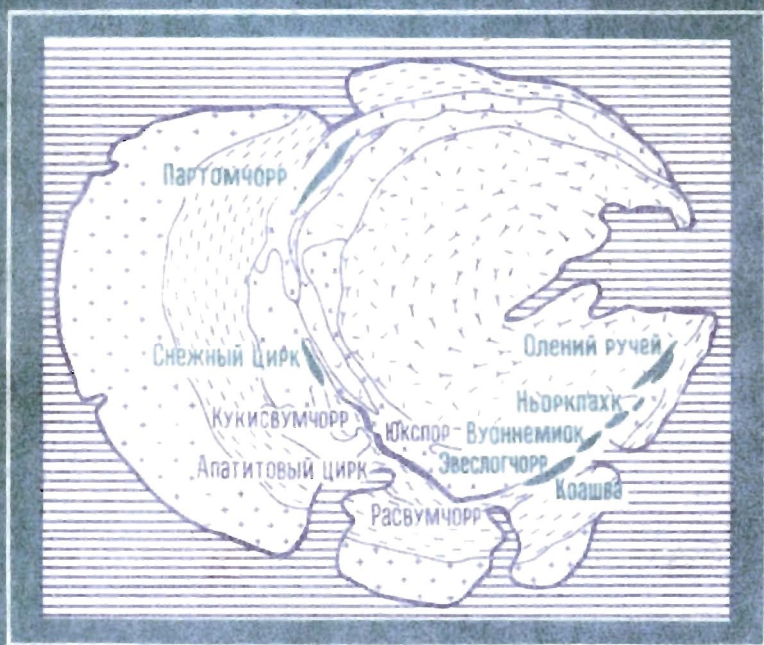


# НОВЫЕ ХИБИНСКИЕ АПАТИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ



ИНСТИТУТ МИНЕРАЛОГИИ, ГЕОХИМИИ- И КРИСТАЛЛОХИМИИ  
РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (ИМГРЭ)  
СЕЗЕРС-ЗАПАДНОЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ  
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ (СЕВЗАПГЕОЛОГИЯ)  
МОСКОВСКИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ С. ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ)

# НОВЫЕ ХИБИНСКИЕ АПАТИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Под редакцией  
Е.А. КАМЕНЕВА, Д.А. МИНЕЕВА



МОСКВА "НЕДРА" 1982

**Новые хибинские апатитовые месторождения** / Под ред. Е.А. Каменева, Д.А. Ми-  
неева (ИМГРЭ, Севзалгеология, МГРИ). М., Недра, 1982. 182 с.

Охарактеризованы теоретические основы поисков и разведки, позволившие в последние годы открыть и разведать в Хибинах два новых апатитоносных рудных поля, включающих пять новых крупных месторождений. Приведено краткое описание Хибинского щелочного массива, продуктивного ийолит-уртитового комплекса и новых месторождений. Изложена методика геологоразведочных работ и комплексной оценки месторождений. Впервые рассмотрены основные черты технологической минералогии и некоторые геохимические аспекты проблемы генезиса уникальных по комплексности апатит-нефелиновых руд.

Для геологов, минералогов, геохимиков и экономистов, занимающихся поисками, разведкой и оценкой апатитовых и других многокомпонентных месторождений комплексного минерального сырья.

Табл. 47, ил. 58, список лит. - 48 назв.

Работа подготовлена А.Ю. Беляковым

*Выпущено по заказу Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ)*

*Посвящается  
столетию со дня рождения  
академика  
Александра Евгеньевича Ферсмана*

### Предисловие

“Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981–1985 годы и на период до 1990 года” предусмотрено усилить поиски и разведку месторождений полезных ископаемых, в том числе и месторождений сырья для производства минеральных удобрений. Проведенные в Хибинах поисковые и разведочные работы, завершившиеся открытием ряда новых апатитовых месторождений и удвоением запасов апатит-нефелиновых руд, всецело отвечают этой задаче. Освоение этих месторождений позволит увеличить производство фосфатных удобрений и будет способствовать выполнению “Продовольственной программы СССР на период до 1990 года”, в соответствии с которой необходимо обеспечить поставку сельскому хозяйству минеральных удобрений в 1985 г. в количестве 26,5 млн. т и в 1990 г. — 30–32 млн. т.

Несмотря на полувековой срок эксплуатации хибинские месторождения сохраняют ведущее положение в фосфатном сырьевом балансе страны, являясь и сегодня важнейшим источником высококачественного фосфатного сырья для производства минеральных удобрений. На базе месторождений действует одно из крупнейших в мире горно-обогатительных предприятий — производственное объединение “Апатит”, обеспечивающее апатитовым концентратом многочисленные заводы в нашей стране и за рубежом.

Развитие геологоразведочных работ, обусловленное растущими потребностями сельского хозяйства страны в минеральных удобрениях и предусмотренное директивами Коммунистической партии и Советского правительства, за короткий срок (1960–1980 гг.) привело к резкому увеличению разведанных запасов трех эксплуатировавшихся ранее месторождений юго-запада Хибин (Кукисвумчорр, Юкспор и Расвумчорр) и к открытию на юго-востоке и северо-западе этого апатитоносного рудного узла новых крупнейших месторождений апатит-нефелиновых руд (Апатитовый цирк, Коашва, Эвеслогчорр, Ньоркпахк, Олений ручей, Партомчорр). Два новых рудных поля Хибин — юго-восточное и северо-западное — составляют новую сырьевую базу для действующего горно-обогатительного предприятия, испытывавшего потребность в дополнительных источниках сырья.

Крупнейшее из новых Коашвинское месторождение уже разрабатывается, два других — Ньоркпахкское и Партомчоррское — подготавливаются к освоению, месторождения Эвеслогчорр и Олений ручей — находятся в стадии детальной разведки.

Почти все новые месторождения не имеют выходов на дневную поверхность и могли быть открыты и разведаны лишь благодаря планомерному

изучению Хибинского щелочного массива, научно обоснованному выбору перспективных районов, использованию новых поисковых критериев, применению рациональной современной методики поисковых и разведочных работ, широкому внедрению в практику новой буровой техники и технологии, а также современных геофизических и геохимических методов разведки месторождений. Опыт научной организации поисковых и разведочных работ в Хибинах, охарактеризованный в книге, будет несомненно полезен всем инженерно-техническим и научным работникам, занимающимся изучением и разведкой крупных рудных районов и рудных узлов.

Одновременно хибинскими геологами совместно со специалистами производственного объединения "Апатит" и ряда научно-исследовательских организаций решены вопросы промышленного освоения бедных апатит-нефелиновых руд, разработана и внедрена в производство технология их добычи и обогащения. Эти работы позволили увеличить мощность производственного объединения "Апатит" и продлить срок его деятельности с 20–25 до 50–60 лет, за что в 1981 г. большому коллективу геологов, технологов и экономистов была присуждена премия Совета Министров СССР. Опыт геолого-экономического и технологического изучения и освоения бедных хибинских руд будет полезен всем, работающим на крупных эксплуатируемых месторождениях любого сырья, так как переход к эксплуатации бедных руд на любом месторождении со временем почти неизбежен.

В 1973–1981 гг. по специально разработанной программе хибинскими геологами и специалистами ИМГРЭ, МГРИ, ГИГХС, Министерства химической промышленности СССР, Кольского филиала АН СССР и других организаций выполнена комплексная оценка апатит-нефелинового сырья ряда выявленных месторождений и начата переоценка эксплуатируемых объектов. Минералого-геохимическими исследованиями и технологическими испытаниями на представительных пробах установлена возможность комплексного обогащения апатит-нефелиновых руд с получением пяти концентратов (apatитового, нефелинового, сфенового, титаномагнетитового и эгиринового) и последующим извлечением из них всех основных и попутных компонентов. Такая комплексная оценка фосфатных руд выполнена вообще впервые, она создала реальные предпосылки для перехода к безотходной технологии переработки сырья, повысила народнохозяйственную ценность месторождений и позволила выдвинуть фтор в разряд важнейших полезных компонентов руд, наряду с фосфором и алюминием, существенно изменив структуру баланса запасов фтора. Опыт всестороннего минералогического, геохимического и технолого-экономического изучения уникальных по комплексности руд, изложенный в книге, будет полезен всем специалистам, работающим над проблемой рационального использования минерального сырья, охраны недр и окружающей среды.

Все эти работы были выполнены благодаря самоотверженному труду коллектива Хибингорской геологоразведочной партии Мурманской геологоразведочной экспедиции производственного объединения "Севзапгеология" (б. Северо-западное территориальное геологическое управление), возглавлявшегося К.Д. Беляевым. Существенную методическую

помощь разведчикам и исследователям хибинских руд и месторождений неизменно оказывали К.Д. Беляев, А.М. Быбочкин, В.М. Борзунов, Г.А. Голованов, А.С. Зверев, А.И. Лисицын, А.С. Соколов, Л.Н. Овчинников, В.В. Проскуряков, Р.Л. Баринский, Б.А. Бахматов, В.З. Блисковский, Н.Н. Бойко, О.Б. Дудкин, Л.Т. Дудникова, Е.И. Зайцев, З.Т. Катаева, Ю.А. Киперман, С.Д. Моисеев, А.П. Пиккат-Ордынская, О.Н. Петунина, И.С. Разина, А.С. Филько, Г.А. Фонтанов, В.А. Горелов, В.И. Лыгач.

Первые хибинские месторождения были открыты более пятидесяти лет тому назад. Новое поколение хибинских геологов с благодарностью учло опыт первооткрывателей и разведчиков первых месторождений А.Е. Ферсмана, А.Н. Лабунцова, В.И. Владавца, М.П. Фивега, Л.Б. Антонова и других.

Выпуск настоящей книги приурочен к столетию со дня рождения Александра Евгеньевича Ферсмана (1883—1945 гг.) зачинателя хибинской эпопеи, выдающегося энтузиаста полного комплексного изучения и рационального освоения хибинских недр, идеи и планы которого реализуются в наши дни.

## ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ХИБИНСКОГО МАССИВА И ИЙОЛИТ-УРТИТОВОГО КОМПЛЕКСА

### ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Среди геологических образований мира едва ли можно назвать иной объект, который более чем Хибины привлекал все возрастающее внимание многих поколений геологов. По определению известного исследователя геологии массива и апатитовых месторождений Н.А. Елисеева [15], хибинский плутон представляет собой не только интереснейшую петрографическую провинцию земного шара, но вместе с тем и богатейшую сокровищницу полезных ископаемых. Пристальное внимание геологов к Хибинам обусловлено рядом обстоятельств: Хибинский массив нефелиновых сиенитов и ийолит-уртитов относится к числу крупнейших щелочных комплексов; он является также, по мнению большинства исследователей, классическим примером сложных (многофазных) интрузий центрального типа; характеризуется большим разнообразием минеральных ассоциаций, объединяющих свыше 200 минералов, в том числе 20 новых минеральных видов; наконец, с массивом связаны уникальные залежи апатитовых руд, не имеющие аналогов в мире ни по масштабам запасов, ни по набору и концентрации полезных компонентов.

Изучению геологии, петрологии, минералогии, геохимии, тектоники, генезиса и полезных ископаемых Хибинского щелочного массива и апатит-нефелиновых месторождений посвящена обширная литература. Обобщающие данные по геологическому строению массива, отражающие различный уровень накопленных знаний, опубликованы в разные годы В. Рамзаем и В. Гакманом, Б.М. Куплетским [27], Н.А. Елисеевым, И.С. Ожинским и Е.Н. Володиным [15], С.И. Заком, Е.А. Каменевым, Ф.В. Минаковым и другими [46], А.В. Галаховым [8]. Подробные сведения по минералогии массива, апатитоносной интрузии ийолит-уртитов и апатитовых месторождений приведены в коллективных монографиях "Минералы Хибинских и Ловозерских тундр" [1937 г.], "Минералогия апатитовых месторождений Хибинских тундр" [1964 г.] и "Минералогия Хибинского массива" [1978 г.], а также в сборниках "Материалы по минералогии Кольского полуострова", выпущенных Кольским филиалом АН СССР в 1958—1974 гг. обстоятельные исследования по петрологии и геохимии фосфора и редких элементов выполнены А.Е. Ферсманом, В.И. Герасимовским, О.Б. Дудкиным, Л.Н. Когарко, Б.Н. Мелентьевым, Д.А. Минеевым, С.М. Кравченко, А.Ю. Беляковым, З.Т. Катаевой, тектоника Хибинского массива, отдельных интрузивных комплексов, месторождений и их внутренняя структура изучались Н.А. Елисеевым, С.И. Заком, М.М. Калинин, Г.М. Вировлянским, Ф.М. Онохиным и Е.А. Каменевым; новые данные о природе газопроявлений, содержаниях и

составе горючих газов в породах массива получены И.А. Петерсилье, В.А. Припачкиным и др.

В последнее время в связи с особой актуальностью сырьевой проблемы широкий размах получили комплексные исследования технологии обогащения апатит-нефелиновых руд и апатитсодержащих пород разного качества с целью изыскания наиболее рациональных способов их разделения на минеральные концентраты (Г.А. Голованов, Л.Д. Ратобильская, В.Н. Лыгач, А.Ш. Гершенкоп и др.), а также исследования технологии их переработки (С.Д. Моисеев и др.). Экономические вопросы эффективного использования фосфатного сырья, планирования и прогнозирования добычи и комплексной переработки рассматриваются в работах Н.Г. Пешева и О.С. Нечаевой.

Вместе с тем, несмотря на широкую освещенность в специальной литературе многих вопросов геологии и металлогении Хибин, некоторые стороны проблемы, непосредственно связанные с геологоразведочной практикой, еще не отражены в печати. Большинство новых апатит-нефелиновых месторождений, открытых в последние годы, в литературе вообще не упоминается. Не менее важны в практическом отношении вопросы, связанные с научным обоснованием геологического прогноза и поисковых критериев, с разработкой методических основ разведки и подготовки для промышленного освоения новых месторождений, а также с созданием принципиально новых методов коренной комплексной переоценки сырьевых баз действующих рудников. Эти вопросы неизменно вызывают интерес геологов, занимающихся практикой поисков и разведки новых апатитовых месторождений в Хибинах.

История геологического изучения Хибин и промышленного освоения апатитовых месторождений отчетливо подразделяется на дореволюционный и советский периоды, несоизмеримые по длительности и конечным результатам.

В дореволюционный период было предпринято несколько кратковременных маршрутов и экспедиций в Хибинские тундры (Н.Б. Широшкин, 1834 г.; А.Ф. Миддендорф, 1840 г.; Н.В. Кудрявцев, 1880 г.; Ш. Рабо, 1884—1885 гг.).

В 1887—1892 гг. изучением Умптека и Луяввурта (Хибинский и Ловозерский массивы) занималась экспедиция финских исследователей — геолога В. Рамзая, минералога В. Гакмана и геодезиста А. Петрелиуса. Итогом их многолетней работы явилось создание первого варианта геологической и геоморфологической карт, подробное и точное петрографическое описание, сохраняющее значение и до наших дней, возрастная классификация пород, полные химические анализы различных нефелиновых сиенитов, среди которых впервые выделены хибичиты и умптекиты. Щелочные массивы Умптека и Луяввурта рассматривались как самостоятельные интрузии (локколиты), возникшие из общего очага, причем на современном срезе Луяввурт опущен по отношению к Умптеку.

Оценивая с современных позиций итоги экспедиции В. Рамзая и других исследователей, завершивших дореволюционный период изучения Хибин, необходимо отметить, что исследования были выполнены весьма квалифи-



цированно, новейшими, по тому времени, петрографическими, минералогическими и петрохимическими методами, что позволило в общих чертах осветить геологическое строение обоих щелочных массивов, обосновать схему последовательности интрузивных комплексов от нефелиновых сиенитов разного состава и ийолитов до мончикитов и тингуантов, сопоставив петрологию и петрохимию нефелиновых сиенитов Хибин и Ловозера с аналогичными породами других районов мира. Однако многолетние экспедиции финских геологов в Хибинь не привели к обнаружению сколько-нибудь заметных скоплений апатита, который отмечался ими лишь как акцессорный минерал нефелиновых сиенитов или второстепенная примесь в ургитах. Именами геологов-первопроходцев впоследствии были названы минералы (рамзаит и гакманит), ущелье — Рамзая, реки — Гакмана и Петрелиуса.

Советский период изучения Хибин начался после Великой Октябрьской социалистической революции: вскоре после освобождения Кольского полуострова от иностранных интервентов.

Академик А.Е. Ферсман в мае 1920 г. по пути в Мурманск, куда он направлялся в составе специальной комиссии Академии наук для обсуждения вопросов, связанных с хозяйственным освоением края, совершил экскурсию со станции Имандра на северо-западные склоны горы Маннепахк. По воспоминаниям А.Е. Ферсмана [42], его впечатления от маршрута оказались неожиданными: "... я прямо терялся при определении этих, еще никогда не виданных мною пород. Для меня сразу же стало ясным, что Хибинь — это целый новый своеобразный мир камня и что углубленное изучение природы Хибин не может не привести к крупным открытиям новых полезных ископаемых". Уже осенью того же года на средства Северной научно-промышленной экспедиции ВСНХ из числа преподавателей и студентов Ленинградского университета и Географического института А.Е. Ферсманом был организован отряд, обследовавший горные массивы Часночорр, Маннепахк и ущелье Рамзая. С тех пор научные экспедиции в Хибинь под руководством А.Е. Ферсмана стали проводиться ежегодно.

Первым знаменательным событием в летописи открытий хибинских апатитов явилось обнаружение в августе 1921 года отрядом А.Е. Ферсмана на южном склоне Кукисвумчорр глыбовой россыпи богатой слоистой апатитовой породы. Через два года, в июле 1923 г. Б.М. Куплетским, Э.М. Бонштедт, А.Н. Лабунцовым и Е.Е. Костылевой у края второго западного цирка Расвумчорра отмечены сплошные выходы апатитовой породы. Позднее, в 1925 г., А.Н. Лабунцов в районе перемычки Расвумчорр-Ловчорр оконтурил коренные выходы апатитовой породы на площади 10 000 м<sup>2</sup>.

Вслед за случайными находками апатита в 1926 г., и особенно в 1927 г., под руководством А.Н. Лабунцова начались его планомерные поиски, которые привели к открытию Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений, где в августе 1927 г. были поставлены заявочные столбы. Об этих открытиях А.Е. Ферсман немедленно сообщил дирекциям Института по изучению Севера и Мурманской железной дороги, которая также финансировала поисковые работы в Хибинах.

С 1928 г. к изучению проблемы промышленного использования апатита подключился Научный институт удобрений (НИУ) с целью проведения поисково-оценочных (В.И. Влодавец) и разведочных (М.П. Фивег) работ. В.И. Влодавец пришел к выводу о необходимости изменить метод работы, применявшийся предыдущими исследователями: перейти от качественного метода, по возможности, к количественному. По результатам бороздового опробования, выполненного в большом объеме (8 сечений по 800 м каждое), он оценил запасы апатит-нефелиновых руд Кукисвумчоррского месторождения в 17 млн. т, а Юкспорского — в 72—100 млн. т.

Решением Ленинградского областного Совета народного хозяйства в марте 1929 г. была создана Апатит-нефелиновая комиссия с целью координации всех исследовательских и строительных работ в Хибинах. На горе Кукисвумчорр в августе 1929 г. была заложена буровая скв. №1, чем было положено начало целенаправленным геологоразведочным работам, продолжающимся до настоящего времени.

Президиум Госплана РСФСР по докладу А.Е. Ферсмана в октябре 1929 г. признал за хибинскими апатитами по их химическим свойствам и величине запасов первостепенное значение как в деле обеспечения Советского Союза фосфатным сырьем, так и в развешивании нашего экспорта.

Результаты разведочных работ довоенного периода изложены в производственных отчетах, ряда статей и обобщены М.П. Фивегом, Л.Б. Антоновым, Н.А. Елисеевым и А.Е. Ферсманом. За десять лет (1930—1940 гг.) геологоразведочной партией НИУ (М.П. Фивег, Л.Б. Антонов, Г.С. Пронченко) было разведано 350 млн. т руды, а общие прогнозные запасы, по оценке Л.Б. Антонова, определены в 2 млрд. т [1].

Если минералогические экспедиции, начатые в 20-е годы А.Е. Ферсманом, привели к открытию в Хибинах уникальных залежей апатита, то в 30-е годы задачи хозяйственного освоения этих богатств придали новый мощный импульс минералого-геохимическим исследованиям, центром которых стала хибинская горная научная станция "Тиетта", преобразованная впоследствии в Кольский филиал АН СССР. В 1931—1934 гг. под редакцией А.Е. Ферсмана выпущено семь сборников "Хибинские апатиты (нефелины, редкие элементы и пирротины)", содержащих более двухсот статей, докладов и сообщений по различным вопросам геологии, петрографии, минералогии, геохимии, полезным ископаемым, технологии и экономике минерального сырья.

В 1930—1937 гг. геологами Ленинградского геологоразведочного треста (сейчас Северо-Западного ТГУ), ЦНИГРИ и ВСЕГЕИ под руководством Н.А. Елисеева (Е.Н. Володин, И.С. Ожинский, Е.Н. Егорова, К.К. Судиславлев, Н.А. Волотавская, В.Н. Нумерова, В.И. Намоюшко и др.) были обобщены материалы разномасштабных геологических съемок, на основе которых составлены сводные геологическая и структурная карты массива [15]. Хибинский массив рассматривался как классический пример многофазных сложных интрузий центрального типа, для которых характерная последовательная смена ранних кольцевых комплексов щелочных сиенитов, хибинитов, рихсчорритов более поздними коническими комплексами трахитоидных хибинитов, ийолит-уртитов и фойяитов в направлении от

периферии к центру массива. Широкое использование структурного анализа в процессе картирования массива позволило обосновать и выдвинуть гипотезу о решающей роли гравитационно-кинетической дифференциации в формировании апатитовых залежей и первичном расщеплении ийолит-уртитов.

Результаты геолого-минералогических и технико-экономических исследований по разведке, добыче и переработке апатит-нефелиновых руд опубликованы в ряде сборников: "Хибинские апатиты", "Материалы по петрографии и минералогии Кольского полуострова" [1930—1937 гг.] и в монографии "Минералы Хибинских и Ловозерских тундр" [35], в которой учтены 111 минералов руд и пород, в том числе 18 новых и 25 весьма редких минеральных видов.

В ранний послевоенный период (1945—1956 гг.) наряду с продолжением разведки выявленных месторождений (П.К. Семенов, Л.Б. Антонов, В.И. Буланый, И.И. Перекрест и др.), широко развиваются петрологические исследования комплексов ийолит-уртитов (М.Д. Дорфман, И.В. Сумин, Т.Н. Иванова), рихсчорритов (А.В. Галахов), нефелиновых сиенитов и пегматитов (К.А. Власов, И.П. Тихоненков, Л.С. Бородин, Ю.С. Слепнев), минералогическое изучение Кукисвумчоррского месторождения (Б.Н. Мелентьев, С.М. Курбатов, Л.Л. Солодовникова и др.). Генезис апатитовых месторождений объяснялся с различных позиций: метасоматическое преобразование ийолит-уртитов фосфатными растворами (С.М. Курбатов), внедрение по коническому разрезу самостоятельной фосфатной магмы (Т.Н. Иванова), отделившейся от исходного расплава в результате ликвидации (Б.Н. Мелентьев).

В 1956—1960 гг. были поставлены задачи по резкому развитию промышленности минеральных удобрений, потребовавшие значительного расширения сырьевой базы апатитовых руд в Хибинах. К тому времени рудная база комбината (ныне производственного объединения) "Апатит" ограничивалась запасами трех месторождений — Кукисвумчоррского, Юкслорского и Расвумчоррского, что не могло обеспечить ускоренного развития фосфатной промышленности.

К середине 50-х годов стала очевидной недостаточная геологическая изученность массива в целом и его глубоких горизонтов в особенности. Противоречивость генетических представлений препятствовала разработке научно обоснованных поисковых критериев, а неудовлетворительная техническая оснащенность геологоразведочных работ сдерживала организацию эффективных поисков новых месторождений апатита.

Наибольший размах геологоразведочные работы в Хибинах получили с 1957 г. в связи с организацией в системе Северо-Западного геологического управления Хибинской поисково-съёмочной партии и Хибиногорской геологоразведочной партии (б. экспедиции Главгеохимразведки). В 1957—1960 гг. коллективом геологов (С.И. Зак, Е.А. Каменев, Ф.В. Миных, Г.П. Колесников, М.М. Калинин и др.) выполнена среднемасштабная геологическая съёмка массива с целью обеспечения производственных и научных организаций современными картами — геологической, структурной, полезных ископаемых и четвертичных отложений. К главным ре-

зультатам этих работ относятся уточнение важной в поисковом отношении возрастной последовательности формирования слагающих массив интрузивных комплексов, выделение трех субфаз продуктивного комплекса ийолит-уртитов, которые по отношению к апатитовому оруденению подразделяются на дорудную, рудную и пострудную, разработка принципиально новых поисковых критериев на апатит.

Ранее считалось, что локализация апатитовых руд как позднемагматических инъекционных образований определяется тектоническими факторами, в связи с чем они должны быть приурочены к верхнему контакту ийолит-уртитов с покрывающими ризкорритами. Это ограничивало сферу поисков узкой зоной контакта и относительно небольшими глубинами. В результате установления генетической связи апатитового оруденения с массивными уртитам рудной субфазы были существенно уточнены закономерности локализации апатитовых залежей в средней части интрузии ийолит-уртитов, внутри толщи массивных уртитов или в их кровле. Установленная закономерность позволила значительно расширить перспективы поисков и вести их целеустремленно, руководствуясь надежным признаком пространственно-генетической связи апатитовых залежей с уртитам.

Реализация новых критериев в процессе детальных поисков (Ф.В. Миных, А.И. Александров, И.И. Перекрест, А.И. Коновалова) и структурно-поискового бурения (1965–1978 гг.) привела к открытию ряда месторождений: Партомчорр (1958 г.), Кошва (1960 г.) и др. Расширены масштабы известных месторождений и выявлены перспективные рудопроявления апатита как вблизи действующих рудников, так и далеко за их пределами. Общая протяженность апатитовых залежей увеличилась с 11 до 50 км.

Исходя из необходимости дальнейшего расширения сырьевой базы в Хибинах, коллективом геологов под руководством К.Д. Беляева и А.С. Михеичева в 1964 г. была разработана программа геологоразведочных работ на апатит в пределах Мурманской области на 1965–1970 гг., в которой определены конкретные задачи по изучению апатитоносности всей продуктивной зоны массива на глубину 1,0–1,2 км, по продолжению разведки известных месторождений и проведению поисков на других щелочно-ультраосновных массивах Кольского полуострова. Реализация составленного на основе программы проекта структурно-поискового бурения обеспечила открытие в Хибинах месторождений Эвеслогчорр (1969 г.), Снежный цирк (1972 г.) и Олений ручей (1975 г.).

Учитывая достижения в области совершенствования техники и технологии добычи и обогащения руд, в целях рационального использования уникальных месторождений Хибин, не имеющих аналогов ни по масштабу и качеству руд, ни по разнообразию полезных компонентов, входящих в их состав, геологи Хибиногорской геологоразведочной партии (ГРП) (Л.Б. Антонов, А.С. Михеичев, И.И. Перекрест) совместно с учеными Кольского филиала АН СССР в 1963 г. выступили с инициативой пересмотра кондиций на апатит-нефелиновое сырье с тем, чтобы без дополнительных капитальных затрат вовлечь в промышленное освоение руды с со-

держанием  $P_2O_5$  ниже 12 %, ранее безвозвратно теряемые при эксплуатации.

Снижение бортового содержания  $P_2O_5$  до 6–8 % обеспечило получение только по эксплуатируемым месторождениям Хибин дополнительный прирост запасов руд по промышленным категориям в количестве 305 млн. т (или 26 млн. т  $P_2O_5$ ), что равнозначно запасам крупного по масштабам месторождения. Экономическое обоснование новых требований к качеству апатит-нефелиновых руд позволило значительно расширить фронт геологоразведочных работ на новых месторождениях, ранее рассматриваемых как резервные.

Одновременно с поисками новых апатитовых залежей, переоценкой известных месторождений проводилась разведка выявленных месторождений. В 1972 г. ГКЗ СССР утвердила крупные запасы апатит-нефелиновых руд Коашвинского месторождения, разведка которого продолжалась с 1960 по 1972 г. (Е.А. Каменев). Открытие, детальное изучение и передача для промышленного освоения этого чрезвычайно сложного в геологическом отношении и весьма перспективного месторождения — крупное достижение коллектива геологов Хибингорской ГРП. Серьезные разногласия исследователей в вопросе о геологической структуре, условиях образования и особенно дискуссия о принципиальной невозможности (Т.Н. Иванова) или, наоборот, правомерности (Е.А. Каменев) увязки рудных тел в пространстве вызвали необходимость углубленного изучения как общих закономерностей, так и частных особенностей генезиса месторождения, поскольку от правильной интерпретации разведочных материалов зависела оценка его промышленной значимости. Это обстоятельство предопределило общность целей исследования и геологической практики. В 1978 г. началась добыча руд на Коашвинском руднике.

Не меньшими трудностями сопровождалась разведка и коренная переоценка Ньоркпахкского месторождения, выявленного в 1932 г. геологом Ленинградского ГРТ (сейчас СЗТГУ) П.И. Прокофьевым. На протяжении 40 лет ошибочно считалось, что на участке Ньоркпахк руды не образуют сплошных залежей, а представляют собой ксенолиты среди цементирующих их трахитоидных ийолитов, в связи с чем разработка их экономически нецелесообразна (Т.Н. Иванова, 1963 г., 1974 г.).

При проектировании предварительной разведки по аналогии с детально изученным месторождением Коашва, которое также считалось непромышленным по тем же причинам (Т.Н. Иванова), была выдвинута и обоснована гипотеза о том, что рудная брекчия локализуется строго закономерно, образуя Верхнюю, Главную и Нижнюю пластовые залежи (Е.А. Каменев). Практическое подтверждение этой гипотезы дало основание приступить непосредственно к детальной разведке, минуя стадию предварительной, что позволило выполнить комплексную геолого-промышленную оценку Ньоркпахкского месторождения в сжатые сроки (1972–1975 гг.) и существенно снизить стоимость геологоразведочных работ. Разведанные и утвержденные ГКЗ СССР запасы руд Ньоркпахкского месторождения более чем в 2 раза превысили ранее прогнозируемые. Это месторождение также передано для промышленного освоения.

В 1970–1973 гг. Д.А. Минеев выполнил систематический анализ распространенности и распределения редких элементов и фтора в фосфатных рудах 72 месторождений самых разнообразных генетических типов и доказал уникальную комплексность Хибинских апатит-нефелиновых руд, требующую всесторонней оценки и первоочередного практического освоения. В 1973 г. К.Д. Беляев, Д.А. Минеев и Е.А. Каменев разработали программу и методику полного комплексного минералого-геохимического и технико-экономического изучения апатит-нефелиновых руд разведываемых и эксплуатируемых месторождений. В 1973 г. под их руководством началась реализация этой программы совместными усилиями сотрудников Хибинской ГРП, ИМГРЭ, МГРИ, Кольского филиала АН СССР и др. В соответствии с намеченной программой систематически исследовались распространенность, баланс и закономерности распределения редких элементов и фтора в рудах всех месторождений.

При разведке Ньоркпахкского месторождения впервые в практике геологоразведочных работ в Хибинах были успешно решены все геологические, технологические и экономические проблемы, связанные с комплексным использованием апатита апатит-нефелиновых руд. При разведке Партомчоррского месторождения был впервые всесторонне оценен и принят на баланс весь комплекс попутных полезных компонентов: 5 минеральных концентратов и 21 попутный элемент.

## РАЗВИТИЕ ЗНАНИЙ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ ХИБИНСКОГО МАССИВА

Схемы последовательности формирования Хибинского массива разрабатывались Б.М. Кушлетским [27], Н.А. Елисеевым, И.С. Ожинским, Е.Н. Володиным [15], Т.Н. Ивановой [17], С.И. Заком, Е.А. Каменевым и Ф.В. Минаковым [46]. В настоящее время известно, что Хибинский массив — крупнейшая многофазная щелочная интрузия центрального типа, приуроченная к тектоническому контакту метаморфизованных образований архея и протерозоя. В ряде пунктов на контактах между интрузивными комплексами сохранились останцы кровли массива, представленные щелочными ромбенпорфирами и сланцами ловозерской серии верхнего девона. Вмещающие породы вблизи контактов подвергались ороговикованию и фенитизации; эндоконтактные изменения выразились в образовании щелочных сиенитов. Внешний контакт, по данным сейсмозондирования, до глубины 6–8 км падает под углом 80–90° к центру, а ниже резко выколаживается.

Внутреннее строение массива определяется зонально-концентрическим расположением разновозрастных интрузивных комплексов, представленных (в порядке внедрения) массивными и трахитоидными хибинитами, рихсчорритами, ийолит-уртитам и тесно связанными с ними апатит-нефелиновыми рудами, лявошорритами и фойяитами. Перечисленные комплексы слагают кольцевые (хибиниты, рихсчорриты, лявошорриты) или конические (трахитоидные хибиниты, ийолит-уртиты, фойяиты) интрузивные тела максимальной видимой мощностью 4–7 км, центры которых пос-

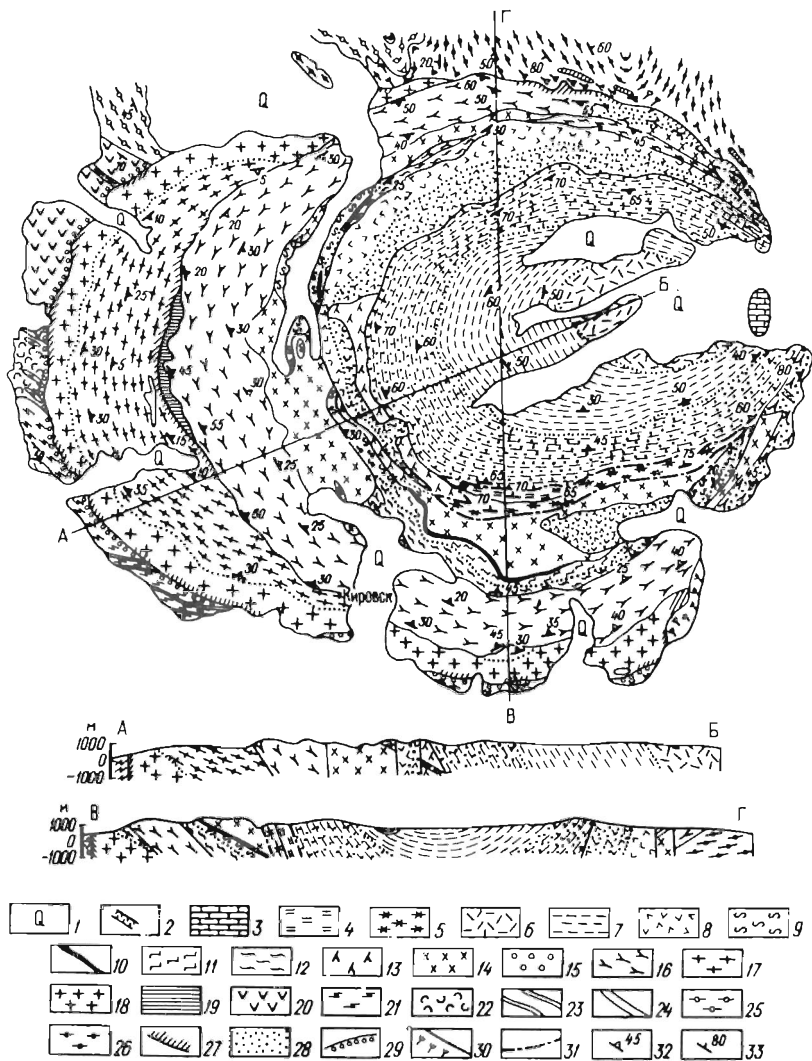


Рис. 1. Геологическая схема Хибинского массива. Составили С.И. Зак, Е.А. Каменев, Ф.В. Минаков с использованием материалов поисковых и разведочных работ 1964–1981 гг.

1 – четвертичные отложения; интрузивные образования палеозоя; 2 – дайки нерасчлененные; 3 – карбонатиты. Хибинский щелочной массив: IV период: 4 – нефелиновые сиениты перекристаллизованные; 5 – рисчорриты гнейсовидные; III период, 6 фаза: 6 – фойяиты эгириновые массивные; 7 – фойяиты эгирин-арфведсонитовые трахитоидные; 5 фаза: 8 – лавочорриты массивные; II период, 4 фаза, 3 субфаза: 9 – ийолиты полевошпатовые трахитоидные; 2 субфаза: 10 – апатит-нефелиновые и сфен-apatитовые руды; 11 – уртиты массивные; 1 субфаза: 12 – ийолиты трахи-

ледовательно смещены с юго-запада на северо-восток [46]. Размеры интрузий в поперечнике уменьшаются от ранних хибинитов до поздних фойяитов (рис. 1).

В петрографическом отношении породы массива, кроме щелочных сиенитов, ийолит-уртитов и апатит-нефелиновых руд, принадлежит к группе нефелиновых сиенитов, близки по минеральному и химическому составу и отличаются лишь по структурно-текстурным особенностям. Некоторые из них получили местные названия: хибиниты, рисчорриты, лявочорриты.

Возраст пород массива, определенный гелиевым, калий-аргоновым и свинцово-урано-ториевыми методами, датируется в  $290 \pm 10$  млн. лет, что соответствует герцинской орогении.

Интрузия хибинитов (1 фаза) прослеживается в периферической части массива в виде серпообразного тела, максимальная ширина ее 6–7 км на западе, северная и южная ветви тела выклиниваются. Вдоль контакта с вмещающими породами развиты щелочные и нефелиновые сиениты, рассматривавшиеся ранее или как породы краевой фации [27], или как породы производных наиболее раннего интрузивного комплекса, предшествующего внедрению хибинитов [8]. Эти же сиениты образуют узкие (20–50 см) оторочки вокруг ксенолитов кровли среди хибинитов, рисчорритов и фойяитов во многих пунктах массива, иногда на удалении 10–15 км от его внешнего контакта. Это приводит к выводу, что ведущая роль принадлежит диффузному обмену между компонентами боковых пород и хибинитов, происходящих от щелочных и нефелиновых сиенитов. Крайняя изменчивость их состава, текстур и структур, наличие неравновесных ассоциаций нефелина и кварца подтверждают сделанный вывод.

В направлении от периферии к центру в хибинитах постепенно увеличивается зернистость, появляется неотчетливая трахитоидность, в соответствии с чем на карте выделяются внешняя полоса массивных хибинитов и внутренняя зона грубозернистых трахитоидных хибинитов.

Трахитоидные хибиниты (2 фаза) образуют разомкнутую к востоку серповидную полосу, длина которой по внешнему обводу достигает 100 км, а наибольшая ширина — 5 км. Трахитоидность хибинитов в плане повторяет очертания интрузии, а в поперечном сечении плавно выполаживается по направлению к всяческому боку.

Наблюдения А.В. Галахова [8] свидетельствуют о несоответствии в разрезе пологого залегания трахитоидности крутому падению внешнего кон-

---

тоидные; 3 фаза: 13 — рисчорриты биотитовые; 14 — рисчорриты эгириновые; I период: 15 — жильная фация хибинитов; 16 — хибиниты трахитоидные; 17 — хибиниты грубозернистые трахитоидные; 18 — хибиниты массивные. Девон, Ловозерская свита: 19 — ромбен-порфиры; средний протерозой: 20 — габбро-диабазы, диабазы; 21 — зеленые сланцы; 22 — туфобрекчии, шаровые лавы; 23 — сланцы глинистые и углисто-глинистые; 24 — сланцы актинолитовые и туфогенные. Архей, архейские интрузии: 25 — диориты роговообманковые гнейсовидные; 26 — гнейсы биотитовые; 27 — щелочные сиениты; 28 — зоны альбитизации, 29 — зоны ороговикования; 30 — зоны фенитизации; 31 — границы зон смятия; 32 — залегание первичной трахитоидности и полосчатости; 33 — залегание гнейсовидности



такта данной интрузии, в связи с чем выдвинуто предположение о возможности обнаружения в глубоких горизонтах Хибинского массива скопленных промышленно ценных минералов.

Рисчорриты — пойкилитовые нефелиновые сиениты (3 фаза) расположены дугообразной полосой, ширина которой 1–4 км с внутренней стороны интрузии грахитоидных хибинитов. А.В. Галахов [8] впервые расчленил данный комплекс на массивные рисчорриты ранней полнокольцевой интрузии и гнейсовидные рисчорриты более поздней неполнокольцевой интрузии. Впоследствии М.М. Калинин [18], С.И. Зак, Е.А. Каменев [16] показали, что гнейсовидные рисчорриты, совместно с перекристаллизованными и катаклазированными нефелиновыми сиенитами, представляют собой тектониты, приуроченные к Эвеслогчоррской (южной) и Реситьонской (северо-восточной) зонам смятия. Наиболее крупная из них зона смятия на Эвеслогчорре протягивается в широтном направлении на 18 км и падает на север (к центру массива) под углом 60–80°. Установлено широкое и повсеместное развитие бластических и катакластических структур, гнейсовидности, зон рассланцевания и милонитизации, присутствие будинированных тел рисчорритов и пегматитов. Среди тектонитов обнаружены реликты слабо измененных исходных рисчорритов и фойяитов. Таким образом, проявление тектонических движений имело место после внедрения фойяитов, завершившего собственно магматическую стадию эволюции массива.

Ййолит-уртитовая интрузия (4 фаза), с которой пространственно и генетически тесно связаны все промышленные апатитовые месторождения и подавляющее большинство рудопроявлений апатита, на современном эрозионном срезе имеет форму почти правильного кольца диаметром 27–28 км. Мощность ее изменяется от 50–500 м в северной до 1500–2000 м в южной и западной частях массива. Перерывы сплошности интрузии фиксируются в районе возвышенностей Валепакх, Лявочорр и на берегу Умбозера. Вмещающими породами являются трахитоидные хибиниты и рисчорриты (внешнее обрамление), расчорриты, лявочорриты и фойяиты (с внутренней стороны).

Комплекс ййолит-уртитов объединяет непрерывную серию разновидностей (уртиты, ййолиты, мельтейгиты, якупирангиты и их полевошпатовые аналоги — ювиты, малиниты и люявриты), отличающихся количественным соотношением главных минералов и структурно-текстурными особенностями (рис. 2). Особую группу составляют апатит-нефелиновые и сфен-apatитовые руды, связанные с ййолит-уртитам рядом промежуточных разновидностей (apatитовые уртиты, сфеновые ййолиты и др.).

Ранее интрузия ййолит-уртитов рассматривалась как классический пример одноактных интрузивных конических тел [35], а особенности ее внутреннего строения целиком объяснялись с позиций гравитационно-кинетической дифференциации. В настоящее время эту гипотезу поддерживает и развивает М.М. Калинин. Проявления разновозрастности отдельных членов ййолит-уртитового комплекса отмечали В.Н. Годовиков, Е.Н. Володин, Н.А. Волотовская, И.В. Сумин и др.

Т.Н. Иванова [17] на основании анализа контактовых взаимоотноше-

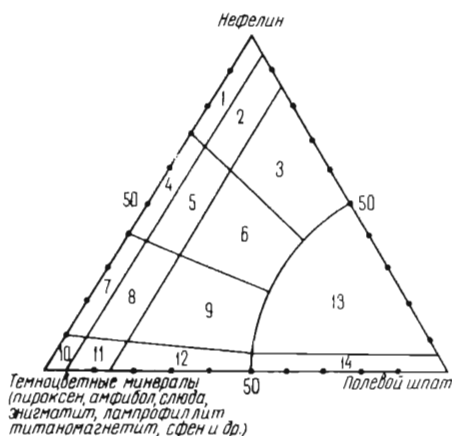


Рис. 2. Диаграмма минерального состава щелочных пород. Составил Н.А. Елисеев, дополнили Е.А. Каменев, Ф.В. Минаков

1 — уртиты; 2 — полевошпатовые уртиты; 3 — ювиты; 4 — ийолиты; 5 — полевошпатовые ийолиты; 6 — малиньиты; 7 — мельтейгиты; 8 — полевошпатовые мельтейгиты; 9 — меланократовые малиньиты; 10 — якупирангиты; 11 — полевошпатовые якупирангиты; 12 — щелочные габброиды; 13 — нефелиновые сиениты; 14 — щелочные сиениты

ний между разновидностями ийолит-уртитов разработала возрастную последовательность формирования пород, предусматривающую пять субфаз внедрения.

Проведенные нами геологические исследования существенно уточнили ранние представления о внутреннем строении и истории становления интрузии ийолит-уртитов (рис. 3). Согласно этой концепции, интрузия ийолит-уртитов сформировалась из трех субфаз, которые по отношению ко времени образования апатит-нефелиновых руд подразделяются на дорудную, рудную и пострудную. Трехкратный процесс становления продуктивной интрузии подчинен механизму образования многофазного Хибинского массива в целом, что выражается в зонально-концентрическом расположении ийолит-уртитов трех выделенных субфаз и в закономерной смене ранних более поздними по направлению от периферии к центру plutона.

*Дорудная субфаза* — трахитоидные уртиты, ювиты, ийолиты (с подчиненными прослоями мельтейгитов) и эндоконтактовые малиньиты — слагают внешнюю часть (лежащий блок) интрузии почти на всем ее протяжении. Видимая мощность их изменяется от 50–200 м в северной части интрузии до 500–700 м на юге и западе. На северном отроге Поачвумчорра породы дорудной субфазы образуют локальную концентрически-зональную структуру, характеризующуюся двукратным послойным чередованием трахитоидных ийолитов и ювитов вокруг центрального (ювитового) ядра (рис.

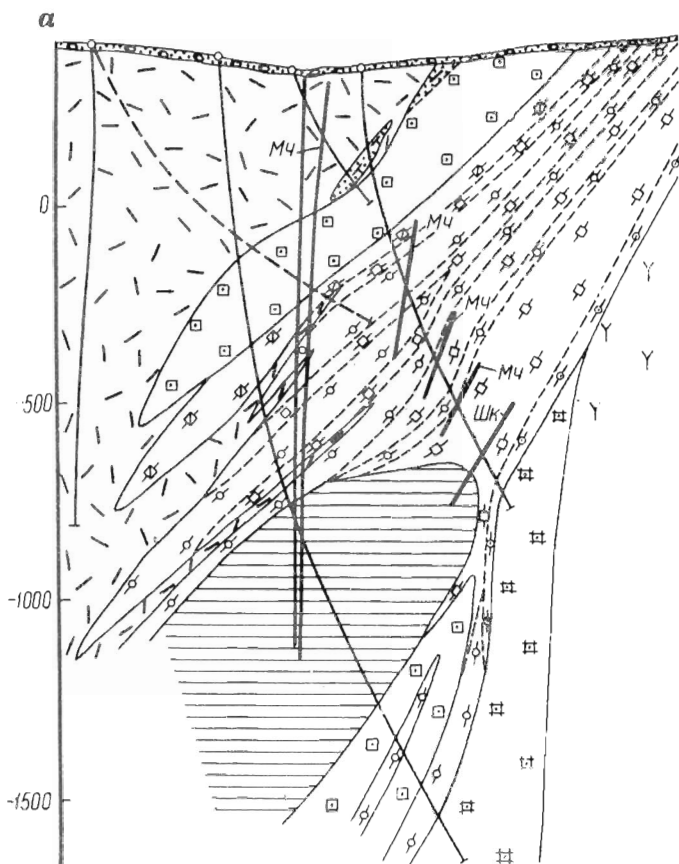


Рис. 3. Геологические разрезы через интрузии ийолит-уртитов: *а* — северная часть интрузии, *б* — северо-западная часть, *в* — юго-западная часть, *г* — южная часть, *д* — юго-восточная часть, *е* — район горы Повчумчорр

1 — четвертичные отложения; 2 — породы дайкового комплекса; Мч — мончикит, Тг — тингуаит, Шк — шонкимит. 3 — дайки; 4 — фойяиты; 5 — лавочорриты; 6 — руда; 7 — руда: *а* — сфен-апатитовая, *б* — сфенит (50% сфена); 8 — апатитовая сплошная; апатит-нефелиновая: 9 — пятнистая, 10 — пятнисто-полосчатая, 11 — полосчатая, 12 — линзовидно-полосчатая, 13 — блоковая, 14 — сетчатая, 15 — массивная; 16 — уртит апатитовый; 17 — ийолит апатитовый; 18 — брекчия апатит-нефелиновых руд; 19 — уртит массивный; 20 — уртит неравномернозернистый массивный; 21 — уртит пегматоидный; 22 — уртит массивный с линзами и полосами ийолита (линзовидно-полосчатый); 23 — уртит массивный, нечетко трахитоидный; 24 — ювит массивный; 25 — трахитоидный: *а* — уртит, *б* — ювит; 26 — малинит: *а* — массивный, *б* — трахитоидный; 27 — ийолит: *а* — массивный, *б* — трахитоидный; 28 — ийолит тонкозернистый: *а* — трахитоидный, *б* — линзовидно-полосчатый; 29 — мельтейгит: *а* — массивный, *б* — трахитоидный; 30 — якупирангит трахитоидный; 31 — луаврит: *а* — трахитоидный; *б* — массивный; 32 — 'рксоррит массивный (*а*); ювит комплекса рискордитов *б*); 33 — хибинит трахитоидный; 34 — роговик; 35 — щелочной сиенит; 36 — нефелиновый сиенит; 37 — полевошпатовый шпат (точка ставится внутри знака породы);

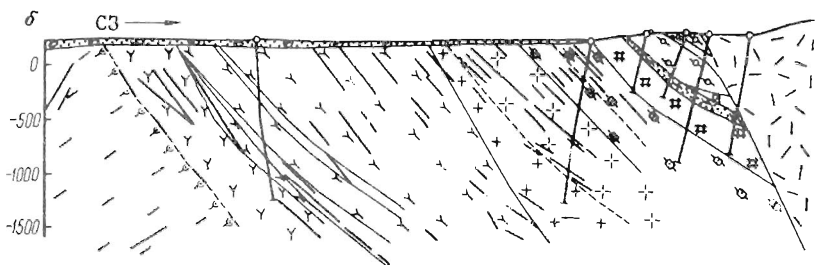


Рис. 3 (Продолжение рис.)

38 – сфен; 39 – титаномагнетит; 40 – слюда; 41 – наложенные процессы: а – шпрещейнизация, б – перекристаллизация; 42 – калищатовый метасоматоз; гидро-термальные жилы: 43 – эгириновые, 44 – цеолитовые; 45 – пегматиты: а – жильный (нерасчлененный), б – фациальный (расчлененный); 46 – зона фенитизации; 47 – катаклиз и милонигизация

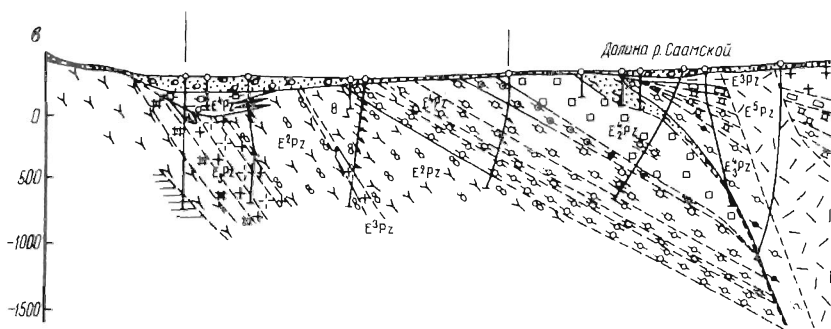


Рис. 3 (Продолжение рис.) .

4). Данная структура имеет сложную воронкообразную форму, ось которой погружается на восток под углом  $55^\circ$ . Специфичность морфологии структуры, по-видимому, обусловлена приуроченностью ее к узлу пересечения конического и радиального разломов, сопровождающих формирование центральных интрузий, особенности внутреннего строения регулируются условиями ритмической кристаллизации в магматической камере.

Ййолиты и уртиты представляют собой темные зеленовато-серые мелко- или среднезернистые породы, в основном состоящие из нефелина и эгирина, содержание которых изменяется от 30 до 70 %, второстепенных сфена, титаномагнетита, апатита и полевого шпата. Реже встречаются лампрофиллит, энigmatит, эвдиалит, ринколит и пектолит. Структура ййолитов и уртитов гипидиоморфнозернистая, порфиоровидная, частично пойкилитовая.

Кристаллы нефелина имеют форму изометричную полигональную, размером от долей миллиметра до 0,5–0,8 см (обычно 0,1–0,3 см), как правило, загрязнены микролитами эгирина. Эгирин-авгит представлен

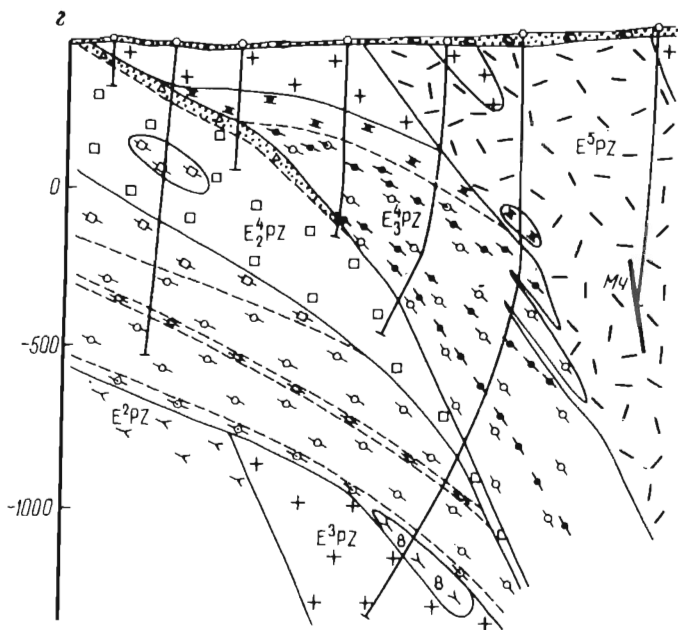


Рис. 3 (Продолжение рис.).

призматическими кристаллами длиной от 0,3–0,5 до 1,0–1,5 см. Сфен образует призматические кристаллы длиной от долей миллиметра до 1,5–2 см, дающие ромбовидные поперечные разрезы. Нередко он содержит пойкилитовые включения нефелина и апатита.

Содержание полевого шпата в этих породах не превышает 10 %, лишь в отдельных локальных участках поднимается до 40 %. Эти существенно полевошпатовые разновидности, по составу отвечающие малиньитам, сосредоточены в лежачем боку южной и западной части интрузии, в зоне шириной 10–100 м (см. рис. 3). Устанавливается связь между степенью идиоморфизма полевого шпата и его содержанием в породе. Так, если в ийолитах и ургитах полевой шпат обычно ксеноморфен и переполнен пойкилитовыми включениями нефелина и эгирина, то в приконтактовых малиньитах образует правильные прямоугольные кристаллы с небольшим количеством пойкилитовых вростков. Эти кристаллы, достигающие 1,5–2 см в длину, резко выделяются на фоне мелкозернистой эгирин-нефелиновой основной массы, придавая породе порфиристый облик. Согласно Л.Л. Солодовниковой, полевой шпат по кристаллооптическим свойствам представляет собой переходную разновидность от ортоклаза к микроклину.

Мельтейгиты имеют зеленовато-черную окраску и преимущественно мелкозернистое сложение. Они состоят из эгирин-авгита (70–90 %). В повышенных количествах присутствуют титаномагнетит, сфен, апатит (до 10–12 %) и лепидомелан. Отличительная черта породы – резкий

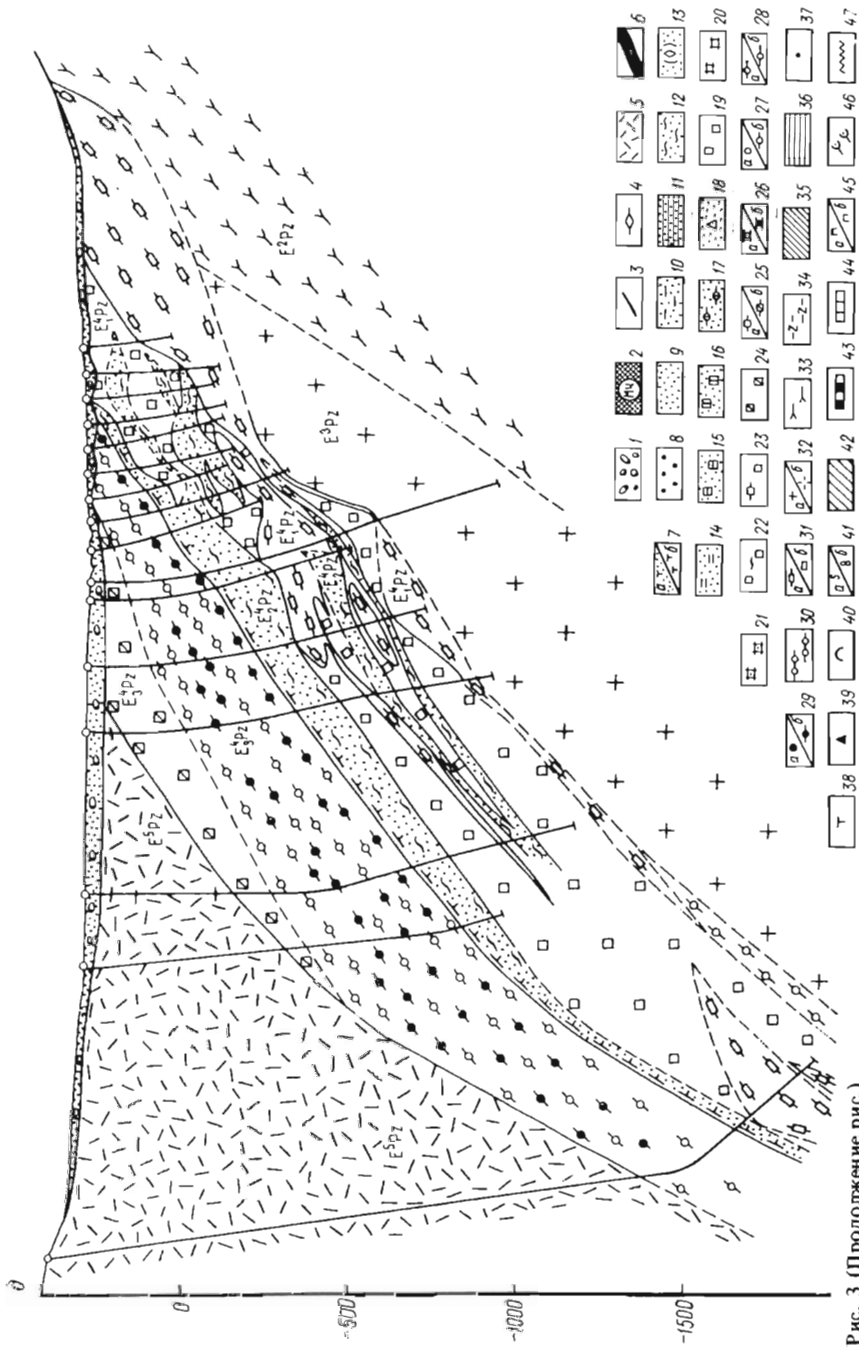


Рис. 3 (Продолжение рис.).

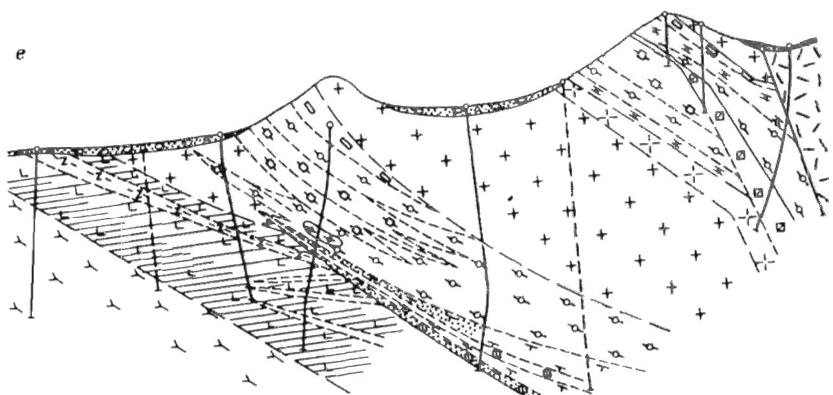


Рис. 3 (Продолжение рис.).

ксеноморфизм нефелина и апатита по отношению к эгирин-авгиту с четко выраженным призматическим габитусом. Структура мельтейгитов гипидиоморфнозернистая, текстура трахитоидная (линейно-параллельная), реже массивная.

Ювиты представляют собой светлую среднезернистую породу, состоящую из нефелина (50–60%), полевого шпата (25–30%), эгирин-авгита (15–20%). Идиоморфные кристаллы нефелина достигают 0,4–0,5 см. Призматические кристаллы эгирин-авгита длиной 0,5–2 см и толщиной 0,2–0,5 см часто имеют скелетную форму, обусловленную обилием пойкилитовых включений нефелина. Зерна полевого шпата размером от 0,5x1 до 1x3 см характеризуются овальной формой, зубчатыми контурами, большим количеством мелких включений нефелина. Акцессорные минералы представлены сфеном, энigmatитом, пектолитом, апатитом, титаномагнетитом. Структура ювитов гипидиоморфнозернистая и пойкилитовая, текстура трахитоидная.

Вторичные изменения в породах первой субфазы развиты слабо и проявляются локально, преимущественно у контактов. Они выражены главным образом в замещении эгирин-авгита красно-бурым щелочным амфиболом типа катафорита и лепидомеланом, а также в натролизации и шпрейтейнизации нефелина.

Характерная особенность этих пород — прекрасно выраженные первичномагматические текстуры течения, обусловленные послойной концентрацией призматических кристаллов пироксена и их линейно-параллельной ориентировкой.

В разрезе первой субфазы четко выделяются два мощных слоя первого порядка: нижний, сложенный ийолитами, и верхний — уртитами. Каждый из слоев первого порядка разделяется на слои второго и третьего порядков, мощность которых соответственно составляет единицы и доли метров. Переходы между слоями первого порядка осуществляются посредством многократного чередования уртитовых и ийолитовых слоев второго и третьего порядков и постепенного увеличения мощности и числа лей-

кократовых слоев вверх по разрезу. Особенностью слоев третьего порядка является сочетание постепенных переходов между ними, с одной стороны, и резких контактов — с другой. Это обусловлено тем, что каждый уртитовый слой при постепенном накоплении эгирина книзу переходит в ийолитовый, который имеет резкую границу со следующим ниже уртитовым слоем. Такое асимметричное изменение содержания эгирина с концентрацией его в лежачем боку каждого слоя свидетельствует о проявлении гравитационного эффекта. Типичный разрез через зону подобного переслаивания описан в районе перемычки между горами Расвумчорр и Коашва, где в интервале 1–2 м многократно чередуются асимметричные ийолитовые и уртитовые слои. Мощность ийолитовых слоев на этом интервале постепенно уменьшается вверх от 3 м до 2 см, в то время как мощность уртитовых слоев остается выдержанной в пределах 0,8–1 м.

Трахитоидные ювиты развиты на западе в долине р. Куниок и на северном конце хр. Поачвумчорр, где они совместно с трахитоидными ийолитами слагают округлое в плане концентрически-зональное тело (см. рис. 6). Концентрические слои ювитов и ийолитов в одних случаях разделены четкими контактами, с которыми всегда конформна трахитоидность обеих пород; в ийолитах вблизи контакта иногда содержатся линзообразные тела ювита длиной до 2 м, всегда параллельные плоскости контакта. В других случаях ювиты и ийолиты связаны постепенными переходами.

Порфиرويدные малиньиты слагают узкую эндоконтактовую зону в лежачем боку южной и западной частей интрузии. Кроме того, они образуют серию жилообразных тел среди рихсчорритов хр. Поачвумчорр, а также участвуют в полосчатых ассоциациях с трахитоидными ийолитами и ювитами, образуя краевую фацию последних.

Рудная субфаза представлена массивными урритами и апатит-нефелиновыми рудами, слагающими среднюю часть разреза интрузии. Эти породы прослеживаются в ее южной части, северо-западном и северо-восточном секторах, но отсутствуют в западной части. Видимая мощность их изменя-

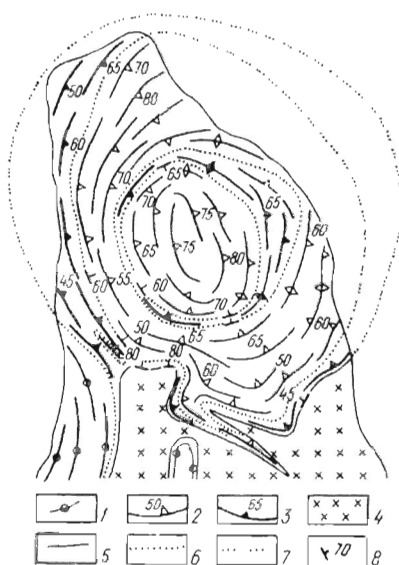


Рис. 4. Геологическая схема кольцевой структуры ийолит-ювитов горы Поачвумчорр

1 — малиньиты; 2 — ювиты; 3 — ийолиты; 4 — рихсчорриты; 5 — контакты пород; 6 — границы между петрографическими фациями; 7 — предполагаемые контуры распространения пород; 8 — залегание контактов



ется от нескольких десятков метров (северо-восточный сектор) до 200–700 м и более (южная ветвь).

Апатит-нефелиновые руды образуют или мощные (100–200 м) пластовые тела висячем боку уртитов (Кукисвумчорр-Юкспор-Расвумчоррское рудное поле), или серию маломощных (5–15 м) параллельных прослоев, также тяготеющих к кровле (Партомчорр-Лявюкская рудная зона), или ряд субпараллельных рудных горизонтов среди уртитов (Коашвинское месторождение) или слагают ксенолиты в ийолит-уртитях порудной субфазы (Ньоркпахк-Суолуайвское месторождение).

Массивные уртиты представляют собой светлые серо-зеленые средние или крупнозернистые, нередко пегматоидные породы, состоящие из 75–90 % нефелина и 10–20 % эгирина. В качестве второстепенных минералов постоянно присутствуют полевой шпат, сфен, титаномагнетит, лампрофиллит, апатит, пектолит, энigmatит. Характерная особенность уртитов – резко выраженное ксеноморфное развитие эгирина и сфена относительно нефелина. Кристаллы нефелина с четкими квадратными сечениями размером 0,5–1 см в средне- и крупнозернистых разновидностях и 2–5 см в пегматоидных. Эгирин представлен неправильными мезостатически развитыми зернами размером 1–2 см. Часто встречаются скелетные монокристаллы его размером от 2х3 до 4х6 см, переполненные включениями нефелина.

Аналогичными формами развития обладает сфен, зерна которого, достигающие в поперечнике 1–3 см, часто имеют полисинтетическое двойниковое строение. В качестве пойкилитовых включений в нем присутствуют нефелин и апатит. Ромбовидные кристаллы сфена иногда образуют вроски в зернах полевого шпата.

В массивных урлитах постоянно присутствует ортоклаз, содержание которого колеблется от 5 до 15 %. На отдельных участках (горы Сев. Суолуайв, Коашва, южный отрог горы Кукисвумчорр, долина р. Куниок) количество полевого шпата увеличивается до 25–50 %, обуславливая появление ювитов, связанных с окружающими урлитами постепенными переходами. Крупные неправильные зерна ортоклаза, обычно имеющие слабо выраженное пертитовое строение, содержат идиоморфные вроски нефелина, эгирина, сфена, апатита, титаномагнетита и лампрофиллита. Нередко наблюдается коррозия нефелина калиевым полевым шпатом.

Апатитовые уртиты, содержащие до 20 % апатита, представляют собой переходную разновидность к апатит-нефелиновым рудам. Мелкозернистый агрегат апатита заполняет в урлитах промежутки между идиоморфными кристаллами нефелина.

Структура уртитов и ювитов гипидиоморфнозернистая, панидиоморфная, криптовая и пойкилитовая. Вторичные изменения в урлитах и ювитах не развиты и связаны в основном с зонами контактов, где они выражаются в натролитизации и канкринитизации нефелина и полевого шпата.

Апатит-нефелиновые породы состоят преимущественно из апатита, нефелина, эгирин-авгита и второстепенных сфена и титаномагнетита. По текстурным признакам они разделяются на сетчатую, линзовидно-полосчатую, полосчатую, пятнистую, пятнисто-полосчатую, крупно- и мелкообловую разновидности.

Сетчатая порода (20–30 % апатита) содержит большое количество линз мелкозернистого ийолита, разделенных сетью тонких (1–5 мм) прослоев мелкозернистого апатита. Размеры ийолитовых линз изменяются от 0,5 до 5 см по ширине и от 1–2 до 10–15 см и более по длине. В линзовидно-полосчатой руде (30–50 % апатита) линзы ийолита менее многочисленны и разделяющие их прослой апатита более мощные (0,5–5 см).

Полосчатая порода (40–60 % апатита) состоит из чередующихся в полосчатых ассоциациях тонких (до 1 см) слоев, в разной степени обогащенный апатитом и нефелином. Пятнистая порода (50–90 % апатита) представляет собой мелкозернистый апатитовый агрегат, в светлую массу которого вкраплены редкие крупные (до 3–5 см) зерна или группы зерен нефелина, эгирин-авгита или сфена, придающие породе пятнистый облик. В тех случаях, когда эти пятна группируются в прерывистые полосы, порода приобретает пятнисто-полосчатый облик.

В крупноблоковой породе (30–40 % апатита) присутствуют короткопризматические кристаллы (блоки) нефелина размером 5–10 см, включенные в линзовидно-полосчатую апатит-нефелиновую массу, слои которой обтекают эти кристаллы. Мелкоблоковая порода представляет собой мелкозернистый агрегат апатита (30–50 %), в который включены густо расположенные кристаллы нефелина размером 5–15 мм.

Кроме того, часто встречается сплошная апатитовая порода, представляющая мономинеральный агрегат крупнозернистого зеленого или дымчатого апатита II генерации, который образует в других породах или во вмещающих уртигах сплошные прослой мощностью до нескольких метров и гнезда размером до 0,5 м.

*Пострудные субфазы* – трахитоидные малиниты, луявриты, уртиты, ийолиты, мельтейгиты и массивные ювиты – залегают в всячем боку интрузии. Они развиты преимущественно в южной и западной частях интрузии, прослеживаясь от Коашкара до Лявочорра в виде дугообразной полосы, видимая мощность которой изменяется как в продольном, так и в поперечном разрезах. В районе Коашвы, Кукисвумчорра и Лявочорра она составляет 300–600 м; в пределах юго-западного рудного поля установлено резкое увеличение мощности пострудных пород с глубиной от 10–50 м на поверхности до 500–700 м на абс. отметках ниже  $\pm 0$  м; на возвышенностях Ньоркпахк и Суолуайв трахитоидные ийолиты обладают максимальной мощностью (до 1500 м), занимая всю площадь развития интрузии.

Уртиты и ийолиты по составу и текстуре аналогичны соответствующим породам первой субфазы.

Мельтейгиты. На 70–90 % состоят из цветных металлов, среди которых преобладает эгирин-авгит. Характерная особенность их – повышенное содержание сфена, титаномагнетита, апатита, вторичного лепидомелана и ксеноформизма нефелина и апатита по отношению к эгирин-авгиту. Структура породы гипидиоморфнозернистая, текстура трахитоидная.

Малиниты. Характеризуются зеленовато-серой окраской и неравномернозернистым сложением. Содержание нефелина колеблется в них от 30 до 60 %, полевого шпата – от 15 до 30 % и эгирин – от 20 до 50 %.

Постоянно в изменяющемся количестве присутствует щелочной амфибол. Структура породы порфиroidная, пойкилитовая и гипидиоморфнозернистая. Размер изометричных зерен нефелина колеблется от долей миллиметра до 0,1–0,2 см в основной массе и до 3–4 мм в порфиroidных вкраплениях. Эгирин развит в виде игольчатых кристаллов длиной от 3 до 15 мм; щелочной амфибол (катафорит, рибекит) образует широкие призматические кристаллы размером от 1x2 до 2x4 см, содержащие пойкилитовые включения нефелина и сфена. Полевой шпат (ортоклаз) присутствует в виде прямоугольных кристаллов размером от 1x2 до 5x8 см, переполненных мелкими зернами нефелина и игольчатого эгирина.

Луавриты обладают четкой лейстовой формой кристаллов полевого шпата и идеально выраженной план-параллельной текстурой. Структура их гипидиоморфнозернистая. Содержание полевого шпата составляет 35–40 %.

Отличительная черта малиньитов и луавритов третьей субфазы – повышенное содержание второстепенных минералов: сфена, лампрофиллита, астрофиллита, эвдиалита, энigmatита, ринколита, пектолита, титаномагнетита и апатита. В малиньитах постоянно присутствует лампрофиллит, образующий ксеноморфные пластинки с пойкилитовыми включениями нефелина. Для луавритов типичен эвдиалит, развитый в виде овальных мелких зерен с зональной или пятнистой интерференционной окраской.

Вторичные изменения в породах третьей субфазы развиты шире и проявлены интенсивнее, чем в породах первой субфазы. В основном они выражаются в замещении эгирин-авгита бурым щелочным амфиболом и лепидомеланом, а также в содалитизации, натролитизации, канкринитизации и шпреуштейнизации нефелина.

Внутреннее строение ийолит-уртитов дорудной и пострудной субфаз обусловлено процессами гравитационно-кинетической дифференциации, что проявляется в широком развитии трахитоидно-полосчатых текстур, обилии петрографических разновидностей и в приуроченности плотных ийолитов и мельтейгитов к нижним частям разреза, а более легких – ювитов, уртитов и луавритов – к верхним. В целом интрузия обладает сложной конической формой, которая определяется крутым (60–80°) падением внешнего контакта и пологим (0–30°) наклоном внутренней поверхности к центру массива.

Лявочорритовая интрузия (5 фаза) прослеживается в виде полукольца длиной 45 км и наибольшей шириной 3,5 км в северной и западной частях массива (от возвышенности Рестињон до перевала Юкспорлак). Кроме того, лявочорриты известны на отроге горы Коашва и в долине р. Вуоннемиок, где они слагают изолированное (в плане) тело, выклинивающееся на флангах.

Термин "лявочоррит" предложен Е.А. Каменевым для обозначения породы, ранее называвшихся "массивными среднезернистыми эгириновыми нефелиновыми сиенитами" [8]. Прежнее название лявочорритов не соответствует особенностям их состава и сложения, поскольку: 1) среди них наряду с массивными разновидностями встречаются и четко расслоенные породы; 2) по крупности зерна различаются мелко-, средне-, крупнозер-

нистые и пегматоидные фации сиенитов; 3) цветной минерал представлен не только эгирином, но также щелочным амфиболом и энигматитом, значение которых в составе породы велико; 4) нефелиновыми сиенитами являются все интрузивные породы массива, за исключением щелочных сиенитов и ийолит-уртитов.

Н.А. Елисеев, основываясь на сходстве минерального состава лявочорритов и фойяитов, их пространственной сопряженности и наличии между ними постепенных переходов, считал лявочорриты краевой фацией фойяитов. Нами лявочорриты выделены в отдельный интрузивный комплекс, поскольку: 1) в районе Кукисвумчорра и в долине р. Вуоннемиок лявочорриты не имеют пространственной связи с фойяитами; 2) на протяжении 36 км от Рисчорра до Коашкара фойяиты непосредственно граничат с рисчорритами и хибинитами без краевой зоны; 3) взаимоотношения лявочорритов с фойяитами не ограничиваются постепенными переходами. Интрузивные контакты между ними свидетельствуют о более позднем формировании фойяитов. Наличие взаимопереходов объясняется близостью их составов, обусловленной принадлежностью этих пород к одному периоду становления массива, а также наложенными процессами постмагматической альбитизации; 4) лявочорриты весьма значительно распространены по площади, что противоречит представлению о принадлежности их к краевой фации.

Как установлено при глубоком структурном бурении, внешний контакт интрузии лявочорритов с более древними рисчорритами и ийолит-уртитами в западной, юго-западной и южной частях падает к центру массива под крутыми углами ( $70-80^\circ$ ) и лишь в районе Коашвы до абс. отметки  $\pm 0$  м залегает умеренно наклонно ( $35-40^\circ$ ), а ниже вновь становится крутым. Эти данные позволяют отнести интрузию лявочорритов к кольцевому типу.

Трахитоидными фойяитами (6 фаза) образовано центральное ядро массива, размером  $19 \times 26$  км. Фойяиты расчленены на три зоны: периферическую (роговообманковые фойяиты), промежуточную (эгирин-роговообманковые фойяиты) и внутреннюю (эгириновые фойяиты).

Образование интрузивных комплексов Хибинского массива подразделяется на три периода, в каждый из которых включены породы, близкие по составу и генезису, но отличающиеся по текстурным признакам и принадлежности к кольцевым или коническим магматическим телам.

В I период сформировались хибиниты (1 фаза) и трахитоидные хибиниты (2 фаза); во II — были образованы рисчорриты (3 фаза) и ийолит-уртиты (4 фаза); в III — возникли лявочорриты (5 фаза) и фойяиты (6 фаза). Состав массивных и трахитоидных хибинитов первого периода практически идентичен. Рисчорриты и ийолит-уртиты, включенные во II период, взаимосвязаны промежуточными по составу и структурным особенностям разновидностями (малиньитами и ювитами). Относимые к III периоду лявочорриты и фойяиты настолько близки по составу, что многими исследователями рассматривались как производные одного акта внедрения. Интрузивные тела, сгруппированные в периоды, тесно и вполне определенно пространственно взаимосвязаны: каждый поздний член любого

периода располагается с внутренней стороны предыдущего и лишь ийолит-уртиты размещаются внутри рисчорритов.

Необходимо обратить внимание на весьма важную закономерность, общую для всех периодов: в каждом из них попарно сочетаются ранняя кольцевая (нерасслоенная) и поздняя коническая (расслоенная) интрузии. Подразделение процесса формирования интрузивных комплексов на периоды позволяет не только подчеркнуть их внутренние связи, возрастную близость и особенности пространственного размещения, но и отразить основные закономерности становления массива, заключающиеся в ритмичной смене кольцевых и конических интрузий.

А.В. Галахов [8] на основании исследования эволюции естественных рядов магматических горных пород Хибинского массива пришел к аналогичному выводу. Он наметил три этапа интрузивной деятельности (соответствующие выделенным нами периодам), в ходе которых возникли краевые нефелиновые сиениты, массивные и трахитоидные хибиниты (I этап), рисчорриты, ийолит-уртиты и апатит-нефелиновые руды (II этап), льявочорриты и фойяиты (III этап).

Наряду с автометаморфическими явлениями, сопровождавшими развитие каждого интрузивного комплекса, интенсивная постмагматическая деятельность проявилась на заключительных стадиях формирования массива. Комплекс метасоматических изменений IV периода, отличающихся от автометаморфических процессов как по масштабам развития, так и по характеру минеральных ассоциаций, привел к альбитизации трахитоидных хибинитов, льявочорритов, фойяитов и тектонитов из зон смятия, а также к образованию эгирин-альбитовых жил.

Широкое проявление постмагматической альбитизации впервые было отмечено И.П. Тихоненковым [41].

Концентрическая зона альбитизированных нефелиновых сиенитов шириной до 5 км прослеживается от Рестиньюна до Коашкара на расстоянии 70 км (см. рис. 1). Интенсивность развития альбита (до 70 % от количества полевых шпатов) достигает максимума на контакте фойяитов с льявочорритами, затухая по мере удаления от него. Эгирин-альбитовые жилы залегают как в пределах массива, где они секут сиениты всех интрузивных комплексов и тектониты, так и во вмещающих породах на удалении до 1 км от контакта. Концентрация их приурочена к зонам смятия. Длина жил достигает 500 м, а мощность изменяется от 0,1 до 20 м. О метасоматической природе данных образований свидетельствуют отсутствие инъекционных контактов с зонами закалки, крайняя неустойчивость минерального состава и зернистости, прихотливая форма с резкой сменой раздувов (10–20 м) и пережимов (менее 1 м), наличие останцов незалеженных пород, сохранивших первоначальное залегание, расположение кристаллов поперек внешних ограничений жил.

Возрастное положение натрового метасоматоза определяется, с одной стороны, наложением альбитизации на хибиниты, льявочорриты и фойяиты, с другой — пересечением измененных пород эгирин-альбитовыми жилами, а последних — дайками лампрофиров.

Комплекс карбонатитов выявлен в восточной части массива, закры-

той четвертичными отложениями, в районе залива Тульилухт (оз. Умба) в процессе структурно-поискового бурения, проводимого Хибиногорской ГРП с 1969 г.

Геофизические работы до начала бурения ограничивались комплексной гравиметрической и магнитной съемками (Г.Н. Шаблинский, 1969 г.), в ходе которых в районе залива Тульилухт редкими точками наблюдений была зафиксирована локальная положительная гравимагнитная аномалия.

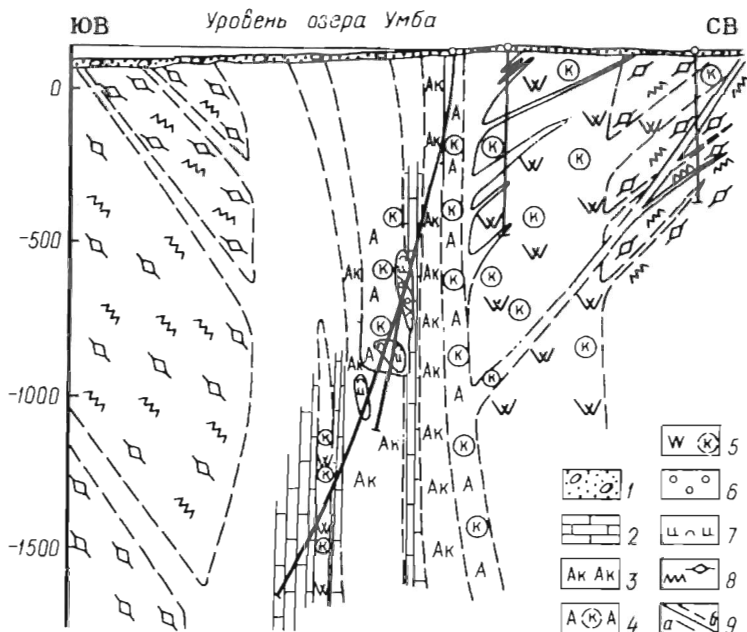
Структурно-поисковая скв. 609 глубиной 1115 м, пройденная в 1969 г. севернее этой аномалии с целью поисков продуктивных ийолит-уртитов и изучения газоносности массива, вскрыла измененные фойяиты с многочисленными жилами редкометалльных карбонатов и слюдяных мончикитов, на основании чего были даны рекомендации на поиски в этом районе редких элементов, апатита и других полезных ископаемых, связанных с карбонатитами (Ф.В. Минаков, О.Б. Дудкин, 1974 г.). В 1978 г. по заявке Хибиногорской ГРП на полуострове и в заливе Центральной Кольской комплексной геофизической экспедицией (ЦККГЭ) выполнена детальная магнито- и гравиразведка для уточнения которой установлено, что аномалия захватывает только южную часть полуострова, а ее максимум расположен в заливе Тульилухт.

В 1979 г. по проекту поисков скрытых залежей апатита в Хибинах на 1977–1981 гг. на участке Тулиок пройдены скважины для выяснения масштабов развития карбонатитов и выяснения природы гравимагнитной аномалии. В направлении от вмещающих фойяитов к центру аномалии (с севера на юг) скважины вскрыли следующий разрез: брекчированные измененные фойяиты с жилами карбонатов, щелочные порфиры (тигуаиты, трахиты) с многочисленными жилами карбонатитов мощностью до 10–20 м; редкометалльные карбонатиты, чередующиеся с альбит-кальцитовыми и биотит-кальцитовыми породами и содержащие реликты измененных (биотитизированных) пироксенитов. Мощность и количество карбонатитовых жил, степень карбонатизации вмещающих пород возрастают по направлению к гравитационной аномалии, в пределах которой собственно карбонатиты слагают интервалы мощностью в десятки и первые сотни метров.

Из этого следовало, что аномалия фиксирует положение карбонатитового "центра", который по геофизическим данным (В.Г. Анзель, 1978 г.) имеет форму вертикального столба (штока), уходящего на глубину более 1500 м.

С целью установления размеров карбонатитового штока, выявления возможной вертикальной зональности и поисков концентраций редких элементов в 1980–1981 гг. в контуре аномалии пробурена опорная наклонно-направленная скв. 632 глубиной 1977 м, проследившая карбонатиты до абсолютной отметки минус 1600 м и на 750 м в плане (рис. 5). В целом карбонатиты в направлении с юга на север распространены в зоне шириной около 4 км. Примерно таких же масштабов их развития следует ожидать и в широтном направлении.

Собственно карбонатиты представлены несколькими разновидностями: кальцитовыми, манганокальцитовыми, манганосидеритовыми, кальцит-



**Рис. 5. Геологический разрез через карбонатитовый шток**

*1* – четвертичные отложения; *2* – карбонаты; *3* – альбит-карбонатные породы; *4* – альбититы карбонатизированные; *5* – тингуаиты и щелочные трахиты карбонатизированные; *6* – ийолиты; *7* – биотитизированные пироксениты; *8* – фойяиты катаклазированные; *9* – контакты: *a* – установленные; *б* – предполагаемые

бербанкит-стронцианитовыми, кальцит-альбит-биотитовыми. В их составе, наряду с кальцитом и силикатными минералами (полевые шпаты, флогопит, пироксены), содержатся бербанкит (20%  $TR_2O_3$ ; 20% SrO, 10% BaO), синхизит (61%  $TR_2O_3$ ), стронцианит (46% SrO). Второстепенными минералами являются сульфиды (пиротин, пирит, марказит, галенит, сфалерит), флюорит, магнетит, гётит; акцессорные – светлый пирохлор, дизаналит, давсонит; циркон, андрадит, волластонит, апатит, сфен, анкилит; поздние и вторичные минералы представлены канкринитом, нахколитом, криолитом, содалитом.

По данным полного химического анализа отдельных проб карбонатитов характеризуются следующим составом (вес. %):  $SiO_2$  – 11,6–32,3;  $Al_2O_3$  – 4,2–9,9;  $Fe_2O_3$  – FeO – 10,8–14,2; CaO – 10,9–24,6; MgO – 4,1–5,6; MnO – 4,1–4,5; SrO – 0,8–4,5; BaO – 1,0–2,3;  $TR_2O_3$  – 1,1–2,2; F – до 2;  $H_2O_{общ}$  – до 2,3;  $CO_2$  – 15,8–34,1.

По предварительным результатам, наблюдается следующая последовательность образования пород (от ранних к поздним): 1) пироксенит интенсивно флогопитизированный и карбонатизированный (присутствует только в ксенолитах); 2) щелочной базальт (мончикит) карбонатизированный и флогопитизированный; 3) карбонатит генерации 1 (кальцит, эгирин,

биотит, магнетит, сфен, апатит, дизаналит); 4) щелочные эффузивы (сиенит-порфиры, трахиты, тингуаиты); 5) альбититы и биотит-кальцит-альбитовые породы; 6) карбонатит генерации 2 (кальцит, эгирин, биотит, альбит, канкринит, волластонит, андрадит, апатит, магнетит, пиррохлор, циркон, рутил); 7) карбонатит генерации 2 (кальцит, бербанкит, стронцианит, пирротин, пирит, циркон, малакон, апатит); 8) карбонатит генерации 4 (кальцит, марганокальцит, аниит, стронцианит, синхизит, бастнезит, флюорит, марказит, гётит); 9) карбонатит генерации 5 (кальцит, марганосидерит, флюорит, давсонит, криолит, нахколит).

По составу силикатных пород и ранних карбонатитов (содержащих альбит, эгирин, биотит) хибинский комплекс близок к комплексу Фен в южной Норвегии, где карбонатитовое жерло окружено сериями даек тингуаита и дамкьернита, но в Хибинах пока не встречено кимберлитовых разновидностей жильных пород. Поздние генерации карбонатитов Хибин необычны и близки к отдельным разновидностям комплекса Канганкунде (юго-восточная Африка).

Полученные материалы позволяют сделать вывод, что карбонатитовый комплекс, выполняющий, по-видимому, жерловую часть Хибинского субвулкана, представляет собой завершающий этап становления этого очага щелочных интрузий. Он безусловно интересен не только в геологическом, но и в практическом отношении и заслуживает более длительного изучения.

Разнообразные по составу породы дайкового комплекса (пикрит-порфириты, мончикиты, щелочные габброиды и тингуаиты) относились ранее к конечным дифференциатам магмы, питавшей Хибинский плутон [35]. Наши исследования позволили выдвинуть гипотезу о принадлежности дайковых образований к продуктам глубинного магматизма, проявившегося на территории Кольского региона.

Действительно, в пределах Хибин дайковые породы, несомненно имеющие магматическое происхождение, секут зоны альбитизации и эгирин-альбитовые жилы, сформировавшиеся в IV периоде постмагматической деятельности. Допустим, что внедрение даек не связано с развитием щелочной магмы, закончившимся в IV периоде. Кроме того, имеющиеся данные о последовательности дайковых инъекций свидетельствуют о наличии обособленного ряда дифференциации от основных расплавов к щелочным, который должен рассматриваться изолированно от нисходящего ряда эволюции щелочной магмы. Наконец, дайки мончикитов, фурчитов и других пород известны далеко за пределами щелочных массивов в районе Печенги и беломорского побережья. Отсутствие пространственной и генетической связи даек со щелочными массивами установлено для многих регионов, расположенных за пределами Кольского полуострова.

По материалам массовых наблюдений над трещиноватостью, выполненных в ходе съемок и разведочных работ, Е.А. Каменевым [16] на основании более 10 000 замеров построено 50 стереодиаграмм, проведен статистический анализ распространенности систем трещин, охарактеризованы их морфологические особенности, показана роль трещинной тектоники в раз-



мещении жильных и дайковых образований, высказаны некоторые соображения о генезисе трещин.

Структурный блок усложнен комбинацией первичных (контракционных) и тектонических трещин с отдельностью, вызванной разгрузкой при эрозии вышележащих пород. Первичные трещины (пластовые, продольные, поперечные и диагональные) гармонично сопряжены со структурой кольцевых и конических интрузий, подчеркивая особенности их формы. Тектонические трещины (радиальные и концентрические) возникают в связи с обновляющимися разломами, сопровождающими становление отдельных интрузий.

Первая и единственная до настоящего времени попытка определения геотермоградиента и ступени в Хибинах предпринята И.Я. Барановым в 1951 г. По результатам термометрии шести мелких (до 240 м) скважин, пробуренных в районе апатитовых месторождений, он получил крайне низкие величины геотермоградиента ( $0,6-0,7^\circ$ ) и, соответственно, преувеличенные значения ступени (140–160 м).

Результаты термокаротажа глубоких (до 1,5–2 км) структурных скважин, пробуренных в последние годы на Коашве и в ряде других пунктов массива, привлечены для вычисления градиента и ступени (19). Измерения выполнялись после установления в скважинах естественного температурного режима, термограмма записывалась при спуске датчика. При расчете геотермических параметров вносилась поправка на искривление скважин. Анализ термограмм показывает, что в зоне климатической зависимости, простирающейся до абс. отметок минус 125–740 м, температурное поле нарастает медленно и неравномерно в связи с влиянием водопритоков. Поэтому наиболее надежны результаты, полученные по самым глубоким скважинам, пересекающим нижнюю границу этой зоны. Вычисленное значение градиента равно  $2,68^\circ$  при диапазоне колебаний от  $2,2$  до  $3,0^\circ$ , а ступени 37,4 м при диапазоне от 32,9 до 45,4 м.

НОВЫЕ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Хибинские месторождения с весьма крупными запасами высококачественных легкообогатимых комплексных апатит-нефелиновых руд — подлинное национальное достояние советского народа. На протяжении более чем 50 лет они сохраняют ведущее положение как в сырьевом балансе страны, так и в масштабах добычи.

С началом промышленного освоения Кукисвумчоррского месторождения наша страна не только отказалась от импорта фосфатного сырья, не только полностью обеспечила внутренние потребности, но стала крупным поставщиком апатитового концентрата на внешний рынок. Освоение

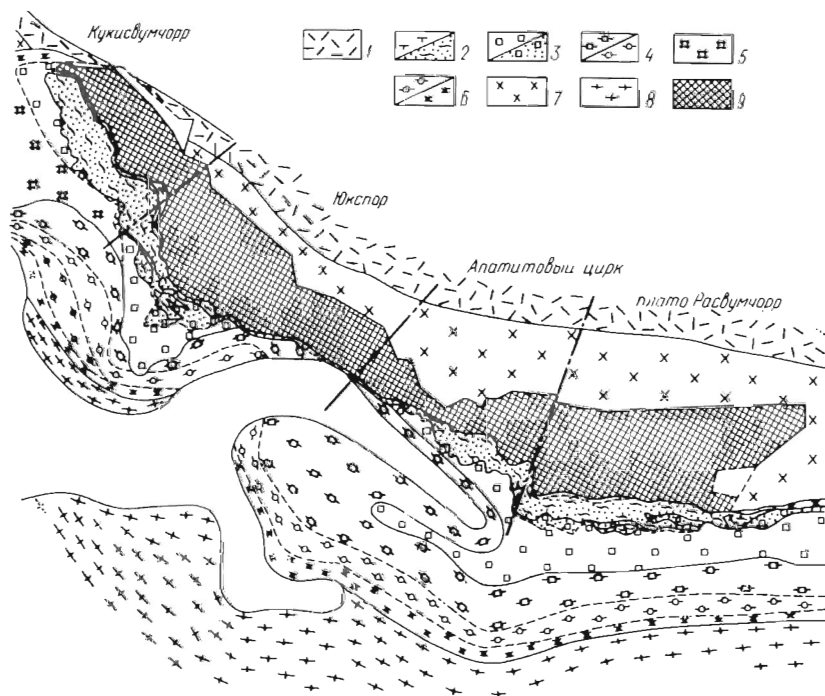
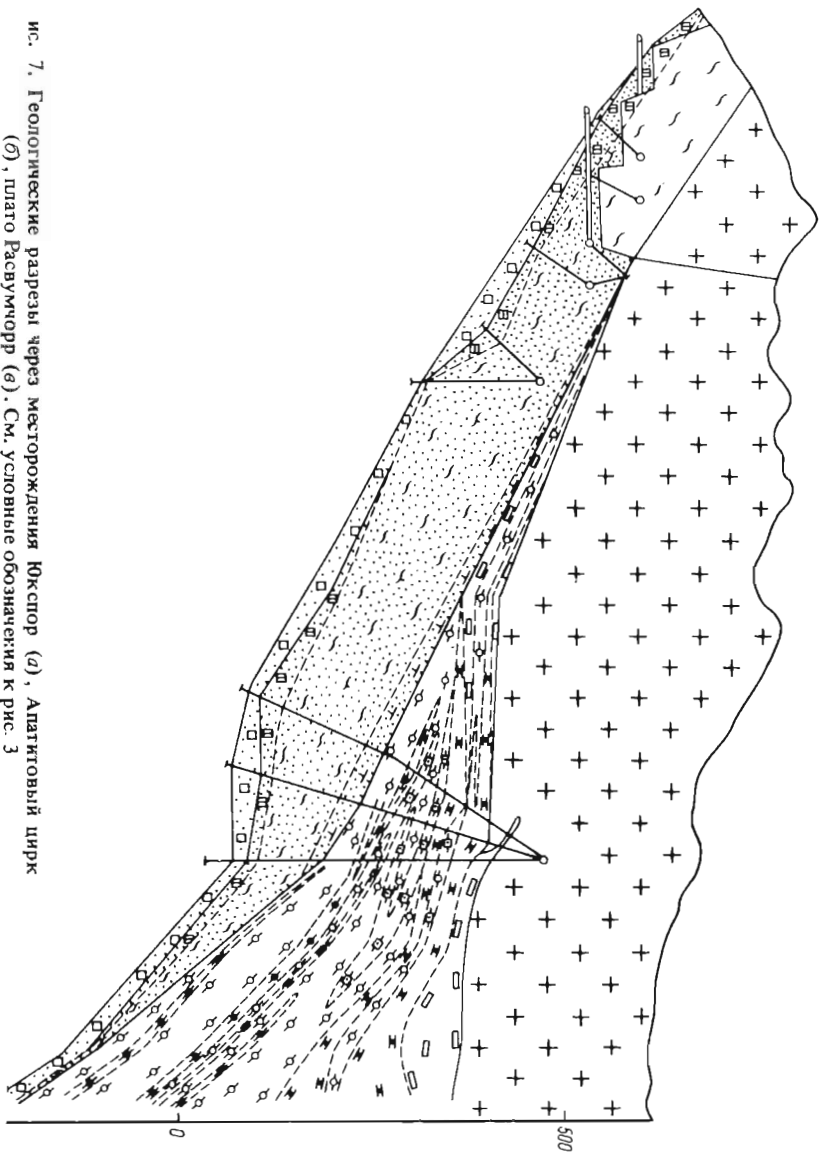


Рис. 6. Схема расположения месторождений юго-западного рудного поля.

1 — лавчорриты; 2 — сфен-апатитовые и апатит-нефелиновые руды; 3 — массивные уртиты, апатитовые уртиты; 4 — трахитоидные уртиты и ийолиты; 5 — неравномернозернистые массивные уртиты; 6 — полевощпатовые ийолиты и малинциты; 7 — рисчорриты; 8 — хибиниты; 9 — плато, изученные на стадии детальной разведки

а



ис. 7. Геологические разрезы через месторождения Юкстор (а), Апатитовый цирк (б), плато Расвумчорр (в). См. условные обозначения к рис. 3

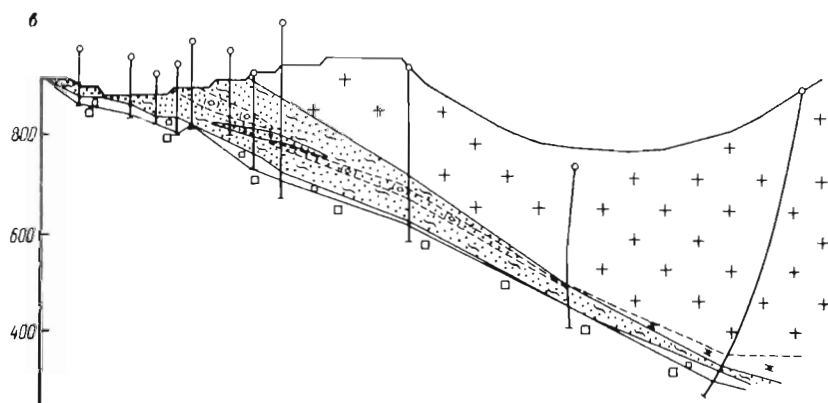
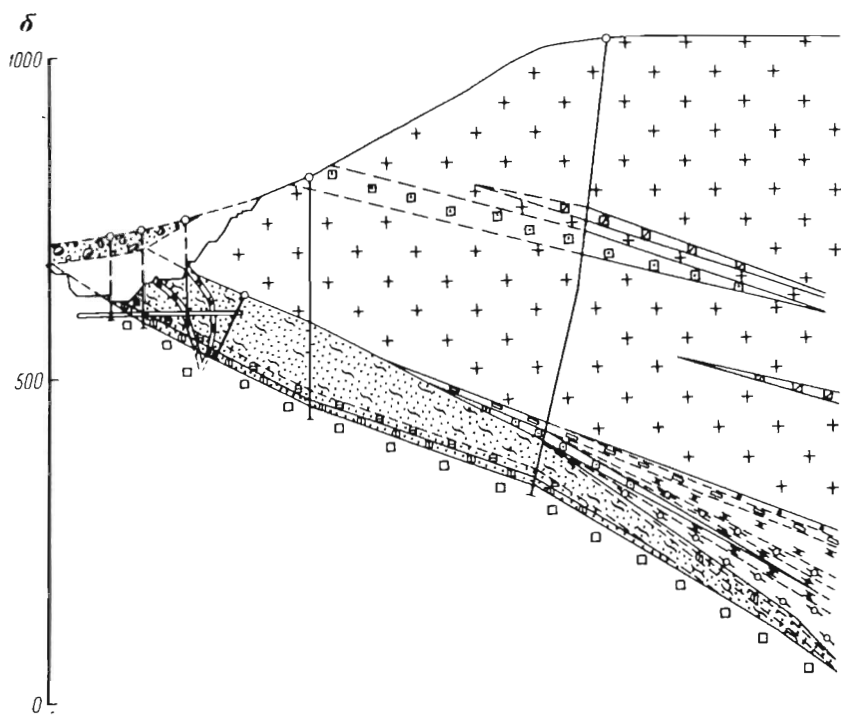


Рис. 7 (Продолжение рис.)

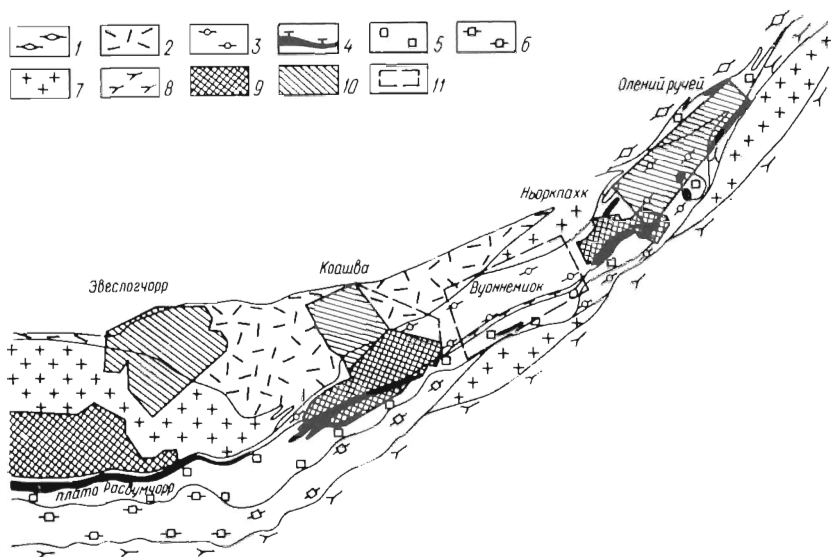


Рис. 8. Схема расположения месторождений юго-восточного рудного поля.

1 - фойяиты; 2 - лявочорриты; 3 - пострудные ийолит-уртиты; 4 - сфен-апатитовые и апатитовые руды; 5 - массивные уртиты; 6 - дорудные ийолит-уртиты; 7 - рисчорриты; 8 - хибиниты. Площади, изученные на стадиях: 9 - детальной разведки; 10 - предварительной разведки; 11 - поисково-оценочных работ.

цетинных и залежных земель явилось толчком к увеличению производства фосфатных удобрений, выпуск которых в основном базировался на использовании хибинского апатита. Резкое увеличение потребности в фосфатном сырье вызвало необходимость усиления темпов геологических поисков и разведки по сравнению с динамикой добычи. Эта задача решается как за счет открытия и разведки новых месторождений, расширения сырьевых баз действующих рудников, так и путем коренной геолого-промышленной переоценки рудных участков, которые ранее по разным причинам не выдвигались в число перспективных объектов.

Программа геологических исследований по расширению сырьевой базы апатитовых руд выполнялась последовательно. Для организации планомерных поисков на площади Хибинского массива была проведена средне-масштабная геологическая съемка с целью обеспечения производственных и научных организаций современными картами — геологической, структурной, полезных ископаемых, геоморфологической и четвертичных отложений. К главным результатам этой стадии работ относятся расшифровка истории формирования многофазного Хибинского массива и продуктивной интрузии ийолит-уртитов, выявление перспективных площадей для постановки детальных поисков и научная разработка принципиально новых поисковых критериев на апатит.

Вслед за этим перспективная территория, совпадающая с площадью развития ийолит-уртитового комплекса, была детально изучена геологическими, геофизическими методами с поверхности и картировочным бурени-

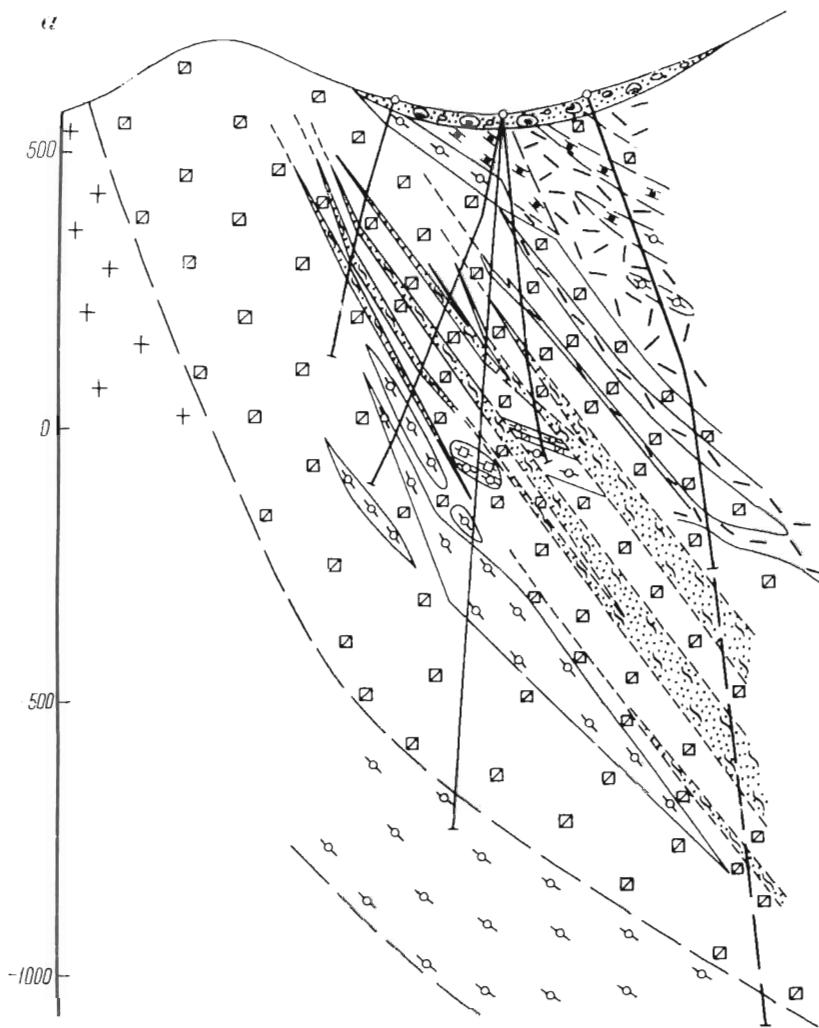
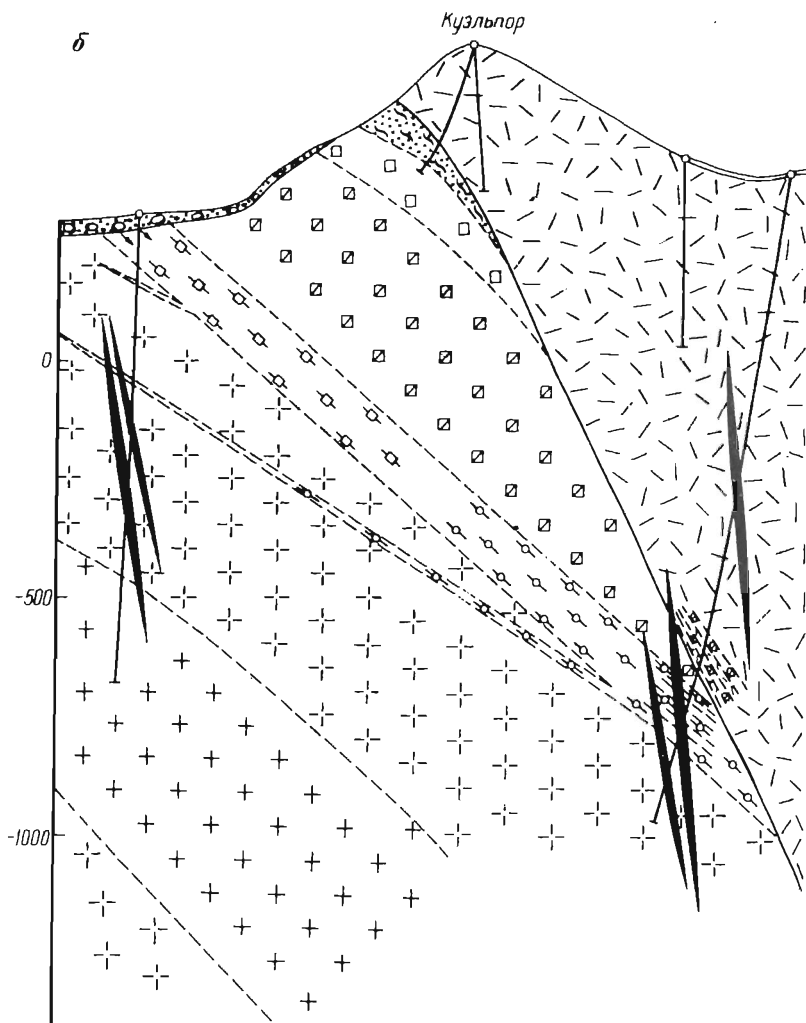


Рис. 9. Геологический разрез через месторождение Снежный цирк (а) и Кузьлпор (б)

ем до глубины 0,5 км. Детальные поиски привели к открытию крупных месторождений Партомчорр на северо-западе Хибин и Коашва – в юго-восточной части массива.

Следующий этап исследований заключался в определении перспектив глубоких горизонтов Хибинского массива с применением структурно-поискового бурения скважин до глубины 1,5–2,5 км. При этом основное внимание было обращено на выявление "слепых" апатитовых залежей на территориях, закрытых четвертичными отложениями, преимущественно на площади ийолит-уртитовой интрузии и в меньшей степени за ее преде-



См. условные обозначения к рис. 3

лами. Структурно-поисковое бурение, в основу которого были положены проверенные на практике критерии генетической связи апатитового оруденения с уртитам рудной субфазы, завершились выявлением новых месторождений Эвселогчорр, Олений ручей, рудного участка Снежный цирк, а также ряда рудопроявлений апатита на значительной глубине, практическая ценность которых нуждается в дальнейшей проверке. В связи с этим следует подчеркнуть, что все промышленные месторождения и подавляющее большинство рудопроявлений апатита, обнаруженных в процессе бурения, пространственно приурочены к интрузии ийолит-уртитов.

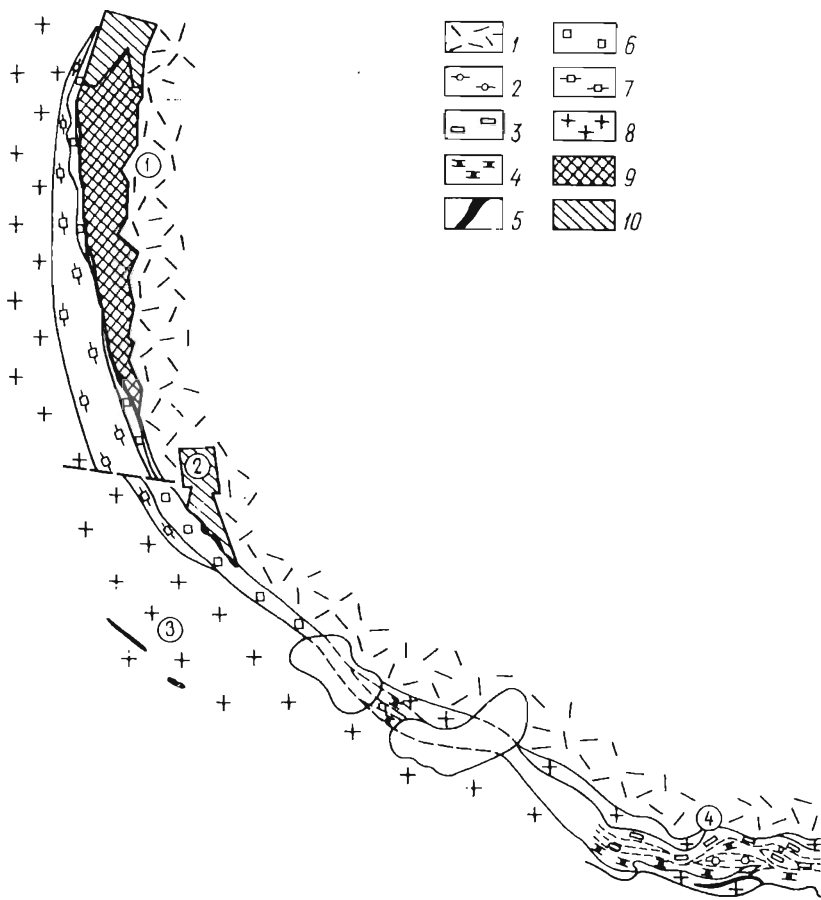


Рис. 10. Схема расположения месторождений северо-западного рудного поля.

1 – лавчорриты; 2 – ийолит-уртиты; 3 – луявриты; 4 – малинциты; 5 – руды; 6 – массивные уртиты; 7 – трахитоидные уртиты; 8 – ричесорриты; площади, изученные на стадиях: 9 – детальной разведки; 10 – предварительной разведки.

Цифры в кружках месторождения: 1 – Партомчорр; 2 – Куэльпор, 3 – Поачвумчорр; 4 – Снежный цирк

В результате обобщения всех ранее выполненных исследований была получена необходимая информация для обоснованного прогнозирования апатитового оруденения до глубины 2 км с учетом конкретных особенностей геологического строения ийолит-уртитовой интрузии на отдельных участках.

Сразу после открытия каждого нового месторождения, практически без перерыва, были организованы геологоразведочные работы, завершившиеся передачей разведанных запасов для промышленного освоения.

С учетом новых открытий имеются достаточные основания для выделе-



ния в Хибинах трех рудных полей. Юго-западное рудное поле включает месторождения Кукисвумчорр, Юкспор, Апатитовый цирк и плато Расвумчорр (рис. 6), разрабатываемые Кировским, Юкспорским, Расвумчоррским и Центральным рудниками (рис. 7). В юго-восточном рудном поле сосредоточен ряд апатитовых месторождений, выявленных, разведанных и подготовленных для промышленного освоения в последние два десятилетия (1960—1980 гг.). К ним относятся разрабатываемое месторождение Коашва, подготовленное к добыче месторождение Ньюркпахк, разведываемые в настоящее время месторождения Эвеслогчорр и Олений ручей, а также рудный участок Вуоннемиок, перспективность которого оценивается на поисковой стадии (рис. 8). Северо-западное рудное поле объединяет детально разведанное месторождение Партомчорр, а также рудные участки Снежный цирк, Куэльпор (рис. 9). На участке Снежный цирк проводятся поисково-оценочные работы. В пределах северо-западного поля известно апатитовое оруденение Поачвумчорр, представленное серией апатитовых жил мощностью 1—8 м, залегающих среди рисчорритов. Прерывистость оруденения, незначительные масштабы его распространения на глубину, отсутствие связи с продуктивной интрузией ийолит-уртитов, а также неблагоприятные для постановки геологоразведочных работ условия залегания апатитовых жил — все эти факторы препятствуют вовлечению Поачвумчоррского участка в сферу поисково-оценочных работ. Схема размещения апатитовых залежей северо-западного рудного поля показана на рис. 10.

## ЮГО-ВОСТОЧНОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ

### КОАШВИНСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

Начиная с 1929 г. район горы Коашва неоднократно посещался и обследовался геологами с целью минералогического и геологического картирования, сопровождавшегося поисками апатитовых руд и других полезных ископаемых. Первые сведения о находках апатита в этом районе относятся к началу 30-х годов.

В.И. Влодавец [6] в процессе геологической съемки горного массива Расвумчорр обследовал примыкающую к нему западную часть горы Коашва. По его данным, на Восточном Расвумчорре апатит-нефелиновая порода раздваивается и идет двумя полосами, не доходя 500 м до перемычки Расвумчорр—Коашва, скрывается под осыпями. Весьма вероятно продолжение нефелин-apatитовой породы и на Коашве, так как на этой горе находятся обнажения уррита, к которому она приурочена в южной части Хибинских тундр. Кроме того, в осыпях были найдены глыбы нефелин-apatитовой породы. В этой работе приведена геологическая схема, на которой показаны установленные и предполагаемые контуры выходов апатитовой залежи от Кукисвумчорра до Восточного Расвумчорра. По данным В.И. Влодавца, рудное тело "раздвигается и выклинивается".

В 1930 г. О.А. Воробьева [7] при картировании восточных районов Хибинского массива обнаружила "... скопления нефелин-apatитовой поро-

ды промышленного типа. Примерно на высоте перемычки Коашва—Южный Расвумчорр имеется коренной выход нефелин-апатитовой породы. Выход имеет неправильную форму треугольника протяженностью 50 м, ширина в юго-западной части около 20 м, в северо-восточном направлении выход выклинивается, достигая ширины обнажения 4—5 м. Детальное обследование контакта показало, что данный выход является восточной оконечностью центральной апатитовой дуги, которая гворачивает на Коашве слегка на северо-восток, и, по-видимому, здесь происходит выклинивание. Линия контакта на северных склонах Коашвы, освобожденная от аллювиальной осыпи, скоплений промышленного апатита не имеет. ...Правда, нет данных исключить вероятность временного пережима рудного тела. Тогда его продолжение нужно искать в долине Вуоннемиока”.

Поисковая партия М.И. Шевченко [48] летом 1933 г. проводила исследование продуктивной полосы на Восточном Расвумчорре, Ньоркпахке и Суолауйве. ”Работами партии установлено, что апатитовые месторождения на южных склонах восточного Расвумчорра могут иметь промышленное значение лишь на протяжении 150 м к востоку от ущелья Дразнящее Эхо. Дальше, на восточных склонах восточного Расвумчорра и на первом плато Коашва, а также на первом северо-восточном отроге ее, апатиты имеют исключительно геологическое значение; ввиду незначительного их числа они обнаружены в виде наибольших линз и шширов, не превышающих по простиранию 50 м и по мощности 10 м”. Более точного описания местонахождения, масштабов и условий залегания этого оруденения не приведено.

В 1932 г. А.Е. Ферсман в статье ”Апатитовые дуги и их промышленное значение” писал: ”Начиная с крутых обрывов Расвумчоррского цирка пояс апатитовых пород уже определено загибается на восток и впервые обнажается в обрывах южных склонов Хибин, открытых к низовьям Кольского полуострова, и здесь прослеживается на протяжении свыше 3 км на Западном и Восточном Расвумчорре, с тем, чтобы на крайнем востоке немного загнуться к северу и на склонах Коашвы сузиться до нескольких метров и совершенно закончиться”.

Основываясь на данных исследований 1929—1933 гг., Л.Б. Антонов [1] в сводке по хибинским апатит-нефелиновым месторождениям сообщает: ”Несколько особняком находятся месторождения Куэльпор, Коашва, Вуоннемиок и Поачвумчорр, которые ввиду незначительных запасов руды и при наличии более мощных Хибинских месторождений пока не имеют промышленного значения”.

В обобщающей работе Н.А. Елисеева, И.С. Ожинского, Е.Н. Володина [15], опубликованной в 1939 г., Коашвинское месторождение в числе известных не упоминается.

В 1953 г. геолог Хибиногорской геологоразведочной партии А.И. Александров обследовал обнаруженные М.И. Шевченко выходы апатита в верхней части северо-восточного отрога горы Коашва. Дополнительно он выявил ряд обособленных рудопроявлений апатит-нефелиновых руд на плато и южных склонах гор, считая их ”самыми верхними частями месторождения”, скрытого на большой глубине. Для обнаружения этого месторожде-

ния А.И. Александровым было рекомендовано бурение поисковых скважин глубиной до 200–300 м у северного подножья Коашвы и в долине р. Вуоннемиок. После того, как данная А.И. Александровым рекомендация была поддержана геофизиком Н.А. Яковлевым, предложившим проверить природу аномалий и резких перепадов магнитных полей в долине р. Вуоннемиок, здесь были пробурены три скважины глубиной до 350 м, не вскрывшие оруденения.

Толчком к развертыванию широкого фронта поисковых работ послужили выводы С.И. Зака о крайне недостаточной геологической изученности ийолит-уртитовой интрузии для обоснованного выделения перспективных участков. Им была поставлена задача провести в 1958–1960 гг. детальные поисково-съёмочные работы на площади развития ийолит-уртитов с применением поискового бурения в первую очередь на участках, закрытых четвертичными отложениями. В 1959 г. Ф.В. Минаков на основе анализа и последующего обобщения всех имеющихся поисковых и разведочных данных по геологии ийолит-уртитов и апатитовых месторождений предложил принципиально новое направление поисков, вытекающее из разработанной им же концепции трехэтапного формирования продуктивной интрузии и генетической связи апатитовых руд с массивными уртитами рудной субфазы. В соответствии с этой концепцией Ф.В. Минаков пришел к заключению о том, что "... приуроченность апатитовых месторождений к контакту ийолит-уртитов и рихсчорритов уже не может считаться единственным надежным поисковым критерием, так как апатитовые залежи могут располагаться внутри ийолит-уртитовой толщи", поэтому "особое значение для постановки поисковых работ на апатит приобретает зона контакта всякого бока уртитов с трахитоидными ийолитами, на которую до настоящего времени не обращалось никакого внимания". Проектом детальных поисков предусматривалось полное пересечение ийолит-уртитовой интрузии маршрутной съёмкой по профилям через 100–200 м в сочетании с поисково-картировочным бурением и горными работами для получения сплошных разрезов интрузии на опорных профилях.

В 1959 г. Ф.В. Минаков обнаружил и оконтурил зону распространения валунов апатитовых руд на северном склоне второго северо-восточного отрога горы Коашва, сделав в полевом дневнике запись: "Происхождение валунов апатита на профиле 133 не совсем понятно. Такие крупные валуны не могли транспортироваться далеко, а коренные валуны апатита имеются только в верховьях ручья, более чем в 1,5 км...". В 1960 г. здесь были начаты горные работы. В шурфе на глубине 6 м в 150 м выше по склону от обнаруженной Ф.В. Минаковым валунной россыпи апатитовых руд была встречена полосчатая апатит-нефелиновая руда состоящая на 70–80 % из апатита. Этот и все последующие шурфы были задокументированы и опробованы геологом В.В. Малыгиным. В том же году на Коашве была пробурена первая разведочная скважина, вскрывшая рудную зону мощностью 150 м, в которой были выделены три интервала брекчированных массивными уртитам апатит-нефелиновых руд мощностью 10–50 м с содержанием  $P_2O_5$  16–17 %.

Таким образом, открытие Коашвинского апатитового месторождения, сделанное геологами Хибиногорской геологоразведочной партии

Ф.В. Минаковым, В.В. Малыгиным и А.И. Александровым в 1960 г., явилось закономерным результатом научно обоснованных и методически правильно проведенных поисковых работ.

С 1961 г. на месторождении начались планомерные геологоразведочные работы (Е.А. Каменев), завершившиеся утверждением крупных запасов апатит-нефелиновых руд ГКЗ СССР и передачей подготовленного месторождения производственному объединению "Апатит" для промышленного освоения.

Уже на ранней стадии разведки выявилось необычайно сложное геологическое строение нового месторождения. Если на других известных к тому времени апатитовых месторождениях юго-западного рудного поля апатитовая залежь имела форму относительно выдержанного по мощности пласта с устойчивыми элементами залегания и постоянным качеством руд, то на Коашве буровыми скважинами было пересечено несколько рудных интервалов апатитовой брекчии, не имеющих между собой однозначной увязки. Среди геологов возникло представление о незаконном характере брекчиевого оруденения, о принципиальной невозможности их герметизации в пространстве и даже ставилась под сомнение промышленная ценность этого месторождения. Были выдвинуты и другие гипотезы: о сложноскладчатой структуре месторождения (И.И. Перекрест), о смещении отдельных рудных блоков по системе разрывных нарушений (Г.М. Вировлянский), о широком развитии процессов будинажа, приведших к разобщению рудных тел на изолированные блоки (М.М. Калинин). Противоречивые и взаимоисключающие взгляды на структуру рудной зоны вызвали необходимость особенно глубокого анализа разведочных материалов, поскольку от правильного решения этого вопроса зависела достоверность промышленной оценки всего месторождения.

Подробный критический анализ предложенных гипотез о структуре и генезисе месторождения, основанный на обширном материале детальных геологоразведочных работ, сделан Е.А. Каменевым [20]. Эти данные позволили отказаться от дальнейшего обсуждения ранее дискуссионных вопросов о геологическом строении и промышленной значимости Коашвинского месторождения.

Геологическое строение Коашвинского месторождения, несмотря на ряд отличий, в общих чертах аналогично месторождениям юго-западного рудного поля. Эта общность, обусловленная генетической связью апатитовых руд и уртитов, выражается в принадлежности пород ийолит-уртитового комплекса к производным трех субфаз интрузии, в совместном нахождении апатитовых руд и массивных уртитов, в полном тождестве состава природных типов руд на разных месторождениях.

На Коашве интрузия ийолит-уртитов представлена породами трех субфаз, размещение которых, как и для Хибинского массива в целом, вполне упорядочено: ранние производные интрузии сменяются более поздними в направлении от периферии к центру (рис. 11). Иначе говоря, дорудные ийолит-уртиты залегают в основании комплекса, апатитовые руды и массивные уртиты занимают его среднюю часть, а породы пострудной субфазы образуют всячий бок и перекрывают рудную зону.

Вмещающими, по отношению к продуктивному комплексу, породами

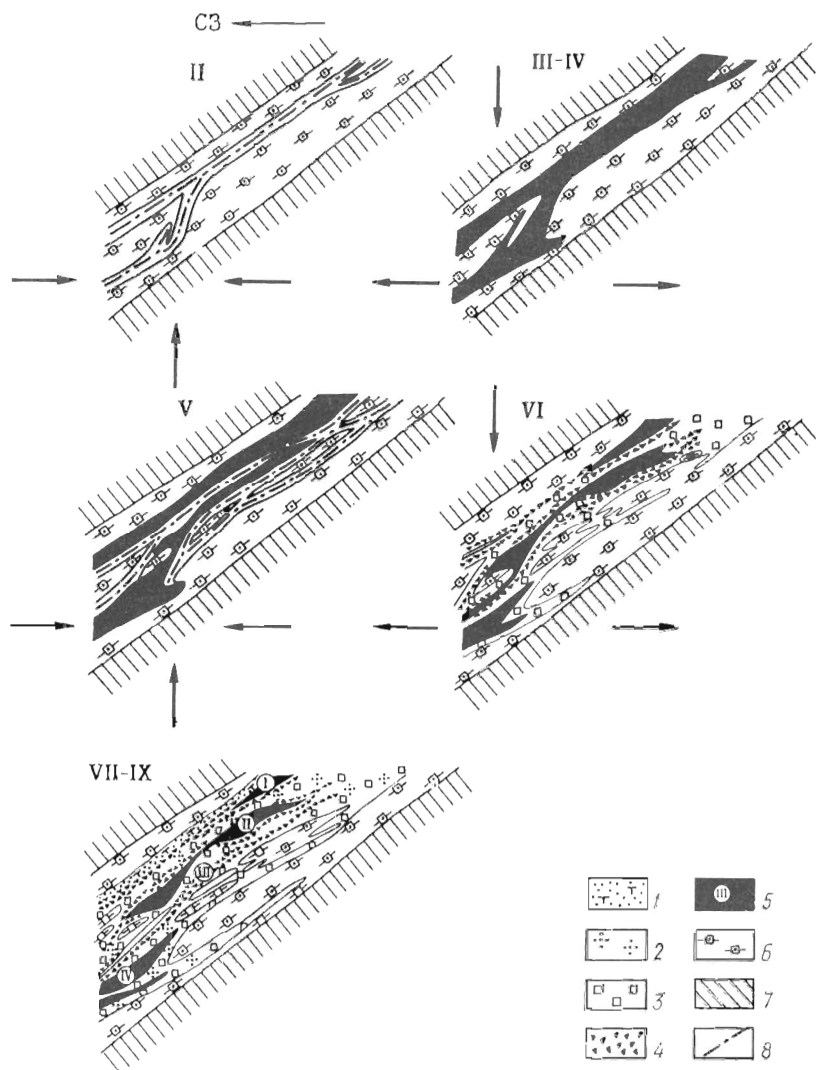


Рис. 11. Схема формирования Коашвинского месторождения.

Римские цифры – стадии формирования. Минерализация: 1 – сфеновая; 2 – апатитовая; 3 – массивные уртиты; 4 – брекчия апатит-нефелиновых руд с уртитовым цементом; 5 – ненарушенные апатит-нефелиновые руды; 6 – трахитоидные ийолит-уртиты и малиниты дорудной субфазы; 7 – хибиниты; 8 – конические расколы

на Коашве являются рискорриты, залегающие под дорудными ийолитами, и ливочорриты, перекрывающие, а на глубине частично срезающие ийолит-уртиты пострудной субфазы. Поскольку рискорриты пространственно удалены от рудной зоны и в процессе эксплуатации месторождения не будут оказывать влияния ни на состав руд, ни на условия добычи, они не изуча-

лись специально. По внешнему облику, макро- и микроструктурам, а также по химическому и минеральному составу рисчорриты района Коашвы полностью аналогичны пойкилитовым сиенитам других районов Хибин.

Контактовое воздействие ийолитов привело к катаклазу и огнейсованию рисчорритов, наблюдаемых в зоне шириной до 60 м. В катаклазированных рисчорритах полевой шпат превращен в мелкозернистый сахаровидный агрегат, становится незаметной пойкилитовая структура. В шлифах отмечается коррозия нефелина калишпатом вплоть до полного замещения, развитие амфибола по эгирину и натролита по калишпату. Микроструктура рисчорритов в зоне катаклаза гранобластовая.

К наиболее ранним производным интрузии относятся трахитоидные уртиты и ийолиты, отличающиеся количественным соотношением главных минералов — нефелина и эгирина, а также их полевошпатовые аналоги — малиньиты и люавриты. Мощность пачки этих пород снижается с глубиной от 390 до 40 м и менее. Дорудные ийолит-уртиты находятся среди массивных уртитов в виде угловатых повернутых ксенолитов размером до нескольких метров, образующих на локальных участках зоны брекчий, а также в виде крупных отторженцев платообразной формы длиной до 1–1,5 км и мощностью до 50 м.

Элементы внутренней структуры дорудных ийолит-уртитов наклонены под углом 10–30° на северо-запад, но в ксенолитах ориентированы произвольно. Малиньиты и люавриты приурочены к контакту с вмещающими рисчорритами.

К продуктивному комплексу (рудной субфазе) относятся две обширные группы пород, возникшие в ходе последовательных стадий рудообразования и взаимосвязанные по составу, возрасту и условиям залегания. Первую группу образуют массивные уртиты, пегматитовые уртиты и фациальные пегматиты. Во вторую группу включены сфен-апатитовые и апатит-нефелиновые руды пятнистой, пятнисто-полосчатой, блоковой, полосчатой и линзовидно-полосчатой текстур. Апатитовые уртиты и брекчия апатит-нефелиновых руд — переходные по составу разновидности между породами обеих групп, объединенные в один комплекс.

Важная особенность внутреннего строения Коашвинской рудной зоны заключается в том, что апатит-нефелиновые руды и массивные уртиты образуют систему сложных по форме пластовых тел — рудных горизонтов и разделяющих их уртитовых прослоев. Рудные горизонты совместно с прослоями уртитов и отторженцами ранних ийолит-уртитов составляют рудную зону длиной по простиранию 3 км, мощностью до 0,4–0,5 км. Общее простирание структур северо-восточное 65–70°, падение северо-западное под пологими углами (20–25°) у повернутыми и умеренно крутыми (40–50°) на глубине 1,5–2 км. В полном разрезе зоны выявлены четыре рудных горизонта, которые на отдельных участках прерываются по простиранию и по падению (табл. 1).

Первый рудный горизонт, приуроченный к кровле рудной зоны, прослежен по простиранию на 3,1 км, по падению до 2–2,5 км. Верхний контакт горизонта с пострудными ийолитами исключительно ровный, связан с вмещающими породами промежуточной узкой зоной, обогащенной сфеном, титаномagnetитом и апатитом; нижняя граница с массивными урти-

Сравнительная характеристика рудных горизонтов

Показатели	Единицы измерения	Горизонты			
		I	II	III	IV
Средняя мощность балансовых руд	м	33,1	34,0	32,6	31,6
Среднее содержание $P_2O_5$	%	14,9	19,1	17,2	18,0
Коэффициент вариации мощности	%	52,5	69,2	94,0	104,4
Коэффициент вариации содержания $P_2O_5$	%	34	36	32	31
Распределение запасов	отн. %	42,5	42,4	8,7	6,4

Таблица 2

Распределение природных типов руд по горизонтам (в отн. %)

Породы	Горизонты				
	I	II	III	IV	Среднее
Сфен-апатитовые	31,7	2,7	—	—	14,7
Апатит-нефелиновые:					
пятнистые	6,3	8,4	5,5	10,8	7,4
пятнисто-полосчатые	6,3	13,6	5,6	13,9	9,6
полосчатые	15,2	25,4	36,7	30,9	22,5
линзовидно-полосчатые	4,0	9,3	16,1	7,2	7,5
блоковые	1,4	3,9	8,3	2,2	3,1
сетчатые	0,8	0,2	—	—	0,5
Брекчия апатитовых пород	15,3	9,9	12,5	14,2	12,7
Апатитовые уртиты массивные	11,9	22,0	12,5	15,8	16,5
Жильные породы, ксенолиты	7,1	4,6	2,8	5,0	5,5

тами имеет более сложную, извилистую поверхность. Мощность горизонта непостоянна: раздувы, оконтуренные изопакитами в 50–75 м, выявлены в центральной части и на северо-восточном фланге; пережимы менее 25 м установлены как вблизи поверхности, так и на глубоких горизонтах.

Второй рудный горизонт целиком залегает среди массивных уртитов и отличается большей морфологической сложностью по сравнению с первым горизонтом; резкими колебаниями мощности, прерывистостью оруденения, наличием безрудных участков. В целом этот рудный горизонт представлен несколькими изолированными друг от друга рудными телами, как правило, совпадающими в плане с участками пережимов мощности первого горизонта (табл. 2).

Третий рудный горизонт длиной в 1 км и шириной (в плане) 0,3–0,5 км расположен в центральной части месторождения на глубине до 0,5 км от поверхности. В отличие от I и II рудных горизонтов, имеющих весьма значительные размеры и выходящих под толщу моренных отложений, III горизонт имеет ограниченные масштабы развития на площади и является "слепым" рудным телом с большими перепадами мощностей на сближенных участках.

Четвертый рудный горизонт залегает в основании разреза рудной зоны, характеризуется весьма сложной формой: частым чередованием раздуров и пережимов мощностью, крайней изменчивостью углов наклона контактов, их непараллельностью, резкими выклиниваниями оруденения, угловыми несогласиями элементов внутренней структуры (полосчатости) с внешними границами, которые в меньшей степени проявляются и на других рудных горизонтах.

Апатит-нефелиновые руды Коашвинской рудной зоны не отличаются от руд эксплуатируемых месторождений юго-западного поля. В кровле первого горизонта залегают породы, обогащенные сфеном и апатитом: сфен-apatитовые уртиты, ийолиты, существенно сфеновые породы, объединенные под названием сфен-apatитовых руд. Они характеризуются тесным парагенезисом сфена, апатита и титаномагнетита, широким развитием трахитоидно-полосчатых текстур, крайней неоднородностью состава и сложности, частым чередованием в разрезе без видимой закономерности, отсутствием интрузивных контактов как с покрывающими ийолитами, так и с нижележащими апатит-нефелиновыми рудами.

Пятнистые, полосчатые, блоковые, линзовидно-полосчатые, массивные руды и в разной степени обогащенные апатитом уртиты образуют непрерывную серию апатит-нефелиновых пород, взаимосвязанных постепенными переходами. Обычно в каждом природном типе руд сочетаются текстурные признаки других разновидностей, в связи с чем при их диагностике допускается некоторая условность. Послойное чередование руд различных типов свидетельствует об их сингенетичности. Наблюдаемые иногда угловые несогласия между ними вызваны воздействием внутрирудной тектоники.

В рудной зоне установлены промышленные скопления позднего апатита, развитого весьма неравномерно среди уртитов, в цементе рудной брекчии и в рудах. Апатит-II отчетливо диагностируется по физическим свойствам (цвету, форме, размерам кристаллов, удельному весу), химическому составу (повышенным соотношением  $\text{SrO}/\text{CaO}$ ) и формами развития (прихотливые мономинеральные агрегаты, ветвящиеся и прерывистые прожилки, неравномерная вкрапленность). В связи с интенсивностью проявления процессов апатитизации внесены дополнения в существующую номенклатуру природных типов апатит-нефелиновых руд. Начальным стадиям метасоматического замещения соответствуют массивные уртиты с апатитовой минерализацией ( $\text{P}_2\text{O}_5$  2—4%), апатитовые уртиты ( $\text{P}_2\text{O}_5$  4—8%); в дальнейшем возникают своеобразные массивные апатит-нефелиновые руды, состоящие из позднего апатита и реликтов массивных уртитов ( $\text{P}_2\text{O}_5$  8—30%); на завершающих стадиях процесса формируются практически мономинеральные (сплошные) апатитовые руды (содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$  превышает 30%).

Место поздней апатитовой минерализации в общей схеме формирования рудной зоны определяется на основании следующих фактов. Минерализация проявилась после кристаллизации апатит-нефелиновых руд, массивных уртитов и сфен-apatитовых пород, которые подвергаются наложенной апатитизации, позже или одновременно с формированием фащи-



альных пегматитов. Среди ксенолитов рудной брекчии не встречены массивные, сплошные руды или апатитовые уртиты. Вместе с тем новообразованный апатит, являясь специфическим минералом брекчии, локализуется как в цементе и ксенолитах, так и по контакту между ними. Наиболее поздние производные ийолит-уртитового комплекса — пострудные ийолиты и мельтейгиты — секут и брекчируют перекристаллизованные апатит-нефелиновые руды и постмагматические апатитовые шпидры в массивных уртиках. Таким образом, наложенные процессы апатитизации имели место в завершающем этапе становления рудной зоны.

Возрастные взаимоотношения массивных уртитов и апатит-нефелиновых руд разнообразны, сложны и противоречивы. С одной стороны, в рудах содержатся шпидровые обособления массивных уртитов, ориентированные согласно полосчатости и обтекаемые ею, с другой — массивные уртиты образуют протяженные полосы в пятнистых, полосчатых и линзовидно-полосчатых рудах или связаны с рудами постепенными переходами, в-третьих, на верхних горизонтах месторождения весьма широко распространены брекчии с ксенолитами апатит-нефелиновых руд.

### НЬОРКПАХКСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

История геологического изучения Ньоркпахкского апатит-нефелинового месторождения от открытия его в 1932 г. до передачи в промышленное освоение в 1977 г. охватывает длительный период времени.

Самые общие сведения о первых находках коренных выходов апатитовых руд на горах Ньоркпахк и Суолуайв с кратким описанием их размеров и характера минерализации произведены в докладах М.И. Шевченко и Г.Т. Кравченко на совещании научно-исследовательских партий и научных учреждений, созванном в г. Хибиногорске (Кировске) в 1933 г. В 1934 г. Л.Б. Антонов [1] по материалам М.И. Шевченко определил прогнозные запасы месторождения Ньоркпахк а 40,2 млн. т по формуле полудиска.

В послевоенные годы на месторождении с перерывами проводились общие (А.И. Александров) и детальные (Ф.В. Минаков) поиски, в результате которых были установлены пространственная связь апатитовых руд с ийолит-уртитам, брекчиевый характер апатитового оруденения с ийолитовым цементом, оценены ориентировочные запасы, сделан отрицательный вывод о рудных перспективах месторождения в связи с "невозможностью выделения на участке какой-либо зоны рудной брекчии, которая могла бы представлять промышленный интерес" и сформулированы задачи дальнейших исследований: выяснение структуры рудовмещающих ийолит-уртитов, условий залегания и связи с ней апатитового оруденения, разработка критериев для поисков апатитовых залежей в "ненарушенном" залегании.

Тезис о широком развитии рудной брекчии на Ньоркпахке прочно утвердился в специальной геологической литературе и долгое время никем не оспаривался. Т.Н. Иванова считала, что нет сплошного тела апатит-нефелиновых пород, а имеются их обломки, ксенолиты, включенные в трахитоидные полевошпатовые ийолиты [17].

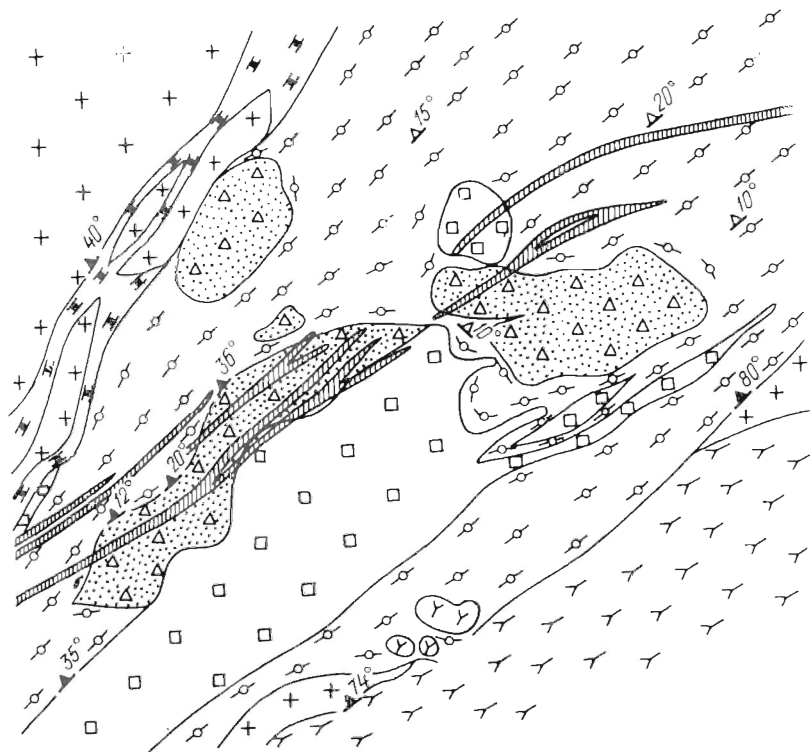


Рис. 12. Геологическая схема месторождения Ньоркпахк. См. условные обозначения к рис. 3

Таким образом, апатитовое оруденение, обнаруженное П.И. Прокофьевым в 1932 г. на горах Ньоркпахк и Суолуайв, продолжительное время считалось всеми исследователями непромышленным в связи с его брекчиевым характером. По этой причине даже не предпринималась попытка увязки в разрезе или в плане отдельных выходов рудной брекчии и не ставился вопрос о постановке на месторождении геологоразведочных работ. Перспективы рудоносности связывались исключительно с поисками апатит-нефелиновых руд в "нечторменном" залегании в зонах контактов интрузии ийолит-уртитов с рнсчорритами.

В 1972 г. Е.А. Каменев на основе проведенного критического анализа и обобщения результатов предшествующих поисково-оценочных работ выдвинул гипотезу о том, что брекчиевое оруденение на месторождении Ньоркпахк имеет многоярусное строение, аналогичное рудной зоне детально изученного Коашвинского месторождения. В рудной зоне были выявлены три залежи брекчиевых апатит-нефелиновых руд (впоследствии названные Верхней, Главной и Нижней), имеющие пластовую форму, пологое залегание, выклинивание на глубине и разделенные жилами вмещающих трахитоидных ийолитов (рис. 12). Эта гипотеза, положенная в основу

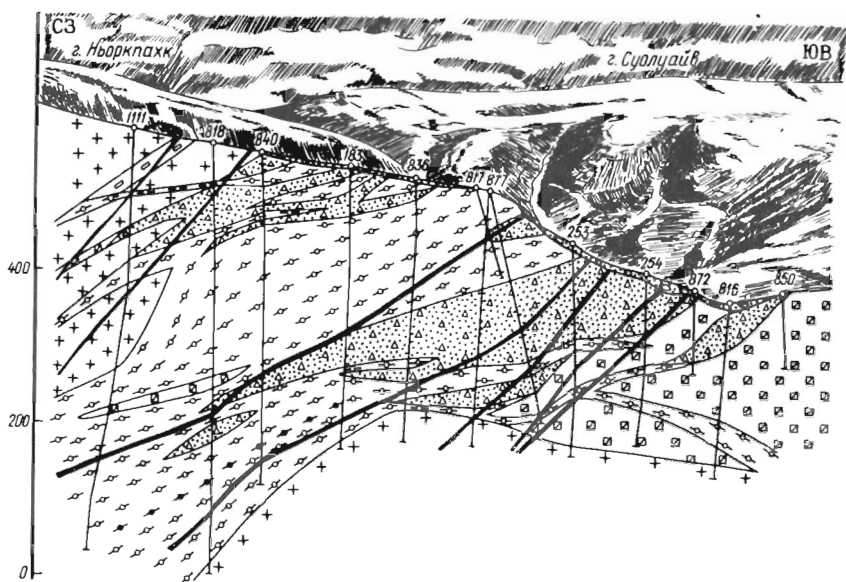


Рис. 13. Геологический разрез через месторождение Ньоркпахк. См. условные обозначения к рис. 3

проекта геологоразведочных работ, позволила непосредственно приступить к детальной разведке, минуя стадию предварительной, что имело существенное значение для сокращения сроков коренной переоценки месторождения и значительного повышения экономической эффективности подготовки его для промышленного освоения.

Рудная зона Ньоркпахкского месторождения пространственно приурочена к продуктивной интрузии ийолит-уртитов, с которой генетически связаны все промышленные апатитовые залежи Хибинского массива. Основное отличие заключается в том, что если на остальных месторождениях апатитовые залежи локализуются в средней части интрузии среди массивных уртитов продуктивной субфазы, то Ньоркпахкская рудная зона в структурном отношении целиком залегает внутри пострудных трахитоидных ийолитов в верхней части разреза интрузии (рис. 13). Продуктивная интрузия ийолит-уртитов и связанные с ней апатитовые залежи в южной части Хибинского массива прослеживаются дугообразной полосой шириной до 2 км от Кукисвумчорра от Коашкара, где она выклинивается. На значительном протяжении разрез интрузии представлен породами трех субфаз, однако в связи со смещением их центров происходит срезание дорудных ийолит-уртитов сначала массивными уртитам (к востоку от Коашвы), а массивных уртитов — пострудными трахитоидными ийолитами (вблизи Ньоркпахка). Срезание ранних производных интрузии более поздними сопровождается образованием зон эруптивных (магматических) брекчий.

На Ньорпахкском месторождении интрузия пострудных ийолитов, цементирующая пластовые тела апатитовых рудных брекчий, залегает в рихсчорритах, простирается на северо-восток  $45-60^\circ$  и погружается на северо-запад с различным наклоном верхнего и нижнего контактов. Вмещающие рихсчорриты рассечены системой апофиз трахитоидных ийолитов и их эндоконтактовых фациальных дифференциатов — малиньитами и луявритами. Вблизи контактов трахитоидные ийолиты и их полевошпатовые аналоги — малиньиты и луявриты образуют цемент эруптивной брекчии с крупноглыбовыми ксенолитами рихсчорритов и апатитовых руд размером от нескольких метров до десятков метров в поперечнике. Такие крупноглыбовые интрузивные брекчии, вне зависимости от состава обломочного и связующего материала, встреченные впервые при изучении Ньорпахкского месторождения, выделены в особый морфологический тип под названием "мегабречия".

Внутренняя расслоенность рудовмещающих ийолит-уртитов, обусловленная трахитоидностью, дробным чередованием прослоев лейко-, мезо- и меланократовых пород (уртитов, ийолитов, мельтейгитов), а также ориентировкой ксенолитов, в целом конформна внешним контактам интрузии. Общее простирание структур на участке северо-восточное, падение центроклиинальное (на северо-запад) под углами  $40-50^\circ$  у контактов с рихсчорритами в пологое, почти горизонтальное, на некотором удалении от них. Вблизи крупных ксенолитов слои течения "приспосабливаются" к их ограничениям и приобретают ламинарную ориентировку.

Апатит-нефелиновые породы совместно с массивными уртитам и брекчирующими трахитоидными ийолитами образуют рудную зону мощностью 280—350 м, простирающуюся на северо-восток  $70^\circ$  с пологим падением на северо-запад под углами  $10-25^\circ$ . В пределах зоны при разведке выявлены четыре залежи — Верхняя, Главная, Средняя и Нижняя пластообразной формы (рис. 14). Между залежами развиты трахитоидные ийолиты в виде серии субпараллельных пластовых интрузий.

Внутреннее строение рудных залежей сложное: ксенолиты в брекчии

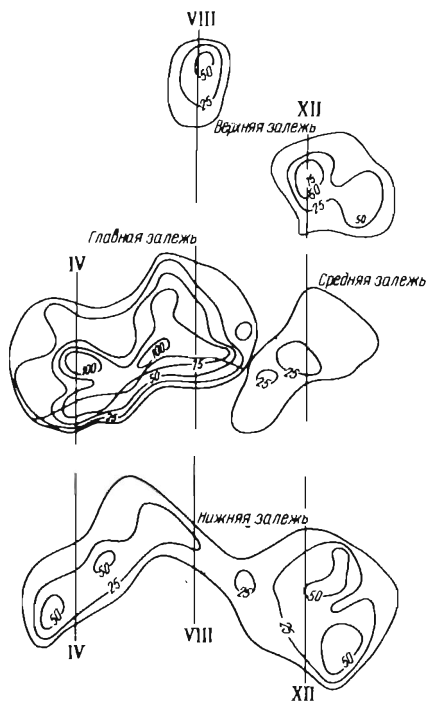


Рис. 14. Изопахиты и взаимное расположение рудных залежей месторождения Ньорпахк

представлены преимущественно апатит-нефелиновыми рудами, апатитовыми уртитамми, а также в подчиненном количестве уртитамми, не содержащими апатитовой минерализации. Концентрация ксенолитов в объеме брекчии неравномерная, участки их скопления часто перемежаются с интервалами с преобладанием ийолитового цемента, в соответствии с чем запасы оцениваются с применением коэффициентов рудоносности. Не выдержана и размерность рудных ксенолитов, величина которых изменяется от 3–5 см до нескольких метров и десятков метров в "мегабрекчиях". Обычно мелкие ксенолиты соседствуют с крупными без видимой закономерности. По статистическим подсчетам, в 70 % случаев встречаются ксенолиты средних размеров (до 3 м), в 20 % – величиной до 10 м и лишь в 10 % – более крупные. Форма их также весьма разнообразна: неправильная с резкими угловатыми контурами, изометричная, линейно-вытянутая, овальная.

Ориентировка полосчатости пород в ксенолитах широко изменяется как по простиранию, так и по углу наклона и, как правило, несогласна по отношению к контактам с цементирующими ийолитами.

Апатит-нефелиновые породы в ксенолитах рудной брекчии представлены рядом природных типов, среди которых по степени убывающей распространенности выделяются (в отн %): полосчатые и лизовидно-полосчатые 22,6, массивные 19,5, блоковые 10,5, пятнистые 7,3, пятнисто-полосчатые 5,7, сетчатые 1,4, а также апатитовые уртиты, блоковые апатитовые уртиты 5,2, уртиты с бедной апатитовой минерализацией 4,9. Цементирующие брекчию трахитоидные ийолиты занимают 10,8 % ее объема, а дайки лампрофиров – тингуаиты, мончикиты, эссексит-диабазы, шонкиниты – 4,5 %.

Минеральный и химический составы наиболее распространенных разновидностей апатит-нефелиновых и прочих пород приведены в табл. 3 и 4.

Апатит-нефелиновые руды, массивные уртиты и вмещающие их трахитоидные ийолиты пересекаются дайками лампрофиров мощностью до 10 м (в среднем 3–5 м). Простирание даек северо-восточное (30–60°) с падением на северо-запад под углами 40–70°. Среди лампрофиров по составу выделяются эссексит-диабазы, мончикиты, тералиты, шонкиниты, щелочные трахиты и тингуаиты. Наиболее поздние образования – натролитовые и эгириновые прожилки – приурочены к трещинам отдельности.

Верхняя залежь обнажается на возвышенностях Ньюоркпахк и Суолуайв, между которыми прослеживается глубокое ущелье. На участке Суолуайв брекчиевые породы Верхней залежи оконтурены на площади 450x500 м и представлены "мегабрекчией", образование которой связано с частичным дроблением первоначально ненарушенного рудного тела в результате тектонических напряжений, сопровождающих интрузию порудных ийолитов. Каждый рудный ксенолит "мегабрекчий" характеризуется автономной внутренней структурой, т. е. сложен монолитной, не раздробленной на отдельные обломки апатит-нефелиновой породой. Жилы трахитоидных ийолитов, разделяющие ксенолиты "мегабрекчии", имеют весьма пологое простирание до 10–30° на северо-запад, в связи с чем контуры рудных выходов на пологом склоне горы в плане характеризуются сложными очертаниями.

Минеральный состав апатит-нефелиновых пород, уртитов и ийолитов (в %) по отдельным пробам

Минералы	Апатит-нефелиновые руды					Породы			
	1 (18)	2 (5)	3 (30)	4 (99)	5 (65)	6 (87)	7 (231)	8 (211)	9 (204)
Апатит	66,02	68,30	50,67	21,17	39,60	32,36	47,47	6,65	3,13
Нефелин	20,32	21,90	34,13	49,19	39,65	37,28	34,07	52,62	46,23
Эгирин	9,44	5,20	7,37	16,89	11,69	17,74	10,06	18,50	33,21
Сфен	1,32	1,30	1,95	2,75	1,98	2,72	1,93	2,91	3,53
Титаномагнетит	0,29	0,60	1,32	0,58	0,56	0,78	0,96	0,68	1,09
Полевой шпат	2,29	2,40	2,79	6,91	5,05	6,36	3,71	14,89	8,29
Прочие	0,32	0,30	1,77	2,51	1,47	2,76	1,80	3,75	3,52
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Примечание. 1. Апатит-нефелиновые руды: 1 – пятнистые; 2 – пятнисто-полосчатые; 3 – линзовидно-полосчатые; 4 – блоковые; 5 – массивные; 6 – брекчиевые; 7 – среднее по типам руд; 8 – массивные уртиты; 9 – трахитоидные ийолиты; II. Здесь и далее в скобках указано число анализов.

Средний химический состав апатит-нефелиновых пород, уртитов и ийолитов (в %) по отдельным пробам

Компоненты	Апатит-нефелиновые руды						Породы		
	1 (5)	2 (1)	3 (14)	4 (2)	5 (6)	6 (214)	7 (213)	8 (210)	9 (201)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	27,28	31,43	21,45	13,44	17,36	11,74	19,23	2,71	1,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	5,59	6,46	11,80	15,48	14,42	14,25	12,25	19,90	16,48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> кр.	4,95	—	11,50	15,34	13,65	12,32	10,96	16,15	14,42
Na <sub>2</sub> O	2,78	1,95	5,66	8,12	6,85	7,51	5,88	9,44	10,10
K <sub>2</sub> O	2,54	1,38	2,74	5,12	3,30	3,88	3,05	6,52	4,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,98	1,35	4,15	5,41	3,22	6,33	4,14	6,50	9,12
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,76	2,04	0,50	0,16	0,44	0,32	0,50	0,12	0,08
RO	2,54	—	1,33	1,30	1,45	1,06	1,39	0,51	0,31
F	2,27	2,30	1,74	1,05	1,45	1,01	1,27	0,42	0,15
RO <sub>2</sub>	1,13	0,33	1,19	1,88	1,15	2,03	1,38	2,26	2,95
SiO <sub>2</sub>	15,00	8,21	20,59	28,65	28,49	30,75	23,01	42,39	43,45

Примечание. 1. Номера анализов соответствуют обозначениям табл. 3. 2. Анализ 2 (пятнисто-полосчатые породы) из работы Т.Н. Ивановой [17].

Сравнительная характеристика рудных залежей

Показатели	Единицы измерения	Верхняя	Главная	Средняя	Нижняя
Средняя мощность балансовых руд	м	28,0	50,8	16,3	26,9
Коэффициент рудоносности	м/м	0,90	0,88	0,92	0,93
Среднее содержание $P_2O_5$	%	15,2	13,2	13,1	15,0
Коэффициент вариации мощности	%	85,0	65,9	79,3	15,9
Коэффициент вариации содержания $P_2O_5$	%	23,4	19,9	31,1	32,0
Распределение запасов	отн. %	6,1	52,8	4,5	36,6

На участке Ньюкпахк такая же "мегабрекчия" локализуется лишь в центральной части залежи, а по направлению к краевым зонам постепенной сменяется брекчией обычного типа.

В составе Верхней залежи преобладают (в отн. %): линзовидно-полосчатые породы 38,4, менее распространены массивные 15,2, блоковые 8,9, полосчатые 6,9 и пятнистые 3,6 породы, апатитовые и блоковые уртиты 8,8 и 8,9, а цементирующие ийолиты и дайковые породы составляют 15,9 % от объема брекчии.

Главная залежь выявлена на участке Ньюкпахк и прослежена по простиранию на 2,2 км при ширине в плане от 700 м на флангах до 500 м в центральной части, где отмечается пережим. Наибольшая мощность залежи у поверхности 100-130 м. Брекчиевые породы Главной залежи обнажаются на крутом юго-восточном склоне Ньюкпахка, а у подножья горы перекрыты слоем делювия мощностью до 5-15 м. Породы в ксенолитах представлены (в отн. %): массивными 20,3, линзовидно-полосчатыми 19,5, блоковыми 12,4, пятнистыми 6,2, полосчатыми 5,6 и сетчатыми 1,7 текстурными типами, блоковыми 10,4 и апатитовыми 7,6 уртитами; разубоживающие ийолиты и жильные породы составляют 9,3 и 7 % от объема рудной брекчии.

Главная залежь характеризуется клиновидной формой с плавным уменьшением мощности по простиранию и по падению: угол наклона верхнего контакта 20-30° более крутой, чем нижнего 10-20° (табл. 5).

Из анализа данных табл. 5 следует, что изменчивость мощности увеличивается от Нижней залежи к Верхней, представленной "мегабрекчией", а содержания  $P_2O_5$ , наоборот, — от Верхней к Нижней залежи.

Средняя залежь целиком размещается на площади Суолуайвского участка и в структурном отношении, по условиям локализации в разрезе рудной зоны, по гипсометрическому положению является аналогом Главной залежи Ньюкпахкского участка. Среднюю залежь можно рассматривать как часть Главной залежи, что подтверждается также соизмеримой распространенностью природных типов руд в объеме апатитовой брекчии, образующей обе залежи, кроме того, проекции их контуров на плане не перекрывают, а дополняют друг друга.



Средний минеральный и химический составы ( $\bar{x}$ ) и степень их изменчивости ( $v$  — коэффициент вариации) апатит-нефелиновых руд по Верхней, Главной, Средней и Нижней залежам определены с использованием результатов 369 групповых проб (табл. 6).

Размеры Средней залежи невелики. Она прослежена по простиранию на северо-восток  $50-70^\circ$  на 800 м при ширине 300—500 м. Падение ее контактов на северо-запад под углом  $20-25^\circ$ . Наибольшая мощность залежи в центральной части 35—45 м; в сторону флангов, по падению и по восставанию мощность залежи уменьшается постепенно.

Нижняя рудная залежь протягивается на 1,8 км по всей длине месторождения при изменчивой ширине в плане: на площади Ньоркпахкского и Суолуайвского участков ее размеры значительны (до 700—1000 м в поперечнике), тогда как в центральной части наблюдается резкое сужение границ до 300 м. Простирание залежи северо-восточное  $65^\circ$ , падение пологое  $10-15^\circ$  на северо-запад. В районе Ньоркпахка установлено соединение брекчиевых руд Нижней и Главной залежей в более мощное рудное тело, выходящее на дневную поверхность. Раздувы мощностей залежи на участках Ньоркпахк до 55—60 м и Суолуайв до 65 м по направлению к краевым частям постепенно сменяются пережимами и зонами выклинивания.

В составе апатитовой брекчии статистически подсчитаны ксенолиты (в отн. %): линзовидно-полосчатых 19,7, массивных 19,3, блоковых 10,8, полосчатых 8,7, пятнистых и пятнисто-полосчатых пород 6,8, апатитовых блоковых 6,1 и массивных 7,5 уртитов, сетчатых пород 1,3, уртитов с апатитовой минерализацией 4,3 и породы цемента брекчии — трахитоидные ийолиты 11,4, лампрофиры 4,3.

Завершая краткий обзор геологического строения Ньоркпахкского месторождения, следует подчеркнуть некоторые общие признаки, характеризующие рудные залежи.

1. Все рудные залежи размещаются внутри интрузии пострудных ийолит-уртитов, которые рассекают их жилами и брекчируют.

2. Форма рудных тел пластообразная, усложненная раздувами и пережимами мощности, она зависит и целиком определяется структурой вмещающих ийолитов.

3. Внутреннее строение залежей сложное: оруденение представлено брекчией различных типов апатит-нефелиновых пород, цементирующим материалом являются пострудные ийолиты, рудная брекчия пересекается системой даек лампрофиров.

4. Рудные ксенолиты в брекчии сложены обычными для хибинских месторождений природными типами руд, среди которых в пределах Ньоркпахкской рудной зоны преобладают массивные и блоковые руды, апатитовые уртиты, крайне незначительно представлены сетчатые руды и полностью отсутствуют сфен-apatитовые руды, очень типичные для других месторождений.

Формирование апатит-нефелиновой зоны Ньоркпахкского месторождения тесно связано с механизмом становления многофазной интрузии ийолит-уртитов, частью которой она является. Многократные внедрения во вмещающие рихсчорриты разновозрастных ийолит-уртитов и даек лампро-

Средние минеральный и химический составы (в %)

Минералы и компоненты	Залежи								Всего по месторождению (369)	
	Верхняя (48)		Главная (151)		Средняя (26)		Нижняя (144)			
	<i>Средний минеральный состав</i>									
Апатит	36,89	48	34,56	48	33,76	46	39,32	45	36,66	47
Нефелин	40,94	31	39,33	28	43,43	22	35,85	35	38,47	31
Эгирин	13,18	61	14,95	47	14,71	50	13,92	49	14,30	50
Сфен	2,11	45	2,39	56	1,93	59	2,86	54	2,31	54
Титаномагнетит	0,97	133	0,87	153	1,24	99	1,03	104	0,97	126
Полевой шпат	4,02	89	5,50	91	3,15	66	4,88	81	4,90	88
	<i>Средний химический состав</i>									
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15,06	48	14,10	48	13,78	46	16,05	45	14,96	47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	14,13	31	13,76	27	14,95	22	12,85	31	13,54	29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> кр	13,19	31	12,53	30	14,22	23	11,62	35	12,38	32
TiO <sub>2</sub>	1,63	55	1,85	46	1,52	34	1,75	47	1,76	47
SiO <sub>2</sub>	27,58	31	28,80	26	29,14	25	26,37	31	27,72	29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,93	48	5,64	39	5,48	33	5,30	39	5,40	40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,38	45	0,37	46	0,38	37	0,43	44	0,40	45
RO	1,14	31	1,11	38	1,24	34	1,29	43	1,19	40
F	1,13	43	1,13	44	1,13	40	1,27	42	1,19	43
Na <sub>2</sub> O	6,99	33	7,05	32	7,48	26	6,55	35	6,88	33
K <sub>2</sub> O	3,53	36	3,64	33	4,00	36	3,46	40	3,58	37

фигов свидетельствует о сопряженности этапов магматизма и разрывной тектоники, обуславливает широкое развитие магматических брекчий и многоярусность оруденения.

Геологическое строение апатит-нефелиновых зон Ньюкпахкского и Коашвинского месторождений во многом аналогично: в обоих случаях рудные залежи (горизонты) локализуются внутри толщи более поздних по отношению ко времени рудообразования ийолитов (уртитов), которые их брекчируют; и на Ньюкпахке, и на Коашве рудные тела характеризуются изменчивой морфологией, сложным внутренним строением, сходными условиями залегания, общностью и соизмеримой распространенностью природных типов руд. Вместе с тем, геологическое положение рудных зон на этих месторождениях по отношению к уровню разреза продуктивной интрузии резко различно: на Коашве рудные горизонты залегают внутри толщи массивных уртитов, т. е. занимают в полном разрезе интрузии ее среднюю часть; на Ньюкпахке залежи апатитовой брекчии размещаются среди пострудных ийолитов и приурочены к верхней части разреза. Весьма существенное различие — масштабы брекчиевого оруденения: на Коашве оно локализуется вблизи контактов рудных горизонтов, а на Ньюкпахке все залежи целиком сложены апатитовой брекчией. Следует подчеркнуть полное отсутствие в Ньюкпахкской рудной зоне сфен-апатитовых руд, которые на других месторождениях залегают в кровле рудных тел. Концентрация сфена и титаномагнетита в зоне верхнего контакта апатитовых залежей рассматривается как следствие гравитационной дифференциации интрузии покрывающих ийолит-уртитов [20]. На месторождении Ньюкпахк в связи с повсеместным развитием рудной брекчии создавались стесненные условия кристаллизации, препятствующие гравитационному фракционированию титаноносных минералов и их осаждению в нижней части интрузивной камеры.

С учетом изложенного, последовательность процессов формирования апатит-нефелиновой зоны Ньюкпахкского месторождения представляется в таком виде.

1. Заложение во вмещающих рихсчорритах конического разлома под воздействием давления со стороны магматического очага.

2. Внедрение по разлому фосфатно-силикатного расплава, сопровождающееся его расслоением и кристаллизацией с образованием прослоев апатит-нефелиновых руд и массивных уртитов. Переслаивание руд и уртитов в полосчатых ассоциациях, отсутствие между ними секущих контактов свидетельствует об их совместной и одновременной кристаллизации.

3. Развитие в консолидированной апатит-уртитовой зоне и в рихсчорритах сложноконического разлома в результате продолжающейся активности магматического очага.

4. Внедрение по сложноконическому разлому пострудного ийолит-уртитового расплава, приведшее к дроблению и послыжному брекчированию как апатит-нефелиновых руд, так и массивных уртитов, их концентрации в рудные залежи.

Сложноконический разлом затронул в основном центральную, или осевую, часть продуктивной зоны, что привело к наиболее интенсивному

дроблению апатит-нефелиновых руд и уртитов, перемешиванию их обломков, образованию "сухой брекчии" и, следовательно, вызвало усреднение состава брекчии. На удалении от разлома проявились определяющие трещины, поступление по которым малых порций ийолитового расплава явилось причиной образования крупноглыбовых рудных "мегабрекчий".

5. Внедрение даек лампрофиров по системе крутонаклонных конических расколов завершило формирование и стабилизацию геологической структуры рудной зоны. Образование гидротермальных цеолит-эгириновых жил происходило на фоне уже консолидированных структур и не отразилось на морфологии рудных залежей.

В процессе детальной разведки всесторонне исследованы технологические показатели комплексной обогатимости брекчиевых руд и вмещающих пород с получением апатитового, нефелинового, сфенового, титаномагнетитового и эгиринового концентратов на свежей и оборотной воде в лабораториях Кольского филиала АН СССР и объединения "Апатит". Результаты испытаний технологических проб массой до 12 т с содержанием  $P_2O_5$  от 3 до 19 % показали, что по схеме флотации, применяемой на действующих обогатительных фабриках, из руд Ньоркпахкского месторождения получают кондиционные апатитовый и нефелиновый концентраты с извлечением 93–97 % P и 64–78 % Al. Из пенного продукта нефелиновой флотации после его обесшламливания и отмывки реагентов по флотационно-магнитной схеме получены сфеновый, титаномагнетитовый и эгириновый концентраты. Качество титаносодержащих концентратов обеспечивает возможность их переработки на чугуны, пигментную двуокись титана, титанокальциевые пигменты и наполнители.

Проба вмещающих ийолит-уртитов изучалась в институте "Механобр" по схеме сухой и мокрой магнитной сепарации, флотационной и магнитной схемам. Испытаниями установлена пригодность пород вскрыши для выработки кондиционных продуктов — нефелина, сфена и эгирина, что создает условия для внедрения в производство безотходной технологии обогащения руд и пород.

В короткий срок разработана и практически подтверждена схема извлечения попутных полезных компонентов при производстве нитрофоски из апатитового концентрата Ньоркпахкского месторождения (К.Д. Беляев, Д.А. Минеев, С.Д. Моисеев и др.).

Горно-геологические условия разработки оцениваются как благоприятные: около 2/3 всех запасов могут быть отработаны открытым способом при коэффициенте вскрыши не более 3 м<sup>3</sup>/м; газоопасные проявления, осложняющие ведение добычи на других месторождениях Хибин, на Ньоркпахке не установлены. При вскрытии месторождения необходимо соблюдение мероприятий по предупреждению снежных лавин.

По заключению ГКЗ СССР, коллективом геологов Хибиногорской ГРП в содружестве со специалистами институтов ИМГРЭ, МГРИ, ГИГХС, "Механобр", Кольского филиала АН СССР в короткий срок проведена большая работа по выявлению, разведке и подготовке к промышленному освоению в экономически развитом районе Ньоркпахкского месторождения комплексных апатит-нефелиновых руд. Заслугой геологов является

обоснование постановки и проведения разведочных работ на этом месторождении, считавшемся ранее непромышленным. Решением коллегии Мингео СССР в соответствии со статьей 20 "Основ законодательства Союза ССР и союзных республик о недрах" за научное обоснование направления и методики геологоразведочных работ, в результате которых выявлены дополнительные запасы полезных ископаемых, выявлены и утверждены запасы редкометалльных попутных компонентов и фтора, существенно увеличивающие промышленную ценность известного ранее месторождения, К.Д. Беляеву, Е.А. Каменеву и Д.А. Минееву присуждено звание первооткрывателей Ньоркпахкского месторождения.

### ЭВЕСЛОГЧОРРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

В обширной геологической литературе о Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях Эвеслогчоррское месторождение не упоминается. Вместе с тем, за продолжительное время после его открытия на этом месторождении выполнен большой объем геологоразведочных работ, с достаточной полнотой и достоверностью изучено геологическое строение, морфология и структура апатитовой залежи, исследован вещественный состав горных пород и руд, их технологические свойства, оценены сырьевые ресурсы, определены сроки его вовлечения в эксплуатацию.

Месторождение расположено в верховье р. Вуоннемиок и ручья Бурового, к югу от хребта Эвеслогчорр. Основаниями для постановки глубокого структурно-поискового бурения, приведшего к открытию месторождения, послужили благоприятные геологические предпосылки, вытекающие из установленной Ф.В. Минаковым генетической связи апатитового оруденения с массовыми уртитам, а также рекомендации Г.Н. Шаблинского по проверке природы интенсивной положительной аномалии силы тяжести, выявленной на этом участке. В 1968 г. на участке Эвеслогчорр было организовано бурение глубоких структурно-поисковых скважин (Е.А. Каменев). Залежи сфен-apatитовых и апатит-нефелиновых руд общей мощностью более 100 м и была вскрыта на глубине 1 км первой из пробуренных на этом участке скважин.

Апатитовая залежь Эвеслогчоррского месторождения, подобно другим месторождениям Хибин, локализуется в кровле толщи массивных уртитов рудной субфазы продуктивного комплекса, с которым руды связаны генетически (рис. 15). Эта общность подчеркивается также рядом других определяющих особенностей геологического строения и состава рудных тел: их пластовой формой, закономерной приуроченностью сфеновых руд к кровле залежи, одинаковым набором природных типов руд, характером их взаимоотношений как между собой, так и с вмещающими породами. Более того, апатитовая залежь на Эвеслогчорре через зону пережимов пространственно и геологически связана с рудными телами месторождений юго-западного рудного поля, являясь их продолжением по падению. По простиранию Эвеслогчоррское и Коашвинское месторождения сопряжены через узкую зону сфеновых руд.

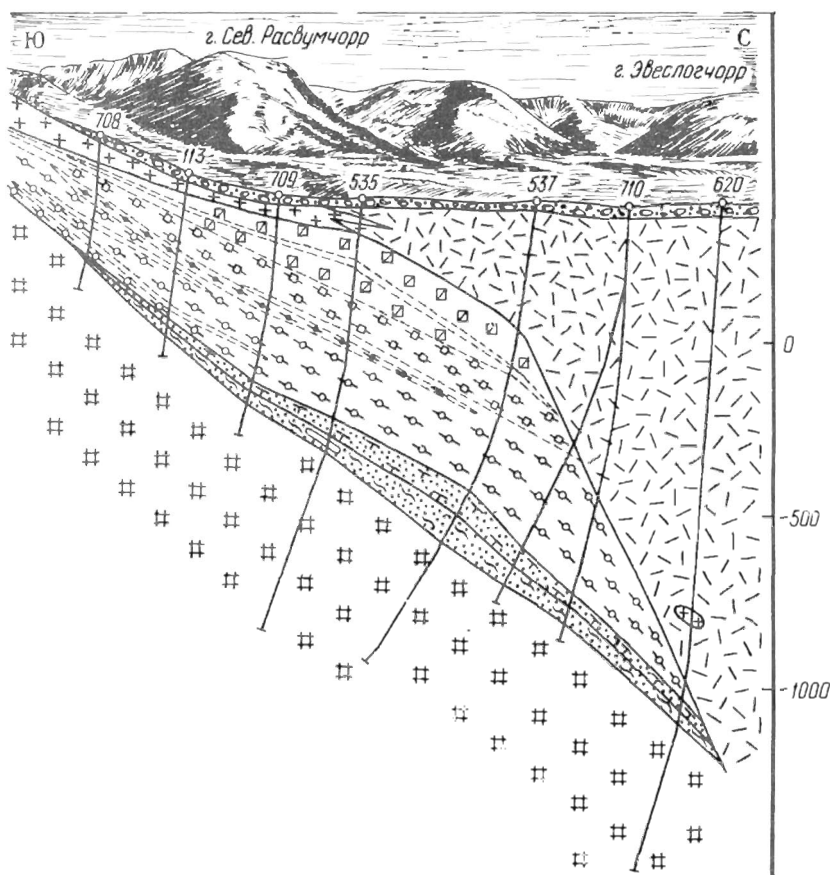


Рис. 15. Геологический разрез через месторождения Эвслогчорр. См. условные обозначения к рис. 3

К отличительным особенностям Эвслогчоррского месторождения относятся "скрытый" характер локализации оруденения и отсутствие внутрирудных апатитовых брекчий, а также подстилающих дорудных ийолитуртитов. Продуктивный комплекс представлен пострудными (покрывающими) трахитоидными луввритами, малиньитами, урритами, ийолитами и мельтейгитами и производными рудной субфазы – сфен-апатитовыми и апатит-нефелиновыми рудами, апатитовыми урритами, массивными урритами. Вмещающими породами для ийолит-уртитов являются ричесорриты и ювиты, которые "срезаются" вместе с апатитовой залежью покрывающими и подстилающими толщами по падению крутопадающей интрузией льявочорритов.

Общее простирание структур широтное, падение на север под разным

наклоном: от пологого и умеренного (ййолит-уртиты, апатитовые руды) до крутого, почти вертикального (лявочорриты).

Наиболее ранние по времени образования породы — рисчорриты на участке Эвслогчорр широко распространены на поверхности, но весьма ограниченно развиты на глубину: вертикальная мощность рисчорритов, в зависимости от уровня эрозии, изменяется от 100 м (в долинном ярусе рельефа) до 500 м (от вершины горы Северный Расвумчорр).

Рисчорриты — лейкократовая массивная неоднородная по зернистости полевошпат-нефелин-эгириновая порода с постоянной примесью эвдиалита, сфена, лампро- и астрофиллита, титаномагнетита, пектолита и мурманита, в которой нефелин и, отчасти, цветные минералы образуют пойкилитовые вростки и микропегматитовые сростания в полевом шпате. В этой породе содержится полевого шпата 47,9–52,4 %, нефелина 29,6–36,9 %, эгирина 11,2–12,4 %. Микроструктура рисчорритов пойкилитовая с элементами дактилоскопической (микропегматитовой, графической). Вростки нефелина гексагональной, клиновидной формы включают микролиты эгирина, сфена, апатита. Вторичные изменения в рисчоррите проявлены незначительно: пелитизация полевого шпата и развитие альбита (на контакте с лявочорритами), локальная шпрейуштензация нефелина.

Продуктивный комплекс на Эвслогчорре представлен производными рудной и пострудной субфаз. К рудной субфазе относятся сфен-apatитовые, апатит-нефелиновые руды и массивные уртиты, взаимосвязанные между собой промежуточными по составу разновидностями, переходными зонами и послойными ассоциациями. Сфеновые и апатитовые руды вместе с апатитовыми уртитам на Эвслогчорре образуют пластовую рудную залежь, которая через зону пережимов связана по простиранию с месторождениями Коашва и Апатитовый цирк, а по восстанию — с плато Расвумчорр. Таким образом, Эвслогчоррское месторождение — часть единой "apatитовой дуги", включающей шесть месторождений: Кукисвумчорр, Юкспор, Апатитовый цирк, плато Расвумчорр, Эвслогчорр и Коашва.

В этой цепи месторождений Эвслогчоррская залежь наиболее глубинная: ее апикальная часть не поднимается выше нулевой отметки, а нижний контур достигает глубины 1,5 км от поверхности. Проекция рудной залежи в плане имеет овальные очертания, в продольном и поперечном сечениях залежь подобна уплощенной линзе с соотношением высоты (мощности) к длине (ширине) не более 1:20 — 1:25, усложненной раздувами-пережимами. Максимальная мощность ее в центральной части превышает 100 м; в направлении от центра к краям линзы мощность залежи уменьшается до первых метров. Простирание рудной залежи широтное ( $90 \pm 10^\circ$ ), падение на север под углами от  $25-30^\circ$  (в верхней части),  $35-40^\circ$  (в центральной части линзы) до  $45-50^\circ$  (на больших глубинах). Изменения простирания, углов падения и мощности от участка к участку плавные, без заметных перепадов.

Апатит-нефелиновые породы Эвслогчоррской залежи представлены следующими природными типами (в порядке убывающей распространенности, в отн. %): апатитовыми уртитам и массивными апатит-нефели-

новыми породами 36,5, сфен-апатитовыми 27,7, полосчатыми и линзовидно-полосчатыми 16,8, пятнистыми и пятнисто-полосчатыми 5,9, сетчатыми 3,3, блоковыми 1,2, составляющими 91,4 % от объема залежи; остальная часть приходится на долю внутрирудных пород — уртитов, ийолитов, даек лампрофиров. Преобладание относительно бедных массивных апатит-нефелиновых, сфен-апатитовых руд и массивных уртитов присуще глубинным частям всех рудных пород залежей Хибинской группы. Это явление, по-видимому, — отражение промежуточной стадии процесса дифференциации исходного расплава на существенно апатитовой (руды) и существенно нефелиновой (уртиты) частях, наиболее контрастно представленного на высоких гипсометрических уровнях.

Сфен-апатитовые породы приурочены исключительно к кровле залежи; ниже по разрезу развиты массивные уртиты с апатитовой минерализацией; пятнистые и пятнисто-полосчатые породы размещаются в центральной (осевой) части залежи и далее сменяются полосчатыми, линзовидно-полосчатыми рудами, содержащими прослой блоковых пород; массивные породы, апатитовые уртиты и уртиты с апатитовой минерализацией тяготеют к подошве залежи (рис. 16). Такая же упорядоченная смена природных типов пород свойственна месторождениям юго-западного рудного поля. Отличие заключается в том, что на Эвслогчорре значительно шире развиты внутрирудные уртиты, полностью отсутствуют апатитовые брекчии и сетчатые породы.

Естественные границы между рудами и вмещающими ийолитами (со стороны кровли) и уртитам (со стороны подошвы) отсутствуют, поэтому средний минеральный и химический составы балансовых руд существенно зависят от бортового содержания  $P_2O_5$ , определяемого условиями.

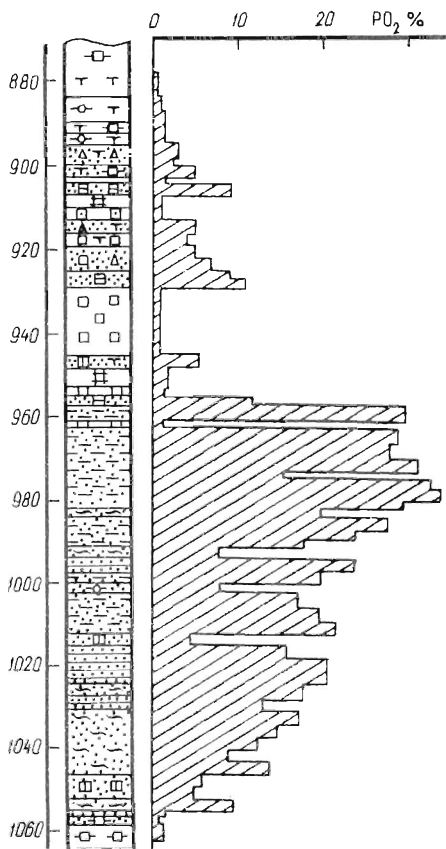


Рис. 16. Распределение фосфора в вертикальном разрезе рудной залежи месторождения Эвслогчорр. См. условные обозначения к рис. 3



Средний минеральный и химический состав апатит-нефелиновых и сфен-apatитовых пород отдельных проб (в %)

Минералы, компоненты	Бортовое содержание $P_2O_5$				Классы содержаний $P_2O_5$			
	8	6	4	2	8-6	6-4	4-2	Менее 2
Апатит	42,75	36,70	32,95	28,75	17,30	12,27	7,54	3,79
Нефелин	37,45	38,35	39,36	40,75	37,41	43,03	48,26	53,16
Эгирин	9,86	12,25	13,41	13,82	17,66	18,84	16,06	23,78
Сфен	6,20	8,19	9,23	10,70	12,90	14,23	18,34	15,46
Титаномагнетит	2,87	3,55	3,92	4,64	5,12	5,65	3,11	0,87
Полевой шпат	0,87	0,96	1,13	1,34	1,15	1,94	2,46	2,96
$P_2O_5$	16,94	13,57	12,15	10,71	6,91	5,01	2,98	1,14
$Al_2O_3$ общ	13,15	13,78	13,93	14,50	14,79	12,35	17,95	19,18
$Al_2O_3$ кр	12,35	12,82	12,97	13,39	13,50	12,08	16,12	16,38
$TiO_2$	3,03	4,00	4,51	4,77	6,76	8,43	6,72	2,85
$R_2O_3$	0,38	0,33	0,31	0,28	0,23	0,25	0,13	0,07
RO	1,41	1,21	1,13	1,03	0,87	0,80	0,49	0,31
$V_2O_5$	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09
CaO	32,29	27,04	24,79	22,51	16,55	13,27	9,94	8,98
$Na_2O$	6,26	6,42	6,68	7,08	6,57	7,68	9,30	10,21
$K_2O$	2,69	2,83	2,94	3,15	3,55	2,93	4,16	5,49
F	1,59	1,45	1,33	1,22	0,82	0,68	0,47	0,31

Средний минеральный состав природных типов породы (в %)

Минералы	1	2	3	4	5	6	7	8
Апатит	11,41	75,39	39,13	26,42	56,27	12,46	2,70	4,26
Нефелин	25,14	15,19	46,19	48,13	29,73	54,20	60,61	53,94
Эгирин	13,41	3,40	7,83	14,64	6,97	16,10	19,58	16,64
Сфен	37,81	2,71	3,49	5,38	3,87	6,70	9,59	18,89
Титаномагнетит	7,45	0,47	1,55	2,96	0,73	0,17	2,21	3,04
Полевой шпат	1,53	0,46	0,41	0,75	0,93	5,92	2,40	0,98
Лепидомелан	0,28	0,51	1,11	1,45	0,66	0,43	1,97	—
Прочие	1,97	1,42	0,22	0,01	0,58	3,65	0,47	1,65
Сумма	99,00	99,55	99,93	99,75	99,74	99,63	99,53	99,40

Примечание. 1 — сфен-апатитовая порода (5 анализов, интервал 35,35 м) апатит-нефелиновые породы; 2 — пятнистые и пятнисто-полосчатые (4 анализа, 21,4 м); 3 — линзовидно-полосчатые (5 анализов, 51,5 м); 4 — сетчатые (2 анализа, 10,5 м); 5 — массивные (8 анализов, 59,6 м); 6 — апатитовый уртит (3 анализа, 7,6 м); 7 — уртит массивный (10 анализов, 84,7 м); 8 — уртит блоковый с вкрапленностью апатита (1 анализ, 6,2 м).

Поскольку постоянные кондиции для месторождения еще не установлены, целесообразно проанализировать динамику изменения минерального и химического (табл. 7) составов апатит-нефелиновых пород, соответствующих различному уровню бортового содержания  $P_2O_5$ .

Определение минерального состава производилось по группе рядовых проб, представляющих, как правило, руды различных текстурных разновидностей, что неизбежно приводило к их усреднению. Из большого числа групповых проб смешанного состава выбраны те пробы, которые характеризуются однородным составом, т. е. относятся к определенному природному типу руд (табл. 8).

Между всеми разновидностями сфен-апатитовых, апатит-нефелиновых руд и массивных уртитов отсутствуют резкие границы или интрузивные контакты, что свидетельствует об их сингенетичности и об отсутствии внутрирудных тектонических нарушений. Не установлено также секущих контактов между рудами и вмещающими породами со стороны кровли и подошвы. Среди массивных уртитов, подстилающих рудную залежь, выявлены уртиты с неотчетливой трахитоидностью, обусловленной ориентировкой кристаллов эгирина. Эти уртиты, связанные постепенными переходами с окружающими массивными уртитам, образуют линзовидные тела протяженностью 200—300 м при мощности 10—30 м, залегающие согласно с общей структурой вмещающих пород. Уртиты с неотчетливой трахитоидностью по составу идентичны дорудным трахитоидным уртитам, которые на соседнем Коашвинском месторождении залегают в основании рудной зоны или в виде "отгорженцев" среди массивных уртитов между рудными горизонтами. Однако на Коашве дорудные трахитоидные уртиты в апикальной части месторождения брекчируются массивными уртитам, в средней — имеют с ними сложные неоднозначные возрастные взаимо-

отношения, а в глубинной, так же как и на Эвеслогчорре, связаны постепенными переходами или переслаиваются в полосчатых ассоциациях.

Наблюдаемые взаимоотношения между уртами дорудной и рудной субфаз позволяют выдвинуть предположение о том, что выделение в схеме формирования ийолит-уртитового комплекса трех интрузивных субфаз условное: в зависимости от гипсометрического положения исследуемого объекта можно непрерывно проследить изменения характера контактовых взаимоотношений между породами разного возраста. В приповерхностных частях массива контакты между породами разных интрузивных субфаз резкие, секущие, что является следствием длительного перерыва во времени их внедрения и кристаллизации. На средних глубинах интрузивный характер контактовых взаимоотношений проявляется менее отчетливо, наряду с зонами брекчирования имеют место зоны постепенных переходов между породами, их переслаивание. Эти изменения отражают результат последовательного сокращения временного интервала между внедрением и консолидацией производных разных интрузивных циклов (субфаз). Наконец, на глубоких горизонтах границ между различными петрографическими фациями и разновидностями руд становятся неотчетливыми, характеризуются постепенными переходами, что свидетельствует о близкосодейственной их кристаллизации в одинаковых термодинамических условиях.

Технологические показатели комплексной обогатимости сфен-апатитовых руд, апатит-нефелиновых руд и подстилающих апатитовых уртитов Эвеслогчоррского месторождения исследованы в лаборатории объединения "Апатит". В качестве собирателя при флотации апатита применялась омыленная смесь жирнокислотных технических продуктов (35 % сырого и 15 % дистиллированного таллового масел, 25 % технически жирных кислот, 20 % вторичного гудрона, 5 % окисленного петролатума). Нефелиновый концентрат получался при обратной флотации мылом сырого таллового масла при pH 11,5, создаваемом каустической содой. Переработка пенного продукта нефелиновой флотации всех проб руды, содержащего в большом количестве сфен, эгирин и титаномагнетит, осуществлялась по комбинированной флотационно-магнитной схеме с предварительным обесшламливанием пульпы. Флотация темноцветных минералов проводилась омыленной смесью дистиллированного таллового масла, вторичного масляного гудрона и реагента Т-66 в соотношении 1:5:1. В качестве депрессора нефелина полевого шпата, вторичных минералов и апатита использовался гексаметафосфат натрия. Коллективный темноцветный концентрат после сушки подвергался магнитной сепарации в слабо- и сильномагнитном полях для выделения титаномагнетитового, эгиринового и сфенового концентратов.

Результаты технологических испытаний показали, что руды Эвеслогчоррского месторождения эффективно обогащаются по флотационным схемам и режимам, применяемым на действующих фабриках объединения "Апатит".

## МЕСТОРОЖДЕНИЕ ОЛЕНИЙ РУЧЕЙ

Геологическое строение и рудные перспективы крайнего юго-восточного фланга продуктивной зоны до последнего времени оставались слабо изученными. Это объяснялось не столько удаленностью участка от известных рудных объектов, сколько широким развитием здесь ийолитовых пород, к тому же почти полностью перекрытых четвертичными отложениями.

Участок Олений ручей, в пределах которого в процессе структурно-поискового бурения в 1975 г. было открыто апатитовое месторождение того же названия, расположено в долине ручья Минерального и Оленьего на склонах возвышенностей Коашкар, Ньоркпахк и Суолуайв. В 1953–1954 гг. геолог А.И. Александров по результатам рекогносцировочного обследования территории рекомендовал провести горно-буровые работы по сети 200x200 м. Позднее на этом участке Хибиногорской геологоразведочной партией (Ф.В. Минаков, А.И. Александров, А.И. Коновалова и др.) выполнялись детальные поисково-съемочные работы с использованием поверхностных горных выработок и картировочных скважин на закрытых площадях. Летом 1961 г. в русле ручья Минерального и на северном склоне горы Суолуайв были обнаружены коренные выходы блоковых апатит-нефелиновых пород, апатитовых уртитов и рудной брекчии с ийолитовым цементом. В 1,5 км к северо-востоку от этих рудных выходов, на южном склоне горы Коашкар, полностью перекрытом мореной, в нескольких шурфах были вскрыты бедные блоковые апатитовые породы, что позволило сделать Ф.В. Минакову в 1964 г. вывод о принадлежности их к единой рудной зоне, связанной с блоковыми уртитам.

В 1961 г. Е.А. Каменев на горе Коашкар, в верховьях Оленьего ручья выявил апатитовое оруденение, приуроченное к ювитам в зоне их контакта с фойяитами. Полоса прожилково-вкрапленного оруденения мощностью 9 м с содержанием  $P_2O_5$  14,4 %, прослеженная по простиранию на 40 м, круто, под углом 60–65°, наклонена в сторону от центра массива.

В 1975 г. на участке Олений ручей с целью установления масштабов развития и условий залегания апатитового оруденения, выявленного Ф.В. Минаковым и Е.А. Каменевым, было начато структурно-поисковое бурение. Двумя скважинами в ювитах была прослежена зона апатитовой минерализации с крутым (75°) падением к юго-востоку, т. е. в направлении, противоположном общему залеганию геологических структур в данном районе массива. Скважина, пробуренная в центре участка, пересекала до десяти прослоев апатит-нефелиновых пород промышленного характера (массивные, блоковые, пятнисто-поясчатые и линзовидно-полосчатые разновидности) общей мощностью 116,5 м и средним содержанием  $P_2O_5$  до 15 %. Условия локализации в геологической структуре, преимущественное развитие в зоне массивных уртитов, ассоциирующих с апатит-нефелиновыми породами, при подчиненной роли инъецирующих их трахитоидных ийолитов — эти благоприятные признаки уже на поисковой стадии позволяли оценивать месторождение Олений ручей как весьма перспективное.

Современные представления о геологическом строении месторождения, морфологии зоны, внутренней структуре апатитовых залежей, качественной характеристике и технологических свойствах апатит-нефелиновых пород основываются на обширном фактическом материале выполненных поисково-оценочных, предварительных геологоразведочных работ и непрерывно пополняются в процессе проводимой в настоящее время детальной разведки. Месторождение Олений ручей крайнее в ряду промышленных объектов юго-восточного рудного поля: в геологическом отношении оно приурочено к зоне выклинивания продуктивного комплекса ийолит-уртитов, которые представлены здесь производными рудной и пострудной субфаз. Вмещающие породы – трахитоидные хибиниты и массивные рисчорриты, развитые с внешней стороны и подстилающие интрузию ийолит-уртитов, а также тектонизированные рисчорриты и фойяиты, залегающие со стороны внутреннего контакта и перекрывающие рудную зону. Верхний и нижний контакты интрузии ийолит-уртитов, вмещающей рудную зону месторождения, под круглыми углами наклонены на северо-запад, т. е. к центру массива, причем крутизна контактов на коротком интервале длиной 3 км винтообразно увеличивается от 30–40 до 60–70° в зоне выклинивания интрузии на горе Коашкар.

Рудная зона почти на всем протяжении перекрыта сплошным чехлом четвертичных отложений: непосредственному наблюдению доступны лишь редкие рудные выходы в русле ручьев Олений и Минеральный. Вместе с тем, густая сеть поисковых и разведочных скважин обеспечивает достаточно полную информацию о геологическом строении не только приповерхностных, но и глубинных горизонтов месторождения (рис. 17).

Рудная зона мощностью до 1 км и длиной до 3 км имеет очень сложное, многоярусное строение. В разрезе продуктивной зоны наблюдается упорядоченное чередование пород пострудной и рудной субфаз (трахитоидных уртит-ийолит-мельтейгитов, массивных уртитов, апатит-нефелиновых пород) и вмещающих хибинитов и рисчорритов, пересеченных дайками лампрофиров. Сложность внутреннего строения продуктивной зоны усугубляется широко и интенсивно проявленными процессами катаклаза, милонитизации, рассланцевания, будинажа и брекчирования, связанными с близостью Эвеслогчоррской зоны смятия.

Наиболее ранние по возрасту хибиниты и рисчорриты в структуре продуктивной зоны образуют серию линзовидных отторженцев размером по простиранию до сотен метров, по падению до десятков – сотен метров, по мощности до 20–30 м. Эти отторженцы вмещающих пород встречаются на различных уровнях разреза рудной зоны, преимущественно в ее средней и нижней частях, и в целом залегают согласно структуре окружающих руд и ийолит-уртитов. В зонах катаклаза и милонитизации хибиниты и рисчорриты изменены настолько интенсивно, что по вмещающему облику диагностируются неуверенно и с трудом различаются между собой. Измененные рисчорриты и хибиниты представляют собой тектониты, состоящие их перекристаллизованного микроклин-пертита (35–40 %) и, частично, из альбита (до 10 %), в светлой мелкозернистой массе которых отчетливо выделяются изометричные "пятна" более темного мозаичного

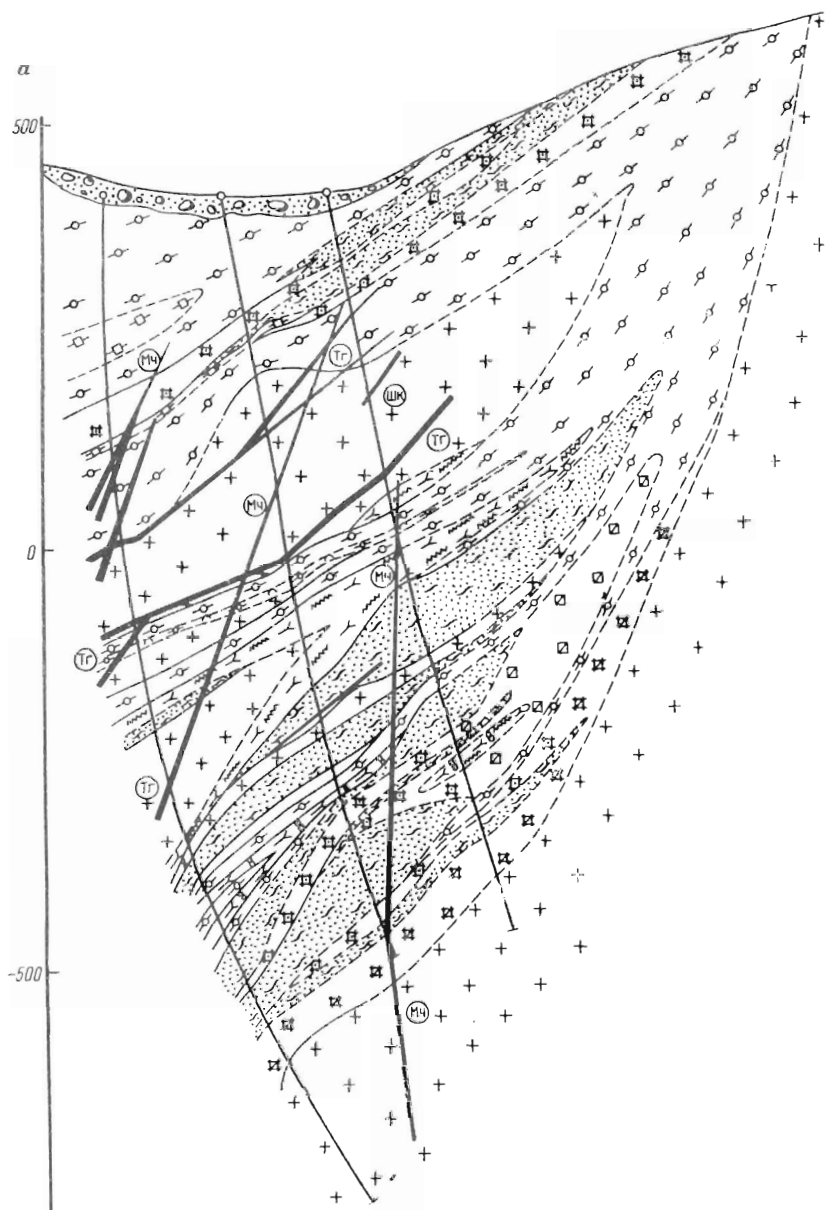
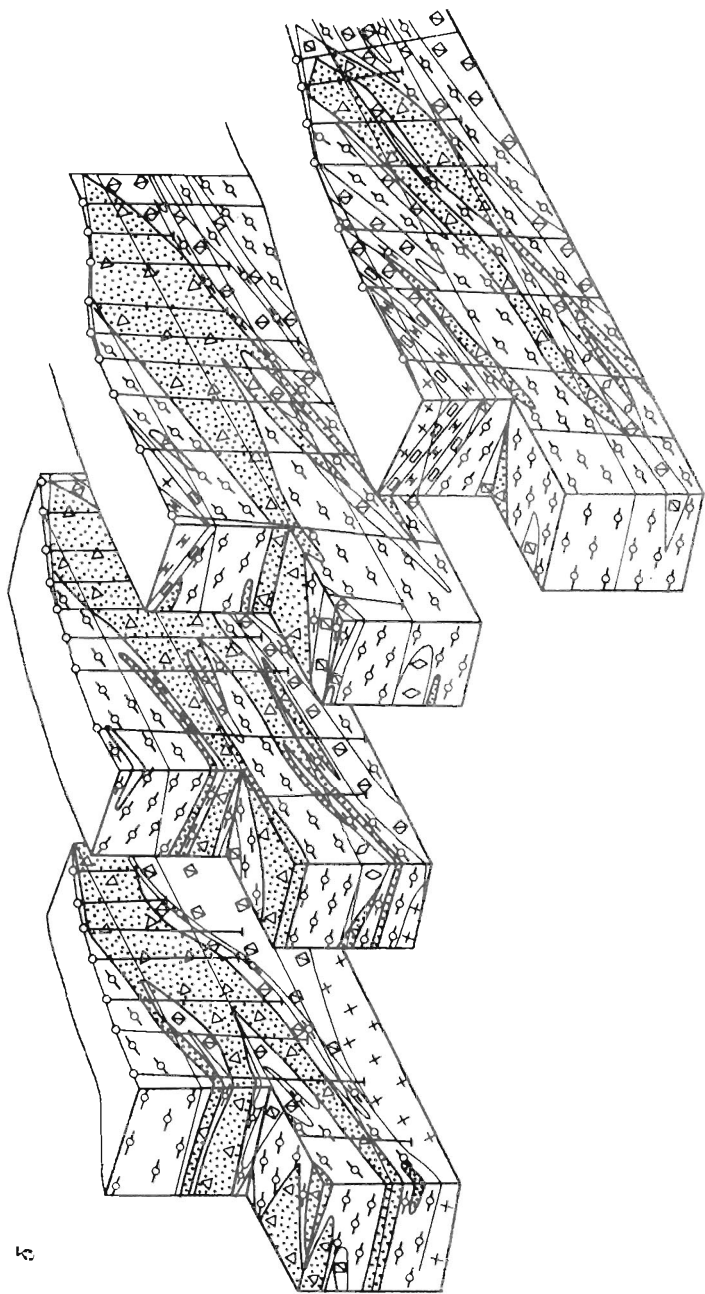


Рис. 17. Геологический разрез (а) и блок-диаграмма (б) месторождения Олений ручей. См. условные обозначения к рис. 3



5

Рис. 17 (Продолжение рис.)

нефелина (35–40 %). Эгирин (10–20 %) также превращен в тонкозернистый агрегат, равномерно рассеянный среди основной массы из полевого шпата. Рисчорриты отличаются макроскопически от хибинитов реликтами пойкилитовой структуры, более лейкократовым обликом, а по химическому составу — преобладанием  $K_2O$  или  $Na_2O$ .

Уртиты рудной субфазы, представленные рядом фациальных разновидностей — от средне- и крупнозернистых до блоковых и пегматоидных и взаимосвязанные друг с другом и апатит-нефелиновыми породами зонами постепенных переходов, являются вмещающими. Массивные уртиты, среди которых по составу выделяются полевошпатовые и апатитовые разновидности, совместно с рудными телами залегают в основании разреза продуктивной зоны, слагая ее нижнюю часть. Контактные взаимоотношения массивных уртитов с рудами неоднозначные: наряду с зонами постепенных переходов от уртитов через апатитовые уртиты до массивных и сплошных апатитовых пород установлены отчетливые интрузивные контакты с угловыми несогласиями по отношению к полосчатости апатит-нефелиновых пород. Средний минеральный состав фациальных разновидностей уртитов приведен в табл. 9. Помимо главных минералов — нефелина и эгирин-диопсида, они содержат в повышенных количествах калиевый полевой шпат, сфен, апатит, ринколит, эвдиалит, астрофиллит и вторичные — щелочной амфибол, альбит, содалит, канкринит, цеолиты и карбонаты.

В тектонизированных уртитах на фоне гранобластовых и бластокатаклических микроструктур отмечаются реликтовые участки с первичной гипидиоморфнозернистой структурой.

Апатит-нефелиновые породы месторождения Олений ручей представлены (в об. %) пятнистыми 6,69, пятнисто-полосчатыми 16,54, линзовидно-полосчатыми 15,91, блоковыми 1,97, полосчатыми 1,03, а также непрерывной серией нефелин-apatитовых пород: сплошных апатитовых пород 2,89, массивных апатит-нефелиновых руд 13,03, апатитовых уртитов 9,34 и ийолитов 0,59, среди которых в виде прослоев уртитов, ксенолитов хибинитов и рисчорритов и жил трахитоидных ийолитов включены разубоживающие породы 27,84. Брекчиевые апатит-нефелиновые породы, цемент которых являются наиболее поздние трахитоидные ийолиты, составляют 4,15 % от объема рудных тел. В зоне месторождения Олений ручей, так же как и на Ньюрклакке, не представлены сфен-apatитовые руды, залегающие на всех других месторождениях в кровле рудных тел на контакте с дифференцированной толщей пострудных ийолит-уртитов.

Средний минеральный состав разновидностей пород и уртитов показан в табл. 9.

Вторичные изменения апатит-нефелиновых руд проявляются в развитии содалита, канкринита и цеолитов по нефелину, амфиболизации и биотитизации по эгирину, в возникновении локальных зон катаклаза и рассланцевания, пересекающих как рудные тела, так и вмещающие их ийолит-уртиты.

Пострудная субфаза интрузии представлена расслоенной серией трахитоидных уртитов, ийолитов, мельтейгитов, образующих сложноветвящуюся систему пластовых интрузивных слоев различной мощности, тяготею-



Минеральный состав пород и уртитов (в %)

Минералы	Апатит-нефелиновые породы					Массивные уртиты		
	1	2	3	4	5	6	7	8
Апатит	76,21	67,02	55,78	48,06	34,10	2,65	13,80	2,11
Нефелин	12,82	18,62	28,74	30,68	45,11	60,15	52,25	46,95
Эгирин	6,35	8,63	9,25	10,88	12,82	23,01	20,61	28,65
Сфен	2,29	1,85	2,70	3,40	4,19	4,85	5,55	5,26
Титаномагнетит	0,29	0,45	0,74	0,43	0,44	0,57	1,48	0,75
Полевой шпат	2,03	3,37	2,48	5,98	3,26	5,91	5,80	15,63
Прочие	0,01	0,06	0,31	0,57	0,08	2,86	0,51	0,65
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Примечание. Апатит-нефелиновые породы: 1 – пятнистые (среднее из 17 анализов); 2 – пятнисто-полосчатые (29 анализов); 3 – линзовидно-полосчатые (84 анализа); 4 – массивные (55 анализов); 5 – блоковые (9 анализов); массивные уртиты: 6 – уртит (29 анализа), 7 – апатитовый уртит (44 анализа), 8 – полевошпатовый уртит (23 анализа).

Таблица 10

Минеральный состав ийолитов (в %)

Минералы	1	2	3
Апатит	2,26	6,67	2,52
Нефелин	49,90	43,55	39,54
Эгирин	36,80	33,15	36,91
Сфен	6,92	8,36	6,52
Титаномагнетит	0,45	5,47	0,07
Полевой шпат	3,36	2,74	14,44
Прочие	0,31	0,06	—
Сумма	100,0	100,0	100,0

Примечание. 1 – ийолит (среднее из 52 анализов); 2 – апатитовый ийолит (22 анализа); 3 – полевошпатовый ийолит (3 анализа).

щих к верхней части продуктивной зоны и разделяющих вмещающие, более ранние по возрасту, массивные уртиты и апатит-нефелиновые руды на серию пластобразных отторженцев и рудных тел. Ниже по разрезу, в средней и особенно в донной частях рудной зоны трахитоидные ийолит-уртиты локализируются в виде маломощных жил и апофиз, выклинивающихся по восстанию среди руд, уртитов, рихсчорритов и хибинитов. Таким образом, на дневной поверхности обнажаются самые верхние части разреза продуктивной зоны, представленные преимущественно трахитоидными ийолитами, в связи с чем план геологического строения на уровне эрозии не отражает ни структурной позиции, ни рудных перспектив глубоких горизонтов месторождения.

Среди ийолитов по составу второстепенного минерала выделяются апатитовые и полевошпатовые разновидности, средний минеральный состав которых приведен в табл. 10.

Сравнительная характеристика залежей Апикального яруса

Показатели	Единицы измерения	Залежи		
		верхняя	главная	нижняя
Средняя мощность залежи	м	35,1	19,9	24,7
Среднее содержание $P_2O_5$	%	15,4	15,7	12,3
Распределение запасов	% общ.	2,2	7,7	2,8
Средний минеральный состав				
апатит	% об.	35,02	36,07	29,97
нефелин		31,34	31,34	37,95
эгирин		15,25	14,46	18,35
сфен		4,87	3,17	3,05
титаномагнетит		0,46	1,23	0,45
полевой шпат		5,38	7,06	5,01
Типы пород				
пятнистые	отн. %	12,69	5,52	3,94
пятнисто-полосчатые		10,87	11,76	4,64
линзовидно-полосчатые		—	17,10	24,30
блоковые		2,55	3,05	2,14
массивные и сплошные		41,02	25,55	15,52
апатитовые уртиты		17,63	17,43	11,16

Вблизи зоны смятия трахитоидные ийолиты интенсивно изменены, что выражается в их перекристаллизации, милонитизации, огнейсовании и катаклазе, первичные микроструктуры практически не сохранились.

По материалам геологоразведочных работ в пределах рудной зоны, представляющей структуру первого порядка, выделены три структурно-морфологических элемента второго порядка — Апикальный и Глубинный рудный ярусы и разделяющая их пачка межрудных ийолит-уртитов. Оба рудных яруса и межрудная пачка состоят из морфологических единиц третьего порядка: ксенолитов, отторженцев (хибиниты, рисчорриты), пластовых залежей (массивные уртиты, апатит-нефелиновые руды), жил, апофиз и даек (трахитоидные ийолиты, лампрофиры).

Апикальный рудный ярус, перекрытый рыхлыми отложениями ручьев Олений и Минеральный, прослежен по простиранию на 1,5 км в центральной части месторождения, по падению отдельные рудные залежи протягиваются до глубины 100–300 м, где выклиниваются среди трахитоидных ийолитов. Апикальный ярус включает три рудные залежи — Верхнюю, Главную и Нижнюю, которые по положению в геологической структуре, условиям залегания и по характеру взаимоотношений с вмещающими ийолитами аналогичны рудным типам Ньюаркпакского месторождения (табл. 11).

Разубоживающие породы (ийолиты, уртиты) составляют 15,24–38,30 % от объема руд Верхней, Главной и Нижней залежей.

Пачка межрудных пород представлена массивными уртиты с локальной апатитовой минерализацией, включающими отторженцы вмещающих

хибинитов и рисчорритов, и пересекающими их жилами трахитоидных ийолитов, дайками тингуаитов, шонкинитов, мончикитов. В средней части пачки выделен маркирующий прослой трахитоидного мельтейгита, облегчающий корреляцию разреза. В целом же разновозрастные породы межрудной пачки чередуются в структуре без видимой закономерности. Относительно выдержаны по простиранию и по падению жильные тела трахитоидных ийолитов, приуроченные обычно к зонам контактов пород разного состава. Менее надежна увязка пластов уртитов, которые являются вмещающими по отношению к ийолитам и поэтому коррелируются менее уверенно. Наибольшей изменчивостью характеризуется морфология отторженцев хибинитов и рисчорритов.

Глубинный рудный ярус размещается в нижней части продуктивной зоны и представлен, подобно Аликальному ярусу, тремя рудными залежами — Верхней, Главной и Нижней, в каждой из которых попарно сочетаются основное и сателлитовое рудные тела. Основные рудные тела по простиранию в северо-восточном направлении раздваиваются с образованием рудного сателлита, во всех случаях располагающегося ниже основного рудного тела, имеют меньшую протяженность и большую изменчивость формы (табл. 12). Апатитовые залежи Глубинного яруса на всем протяжении являются "слепыми" рудными телами, причем контур их выклинивания по восстанию воздымается при прослеживании от северо-восточного фланга (абс. отметки 0 — минус 100 м) к центральной части месторождения (0 — 100 м) и далее в юго-западном направлении, где оруденение полностью не околонтурено. Анализ данных разведочного бурения позволяет уверенно прогнозировать увеличение перспектив оруденения на юго-западном фланге, поскольку установлено, что апатитовые залежи Глубинного яруса не выклиниваются, а наоборот, увеличиваются по мощности и прослеживаются под рудной зоной Ньюкпахкского месторождения.

Из сжатого обзора геологической структуры месторождения Олений ручей можно сделать предварительный вывод о том, что строение и условия размещения рудных залежей Аликального и Глубинного ярусов по ряду признаков различаются: если залежи брекчиевых руд Аликального яруса могут, с некоторой условностью, составляться с телами апатитовых брекчий Ньюкпахкского месторождения, то характер локализации оруденения Глубинного яруса среди массивных уртитов в этом отношении позволяет предположить аналогию со структурой рудной зоны Коашвинского месторождения. В случае справедливости таких аналогий для объяснения механизма формирования Аликального рудного яруса можно привлечь генетическую схему образования Ньюкпахкской рудной зоны, а для расшифровки условий становления Глубинного яруса принять в качестве рабочей гипотезы последовательность стадий рудообразования, установленную для месторождения Коашва.

Геологическое изучение месторождения Олений ручей продолжается на стадии детальной разведки, и надо полагать, что при этом будет получена дополнительная информация о генезисе и структуре рудной зоны.

Задача дальнейших исследований состоит в выяснении масштабов развития промышленного оруденения на глубине и на юго-западном фланге,

Сравнительная характеристика залежей Глубинного яруса

Показатели	Единицы измерения	Залежи					
		Верхняя		Главная		Нижняя	
		основное	спутелит	основное	спутелит	основное	спутелит
Средняя мощность залежи	м	24,1	36,1	28,2	33,0	29,0	29,0
Среднее содержание $P_2O_5$	%	15,56	20,79	14,91	14,10	16,40	14,37
Коэффициент мощности	%	74	112	60	102	79	93
Вариации содержания $P_2O_5$		44	40	22	50	52	34
Распределение запасов	отн. %	15,9	11,9	21,0	11,0	19,7	7,8
Средний минеральный состав							
апатит		37,31	50,04	39,09	32,49	39,32	36,28
нефелин		32,72	24,09	31,00	36,41	31,87	37,27
эгирин		14,87	12,13	15,48	15,68	14,57	12,77
сфен		2,90	2,99	3,13	3,64	2,97	2,80
титаномагнетит		0,91	0,87	0,89	0,93	0,79	0,82
полевой шпат		7,37	6,97	6,70	7,20	6,34	6,16
Типы пород	отн. %						
пятнистые		6,24	18,91	6,31	1,31	7,68	2,50
пятнисто-полосчатые		13,41	25,13	22,47	10,10	21,05	16,88
полосчатые		4,31	—	0,90	—	0,92	—
линзовидно-полосчатые		24,84	7,93	11,78	21,53	12,00	14,95
блоковые		0,93	1,99	1,15	1,45	1,51	5,98
брекчиевые		—	1,92	5,50	3,92	8,77	13,07
сплошные		2,39	3,56	3,60	3,99	0,30	0,43
массивные		7,81	11,99	12,86	13,05	12,22	7,91
апатитовые уртиты		8,53	3,96	8,40	12,77	7,64	11,19
Разубоживающие породы	отн. %	31,53	24,61	26,93	31,87	27,91	27,09

где, как указывают геологические предпосылки, апатитовые руды размещаются на значительной площади ниже разведанных залежей месторождения Ньюрпахк. С этой целью намечается проведение специальных поисковых работ с применением глубинного структурного бурения.

## СЕВЕРО-ЗАПАДНОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ

### ПАРТОМЧОРРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

В 1939 г. А.Е. Святловский и Ф.М. Дитерихс сообщили, что при исследовании северо-западной части массива в полосе развития пород ийолит-уртитового комплекса ими обнаружены в обнаженном русле ручья Южный Лявойок две жилы апатит-сфеновых пород мощностью 70–80 см, которые по особенностям строения являются миниатюрной копией мощных апатитовых месторождений в южной части Хибин. Никакого практического вывода из этого сообщения сделано не было, и район к северу от горы Куээльпор надолго оставался вне интересов геологов-поисковиков.

Через 20 лет после завершения среднemasштабного геологического картирования Хибинского массива (С.И. Зак, Е.А. Каменев, Ф.В. Минаков и др.) стала очевидной недостаточная изученность полосы продуктивных ийолит-уртитов, с которыми, как было установлено Ф.В. Минаковым, не только пространственно, но и генетически связаны все промышленные залежи апатитовых руд и большинство известных проявлений апатитового оруденения и минерализации. Намеченной программой детальных поисков новых апатитовых залежей, охватывающих всю ийолит-уртитовую полосу, предусматривалось, в частности, поисково-картировочное бурение нескольких скважин через 1–2 км по простиранию зоны контакта уртитов с ийолитами вдоль западных склонов гор Рисчорр и Партомчорр, на участке протяженностью 6 км известным Куэльпорским месторождением и ручьем Южный Лявойок, где в 1956 г. И.И. Перекрестом была встречена зона сфен-apatитовых руд.

В соответствии с этой программой уже к 1961 г. на участке Партомчорр было пробурено 10 поисковых скважин, по которым рудная зона была прослежена на 5 км по простиранию и на 500 м на глубину, что позволило в 1962 г. А.С. Михеичеву и И.И. Перекресту дать количественную и качественную прогнозную оценку выявленного месторождения.

На поисковой стадии изучения месторождения было установлено, что рудная зона средней мощностью около 70 м представлена апатитсодержащими уртитам и ийолитами, чередующимися с пропластками апатит-сфеновых и апатит-нефелиновых руд, составляющими не более 20–30 % от всей мощности зоны. В связи с преобладанием в разрезе слабо минерализованных пород над рудами, также не отличающимися повышенным содержанием апатита, качество руд в целом по зоне оказалось в 2–3 раза ниже, чем на новых и эксплуатируемых месторождениях Хибин. Это обстоятельство на некоторое время отвлекло усилия геологоразведчиков на подготовку для промышленного освоения более эффективных сырьевых баз на объектах юго-восточного рудного поля.

Изучение месторождения было возобновлено в 1969 г., а тремя годами позже институт Гипроруда, основываясь на материалах поисково-оценочных работ, подготовил технико-экономическое обоснование целесообразности детальной разведки месторождения, проведенной в 1972–1978 гг.

В геологическом отношении апатит-сфен-нефелиновые руды Партомчоррского месторождения пространственно приурочены к продуктивной интрузии ийолит-уртитов, с которой они связаны и генетически. Рудная зона мощностью до 100–150 м на всем протяжении скрыта под мореной и прослежена разведочными скважинами от поверхности до глубины 500–1000 м, где выклинивается. Простирание рудной зоны северо-восточное 10–30°, падение на юго-восток, т. е. к центру массива, под углами от 30–40° в верхней части до 50–60° на глубине. Покрывающие породы представлены ритмично расслоенной пачкой массивных ювитов, трахитоидных уртитов, ийолитов, мельтейгитов общей мощностью до 500 м; подстилают рудную зону массивные уртиты мощностью до 100–200 м, которые залегают на неотчетливо трахитоидных урритах. Со стороны висячего бока продуктивных ийолит-уртитов и пород рудной зоны развиты более позд-

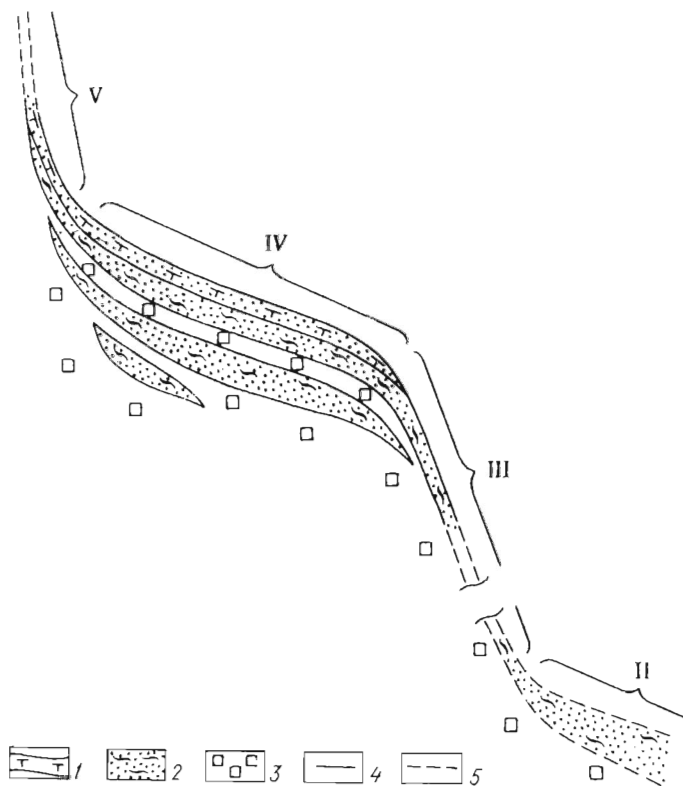


Рис. 18. Строение рудного тела месторождения Партомчорр

1 — апатит-сфеновые руды; 2 — апатит-нефелиновые руды; 3 — уртиты; границы рудного тела: 4 — установленные, 5 — эродированные; II, III, IV, V — структурные ярусы

ние ливочорриты. Крутопадающая интрузия ливочорритов под острым углом пересекает расслоенную толщу ийолит-уртитов и, по-видимому, срезает на глубине рудную зону, хотя это явление окончательно не установлено.

Морфология рудной зоны, по И.И. Перекресту, в общем виде определяется сочетанием полого- и крутопадающих структур, сменяющих друг друга в направлении сверху вниз (рис. 18), причем промышленная часть зоны пространственно совпадает с пологими структурными элементами. Оруденение на участках крутого залегания ( $50-70^\circ$ ) характеризуется некондиционной мощностью, измеряемой дециметрами — первыми метрами, слабой прожилковой и гнездово-вкрапленной апатитовой минерализацией в уртигах. Такой морфологический тип рудоконтролирующих структур, соответствующий различным уровням эрозионного среза, охватывает южную (III ярус) и, частично, северную (II ярус) окраины месторождения

(см. рис. 18). На большей же части площади рудная зона представлена пологими структурами (II ярус) переслаивания сфен-апатитовых, апатит-нефелиновых руд, апатитовых уртитов с уртитам без признаков рудной минерализации. Граница сопряжения полого- и крутопадающих структур образуется острый угол с линией простирания рудной зоны и полого погружается на северо-восток, в связи с чем на дневной поверхности обнажаются различные части этой сложной рудоконтролирующей структуры.

Размеры рудной зоны, совпадающей в геологических границах с пологой рудоконтролирующей структурой II яруса, установлены разведочным бурением: наибольшая ширина в плане 900–1000 м, вертикальная амплитуда 700–800 м. При прослеживании рудной зоны в южном направлении ее размеры в плане и на глубину постепенно сокращаются в связи с различным уровнем эрозии в разных частях месторождения. Размеры крутопадающих рудоподводящих структур, особенно их вертикальная амплитуда, не установлены.

В геологическом отношении апатит-нефелиновые руды Партомчоррского месторождения пространственно приурочены к продуктивной интрузии ийолит-уртитов, с которой они связаны и генетически. Рудная зона мощностью до 100–150 м на всем протяжении скрыта под мореной и прослежена буровыми скважинами от поверхности до горизонта минус 600 м, где выклинивается. Простирание рудной зоны северо-восточное  $10-30^\circ$ , падение на юго-восток, т. е. к центру массива, под углами от  $30-40^\circ$  в верхней части до  $50-60^\circ$  на глубине. Покрывающие породы представлены ритмично расслоенной пачкой массивных ювитов, трахитоидных уртитов, ийолитов, мельтейгитов общей мощностью до 500 м; подстилают рудную зону массивные уртиты мощностью 100–200 м, которые залегают на нечетливо трахитоидных уртитов. Со стороны висячего бока продуктивных ийолит-уртитов и генетически связанных с ними апатит-нефелиновых руд развиты более поздние лавочорриты. Крутопадающая интрузия лавочорритов под острым углом пересекает расслоенную продуктивную толщу ийолит-уртитов и, по-видимому, срезает на глубине апатит-нефелиновую залежь, хотя явление окончательно не установлено.

В разрезе рудной зоны в общем виде выделяются три рудных тела, каждое из которых состоит из переслаивающихся слоев апатит-нефелинового и нефелин-апатитового состава: в кровле верхнего рудного тела, кроме того, широко представлены апатитовые руды и апатитовые ийолит-уртиты, обогащенные сфеном и титаномagnetитом (сфен-апатитовые руды). Рудные тела разделяются прослоями массивных уртитов, практически не содержащих апатитовой минерализации. Верхнее и среднее рудные тела развиты на всей площади месторождения, тогда как нижнее тело выявлено в северной части на ограниченной площади. Прослой рудоразделяющих массивных уртитов на имеет сплошного распространения: в направлении от флангов к центральной части месторождения он выклинивается, что приводит к соединению верхней и средней залежей, образующих здесь мощное рудное тело. Мощность уртитовых прослоев между рудными горизонтами составляет в среднем 20–30 м, участками до 50 м.

Апатит-нефелиновые породы Партомчоррского месторождения по сос-

## Характеристика рудных тел месторождения Партомчорр

Размеры, средние содержания $P_2O_5$ и минералов, изменчивость, типы руд	Единицы измерения	Рудные тела		
		Верхнее	Среднее	Нижнее
Средняя мощность	м	26,4	36,8	16,3
Максимальная мощность	м	108,8	110,6	68,1
Коэффициент вариации мощности	%	61,6	61,9	—
Коэффициент вариации содержания $P_2O_5$	%	34,6	36,2	—
Среднее содержание $P_2O_5$	%	6,96	7,91	6,77
Распределение запасов	отн. %	46,4	51,4	2,2
сфен-апатитовые		35,8	—	—
апатит-нефелиновые		39,0	76,6	79,8
рудные, в том числе пятнистые		1,2	2,3	2,5
Типы пород				
линзовидно-полосчатые		24,5	48,0	50,0
сетчатые		3,6	7,0	7,3
массивные, апатитовые		9,7	19,3	20,2
безрудные прослои уртитов, ийолитов и др.		25,2	23,4	20,2
Средний минеральный состав				
апатит		17,1	19,4	16,8
нефелин		42,7	49,1	52,1
эгирин		18,1	15,2	15,0
сфен		8,8	5,6	6,2
титаномагнетит		6,6	4,0	4,4
полевой шпат		2,4	2,4	1,5

таву и текстурным признакам можно разделить на группы: 1) сфен-апатитовые, 2) апатит-нефелиновые породы и апатитовые уртиты, 3) ийолиты. В составе балансовых пород значительный объем (до 20–25%) приходится на долю разубоживающих ийолитов и уртитов, резко снижающих среднее содержание  $P_2O_5$  до 7,5% по сравнению с эксплуатируемым (16,5–18,0%) и другими месторождениями Хибин (14,0–15,5%). Сравнительные параметры рудных тел Партомчоррского месторождения приведены в табл. 13.

Руды Партомчоррского месторождения представлены теми же природными типами, что и другие месторождения Хибин, но отличаются относительной распространенностью: среди них преобладают относительно бедные разновидности (апатитовые уртиты, сетчатые, линзовидно-полосчатые руды) над богатыми (пятнистыми, пятнисто-полосчатыми) и полностью отсутствуют блоковые и брекчиевые руды. Другое отличие заключается в присутствии в рудах повышенных количеств титаносодержащих — сфена и титаномагнетита.

Поисково-оценочные работы, начавшиеся сразу после открытия месторождения (1959–1961 гг.), заключались в установлении пространственных границ оруденения, изучении вещественного состава руд и общих условий их разработки, определении прогнозных запасов. На этой стадии



рудная зона оконтурена 10 скважинами по простиранию на 5 км и по падению в плоскости залежи на 800 м до абс. глубины минус 300 м. Были оценены прогнозные запасы при сравнительно низком содержании  $P_2O_5$  — 6,46 %. Последнее обстоятельство временно приостановило геологоразведочные работы на этом месторождении. В связи с необходимостью расширения сырьевой базы апатитовых руд для увеличения производственных мощностей объединения "Апатит" в 1972 г. были подготовлены геологическое и технико-экономическое обоснование целесообразности проведения геологоразведочных работ и составлен проект временных кондиций, утвержденный Министерством химической промышленности СССР.

Предварительная и детальная разведка проводилась без перерыва в 1972—1978 гг. На стадии предварительной разведки с целью определения общих перспектив запасов по категории  $C_1$  и  $C_2$  и изучения масштабов и условий разработки месторождения пробурена 61 скважина, выполнен комплекс каротажных исследований (семь методов), проведены стационарные гидронаблюдения и откачки, изучены химический и минеральный составы и физические свойства руд и пород, в лабораторном масштабе исследованы технологические свойства руд и пород с получением пяти минеральных концентратов. По временным кондициям, предусматривающим бортовое содержание  $P_2O_5$  для балансовых руд 6 %, подсчитаны запасы для открытой и подземной добычи по категориям  $C_1$  и  $C_2$ , определены запасы попутных полезных компонентов, содержащихся в апатите, нефелине, сфене и титаномagnetите. На этой стадии были определены основные факторы, влияющие на выбор методики последующей детальной разведки, установлено, что по изменчивости морфологии рудных тел и качества руд месторождения Партомчорр относятся к группе I по степени сложности геологического строения, для которого запасы промышленных категорий должны быть разведаны в соотношении  $A:B:C_1 = 10:20:70$  %.

На стадии детальной разведки все вопросы, касающиеся геологического строения, качественной и технологической характеристики руд как комплексного минерального сырья, включая переработку концентратов на конечные продукты, горнотехнические условия были изучены в объеме, необходимом и достаточном для составления технически правильного и экономически выгодного проекта разработки месторождения. С этой целью пробурены 146 скважин и 13 — для гидрогеологических исследований, проведен комплексный картаж, детально изучен вещественный состав руд и пород, химизм минералов и продуктов обогащения, технологические свойства руд различного качества проверены в полупромышленном масштабе в условиях обратного водоснабжения, переработаны на конечные продукты крупные партии минеральных концентратов, подробно исследованы горнотехнические условия добычи, газоносность и лавинопасность.

Важный фактор повышения эффективности геологоразведочных работ — продуманная система разведки, под которой следует понимать порядок пространственного расположения и последовательность проходки разведочных выработок, что обеспечивает решение геологической задачи на той или иной стадии при минимальной затрате средств. Для разведки

Партомчоррского месторождения наиболее рациональна система расположения скважин по линиям профилей вкрест простираения рудной зоны. Однако в условиях горного рельефа и повышенной лавиноопасности в течение большей части года для обеспечения такой сети скважин широко применялось наклонно-направленное бурение по заданной траектории. С этой целью использовались стационарные и съемные отклонители, а также отклонители непрерывного действия, что в сочетании с учетом закономерностей естественного искривления скважин обеспечивало выведение их в проектные точки с требуемой точностью.

Форма и параметры сети скважин, принятые на ранней стадии разведки по аналогии с эксплуатируемыми месторождениями, также относящимися к группе I по степени сложности геологического строения, впоследствии были проконтролированы методом последовательного разрежения по простиранию и падению и способом определения длины отрезка одностороннего изменения параметров рудной залежи, предложенным В.М. Борзуновым. Проведенный анализ подтвердил правильность выбора разведочной сети и достоверность данных подсчета запасов по категориям А, В и С<sub>1</sub>.

Учитывая особенности минерального состава руд Партомчоррского месторождения и существенные отличия их от руд текущей добычи (низкое содержание апатита и повышенное количество темноцветных минералов и нефелина), при разведке была выполнена обширная программа по изучению обогатимости руд и переработке опытных партий концентратов на конечные продукты, которая включала следующие мероприятия:

- лабораторные исследования руд с различным бортовым содержанием  $P_2O_5$  отдельно и с учетом разубоживания;
- технологическое изучение вмещающих ийолит-уртитов как исходного сырья для получения нефелина и темноцветных концентратов;
- полупромышленные испытания на пробе-аналоге массой 127 т, отобранной из бедных руд эксплуатируемых месторождений;
- полупромышленные испытания на свежей и оборотной воде представительной пробы Партомчоррского месторождения при бортовом содержании  $P_2O_5$  2 % с разубоживающими добавками в количестве 8 % со стороны кровли и 3 % со стороны подошвы с получением опытных партий минеральных концентратов для последующих исследований;
- лабораторные исследования апатитового, нефелинового, сфенового, титаномагнетитового и эгиринового концентратов на продукты, выпускаемые химической, глиноземной, металлургической и другими отраслями промышленности.

Обогатимость руд и пород изучалась в лабораториях институтов ГИГХС, Механобр и на опытной полупромышленной установке Горного института Кольского филиала АН СССР при участии геологов-разведчиков и специалистов производственного объединения "Апатит". Лабораторные исследования носили поисковый характер с целью проверки таких схем обогащения, как первичная избирательная классификация, гравитация путем разделения в тяжелых жидкостях, флотация и магнитная сепарация в слабом и сильном полях. Особенности состава руд Партомчоррского

месторождения отразились на ходе комплексной обогатимости, структуре технологических схем и реагентных режимах флотации апатита, нефелина и сфена. В итоге для эффективного разделения минералов была выработана комбинированная технология с флотационными и магнитными методами обогащения, обеспечивающая получение концентратов (в %): апатитового:  $P_2O_5$  39,4, извлечение 93–97; нефелинового:  $Al_2O_3$  29,1–29,8, извлечение 60–70; титаномагнетитового:  $TiO_2$  11–18,  $Fe_2O_3$  67–77; сфенового –  $TiO_2$  28–36 и эгиринового:  $TiO_2$  3–7,  $Fe_2O_3$  15–20; при суммарном извлечении  $TiO_2$  55–90 и  $Fe_2O_3$  60–80.

На пробе-аналоге, отобранной из действующих карьеров и соответствующей среднему составу руд Партомчоррского месторождения, производилась отладка технологического процесса и формирование состава оборотных руд. Для выделения оптимальной технологии обогащения бедной апатит-нефелиновой руды опробованы три варианта схем, отличающихся количеством перечисток и контрольных операций в апатитовом и нефелиновом циклах флотации, подготовкой исходных продуктов перед последующей контрольной флотацией нефелина и перед концентрационным столом, количеством используемых флотационных камер, расходом реагентов и точками их подачи. Испытания схем проводились с использованием реагентов, применяемых на действующих фабриках, на свежей и оборотной воде, которая формировалась отдельно для апатитового и нефелинового циклов. В результате работы с пробой-аналогом была уточнена технологическая схема, отрегулировано оборудование, получены пять минеральных концентратов при достаточно высоких показателях по извлечению, что позволило избежать потери руды на стадии основных полупромышленных испытаний.

Представительная усредненная проба для полупромышленных испытаний массой 47 т отобрана из керна 32 скважин большого диаметра (93 мм) объемом 5,9 тыс. м, пробуренных специально для этой цели. В пробу включены все рудные разновидности в соотношениях, близких к природным, внутрирудные прослои некондиционных пород, а также разубоживающие добавки. Для полупромышленных испытаний разработана комбинированная магнитофлотационная схема, включающая:

- флотацию апатита с 3–4 перечистками пенного продукта основной флотации и 2–3 контрольные флотации;
- выделение из хвостов апатитовой флотации титаномагнетитового концентрата в слабом магнитном поле;
- получение нефелинового и коллективного темноцветного концентратов по технологии обратной флотации нефелина с применением в качестве собирателя мыла сырого таллового масла и высокомолекулярного алкилбензолсульфоната в щелочной среде;
- доводку коллективного сфен-эгиринового концентрата флотацией и гравитацией;
- селективное разделение коллективного продукта на сфеновый и эгириновый концентраты в сильном магнитном поле.

При переходе испытаний на пробе-аналоге к основной пробе оборотная вода была уже подготовлена, состав ее стабилизирован, а подача свежей

воды в перечистные операции апатитового и нефелинового циклов составила 5—15 % от общего ее расхода в цикле. Обратное водоснабжение обеспечивает полное исключение загрязнения водоемов проточками, снижение на 15—20 % расхода реагентов-собирателей, совершенствование нефелиновой флотации, сохранение теплообмена воды и повышение производительности мельниц, экономия в размере 0,21 руб. на 1 т апатитового концентрата (А.И. Андреева, В.Н. Лыгач, А.В. Машьякова и др., 1978 г.).

В результате полупромышленных испытаний из бедных руд Партомчорского месторождения по технологии безотходной переработки получены пять кондиционных концентратов (в %): апатитовый:  $P_2O_5$  39,4, извлечение 84,5; нефелиновый:  $Al_2O_3$  30,05, извлечение 67; сфеновый, титаномагнетитовый и эгириновый с суммарным извлечением  $TiO_2$  69,5 и  $Fe_{общ}$  57.

В соответствии с программой исследований крупные партии минеральных концентратов прошли дальнейшие испытания на стадии переработки до конечных продуктов. Партомчорский апатитовый концентрат по химическому составу и технологическим свойствам аналогичен выпускаемому на действующих фабриках и является высококачественным сырьем для выработки аммофоса, двойного суперфосфата, экстракционной фосфорной кислоты и сложных удобрений с попутным извлечением ряда редких компонентов. Нефелиновый концентрат отличается лучшими качественными показателями: в нем содержится повышенное количество  $Al_2O_3$  и щелочей, но меньше вредных примесей  $FeO$  и  $TiO_2$ . Из пробы нефелина в лабораторных условиях получены глинозем, поташ и содопродукты способами азотнокислотной переработки, а также спеканием с известняком и последующим содощелочным выщелачиванием; практически подтверждена целесообразность переработки нефелина на алюминиевые коагулянты и алюмокалиевые квасцы.

Качество темноцветных минеральных продуктов из руд Партомчорского месторождения выше, чем из руд текущей добычи: титаномангнетит содержит больше железа и титана, а сфеновый концентрат лучше очищен от апатита и нефелина, являющихся вредными примесями. Из титаномагнетитового концентрата выработан титановый шлак и ванадиевый чугун, а из сфенового — чистая двуокись титана, высококачественные титано-кальциевый и кальциево-кремнеземный пигменты с попутным извлечением редких компонентов.

Вопрос о практическом использовании эгиринового продукта остается открытым: он значительно уступает по качеству концентрату из добываемых руд и требует дополнительного обогащения. Возможны два способа его применения: 1) комбинированная металлургическая и химическая переработка, включающая восстановительный обжиг при 1250—1300 °С, дробление, измельчение и магнитную сепарацию обожженного продукта с выделением железа в магнитную и кремнезема в немагнитную фракцию; 2) совместное восстановление и плавка шихты из эгириновых и титаносодержащих концентратов с получением титанового шлака и железа.

## СТРУКТУРНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Целенаправленные поисковые работы, основанные на установленной закономерности о пространственной и генетической связи апатитового сруденения с массивными уртитам рудной субфазы продуктивной интрузии, ознаменовались открытием ряда новых месторождений, которые протягиваются от горы Партомчорр на северо-западе до горы Коашкар на юго-востоке Хибинского массива. Каждое из выявленных месторождений отличается неповторимым, только ему присущим планом геологического строения, набором природных типов руд, характером взаимоотношений с вмещающими породами. В связи с новыми открытиями возникла необходимость и появилась возможность для сопоставления этих месторождений между собой с целью познания более глубоких явлений, управляющих размещением апатитовых залежей в структуре ийолит-уртитовой интрузии, что имеет первостепенное значение для прогнозирования скрытого апатитового оруденения. Таким образом, успехи геологической практики выдвинули на первый план новые задачи, требующие научного обоснования.

Вопросы о структурной взаимосвязи апатитовых залежей в Хибинах затрагивались в работах ряда геологов, но до недавнего времени ограничивались месторождениями юго-западного рудного поля. А.Е. Ферсман впервые обратил внимание на приуроченность Кукисвумчорр-Юкспор-Расвумчоррской залежи к единой дугообразной полосе и предложил вести поиски апатита на продолжении ее северной и восточной ветвей. Для наглядного представления о форме апатитового пояса А.Е. Ферсман [42] предложил модель плоского опрокинутого конуса, поверхность которого в виде фетонов выстилается апатитовой рудой (рис. 19). Разобшение первоначально единой рудной залежи на отдельные линзы объясняется либо глубокой эрозией современной поверхности (А.Е. Ферсман), либо внедрениями поздних интрузий ийолит-уртитов (Т.Н. Иванова), либо воздействием позднемагматической тектоники, приведшей к смещению соседних блоков по системе радиальных разломов (Ф.М. Онохин) и продольных сбросов (Г.М. Вировлянский) с амплитудами от нескольких сотен метров до 2—3 км. В свете этих данных о горсто-грабенном строении Хибинского массива высказаны рекомендации по направлению поисковых работ на площади погруженных блоков.

По мнению М.М. Калинкина, главнейшим рудоконтролирующим структурным элементом продуктивной интрузии является ее продольный флексуобразный изгиб, к пологим крыльям которого приурочены наиболее мощные апатитовые залежи, представленные месторождениями юго-западного рудного поля и рудным участком Куэльпор. Пологое "рудное" крыло флексуры по падению сменяется крутым соединительным крылом с непромышленным апатитовым оруденением, вертикальная амплитуда которого М.М. Калинкиным оценивается в 1 км. На еще более глубоких горизонтах, согласно этой гипотезе, предполагается появление "нижнего

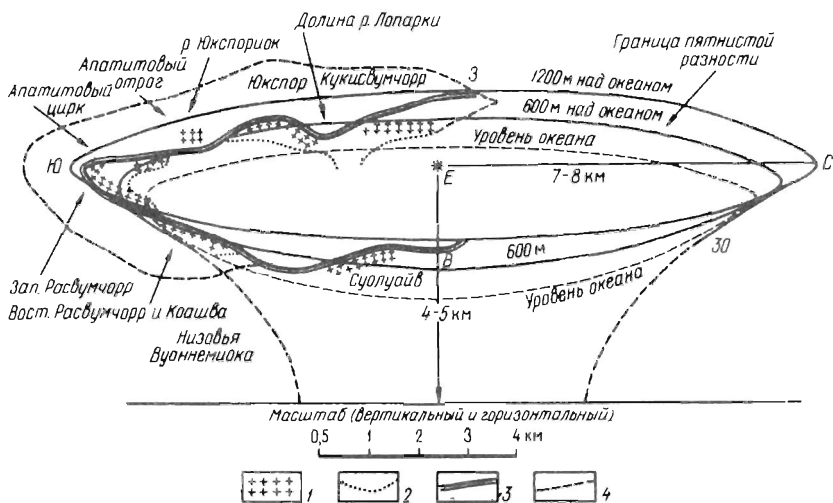


Рис. 19. Схематическое расположение апатитовых месторождений в центральной дуге Хибинских гундр. По А.Е. Ферсману [42]

1 – апатит-нефелиновое тело; 2 – воображаемая нижняя граница апатитового тела; 3 – рельеф поверхности; 4 – внешняя граница уртит-йолитовой интрузии

пологого крыла” с невыясненными перспективами апатитоносности. Прогнозы М.М. Калинкина о высокой оценке рудных перспектив глубинных частей Хибинского массива, особенно района месторождений юго-западного рудного поля, разделяются большинством геологов, придерживающихся иных представлений о факторах, контролирующих оруделение.

Сходную позицию в этом отношении занимает И.И. Перекрест, выдвинувший тезис о сочетании в структуре Партомчоррского и Куэльпорского месторождений пологих рудных и крутопадающих рудопроводящих ярусов. Обоснованность такого предположения подтверждается результатами глубокого структурно-поискового бурения скважин в этом районе. Вместе с тем правомерность положительных прогнозов глубинных горизонтов юго-западного рудного поля остается спорной, особенно в свете новых данных разведочного и структурного бурения.

Л.Б. Антонов отмечает наличие вертикальной зональности в строении апатитовых месторождений юго-западного рудного поля, выделяя апикальную, ядерную структурные части (блоки) и подводящее шнуровидное продолжение. Каждый из рудных “блоков” характеризуется специфическими чертами геологического строения и структуры. В связи с предполагаемым юго-восточным склонением апатитовых залежей структурные блоки обнажаются на разных гипсометрических уровнях: апикальная часть структуры в результате эрозии и погашения при добыче частично сохранилась лишь на месторождении Плато Расвумчорр; “ядерный структурный блок” представлен на Кукисвумчорре, Юкспоре и Расвумчорре, но отсутствует на участках Юкспориок–Апатитовый Цирк; “подводящее

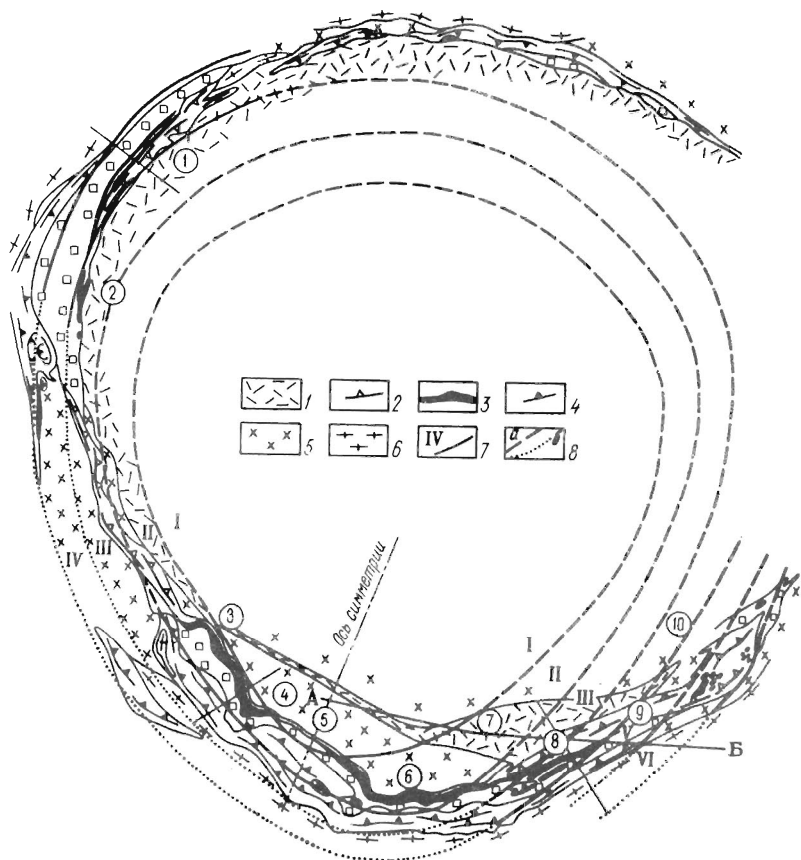


Рис. 20. Структурная зональность хибинских апатит-нефелиновых месторождений

1 – лявочорриты; 2 – пострудные ийолит-уртиты; 3 – апатит-нефелиновые руды и массивные уртиты; 4 – дорудные ийолит-уртиты; 5 – рисчорриты; 6 – трахитоидные хибиниты; 7 – номер и условная граница структурных ярусов; 8 – предполагаемая граница ярусов: а – на глубине, б – эродированные. Цифры в кружках: 1 – Партомчорр-Лявойок; 2 – Куэльпор; 3 – Кукисвумчорр; 4 – Юкспор; 5 – Гакман-Юкспорьяк; 6 – Расвумчорр; 7 – Эвеслогчорр; 8 – Коашва; 9 – Вуоннемиок; 10 – Ньоркпахк-Суолауйв

шнуровидное продолжение” прослеживается на глубоких горизонтах через все рудное поле.

Ни одна из рассмотренных схем размещения апатитовых месторождений в пределах концентрически-зональной продуктивной интрузии не является обобщающей уже потому, что не учитывает ни структурных позиций всей совокупности Хибинских месторождений от Партомчорра до Оленьего ручья, ни особенностей их внутреннего строения, присущих каждому из этих месторождений.

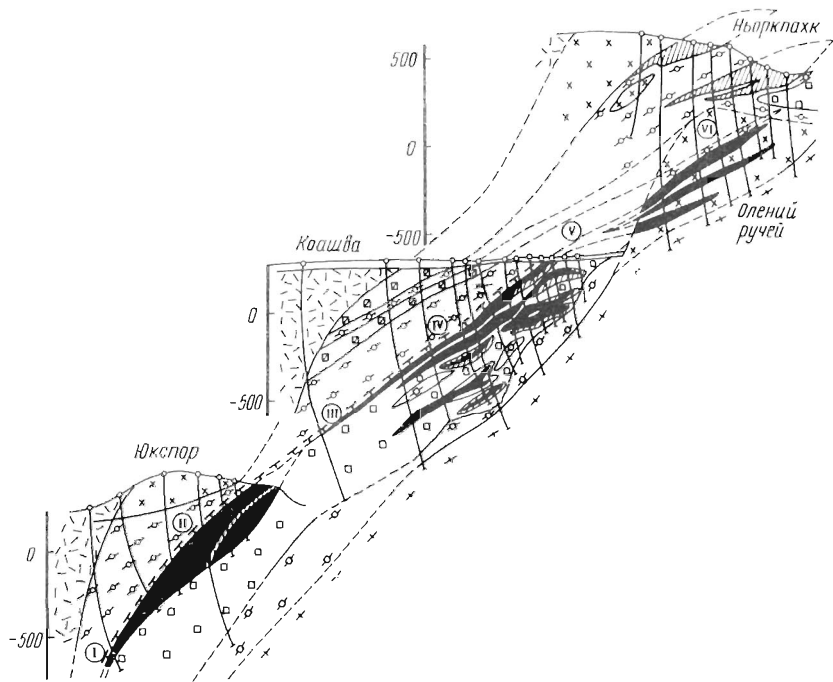


Рис. 21. Структурные ярусы хибинских месторождений. См. условные обозначения к рис. 3. Цифры в кругах: I–VI – структурные ярусы

Вместе с тем, уже при обзоре геологической схемы Хибин можно обратить внимание на симметричное расположение главных апатитовых месторождений и рудных участков относительно участка Гакман-Юкспориок. Этот участок разделяет юго-западное рудное поле на две части: справа располагается кукисвумчоррская и примыкающая к ней юкспорская апатитовые залежи, слева – расвумчоррская и сопряженная с ней рудная залежь Апатитового Цирка. Обе части по размерам, величине запасов, внутреннему строению, составу руд аналогичны друг другу. На северном и восточном их продолжении непрерывно или с нарушением сплошности прослеживаются рудные участки Куэльпор и Восточный Расвумчорр, соизмеримые между собой по масштабам и близкие по геологическому строению. Далее по простиранию через равные по протяженности безрудные участки размещаются многоярусные рудные зоны Партомчоррского и Коашвинского месторождений, характеризующиеся чередованием рудных тел (горизонтов) с прослоями массивных уртитов. В юго-восточном секторе массива известны также месторождения Ньоркпахк и Олений ручей, не имеющие, однако, аналогов в северо-западной части (рис. 20).

Закономерное размещение апатитовых залежей в плане сочетается с их вертикальной структурной зональностью в поперечном сечении. На глу-



Структурные ярусы хибинских апатитовых месторождений

Структурные ярусы	Рудные поля	Месторождения (рудные участки)	Особенности строения
I	Юго-западное	Глубокие горизонты Ку-кисвумчорр-Расвумчоррской залежи, участок Гакман-Юкспориок	Маломощная крутопадающая залежь линзовидно-полосчатых сетчатых и вкрапленных руд
II	Юго-западное	Центральные части Ку-кисвумчорр-Юкспор-Расвумчоррского и Эвеслогчоррского	Мощная пластовая пологопадающая залежь с зональным размещением пятнистых и полосчатых руд
III	Юго-восточное	Восточный Расвумчорр	Маломощная залежь частично брекчированных руд
	Северо-западное	Куэльпорский участок	
IV	Юго-восточное	Коашвинское	Мощные рудные зоны переслаивания апатитовых тел (горизонтов) и массивных уртитов
	Северо-западное	Партомчоррское	
V	Юго-восточное	Участок Вуоннемиок	Маломощная залежь сфен-apatитовых руд и уртитов
VI	"	Ньоркпахкское	Мощная зона брекчированных руд, разобщенных на серию залежей среди ийолитов
	"	Олений ручей	Мощная зона переслаивания апатитовых залежей с уртитами, ийолитами и более ранними породами

боких горизонтах юго-западного поля рудная залежь, сложенная преимущественно бедными и убогими рудами и апатитовыми уртитамы мощностью не более 25—50 м, залегает круто к центру массива под углом 50—60°. На современном эрозионном срезе эта часть рудного тела обнажается на участке Гакман-Юкспориок, т. е. к центру юго-западного рудного поля. На более высоком гипсометрическом уровне, по мере приближения к поверхности, апатитовая залежь постепенно выволаживается до 30—20°, увеличиваясь по мощности до 100—200 м и более, и приобретает отчетливую зональность, обусловленную упорядоченным переслаиванием природных типов сфен-apatитовых и апатит-нефелиновых руд.

Сходными структурно-морфологическими признаками характеризуется Эвеслогчоррская рудная залежь, скрытая на глубине 0,5—1 км от поверхности, что, с учетом ее географического расположения относительно юго-западного рудного поля, подтверждает вывод о наличии склонения.

Если предположение о взаимосвязи вертикальной и горизонтальной зональности в структуре хибинских месторождений правомерно, то для реконструкции формы эродированной части залежей юго-западного рудного поля можно использовать данные по изучению его флангов, а также апикальной части Эвеслогчоррского месторождения. По восстанию мощная зонально построенная апатитовая залежь постепенно сменяется рудным

Структурно-генетическая классификация Хибинских апатитовых месторождений,  
по Е.А. Каменеву (1981 г.)

Сложность геологического строения, группа	Приуроченность к рудоуправляющим структурам	Морфологический тип	Отношение к вмещающим породам	Наличие связи с рудоподводящими каналами	Отношение к первоначальному залеганию	Размеры рудных тел (длина, мощность)	Примеры			
Простое, I	Рудные тела в структурах расслоенных интрузивных комплексов	Рудные залежи	Связанные зонами постепенных переходов	"Срезанные" поздними интрузиями	Несмещенные (расслоенные)	Весьма крупные (3-5 км; 100-200 км)	Кукисвумчорр-Юкспор Апатитовый Цирк- Плато Расвумчорр			
							Партомчорр			
Сложное, II	Рудные тела в структурах последовательных инъекций	Многоярусные рудные зоны	С "пассивными" контактами	Бескорневые	Частично смещенные	Крупные (1-3 км; 50-100 м)	Коашва горизонты	I II	Ньюр- пахк (залежи)	Главная
					Смещенные					
						Мелкие (до 0,5 км; до 25 м)		IV	Верхняя	
			С "активными" контактами	Корневые	Несмещенные (инъекции)	Средние (0,5-1 км; 25-50 м)	Олений ручей (рудные тела)	Верхний ярус Нижний ярус 1, 2, 3 (а, б)		
----- Весьма сложное, III										

пережимом, который на дневной поверхности фиксируется на отрезке Восточной Расвумчорр-Коашва, а на северо-западе массива отражается на участке между Куэльпором и Партомчорром. Авторы считают, что полностью эродированная апикальная часть месторождений юго-западного рудного поля была представлена зоной переслаивания апатит-нефелиновых руд и массивных уртитов, аналогами которой являются Коашвинская и Партомчоррская рудные зоны.

На участке Вуоннемиок к зоне контакта пострудных трахитоидных ийолит-уртитов с массивными урритами приурочена пластовая залежь сфен-апатитовых пород. Далее к северо-востоку сфен-апатитовое оруденение сменяется многоярусными рудными зонами месторождений Ньоркпахк и Олений ручей (рис. 21). В северо-западном секторе продуктивной полосы не выявлены рудные зоны, мерфологические, сходные с известными на юго-востоке. Их отсутствие в этом районе массива объясняется срезанием льявочорритовой интрузией, смещенной относительно центра конической интрузии ийолит-уртитов на 11,9 км по азимуту СВ  $63^{\circ}$ .

Обобщение особенностей пространственного размещения апатитовых залежей, отличающихся направленным изменением геологического строения и состава руд, взаимоотношениями с вмещающими породами, приводит к выводу о наличии плановой и вертикальной структурной зональности (табл. 14). Естественные границы между структурными ярусами отсутствуют: их сменяемость по вертикали и латерали обусловлена накоплением (исчезновением) типоморфных признаков, присущих каждому из ярусов.

Пространственной моделью структурной зональности может служить усеченный плоский конус, на поверхности которого параллельно основанию расположены рудные пояса, соответствующие выделенным ярусам. В отличие от представлений А.Е. Ферсмана, предполагавшего, что ось конической модели рудного пояса ориентирована вертикально и что структурный план месторождений определяется исключительно уровнем эрозии, в выдвигаемой гипотезе допускается наклон конуса на юго-запад, вследствие чего на дневной поверхности обнажаются рудные тела различных ярусов.

На основании изложенных представлений о плановой и вертикальной структурной зональности химических месторождений и построения пространственной модели в виде перевернутого усеченного конуса была разработана структурно-генетическая классификация хибинских апатитовых месторождений (табл. 15).

**МЕТОДИКА ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ  
И КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ****СТАДИИ И СИСТЕМА ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Эффективность поисков и разведки во многом зависит от соблюдения строгой последовательности их проведения. Планомерное изучение недр включает следующие стадии и этапы:

Стадия 1 — региональные геолого-геофизические работы масштаба 1:200 000 — 1:100 000 с целью выявления главных рудоконтролирующих структур, определяющих размещение апатитоносности интрузии центрального типа; геологическая съемка перспективных площадей в масштабе 1:100 000 — 1:50 000 (1:25 000) для создания геологической основы последующих поисков — геологической, прогнозно-металлогенической, структурно-тектонической и других специальных карт; глубинное геологическое картирование с применением структурно-картировочного бурения.

Стадия 2 — поиски месторождений апатитовых руд и других полезных ископаемых, в том числе новых видов минерального сырья, с целью обеспечения резерва перспективных рудопроявлений и выявления среди них первоочередных объектов для постановки разведочных работ. В общем виде поиски начинаются с обследования потенциально рудоносных площадей (общие поиски), затем они ориентируются на обнаружение конкретных рудопроявлений (детальные поиски) и обязательно завершаются оценкой целесообразности вовлечения выявленного рудного объекта в число месторождений, подготовленных для разведки (поисково-оценочные работы).

Стадия 3 — предварительная разведка проводится на наиболее перспективных участках, получивших на поисковой стадии положительную оценку, с целью определения общих масштабов запасов, условий разработки и возможной добычи. На этом же этапе рекомендуется изучить природные факторы, влияние на выбор рациональной методики предстоящих детальных разведочных работ. По материалам предварительной разведки рассчитываются технико-экономические показатели временных кондиций для подсчета запасов и решается вопрос о целесообразности детальной разведки.

Стадия 4 — детальная разведка является завершающим этапом подготовки месторождения для промышленного освоения, что предопределяет ее конечные задачи по учету всех геологических, горнотехнических, технологических и других факторов с полнотой и достоверностью, достаточной для составления экономически оптимального проекта строительства и эксплуатации горно-обогатительного предприятия. Для подсчета разведанных запасов используются постоянные кондиции, утвержденные в ус-

тановленном порядке Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых (ГКЗ СССР).

Стадия 5 — эксплуатационная разведка необходима для уточнения перспектив прироста запасов на флангах, глубоких горизонтах, для обеспечения текущего планирования добычи.

Требования по соблюдению очередности в организации геологоразведочных работ не исключают, а предполагают необходимость творческого подхода к их планированию, когда в зависимости от конкретных условий отдельные стадии и этапы работ могут по времени совмещаться или даже исключаться.

Хибинские апатитовые месторождения выявлены и подготовлены для промышленного освоения в результате планомерного проведения научно обоснованных поисковых и разведочных работ по стадиям.

В первые годы промышленного освоения хибинских апатитовых залежей, прогнозные запасы которых при сравнительно небольших объемах добычи считались неисчерпаемыми, геологоразведочные работы были в основном ориентированы не на выявление новых месторождений, а на подготовку сырьевой базы для организации горнорудного предприятия. Ускоренное развитие разведки, минуя стадию поисков, вызванное народнохозяйственной необходимостью, следует признать правомерным.

Учитывая возросшие потребности в фосфатном сырье, недостаточную геологическую изученность Хибинского массива в целом и продуктивной ийолит-уртитовой интрузии в особенности, а также слабую научную обоснованность поисковых критериев, были проведены общие поиски, включавшие среднemasштабное геологическое картирование Хибинского массива и его обрамления на площади 1,5 тыс. км<sup>2</sup> и составление комплекта карт — геологической, структурной, полезных ископаемых и четвертичных отложений. Главным результатом этого этапа работ явилось уточнение важной в поисковом отношении возрастной последовательности формирования интрузивных комплексов массива, выделение трех субфаз продуктивных ийолит-уртитов (лорудной, рудной и пострудной), разработка принципиально новых поисковых критериев на апатит [46].

Ранее считалось, что апатитовые руды следует искать в кровле нерасчлененной (однофазной) интрузии ийолит-уртитов на границе с покрывающими ризчорритами, что ошибочно ориентировало поиски на зону контакта этих пород и ограничивало их относительно небольшими глубинами. В связи с расчленением продуктивной интрузии на три субфазы и установлением генетической и пространственной связи апатитового оруденения с массивными урритами рудной субфазы были существенно уточнены закономерности локализации апатитовых залежей и расширены перспективы поисков.

Новые поисковые критерии были положены в основу детальных поисков на площади продуктивной интрузии ийолит-уртитов в 100 км<sup>2</sup>, которые сопровождалась крупномасштабной геологической съемкой по системе радиальных профилей, комплексными наземными геофизическими исследованиями (грави-, магнито- и сейсморазведка), горными работами на закрытых территориях и поисково-картировочным бурением до глубины

200–500 м. По завершении детальных поисков были определены наиболее перспективные участки в юго-восточной и северо-западной частях дугообразной интрузии ийолит-уртитов для постановки поисково-оценочных работ на выявленных месторождениях Коашва и Партомчорр. Эти работы заключались в установлении пространственных границ оруденения в плане и на глубину до 500 м, изучении вещественного состава руд, определении прогнозных запасов и общих условий их разработки.

На основе сравнительного экономического анализа ряда рудных объектов производится их разработка и определяется очередность проведения геологоразведочных работ.

Для крупных месторождений, промышленная ценность которых не вызывает сомнения, целесообразно совместить стадии предварительной и детальной разведок, что способствует рациональному использованию основных видов геологоразведочных работ, сокращает сроки подготовки месторождения для передачи промышленности и повышает экономическую эффективность разведки. Разведка Ньоркпахкского месторождения проводилась без разделения по стадиям, что позволило выполнить ее досрочно и снизить плановую стоимость на 10 %.

Для уменьшения степени риска и во избежание неоправданных затрат на разведку нерентабельного объекта в процессе изучения месторождения разрабатываются экономически обоснованные требования к качеству руд и к условиям их эксплуатации. Временные кондиции составляются по материалам предварительной разведки, утверждаются министерством или ведомством, в ведение которого передается месторождение, и используется для оперативного подсчета запасов. По результатам детальной разведки требования к руде подлежат существенному уточнению: технико-экономические расчеты при обосновании постоянных кондиций должны наиболее полно учитывать количество и качество руд, разведанных по промышленным категориям в необходимых соотношениях; достоверно установленные показатели по обогатимости руд и переработке их на конечные товарные продукты; гидрогеологические и горнотехнические условия эксплуатации. Таким образом, постоянные кондиции определяют основные требования, которыми следует руководствоваться при подсчете и утверждении балансовых и забалансовых запасов, разработке проектов горнорудных предприятий и планировании добычи.

При рассмотрении методических приемов разведки хибинских апатитовых месторождений следует подчеркнуть их уникальность как природных геологических образований, не имеющих аналогов в мировой практике. Проведение геологоразведочных работ на современном этапе определяется следующими факторами:

- вовлечение в разведку все более сложных по морфологии и структуре рудных тел и месторождений, имеющих многоярусное строение;
- большие глубины залегания рудных тел, достигающие 1–1,5 км;
- последовательное изменение кондиций, переоценка бедных руд;
- изучение апатитовых руд как комплексного минерального сырья;
- детальное исследование технологии обогатимости руд различного качества с получением всех минеральных концентратов и их последующей

переработкой на конечные продукты, используемые в различных отраслях промышленности.

К числу наиболее важных мероприятий по совершенствованию методики и повышению эффективности разведочных работ относятся: 1) разработка и научное обоснование новых поисковых критериев; 2) внедрение оптимальных систем разведки с учетом особенностей геологического строения и специфики состава руд различных типов; 3) внедрение рационального комплекса скважинной геофизики, в частности нейтронного активационного каротажа для определения содержаний фосфора и фтора и использования их для подсчета запасов; 4) разработка и реализация программы геологопромышленной оценки апатитовых руд на основные и попутные полезные компоненты; 5) совершенствование и освоение методов массовых анализов химического и минерального состава многокомпонентных апатитовых руд; 6) экономическое обоснование их комплексного использования; 7) совершенствование методов подсчета запасов и их творческое применение в зависимости от особенностей геологического строения месторождений и применявшейся системы разведки.

В связи с развитием техники добычи и совершенствованием технологии переработки апатитовых руд, а также ростом потребности в фосфатном сырье неоднократно пересматривались показатели кондиций в части снижения бортового и минимального промышленного содержания пятиоксида фосфора в балансовых рудах. В первые годы разработки хибинских месторождений добывались исключительно богатые руды (более 28 %  $P_2O_5$ ); в довоенный период бортовое содержание  $P_2O_5$  в рудах принималось равным 18 % при среднем по месторождению не менее 20 %; в дальнейшем эти показатели были снижены соответственно до 12 и 18 %, а в настоящее время действуют кондиции, предусматривающие бортовое содержание  $P_2O_5$  в балансовых рудах для открытой разработки 6%, для подземной 8 %, а минимальное промышленное содержание в зависимости от способа добычи 11–13,5 %  $P_2O_5$ . Из анализа данных, приведенных в табл. 16, следует, что по мере увеличения масштабов добычи и выпуска апатитового концентрата последовательно снижалось среднее содержание  $P_2O_5$  в исходной руде.

Для перспективных месторождений, намечаемых для освоения в ближайшие годы, разработаны постоянные кондиции с бортовым содержанием  $P_2O_5$  в балансовых рудах 3–6 %, минимальным промышленным содержанием 4–8 %. Учитывая возрастающую потребность в продукции, выпускаемой объединением "Апатит", в настоящее время производится коренная переоценка эксплуатируемых месторождений на основе новых кондиций и с учетом требований законодательства о недрах по комплексному использованию наряду с основными также и попутных полезных компонентов.

Важным фактором повышения эффективности геологоразведочных работ является продуманная система разведки, под которой понимается порядок пространственного расположения и последовательность проходки разведочных выработок, что обеспечивает рациональное решение геологической задачи на каждой стадии при минимальной затрате средств.

Динамика разработки хибинских месторождений

Годы	Добыча, млн. т		Содержание $P_2O_5$ в добываемой руде	Выпуск апатитового концентрата, млн. т	Разведанные запасы руды, млн. т
	годовая	с начала освоения			
1930	0,1	0,1	32,30	—	—
1935	1,5	4,2	26,75	1,0	200
1940	1,8	15,1	25,01	1,1	350
1950	2,9	26,4	23,45	1,5	520
1955	5,3	47,2	21,53	2,6	1060
1960	8,5	85,6	19,51	3,8	1380
1965	19,8	151,5	17,62	7,5	1850
1970	27,2	271,2	17,57	11,3	2230
1975	38,1	439,7	17,07	15,8	3220
1980	46,5	654,0	16,22	17,1	4000

Хибинские апатитовые месторождения различаются между собой по размерам, условиям залегания, строению залежей, изменчивости формы рудных тел и качеству руд, в соответствии с чем они могут быть представлены несколькими морфологическими типами:

1) весьма значительные по размерам пологозалегающие пласты с направленно изменяющимися с глубиной мощностью и качеством руд (Кукисвумчорр, Юкспор, Апатитовый Цирк, Плато Расвумчорр, Эвеслогчорр), относящиеся к группе I (месторождения простого строения), для которых запасы должны быть разведаны по категориям А, В и С<sub>1</sub> в соотношении 10:20:70 %;

2) крупные и средние по масштабам рудные зоны, состоящие из нескольких (2–4) рудных тел (горизонтов) относительно простой (Партомчорр) или сложной (Коашва, Ньюркпахк) формы с изменчивым качеством руд. По степени сложности геологического строения месторождения Коашва и Ньюркпахк, представленные горизонтами брекчиевых руд, принадлежат к группе II, для которых выявление при разведке запасов категории А нецелесообразно в связи с высокой стоимостью геологоразведочных работ, а запасы категории В должны быть обеспечены в количестве не менее 20 %;

3) крупная по размерам глубокозалегающая многоярусная рудная зона месторождения Олений ручей, в которой выделяется до девяти крутопадающих рудных тел весьма сложной формы с невыдержанной мощностью, но относительно постоянным качеством руд. Это месторождение условно относится к группе II по сложности геологического строения.

Таким образом, вне зависимости от сложности геологического строения и степени выдержанности рудных тел все хибинские месторождения имеют пластообразную форму и характеризуются анизотропией морфологических свойств: изменчивость мощности и средних содержаний пятиокси фосфора по простиранию рудных тел меньше, чем в направлении



падения. Для разведки пластовых месторождений наиболее рациональна система расположения скважин по линиям профилей, ориентированных вкрест простирания рудной зоны, с последовательным сгущением сети выработок. Однако такая система разведки не всегда могла быть соблюдена по ряду причин. Во-первых, в связи с естественным искривлением скважин, особенно интенсивным в многоярусных рудных зонах, средние точки пересечения отдельных пластов, залегающих друг под другом, смещаются относительно линии профиля. Причем величина смещения в некоторых случаях может превышать ширину интервала между профилями, и тогда для каждого рудного пласта создавалась автономная разведочная сеть с независимыми параметрами. Во-вторых, в условиях горного рельефа и повышенной лавиноопасности в течение большей части года широко применялось наклонно-направленное бурение скважин по заданной траектории, однако искусственное искривление также неизбежно приводило к частичному нарушению правильности разведочной сети.

В большинстве случаев применение наклонно-направленного и кустового бурения с использованием стационарных, съемных отклонений и отклонений непрерывного действия в сочетании с учетом закономерностей естественного искривления скважин обеспечивало выведение их в проектные точки с требуемой точностью.

Выбор оптимальной системы разведки для вновь разведываемых месторождений обычно производится по аналогии с детально изученными объектами. Участки для выявления запасов по высоким категориям намечаются перед началом детальной разведки по согласованию с проектирующей организацией. Правильность принятой формы и параметров сети выработок впоследствии проверяется и при необходимости корректируется методами последовательного разрежения выработок по простиранию и по падению или любым другим из известных методов (сравнением с эксплуатационными данными, по аналогии с другим объектами, с использованием математической статистики).

## РАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Требования промышленности к материалам геологоразведочных работ в части их полноты и достоверности непрерывно повышаются. Основным видом работ при разведке хибинских месторождений является бурение скважин, обеспечивающее наиболее полную информацию о масштабах распространения и условиях залегания рудных тел, вещественном составе апатитовых руд и вмещающих пород, характере их взаимоотношений и вторичных изменениях, физико-механическом состоянии коренных пород и их обводненности. В целях сокращения сроков и повышения геолого-экономической эффективности поисковых и разведочных работ освоены и внедрены прогрессивные методы бурения и современные технические средства: алмазные коронки, гладкоствольные колонны со съемными керноприемниками, легкосплавные бурильные трубы, высокочастотные гидроударные машины, новейшая контрольно-измерительная аппаратура. Наряду с техническим переоснащением совершенствуются технология

## Скважинные геофизические методы

Геологические задачи	Основные	Вспомогательные
1	КМВ, ГК, ГГК-II	Расходо- и кавернометрия, НАК <sup>16</sup>
2	НАК <sup>16</sup>	ГК, ГГК-II, КМВ, кавернометрия
3	Расходо-, термо- и кавернометрия	Резистивиметрия
4	ГК	НАК <sup>16</sup>
5	Газовый каротаж	Газометрические исследования

бурения и проведения скважин (многоствольное и наклонно-направленное бурение на форсированных режимах комбинированным способом с применением шарошечных долот и алмазных коронок и т. д.).

В результате совершенствования методики и техники разведки резко ускорились темпы прироста запасов: если на разведку первого миллиарда тонн апатитовых руд потребовалась четверть века (1930–1955 гг.), то на выявление второго миллиарда было затрачено 12 лет (1956–1967 гг.), на разведку третьего миллиарда только 7 лет (1968–1974 гг.), а рубеж в четыре миллиарда тонн разведанных запасов апатитовых руд был достигнут за последние 5 лет (1975–1979 гг.).

В практике поисковых и разведочных работ в Хибинах широко используются геофизические исследования в скважинах, включающие гамма-каротаж (ГК), каротаж магнитной восприимчивости (КМВ), плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-II), нейтронный активационный каротаж по изотопу азот-16 (НАК<sup>16</sup>), расходо-, термо-, каверно- и резистивиметрию, а также газовый каротаж и газометрические исследования. Методы скважинной геофизики применяются для решения следующих геологических задач (табл. 17): 1) расчленение разреза в интервалах бескернового бурения, на участках с низким выходом керна или на объектах со скрытой слоистостью, уточнение глубин контактов и других геологических границ, изучение физических свойств руд и горных пород; 2) выделение рудных интервалов и определение содержаний фтора и фосфора в околоскважинном пространстве для подсчета запасов; 3) исследование гидрогеологических условий месторождений, выделение зон водообмена, связанных с повышенной трещиноватостью, исследование геотермического режима; 4) выявление и поиски рассеянных элементов; 5) анализ газового режима, прогнозирование газоопасных проявлений при бурении скважин и эксплуатации месторождений.

Руды и породы хибинских месторождений характеризуются широким диапазоном значений плотности и магнитной восприимчивости, что обеспечивает воспроизводимость и информативность комплексного каротажа. Плотность (в г/см<sup>3</sup>) руд зависит от содержания апатита и повышается от 2,8–2,9 в относительно бедных рудах до 3,0–3,2 в богатых. Вмещающие породы также дифференцируются по плотности от 2,5–2,75 в лейкократовых урритах, ювитах, нефелиновых сиенитах, 2,85–3 в мезократовых ийо-

литах, малиньтах, луявритах до 3,0—3,5 в меланократовых мельтейгитах и якупирангитах. По гамма-активности (в мкР/ч) апатитовые руды (20—40) и ийолит-уртиты (10—20) отчетливо выделяются на фоне окружающих нефелиновых сиенитов (40—50). Магнитная восприимчивость руд и пород определяется в основном присутствием титаномагнетита, которым наиболее обогащены мельтейгиты и якупирангиты, промежуточными значениями характеризуются ийолиты и некоторые разновидности руд, а лейкократовые породы практически немагнитны.

Метод НАК<sup>16</sup> основан на ядерной реакции  $^{19}\text{F} + n \rightarrow ^{16}\text{N} + \alpha$ , возникающей при активации полоний-бериллиевым источником. Между фтором и фосфором, содержащимися в апатите, существует прямая и тесная корреляционная связь (К 0,98). Фтор входит также в состав биотита — главного минерала слюдяных мельтейгитов. Для однозначной разбраковки мельтейгитов и рудных интервалов в комплексе с НАК<sup>16</sup> применяются ГК, ГК-П и КМВ. Активационный каротаж по определению фтора и фосфора апробирован ГКЗ СССР и широко применяется при подсчете запасов этих компонентов. Экономический эффект от использования метода НАК<sup>16</sup> при разведке одного только Ньоркпахкского месторождения составил 270 тыс. руб.

Некоторые вопросы практического применения комплексного каротажа, по-видимому, изучены не полностью. При творческом подходе к интерпретации отдельных методов открываются новые возможности. Так, методом ГК уверенно выделяется граница морены и коренных пород, которая из-за повышенной трещиноватости не всегда фиксируется при бурении.

Использование расходомерии в комплексе с другими методами вместо трудоемких и дорогостоящих гидрогеологических откачек и наливов оказалось весьма эффективно для выявления водоносных горизонтов и определения статического уровня, удельного расхода и коэффициента фильтрации. В этом отношении возможности резистивиметрии более ограничены в связи с самоизливом скважин. Термокаротаж применяется в комплексе с другими методами для изучения гидрогеологических условий, температурного режима, определения геотермического градиента и ступени. Установлено, что ниже зоны климатической зависимости (около 1 км от поверхности) температура увеличивается на 1 °С в среднем через 38,8 м (градиент 2,58 град/100 м). Термокаротаж весьма информативен как с целью гидрогеологии и проектирования глубоких подземных рудников, так и с целью изучения физико-химических процессов, протекающих в недрах.

Взрывоопасные газопроявления при разведке и эксплуатации хибинских месторождений вызвали необходимость проведения газового каротажа, методика которого заключается в изучении газов свободной фазы и газов закрытых полостей минералов. Исследованы состав и содержание газов (метан и другие углеводороды, водород), установлена их связь с определенным комплексом пород, разработаны методы прогноза и предупреждения внезапных выбросов горючих газов. Кроме того, газокаротаж может быть использован при расшифровке структуры сложных многоярусных месторождений.

Горные работы на современном этапе изучения хибинских месторождений утратили свое значение и здесь не рассматриваются. Ранее они широко применялись при поисках и разведке для вскрытия и оконтуривания рудных выходов, прослеживании сплошности оруденения и при специальных инженерно-геологических изысканиях.

## КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА АПАТИТОВЫХ РУД

Апатит-нефелиновые руды – комплексное минеральное сырье. Практическое значение имеют (или могут иметь) главные минералы этих руд: апатит, нефелин, сфен, титаномagnetит, частично эгирин, составляющие свыше 95 % их массы и извлекаемые в селективные концентраты. Каждый из рудовмещающих минералов, кроме основных компонентов: фосфора и фтора в апатите, алюминия в нефелине, титана в сфене и титаномagnetите, содержит в качестве изоморфных примесей редкие попутные полезные компоненты [4]. Нефелин – также исходное сырье для получения порландцемента, поташа, содопродуктов и алломокалиевых квасцов; сфен может использоваться в лакокрасочном производстве, а эгирин – при изготовлении глазурей для покрытия керамики.

Вмещающие породы соответствуют требованиям строительной промышленности и могут применяться в качестве щебня и заполнителей для тяжелого бетона.

Академик А.Е. Ферсман неоднократно подчеркивал необходимость всестороннего изучения и социально-экономическую важность комплексного освоения апатит-нефелиновых руд Хибин.

Проводившиеся впоследствии минералого-геохимические исследования, лабораторные технологические испытания и укрупненные технико-экономические расчеты подтверждали практическую значимость рационального освоения апатитовых руд Хибин, не имеющих в мировой практике аналогов ни по масштабам их концентрации в недрах, ни по разнообразию и богатству связанных с ними минеральных ассоциаций. Однако эти изыскания выполнялись в недостаточном объеме, не имели систематической направленности и не обеспечивали основы для практического решения проблемы комплексного использования природных богатств Хибин.

Для реализации этой важной народнохозяйственной проблемы разработана программа и обоснована методика геологоразведочных, минералого-геохимических, технологических и геолого-экономических исследований с целью промышленной оценки апатитовых руд новых и эксплуатируемых месторождений на весь комплекс основных и попутных полезных компонентов. Программой предусмотрено систематическое опробование, скомплексированы рациональные методы массового анализа вещественного состава (инструментальный нейтронно-активационный, флуоресцентный рентгено-спектральный и др.), исследования распространенности попутных полезных компонентов в рудах и породах, в минералах, их концентратах и продуктах обогащения, методика статистической обработки этих данных на ЭВМ, комплексные технологические испытания руд в условиях замкнутого водооборота, переработка минеральных концентрата

тов на конечные продукты, изучение баланса распределения компонентов, количественная оценка запасов и экономический анализ эффективности использования комплексных руд в промышленных масштабах. Выполнение намеченной программы потребовало четкой координации работ многих геолого-производственных, научно-исследовательских и проектных организаций.

Изучение попутных полезных компонентов выполнялось в комплексе с разведкой месторождений на основной полезный компонент. С целью выяснения распределения и содержания редких компонентов в рудных телах, природных типах руд и петрографических разновидностях, мономинеральных фракциях, лабораторных концентратах и продуктах обогащения осуществлялось систематическое опробование. Групповые пробы, характеризующие определенные типы руд и пород, отбирались из дубликатов обработки рядовых проб пропорционально их длинам в пересчете на 100 % выхода керна и направлялись на минералогический и химический анализы (на 10—15 компонентов). По результатам анализов устанавливались парные и множественные корреляционные связи между минералами и компонентами, что обеспечивало использование установленных аналогий и сокращение объемов аналитических исследований. Мономинеральные фракции из всех разновидностей руд и пород отбирались и анализировались раздельно. Чистота выделенных минералов контролировалась просмотром под биноклем и проверялась химическим анализом по основному компоненту: апатита — по фосфору, нефелина — по алюминию и т. д. По результатам полных химических анализов минералов и лабораторных концентратов составлялись балансы распределения основных попутных полезных компонентов и их средние содержания. Внутренний и внешний контроль анализов компонентов по классам содержаний выполнялся в большом объеме (по отдельным элементам до 100 %) различными методами в специализированных лабораториях.

Количественная оценка запасов комплексных руд производилась в зависимости от особенностей геологического строения, характера распределения основных и попутных компонентов и принятой системы разведки различными методами: блоков (месторождения Партомчорр, Коашва), геологических разрезов (Ньюркапак, эксплуатируемые месторождения), горизонтальных сечений и изолиний мощности (Эвеслогчорр). Подсчет запасов попутных компонентов в балансовых и забалансовых рудах выполнялся по той же методике, что и для основного компонента, и проверялся контрольными подсчетами по корреляционным связям с фосфором и (или) алюминием и по средним содержаниям в главных рудообразующих минералах. Сходимость результатов подсчета запасов различными методами с учетом балансов распространения элементов обычно не превышает 3—5 отн. % для промышленных категорий.

#### МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКИХ РАБОТ.

#### АТТЕСТАЦИЯ ВНУТРЕННИХ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ

В соответствии с программой комплексного минералого-геохимического исследования состава апатит-нефелиновых руд с 1973 г. систематически изучались распространенность и распределение редких элементов и

Химический состав стандартных образцов.  
По З. Т. Катаевой, Д. А. Минееву (1973 г.) (в %)

Компоненты	Апатит-нефелиновая руда	Апатитовый концентрат	Нефелиновый концентрат
SiO <sub>2</sub>	7,50	0,56	44,58
TiO <sub>2</sub>	0,65	0,61	0,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,84	1,64	29,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,40	0,60	2,00
FeO	0,42	0,08	1,00
MnO	0,06	0,04	0,03
MgO	0,20	Сл.	0,22
CaO	45,11	52,40	1,30
SrO	1,80	2,72	0,03
BaO	0,23	0,18	0,04
Na <sub>2</sub> O	2,58	0,52	12,11
K <sub>2</sub> O	0,89	0,17	8,13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	30,64	37,52	0,34
H <sub>2</sub> O ±	0,40	0,10	1,02
F	2,93	3,32	0,07
ΣTR	0,75	0,95	0,015
Сумма	101,40	101,41	100,34
-O = F <sub>2</sub>	1,23	1,39	0,03
Сумма	100,17	100,02	100,31

Таблица 19

Содержание редкоземельных элементов в стандартном апатитовом концентрате по данным разных аналитических методов. По Д. А. Минееву [33] (в отн. %)

Элементы	Методы			Среднее
	рентгено-спектрохимический (Р.Л. Баринский)	прямой спектральный (Л.Г. Логинова)	хроматографический (Т.Н. Павлова)	
La	29,8	27,6	28,9	28,8
Ce	44,8	46,8	43,5	45,0
Pr	4,4	5,7	5,5	5,2
Nd	15,8	12,8	15,2	14,6
Sm	2,1	2,1	2,5	2,2
Eu	0,6	0,7	2,6	0,7
Gd	1,6	1,8	—	1,8
Tb	—	—	1,3	0,1
Dy	0,7	1,3	—	1,1
Ho	—	0,2	—	0,1
Er	0,2	0,7	0,4	0,4
Tm	—	—	—	—
Yb	—	0,2	—	0,1
Lu	—	—	—	—
Y, г/т	—	540	380	460
ΣTR, г/т	9100	9550	8550	9050

Примечание. В таблице в скобках даны фамилии аналитиков.

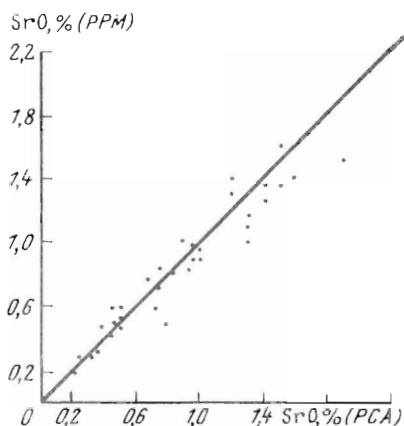


Рис. 22. Сходимость результатов определения содержаний стронция в рудах, выполненных рентгено-радиометрическим (PPM) и рентгено-спектральным (РСА) методами. По Д.А. Минееву, Р.И. Фарфель

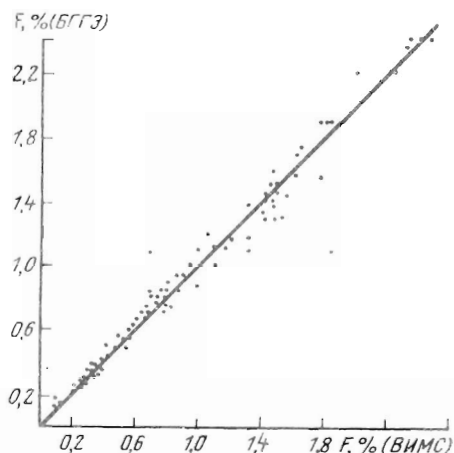


Рис. 23. Сходимость результатов определения содержания фтора в рудах, выполненных методом фторид-селективного электрода в разных лабораториях. По Д.А. Минееву, Р.И. Фарфель

фтора в породах, рудах и концентратах эксплуатируемых и разведываемых месторождений. Исследовалось содержание Rb, Cs, Sr, Ga,  $\Sigma TR$ , Y и др. и 14 индивидуальных лантаноидов, Ti, Nb, Ta и других элементов в тысячах рядовых и групповых проб руд и в сотнях моно-минеральных фракций.

Исследование распространённости и распределения редких элементов в рудах и промышленных продуктах из-за низких содержаний и большого числа мешающих компонентов — очень сложная аналитическая задача. Поэтому первоначально сопоставлялись возможности разных методов в применении к исследуемому объекту, в том числе ряда новых и новейших методик, разработанных в последнее время. Это потребовало создания и аттестации специальных внутренних стандартных образцов, приготовленных по существующим нормам и проанализированных различными химическими и физическими методами. За стандартные образцы были взяты пробы пятнистополосчатой апатит-нефелиновой руды и продуктов ее технологической переработки — апатитового и нефелинового концентратов, многократно проанализированных на содержание основных и второстепенных компонентов, включая редкие металлы и фтор (табл. 18, 19).

В связи со значительным разнообразием объектов исследования и задач при геохимическом исследовании применялись методы и методики, специально разработанные под руководством Д.А. Минеева, З.Т. Катаевой, Р.Л. Баринского, Е.И. Зайцева, Л.Г. Логиновой в ИМГРЭ для анализа

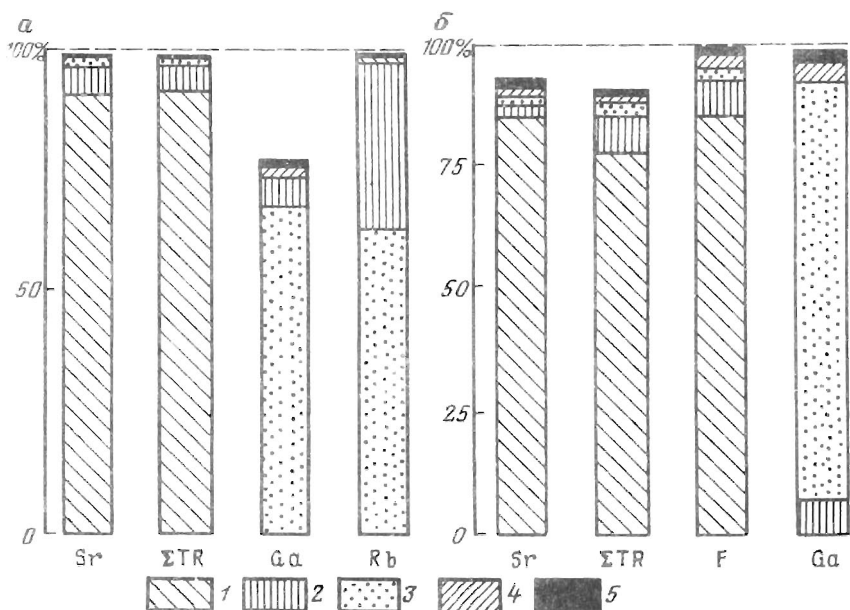


Рис. 24. Баланс распределения попутных полезных компонентов по промышленным концентратам Южорского (а) и Партомчорского (б) месторождений. По А.Ю. Белякову, Д.А. Минееву

Концентраты: 1 – апатитовый; 2 – пироксеновый; 3 – нефелиновый; 4 – сфеновый; 5 – титаномагнетитовый

редкометалльно-фосфатного сырья и утвержденные в Научном совете по аналитическим методам (НСАМ ГКЗ СССР).

Анализ содержания стронция и основных РЗЭ выполнялся инструментальным нейтронно-активационным методом (ИНАА). Благодаря высокому энергетическому разрешению спектрометра аналитические линии определяемых элементов выделяются практически без помех со стороны других элементов, присутствующих в пробах, что обеспечивает точность определения  $\pm 10$  отн. %.

Содержание щелочных металлов Rb, Cs и др. определялось фотометрией пламени и флуоресцентным рентгеноспектральным анализом (РСА).

Редкоземельные элементы Sr, Y, Rb и др. определялись для контроля на приборе РРС-2 и на уникальной установке Р.Л. Баринского. Излучение регистрировалось пропорциональным счетчиком ФЭУ, что позволило избежать наложения на анализируемую линию излучения других порядков и повышало чувствительность до 0,00n % на Sr, Y, Rb и др. и 0,01 % на сумму редкоземельных металлов  $\Sigma TR_2 O_3$  (рис. 22).

Содержание Pb, Sr и др. определялось рентгеноспектральным методом на установке КРФ-18, F – химическим анализом со фторид-селективным электродом (рис. 23).



Расчет баланса распределения редкоземельных элементов по основным минералам апатит-нефелиновых пород одного из новых хибинских месторождений (в %)

Минералы	Среднее содержание минерала в руде	Среднее содержание РЗЭ в минерале	Доля РЗЭ, сосредоточенных в минерале	Содержание РЗЭ в минерале
Апатит	26,92	0,966	80,65	0,26
Нефелин	44,01	0,005	0,68	0,0022
Сфен	6,99	0,785	16,98	0,0547
Титаномагнетит	10,58	0,023	0,75	0,0024
Эгирин-диопсид	11,10	0,026	0,90	0,0029
Калиевый полево-шпат	0,37	0,040	0,04	0,00015

Примечание. Среднее содержание TR в породе 0,34 %.

Помимо общих для всех элементов статистического и графического анализов (статистической оценки средних содержаний, коэффициентов концентраций, поэлементные графики сравнения, корреляционный анализ по программе), для РЗЭ применялись разработанные Д.А. Минеевым методы графического исследования составов РЗЭ на основе тройной диаграммы, диаграмма "логарифм содержаний РЗЭ – состав лантаноидов", базирующаяся на изотопной модели природной смеси лантаноидов [33].

После выполнения аналитических работ с помощью ЭВМ были проанализированы корреляционные связи между основными и попутными компонентами при разных бортовых содержаниях  $P_2O_5$ , рассчитан баланс распределения попутных полезных компонентов по минералам и концентратам (табл. 20, рис. 24), определена доля извлекаемых попутных компонентов, подсчитаны запасы попутных компонентов в извлекаемых промышленных концентратах.

Учитывая установленную тесную корреляционную связь между La, Ce и  $\Sigma TR_2O_3$  в наблюдаемом диапазоне содержаний в рудах (рис. 25) и преобладание La + Ce в  $\Sigma TR$ , определение  $\Sigma TR_2O_3$  в рудах может быть здесь заменено определением  $\Sigma (La + Ce)$  и вычислением  $\Sigma TR_2O_3$  по корреляции или графику, что при наличии систематического контроля повышает экспрессность и понижает стоимость аналитических работ без снижения их достоверности.

В результате проведения систематических исследований получена детальная характеристика распределения содержаний редких и рассеянных элементов в апатитах, сфенах, пироксенах, титаномагнетитах всех месторождений.

Редкие и рассеянные элементы сосредоточены в виде изоморфных примесей в апатите – Sr, 15 TR; нефелине – Rb, Cs, Ga, сфене – Nb, Ta, титаномагнетите – V. Редкие – Sr, TR, F, Nb, Ta, V существенно концентрируются против кларка в апатите, сфене и титаномагнетите; рассеянные – Rb, Cs, Ga содержатся в низких, околосларковских количествах в нефелине.

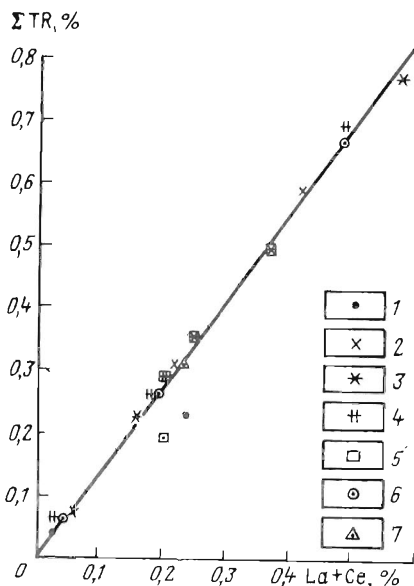


Рис. 25. Корреляция между средними содержаниями в рудах разных месторождений Хибин суммы лантана и церия и всей суммы РЗЭ ( $\Sigma TR$ ) в диапазоне анализированных содержаний. По Д.А. Минееву, Р.И. Фарфель

Месторождения: 1 – Юкспор, 2 – Коашва, 3 – Эвеслогчорр; 4 – Партомчорр; 5 – среднее для месторождения; 6 – среднее для интервалов  $\Sigma TR < 0,1$ ; 0,1–0,5; 0,5–1,0; 7 – общая средняя

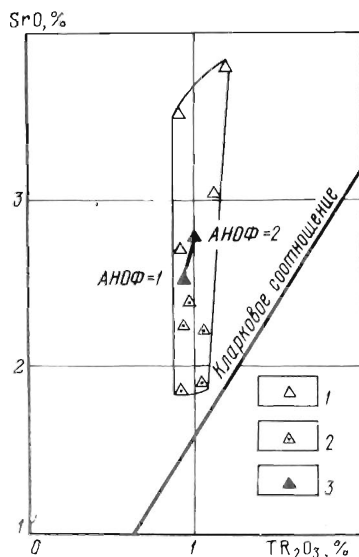


Рис. 26. Стронций и редкие земли в апатитовых концентратах хибинских месторождений

1 – разведываемых; 2 – эксплуатируемых; 3 – концентрат текущей добычи

Характерная особенность – обогащение редкими металлами, особенно стронцием, апатита более бедных по содержанию фосфора новых месторождений, разведывавшихся в последнее время, по сравнению с эксплуатируемыми (рис. 26). Спектр лантаноидов (Ln), наиболее лантан-цериевый из известных для фосфатных месторождений, изменяется он только в пределах рудной зоны, где относительная концентрация лантана несколько повышается с ростом концентрации апатита снизу вверх в вертикальном разрезе рудных тел.

Содержание Sr и РЗЭ в сфене ниже, чем в апатите (0,3–0,5%), а в пироксенах, нефелине, титаномагнетите, полевых шпатах – на уровне кларков. Баланс распределения редких элементов в рудах свидетельствует об их преимущественной концентрации в апатите (см. табл. 20, рис. 27).

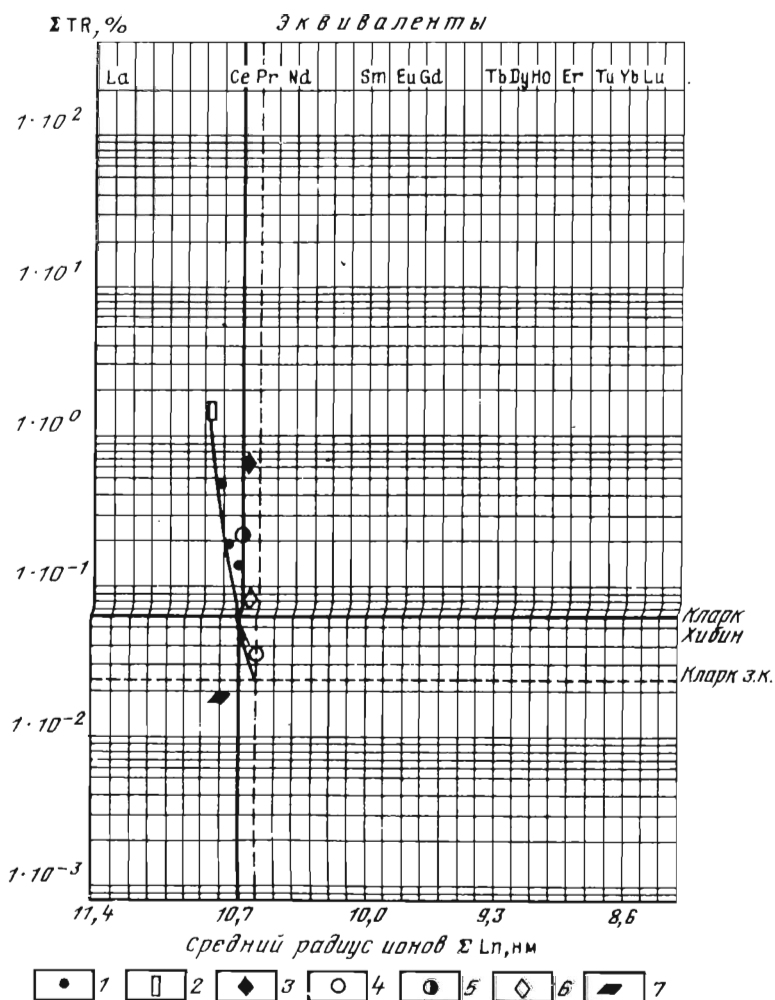


Рис. 27. Редкоземельные элементы в рудах и концентратах месторождения Ньюр-пахк. По Д.А. Минееву, З.Т. Катаевой

1 - апатит-нефелиновые руды; 2 - апатит, концентраты; 3 - сфеновый, 4 - нефелиновый; 5 - темноцветный продукт; 6 - эгириновый, 7 - титаномагнетитовый

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

Сбогачение хибинских апатит-нефелиновых руд осуществляется с 1931 г., когда была пущена в эксплуатацию первая очередь первой апатит-нефелиновой фабрики (АНОФ-1). Вторая фабрика (АНОФ-2) введена в эксплуатацию в 1963–1965 гг. Современные технологические схемы фабрик включают дробление, измельчение и флотацию руды, а также сгущение, фильтрацию и сушку апатитового концентрата. Дробление руды производится в конусных дробилках в три стадии с предварительным грохочением; измельчение в шаровых мельницах с разгрузкой через решетку, работающих в замкнутом цикле со спиральными классификаторами или гидроциклонами. Подготовленная руда поступает на флотацию апатита по схеме, включающей три перемывки концентрата основной флотации и контрольную. Для апатитовой флотации в качестве собирателей применяется хорошо зарекомендовавшая себя омыленная смесь сырого и дистиллированного талловых масел, вторичного масляного гудрона и окисленного петролатума. Для полноты омыления дается избыточная щелочность в пределах 15–20 %.

По существующей технологической схеме на обогатительных фабриках из апатит-нефелиновых руд извлекается только апатит и частично (12–14 %) – нефелин. Остальная часть полезных компонентов направляется в хвостохранилище. В основном апатит-нефелиновые руды характеризуются хорошей обогатимостью. Из-за средне- и грубозернистой структуры они не требуют тонкого измельчения. Полное раскрытие зерен апатита обеспечивается, когда в измельченной руде содержится 50 % класса меньше 0,074 мм. Высокие флотационные свойства апатита и развитая технология его выделения позволяют получать апатитовый концентрат с содержанием 39,4–39,5 %  $P_2O_5$  при технологическом извлечении фосфорного ангидрида на уровне 93–95 %. Концентрат характеризуется однородностью своего состава, небольшим содержанием вредных примесей и является одним из лучших видов фосфатного сырья.

Затруднения возникают при переработке окисленных руд, которые добываются из разрушенных зон. Несмотря на более высокое содержание фосфорного ангидрида в них по сравнению с рядовыми рудами, получение кондиционного апатитового концентрата затруднено и связано со снижением технологических показателей. Это обусловливается наличием в этих рудах шламистого материала и частичным покрытием зерен апатита пленками глинистых минералов и гидроокислов железа, что ухудшает их флотационные свойства. Однако, по данным практики работы обогатительных фабрик производственного объединения "Апатит", высокие технологические показатели процесса и получение кондиционного апатитового концентрата могут быть выдержаны при условии флотации естественной или искусственной шихты, содержание окисленных руд в которой не превышает 10 %.

Технологические показатели извлечения апатита из руд с низким содержанием фосфорного ангидрида могут быть определены по результатам исследований их обогатимости, проведенных институтом Механобр,

ГИГХС, ЦТЛ (Центральная технологическая лаборатория) ПО "Апатит" и Кольским филиалом АН СССР. К настоящему времени проведено значительное число испытаний обогатимости различных проб апатит-нефелиновых руд, содержание фосфорного ангидрида в которых изменялось от 23 до 47 %.

Анализ результатов испытаний обогатимости этих проб показывает, что с использованием собирателей и модификаторов флотации, применяемых на действующих обогатительных фабриках, был получен на всех пробах кондиционный апатитовый концентрат, включая и руды вновь осваиваемых месторождений: Коашвинское, Ньюрпахкское, Партомчоррское. По данным проведенных исследований, содержание  $P_2O_5$  в исходной руде на качество концентрата влияния не оказывает. Технологическое извлечение  $P_2O_5$  в концентрат для неизменных руд больше 90% и, как правило, составляет 94—95 %. При обогащении окисленных руд извлечение  $P_2O_5$  в концентрат менее постоянно. Наиболее низкое извлечение 82 %, а среднее по всем пробам окисленной руды 93,2 %. Неудовлетворительные показатели были получены институтом Механобр при обогащении пробы сфеновой руды, содержащей 7,37 %  $P_2O_5$  и 16,64 %  $TiO_2$ . По схеме с дополнительным выводом хвостов от пересортировки промпродукта был выделен кондиционный апатитовый концентрат, но при извлечении  $P_2O_5$  всего 50 %.

Есть основание полагать, что при переводе обогатительных фабрик на оборотное водоснабжение существенного изменения извлечения фосфорного ангидрида не произойдет. По данным полупромышленных испытаний технологических схем и водоподготовки для флотации апатита на оборотной воде, проведенных Горным институтом Кольского филиала АН СССР, ГИГХС, институтом Механобр, ЦТЛ ПО "Апатит", технологическое извлечение  $P_2O_5$  при этом будет 94 %.

Исследования по получению нефелинового концентрата из хвостов апатитовой флотации проводятся с 1931 г. Они показали, что методом флотации с последующей магнитной сепарацией можно получать нефелиновый кондиционный концентрат с содержанием глинозема 29 % и выше. С 1939 г. работает нефелиновая фабрика на АНОФ-1, сырьем для которой являются хвосты апатитовой флотации. Хвосты апатитовой флотации с содержанием 22—23 % глинозема крупностью 45—50 % + 0,088 мм поступают на классификацию в гидроциклоны. Пески гидроциклона, содержащие большое количество сростков нефелина с эгирином, титаномагнетитом, сфеном, направляются в отвал, что дает большие потери нефелина. Слив гидроциклона после сгущения и одновременного обесшламливания в сгустителях направляется на флотацию. В качестве собирателя и пенообразователя для флотации титаномагнетита, сфена, эгирина применяется мыло сырого таллового масла, рН флотационной пульпы составляет 10,5—10,8, извлечение глинозема в концентрат — около 35 %.

Нефелиновый концентрат на АНОФ-1 производится в ограниченном количестве, что обусловлено масштабами потребности в нем глиноземной промышленности в настоящее время. Дальнейшее расширение производства нефелинового концентрата предусматривается за счет строящегося це-

ха. Принятая в проекте этой фабрики технология более развита и по сравнению со схемой действующего нефелинового цеха АНОФ-1 предусматривает двухстадийную флотацию с перемывкой пенного продукта и доизмельчением крупнозернистой фракции хвостов апатитовой флотации. Это позволяет довести извлечение глинозема в концентрат до 54,3 %.

Согласно МРТУ 6-12-10-66 в нефелиновом концентрате должно содержаться:  $Al_2O_3$  не менее  $29 \pm 1,0$  % (среднее за месяц не ниже 29 %); влаги не более  $1,0 \pm 0,5$  %.

До 1971 г. на АНОФ-1 стабильно получали кондиционный концентрат, а в 1973–1976 гг. среднегодовое содержание глинозема в нем было ниже кондиционного на 0,2–0,3 %. Это объясняется усложнением минерального состава перерабатываемых руд, рядом технологических факторов, отсутствием необходимого фронта измельчения в нефелиновом цикле АНОФ-1 и применяемыми собирателями.

Вопросу выделения сфенового, титаномагнетитового и эгринового концентратов было посвящено много работ, которые выполнены на уровне лабораторных и опытно-промышленных исследований. В 1958 г. Кольским филиалом АН СССР была предложена технологическая схема переработки пенного продукта обратной нефелиновой флотации, по которой первоначально из пенного продукта доизвлекается апатит, затем он поступает на мокрую магнитную сепарацию при различной силе тока с выделением титаномагнетитового и эгринового концентратов. В дальнейшем технология уточнялась в лабораторных и полупромышленных условиях. В ходе полупромышленных испытаний, которые были проведены на установке производительностью 40 т/сут по исходному питанию, были получены сфеновый, титаномагнетитовый и эгриновый концентраты. Качество, выход концентратов и извлечение  $TiO_2$  приведено в табл. 21. Эта технологическая схема заложена в проект цеха опытных установок для комплексного обогащения хибинских апатит-нефелиновых руд и переработки сфенового и титаномагнетитового концентратов.

В 1963 г. институтом Механобр была предложена флотационно-магнитная технологическая схема выделения темноцветных минералов также из хвостов нефелиновой флотации в результате одной заключительной операции магнитной сепарации (в слабом и сильном магнитных полях). По этой схеме выделяются титаномагнетитовый концентрат (сильномагнитная фракция), эгриновый концентрат (слабомагнитная фракция) и сфеновый концентрат (немагнитная фракция). Выход титаномагнетитового концентрата с содержанием 14,78 %  $TiO_2$  составил 1,4 %; эгринового (содержание  $TiO_2$  4,78 %) - 3,2 % и сфенового (30,98 %  $TiO_2$ ) - 1,3 %. Извлечение  $TiO_2$  в указанные концентраты было соответственно 14,6; 10,8 и 28,2 %.

В последние годы Кольским филиалом АН СССР проведен ряд лабораторных и опытно-промышленных исследований по выделению титаносодержащих концентратов из апатит-нефелиновых руд перспективной добычи и месторождений Ньюрпахкского, Партомчоррского, Юкспорского в условиях водооборота.

Этими работами подтверждена возможность выделения из апатит-нефе-

Показатели работы полупромышленной установки по обогащению хвостов нефелиновой флотации (в %)

Продукты обогащения	Выход от исходной руды	Содержание				Извлечение от исходной руды
		TiO <sub>2</sub>	Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
Концентраты сфеновый	0,8	29,0	2,4	2,1	1,3	19,3
титаномагнетитовый	1,1	15,0	66,8	1,9	0,3	13,8
эгриновый	3,6	4,2	22,8	2,7	0,4	12,6

линовых руд сфенового концентрата с содержанием 32–35 % TiO<sub>2</sub>, титаномагнетитового и эгринового концентратов.

Апатитовый концентрат по химическому составу – высококачественное фосфатное сырье, пригодное для кислотных методов переработки. В отечественном производстве и за рубежом существуют два основных направления кислотной переработки фосфатов: на основе серно- и азотно-кислотного разложений.

Процесс сернокислотной переработки апатитового концентрата – основной в промышленности производства минеральных удобрений. Он состоит из двух основных стадий: разложения концентрата серной кислотой и фильтрования фосфорной кислоты с промывкой осадка сульфата кальция водой на вакуум-фильтре. В зависимости от температуры процесса разложения фосфатов и концентрации образующейся фосфорной кислоты в реакционной смеси может осажаться ангидрид CaSO<sub>4</sub>, полугидрат CaSO<sub>4</sub> · 0,5H<sub>2</sub>O и дигидрат CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O. В настоящее время основное количество экстракционной фосфорной кислоты, получаемой при сернокислотной переработке фосфатов, производится в дигидратном режиме. Процесс ведут при температуре 65–80 °С. В этих условиях концентрация фосфорной кислоты составляет 28–32 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Полугидратный процесс проводится при 85–95 °С, кислота содержит 42–48 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Ангидритный процесс происходит при 105–118 °С, кислота имеет концентрацию 47 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Важный момент при переработке апатита – возможность утилизации фтора, содержащегося в нем. На отечественных заводах фтор улавливается в основном из газовой фазы при упаривании раствора фосфорной кислоты, степень использования фтора составляет 25–40 % от его содержания в концентрате. Кроме того, обесфторивание можно производить осаждением нерастворимых кремнефтористых солей натрия и калия с последующей их переработкой. В этом случае степень использования фтора достигает 60–70 % и значительно облегчается процесс упаривания.

Технико-экономический анализ показателей производства концентрированной фосфорной кислоты по дигидратному способу с упаркой и полугидратному (без упарки) для типовой линии 110 тыс. т показывает, что капитальные затраты на установку по полугидратному методу составляют

60–70 % от затрат по дигидратному методу. Себестоимость фосфорной кислоты в полугидратном процессе ниже на 10–15 %, энергозатраты сокращаются по: пару на 80–90 %, электроэнергии на 50 %, воде на 60–80 %.

Несмотря на широкую распространенность переработки фосфатов серной кислотой в последнее время большое внимание уделяется разработке способов азотнокислотного разложения сырья. Объясняется это рядом технологических и технико-экономических преимуществ данного способа перед способом сернокислотной экстракции фосфатов.

Применение азотной кислоты позволяет более полно извлекать содержащиеся в фосфатах полезные компоненты и осуществлять тем самым комплексную переработку сырья. По данным Научно-исследовательского ин-та по удобрениям и инсектофунгицидам (НИИУИФ) при сернокислотном разложении в дигидратном процессе 60–70 % РЗЭ и полугидратном 100 % переходят в фосфогипс, туда же уходит и стронций. Разложение азотной кислотой менее требовательно к качеству сырья.

По сравнению со способом сернокислотной экстракции фосфатов, где серная кислота используется для связывания кальция фосфата с образованием балласта — фосфогипса, применение азотной кислоты позволяет брать ее дважды: как источник активного иона водорода и как источник азота в удобрениях.

Фосфогипс, образующийся как отход при сернокислотной и азотно-сернокислотной переработках апатитового концентрата в количестве 4,3 т на 1 т  $P_2O_5$ , в настоящее время почти не применяется. Кроме того, что на его складирование должны быть затрачены значительные капиталовложения (22,3 руб. на 1 т  $P_2O_5$ ), он еще является источником загрязнения окружающей среды фосфатами, содержание которых в фосфогипсе достигает 1–1,3 %  $P_2O_5$ , и фтором 0,3 %.

Проблема использования фосфогипса актуальная, так как при намеченном уровне производства фосфорных удобрений в СССР суммарное количество фосфогипса будет увеличиваться.

Из всех изученных способов использования фосфогипса наиболее перспективными являются:

- термическое разложение фосфогипса с получением серной кислоты и цемента или извести;

- конверсия фосфогипса аммиаком и углекислым газом с получением сульфата аммония и известняка;

- производство строительных вяжущих типа высокопрочного ангидритового цемента  $\alpha$ -модификации, ангидридовых бетонов и изделий на их основе;

- использование фосфогипса в производстве портландцемента в качестве минерализующей добавки к цементной шихте и клинкеру взамен природного гипса для регулирования схватываемости цемента;

- внесение фосфогипса в почву вместо природного гипса для гипсования солонцов.

Реализация термической переработки фосфогипса с получением серной кислоты и цемента превращает процесс сернокислотного разложения



фосфатов в циклическое производство, что значительно сокращает расход свежей кислоты. Предприятие при этом освобождается от ввоза серосодержащего сырья со стороны, а также от складирования громоздкого отхода сернокислотного производства — колчеданного огарка.

В настоящее время нефелиновый концентрат, получаемый на объединении "Апатит"\* , перерабатывается на Волховском алюминиевом заводе (ВАЗ) и Пикалевском глиноземном комбинате способом спекания на глинозем, содопродукты, галлий и цемент.

Способ спекания заключается в превращении содержащегося в нефелине глинозема в алюминаты натрия и кальция, а кремнезема в результате термической обработки — в двухкальциевый силикат. Нефелиновый концентрат спекают при высоких температурах (1200—1350 °С) с известняком. Алюминаты натрия хорошо растворяются в воде, а алюминаты кальция легко разлагаются содовыми растворами, поэтому глинозем извлекается из продуктов обжига (спека) в раствор. Отделенные от твердого остатка и очищенные от кремнезема алюминатные растворы затем разлагаются с выделением гидроокиси алюминия. Маточный раствор после отделения гидроокиси алюминия идет на извлечение галлия и на получение содопродуктов — кальцинированной соды и поташа.

Попутное получение из нефелина содопродуктов выпариванием щелочных растворов не только значительно улучшает экономику процесса, но позволяет получать кальцинированную соду и поташ.

Маточные растворы содового производства — потенциальное сырье для получения редких щелочных металлов. Исследования Кольского филиала АН СССР совместно с ВАЗ привели к созданию технологии получения концентратов редких щелочных металлов. Попутное извлечение металлического галлия из нефелина, во-первых, позволяет получать его без дополнительных затрат и переделов и, во-вторых, значительно улучшает качество получаемого из глинозема алюминия, где галлий является вредной примесью.

Нефелиновый шлам, образующийся как отход производства в количестве 6,6 т на 1 т глинозема, в основном представляет собой двухкальциевый силикат  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . На действующих заводах он полностью перерабатывается на портландцемент. Однако образование отхода в таком большом количестве сдерживает расширение мощностей по способу спекания из-за ограниченности потребности некоторых районов в цементе. Поэтому ведется поиск новых эффективных путей утилизации шлама. Он может быть использован в дорожном строительстве, в производстве бетона, стройдеталей и др.

Одним из перспективных направлений переработки нефелинов является комплексная переработка их нитратным способом, разработка которого проводится в Институте химии Кольского филиала АН СССР. Технология заключается в разложении нефелинов слабой азотной кислотой с обра-

---

\* Нефелиновый концентрат АНОФ-1 характеризуется следующим химическим составом (в %):  $\text{Al}_2\text{O}_3$  29;  $\text{SiO}_2$  43;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  3,0;  $\text{Na}_2\text{O}$  13,0;  $\text{K}_2\text{O}$  6,8;  $\text{P}_2\text{O}_5$  0,1.

зованием нитратов. Последующие операции — сушка полученного продукта и его повторная обработка азотной кислотой — позволяют более полно извлечь полезные компоненты и отделить нерастворимый в кислоте силикатный остаток с примесями, основной составляющей которого в отличие от нефелинового шлама является  $\text{SiO}_2$  (более 80 % высокоактивного кремнезема). Раствор, содержащий нитраты Al, Fe, Na, Ca, K, упаривается и спекается при температуре 750–850 °С. Дальнейшая переработка алюминатного спека не отличается от переработки спека, получаемого методом спекания.

Сфеновый концентрат предлагается перерабатывать по сернокислотной схеме Кольского филиала АН СССР на титано-кальциевые пигменты и наполнители. Технология переработки сфенового концентрата отработана на модельной установке объединения "Апатит", и в настоящее время начато строительство опытно-промышленной установки.

Предварительно очищенный от примеси фосфора сфеновый концентрат подвергается двухстадийной сульфатизации, в результате чего титан почти полностью (степень вскрытия 95 %) переходит в твердую фазу — двойной сульфат титана и кальция  $\text{CaTi}(\text{SO}_4)_3$ . С помощью дальнейшего выщелачивания и гидролиза с введением в раствор  $\text{Ti}^{+4}$  (1 г/л  $\text{TiO}_2$ ) получается титановая паста, прокаливанием которой при температуре 850–950 °С получают титано-кальциевый пигмент. Попутной продукцией является кальциево-кремнеземный пигмент следующего состава (в %):  $\text{TiO}_2$  5–10;  $\text{CaSO}_4$  46–54,  $\text{SiO}_2$  20–24.

Титаномагнетитовый концентрат — перспективное сырье для производства чугуна и титанистого шлама. Двухстадийная технология, разработанная Институтом металлургии им. А.А. Байкова АН СССР (ИМЕТ), включает предварительное восстановление подготовленного концентрата окисью углерода и антрацитом в температурном интервале 800–1200 °С и бесфлюсовую электроплавку с отдельным получением чугуна и титанистого шлама. Полученные шлаки можно переработать сернокислотным методом на пигментную  $\text{TiO}_2$ .

При электроплавке хибинского титаномагнетитового концентрата можно ожидать получение следующих показателей на 1 т титанового шлама:

расход концентрата	3,85 т
расход восстановителя	0,67 т (85,5 % С)
расход связующего СЦШ	0,18 т
выход металла	2,1 т
содержание в шлаке	
$\text{TiO}_2$	58–65 %
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3–9 %
расход электроэнергии	1780 кВт·ч

Выход титанового шлама составляет около 25 %, а чугуна — около 55 % от веса концентрата. Химическая переработка титанового шлама с таким содержанием  $\text{TiO}_2$  более благоприятна, чем шлама от флюсовой плавки.

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

Вопросы совершенствования методов экономической оценки месторождений фосфатного сырья, внедрение их в практику планирования, развития и промышленного освоения сырьевой базы фосфатноугуковой промышленности на современном этапе имеют важное народнохозяйственное значение. Это обуславливается интенсивными темпами роста потребления фосфатного сырья для производства минеральных удобрений и состоянием сырьевой базы. В 1980 г. добыча фосфатных руд в нашей стране превысила 80 млн. т, что более чем в 5 раз превышает уровень добычи 1960 г. Несмотря на относительно большое количество разведанных запасов фосфатных руд на территории СССР, обеспечение фосфатноугуковой промышленности сырьем — довольно трудная задача. Запасы распределены на месторождения, руды которых характеризуются, как правило, низким содержанием  $P_2O_5$ , трудной обогатимостью, различными технологическими свойствами концентратов, получаемых из них. В этих условиях актуально решение вопросов выбора очередности проведения геологоразведочных работ и промышленного освоения месторождений фосфатного сырья, определения рационального уровня полноты извлечения полезных компонентов из него, обеспечивающих достижение максимального значения народнохозяйственного эффекта от эксплуатации ресурсов этого вида сырья.

Можно назвать много технических и организационных причин, обуславливающих не всегда достаточную степень эффективности эксплуатации фосфатного сырья. Одной наиболее важной причиной, по-видимому, является отсутствие экономической оценки запасов фосфатного сырья и соответствующего этой оценке экономического стимулирования их рационального использования.

Отсутствие экономической оценки фосфатного сырья сказывается на экономических показателях разведки и эксплуатации месторождений. Например, разведанные запасы сырья — продукция геологоразведочных организаций. Отсутствие денежной оценки такой продукции делает необходимым установление в качестве основных показателей производства геологоразведочных организаций объем освоения средств и величину прироста запасов руды (полезного компонента) в натуральном выражении. Стремясь выполнить и перевыполнить план по приросту запасов, геологоразведочные организации иногда выявляют запасы без учета их действительной ценности для народного хозяйства. Следствием этого являются случаи переразведки запасов, когда интенсивно наращиваются и переводятся в высокие категории запасы, не требующиеся народному хозяйству в данный момент и ближайшей перспективе, и случаи потери полезного ископаемого из-за недостаточной геологической изученности уже разрабатываемых месторождений.

Экономическая оценка фосфатного сырья необходима и для организации последовательных хозяйственных взаимоотношений между рудником, обогатительной фабрикой и химическим (металлургическим) предприятием.

ем для создания экономической заинтересованности этих производств в рациональной эксплуатации месторождений.

В отделе экономических исследований Кольского филиала АН СССР совместно с ГИГХС проведены исследования по разработке методики экономической оценки месторождений фосфатного сырья и выполнен ряд экспериментальных расчетов. В основу методики были заложены методологические принципы рентной оценки полезных ископаемых. Под экономической оценкой запасов фосфатного сырья при этом понимается денежное выражение экономического эффекта, приносимого этими запасами в результате их эксплуатации. Эффект от эксплуатации запасов определяется как разность между ценностью фосфорной кислоты и попутной продукции, получаемой из фосфатного сырья и исчисленной исходя из предельно допустимых с народнохозяйственной точки зрения (замыкающих) затрат, и индивидуальными по месторождению суммарными (эксплуатационными и капитальными) затратами на производство данной продукции за период отработки запасов с учетом фактора времени.

Экономическая оценка месторождения подразделяется на кадастровую и плано-перспективную. Кадастровая оценка месторождений (участков) фосфатного сырья проводится по сумме запасов кат. А + В + С<sub>1</sub> и применяется для определения кондиций на сырье, разработки схем размещения и проектов строительства (реконструкции) промышленных объектов, экономической оценки потерь фосфатного сырья при добыче и переработке для денежной оценки разведанных запасов. Плано-перспективная оценка запасов производится в процессе разведки месторождений (провинции, бассейна) по сумме всех категорий (А + В + С<sub>1</sub> + С<sub>2</sub>, а также прогнозные) и является экономическим обоснованием для выбора первоочередных объектов геологоразведочных работ и разработки временных кондиций на фосфатное сырье.

Для определения уровня замыкающих затрат в перспективном периоде была динамично решена оптимизационная задача развития производства фосфорной кислоты в соответствии с общими принципами оптимального планирования (табл. 22).

Уровень замыкающих затрат определен с учетом приведенных затрат на геологоразведочные работы, добычу и обогащение руды, транспорт концентратов в районы потребления и производства фосфорной кислоты из руд наименее благоприятного (замыкающего) месторождения или группы месторождений, объем производства которых составляет 10–12 % от союзного.

По данной методике в отделе экономических исследований Кольского филиала АН СССР были выполнены кадастровая оценка апатит-нефелиновых руд хибинских месторождений и плано-перспективная оценка ресурсов фосфатного сырья страны. Необходимо отметить, что выполнение таких работ — очень сложная задача. Экономическая оценка месторождений фосфатного сырья — комплексная проблема, охватывающая вопросы масштабов и промышленно-геологической характеристики месторождения, анализа условий его промышленного освоения и эксплуатации, технологической изученности руды и получаемых из нее концентратов, оцен-

Замыкающие затраты на фосфорную кислоту (в пересчете на 100%  $P_2O_5$ ).  
По Н.Г. Пешеву [1980 г.]

Год	Месторождение (горно-обогатительное предприятие), формирующее уровень замыкающих затрат	Удельный вес производства сырья от общесоюзного масштаба, %	Замыкающие затраты, руб/т
1980	Каратау, Маарду, Кингисепп	10,2	280
1985	Ошурково, Кингисепп, Чилисайское, Тоолсе	12,3	294
1990	Белая Зима, Чилисайское, Удско-Селемджинское	12,7	310
2000	Кингисеппское, Чилисайское, Удско-Селемджинское	11,2	320

ки основных технико-экономических параметров их производства и на этой основе определение места месторождения в плане развития подотрасли. При этом необходимо иметь в виду, что разведка месторождений дает геологическую информацию о величине запасов, качестве руды с той или иной степенью достоверности. Это обуславливает приближенный характер получаемых расчетных результатов. Вероятностный характер экономической оценки месторождений обуславливается также недостаточной изученностью процессов переработки руды на стадии проведения геологоразведочных работ и даже проектирования предприятия. Дополнительную неопределенность на результаты экономической оценки месторождений накладывает также фактор времени, так как с момента экономической оценки месторождения фосфатного сырья, по результатам предварительной разведки, до конца отработки этого месторождения может пройти 50 лет и более. За этот период времени, несомненно, могут значительно измениться не только технические и экономические параметры эксплуатации запасов месторождения, но и конъюнктура потребления продукции, получаемой из руд месторождения. Все эти обстоятельства позволяют сделать вывод о целесообразности периодического выполнения таких расчетов при составлении очередных пятилетних планов.

Хибинские апатит-нефелиновые месторождения Кольского полуострова на протяжении полувека являются основными поставщиками фосфатного сырья промышленности Советского Союза. Ввиду благоприятных горнотехнических условий разработки высоких технологических свойств руды и апатитового концентрата, выделяемого из нее, интенсивность отработки хибинских месторождений в 2,3 раза превышает средний уровень этого показателя для сырьевой базы фосфатного сырья в стране. За период 1961—1979 гг. добыча апатит-нефелиновых руд увеличилась почти в 5 раз, достигнув 43 млн. т в год.

Благодаря проведению широкого круга научно-исследовательских и опытно-промышленных работ, выполненных Кольским филиалом АН

СССР, институтом Механобр, ГИГХС, НИУИФ, ПО "Апатит" и другими организациями, технологическая изученность апатит-нефелиновых руд и концентратов, которые могут быть получены при комплексном ее обогащении, характеризуются высокими показателями. Это позволило на данном этапе исследований провести экспериментальные расчеты по кадастровой оценке запасов руды хибинских месторождений в нескольких вариантах: при бортовом содержании  $P_2O_5$  в руде 6 % для месторождений (участков), обрабатываемых открытым способом, и 8 % — подземным способом, т. е. на современном уровне использования запасов апатит-нефелиновых руд; при бортовом содержании  $P_2O_5$  в руде 3—4 % и при бортовом содержании  $P_2O_5$  в руде 2 %. По каждому из перечисленных вариантов проведена денежная оценка запасов апатит-нефелиновых руд при условии выделения из них только апатитового концентрата и комплексного использования, т. е. выделения апатитового, нефелинового, сфенового и титаномагнетитового концентратов.

Кадастровая оценка осуществлена для балансовых запасов по категориям А + В + С<sub>1</sub>. Основой определения величины промышленных запасов апатит-нефелиновых руд при различном бортовом содержании  $P_2O_5$  в них явились данные Хибиногорской геологоразведочной партии. Денежная оценка апатит-нефелиновых месторождений выражается совокупным народнохозяйственным эффектом, приносимым в результате их эксплуатации. Эффект определялся как разница между замыкающими и индивидуальными приведенными затратами на производство фосфорной кислоты и другой попутной продукции при варианте комплексной переработки руды. Замыкающие затраты на нефелиновый, сфеновый и титановый концентраты определены расчетным путем, так как к настоящему времени не проведены оптимизационные расчеты по нахождению их значения в перспективном периоде. Уровень замыкающих затрат на нефелиновый концентрат в размере 12,9 руб/т принят из следующих соображений. По данным НИИТЭХИМ, экономия эксплуатационных и капитальных вложений в расчете на 1 т нефелинового концентрата при условии получения из него глинозема, кальцинированной соды, поташа и цемента по сравнению с раздельным получением этих продуктов из традиционных видов сырья составляет соответственно 5,9 и 24,2 руб. Следовательно, экономия приведенных затрат в народном хозяйстве на 1 т нефелинового концентрата составит 9,5 руб. ( $5,9 + 0,15 \cdot 24,2$ ). Эта экономия достигается при использовании нефелинового концентрата по цене 3,45 руб/т. Отсюда можно предположить, что равная эффективность производства глинозема, содопродуктов и цемента из нефелинового концентрата и традиционных видов сырья может быть достигнута при условии предельных затрат на нефелиновый концентрат в размере 12,9 руб. ( $9,5 + 3,45$ ). Эта величина и была принята в качестве замыкающих затрат на нефелиновый концентрат.

Замыкающие затраты на сфеновый и титаномагнетитовый концентраты определены из условия оценки двуокиси титана и железа, содержащихся в них, по отпускным ценам с учетом корректировки величины на содержание полезных компонентов и технологические особенности сырья. По действующему прейскуранту цена тонно-процента  $TiO_2$  в ильменитовом кон-

центрате, содержащем 48 %  $TiO_2$ , составляет 1,2 руб. При содержании в сфеновом концентрате 30–32 %  $TiO_2$  цена его может быть определена в размере  $1,2 \cdot 0,65 \cdot 31 = 25$  руб/т, где 0,65 – коэффициент, учитывающий более низкое содержание  $TiO_2$  в сфеновом концентрате по сравнению с ильменитовым. Аналогичным образом были определены замыкающие затраты на титаномагнетитовый концентрат в размере 17 руб/т.

В ходе исследования была разработана схема и основные алгоритмы вычисления денежной оценки промышленных запасов апатит-нефелиновых руд. Прогноз масштабов добычи руды, производства концентратов и других основных технико-экономических показателей эксплуатации хибинских апатит-нефелиновых месторождений выполнен на базе научно-исследовательских и проектных разработок Кольского филиала АН СССР, Гипроруды, ПО "Апатит". Экономический эффект (рента), полученный за время эксплуатации промышленных запасов апатит-нефелиновых руд, измерялся путем его дисконтирования к 1980 г. с помощью коэффициента приведения.

Результаты экспериментальных расчетов кадастровой оценки запасов апатит-нефелиновых руд хибинских месторождений при варианте выделения из них только апатитового концентрата показывают, что максимальное значение народнохозяйственного эффекта, приносимого в результате их эксплуатации, составляет 12,7 млрд. руб. Этот уровень оценки апатит-нефелиновых месторождений достигается при условии отработки запасов Кукисвумчоррского, Юкспорского, Апатитового цирка, Эвслогчоррского и Ньюрпахкского месторождений с бортовым содержанием  $P_2O_5$  в руде 4 %; Партомчоррского – 3 %, плато Расвумчорр и Коашвинского для подземной выемки – 2 %. При условии отработки месторождений с бортовым содержанием  $P_2O_5$  в руде 6–8 %, что характеризует современный уровень их использования, кадастровая оценка запасов составляет 12 млрд. руб., а при варианте отработки месторождений с бортовым содержанием 2 % – 12,3 млрд. руб.

Необходимо отметить, что по всем вариантам эксплуатации апатит-нефелиновых месторождений имеет место высокая экономическая эффективность использования той части запасов руды, которая может быть отработана открытым способом. Эти запасы, составляя в зависимости от варианта бортового содержания  $P_2O_5$  в руде 22–27 % от общих запасов апатит-нефелиновых руд по кат. А + В + С<sub>1</sub>, приносят около 50 % всего экономического эффекта, получаемого в результате эксплуатации хибинских месторождений. Объясняется это не только более высокими технико-экономическими показателями добычи руды открытым способом, но и доступностью и возможностью более интенсивной выемки этой части запасов по сравнению с запасами, выемка которых предполагается подземным способом на длительную перспективу.

Характер изменения величин кадастровой оценки промышленных запасов по отдельным месторождениям в зависимости от уровня бортового содержания  $P_2O_5$  в руде при их отработке несколько различен. Например, по плато Расвумчорр и Коашве максимальное значение кадастровой оценки запасов достигается при варианте отработки этих месторождений с бор-

товым содержанием  $P_2O_5$  2%. Различно также соотношение между изменением величины кадастровой оценки по отдельным месторождениям при эксплуатации их с бортовым содержанием 6–8 и 2%. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что кондиции на апатит-нефелиновые руды необходимо устанавливать не в целом по Хибинам, а дифференцированно по отдельным месторождениям (участкам). Также следует полагать, что оптимальные кондиции на апатит-нефелиновые руды отдельных месторождений должны определяться с учетом технико-экономических показателей добычи руды на рассматриваемом месторождении и обогащения шихты руды на обогатительной фабрике, где планируется переработка руд этого месторождения. Как в настоящее время, так и в перспективе обогащению подвергаются не руды отдельных месторождений, а шихта руды, поступающая на фабрики с 2–3 месторождений и более. Техничко-экономические показатели обогащения такой шихты, а следовательно, и экономическая эффективность использования руды могут отличаться от механического суммирования технико-экономических показателей раздельной переработки руды отдельных месторождений, а следовательно, и эффективности их использования. Поэтому целесообразно определять кондиции на руду по отдельным апатит-нефелиновым месторождениям (участкам) с учетом показателей обогащения шихты на обогатительной фабрике, где предполагается перерабатывать руды рассматриваемого месторождения (участка).

В то же время следует отметить, что по этой же причине выполнение широкого комплекса технологических работ по исследованию обогатимости руд каждого месторождения (участка) имеет место в настоящее время при проведении геологоразведочных работ и оценке запасов апатит-нефелиновых руд и не несет исчерпывающей информации о состоянии технологической готовности и результатах промышленного освоения этих объектов. По-видимому, более целесообразно такие работы проводить не с рудами индивидуальных месторождений, а с шихтой руды, привязываясь к определенным обогатительным фабрикам и месторождениям, руда которых будет формировать эту эпоху.

Максимальная величина кадастровой оценки промышленных запасов апатит-нефелиновых руд при варианте их комплексного использования (без учета изоморфных попутных полярных компонентов) на 16,3% выше, чем при варианте выделения из них только апатитового концентрата, и составляет 14,8 млрд. руб. Этот уровень кадастровой оценки промышленных запасов руды, при комплексной ее переработке, достигается при условии отработки Кукисвумчоррского, Апатитового цирка, Эвслогчоррского и Ньоркпахкского с бортовым содержанием  $P_2O_5$  в руде 4%; Партомчоррского — 3%; Юкспорского, Коашвинского и плато Расвумчорр — 2%. Относительное значение увеличения кадастровой оценки запасов апатит-нефелиновой руды при условии комплексного ее использования по отдельным месторождениям сильно изменяются. Максимальное увеличение народнохозяйственного эффекта в результате комплексной переработки достигается при эксплуатации запасов Партомчоррского месторождения (55,3%), минимальное — для месторождения плато Расвумчорр (12,4%).



Выше среднего значения, т.е. 16,3 % для всех месторождений Хибин, этот показатель имеет место для Ньюркахкского (21,5 %), Эвслогчоррского (19,8 %) и Коашвинского (19,7 %) месторождений. Данные свидетельствуют о том, что при вводе в эксплуатацию этих объектов организация комплексной переработки руд может оказать наибольшее влияние на увеличение экономической эффективности их использования.

Необходимо отметить, что величина кадастровой оценки апатит-нефелиновых руд может быть уточнена при условии определения уровня замыкающих затрат на попутную продукцию (глинозем, содопродукты, пигментную двуокись титана, фториды и др.).

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Ранее эффективность разведки апатит-нефелиновых руд оценивалась лишь по одному показателю — удельным затратам на единицу прироста запасов руды. Причем этот показатель определялся без учета степени разведанности по категориям, без внесения поправок на изменение масштабов цен и нормативных показателей для расчета сметной стоимости поисков и разведки, что практически исключало возможность объективной оценки эффективности работ на различных месторождениях.

Организация планомерного комплексного изучения апатит-нефелиновых руд вызвала необходимость систематического анализа внутриотраслевой и народнохозяйственной эффективности разведочных работ.

Внутриотраслевая эффективность характеризуется соотношением затрат на разведку с их прямыми результатами (выполнением геологического задания, количеством и качеством выявленных запасов и др., а также показателями хозрасчетной деятельности. Для сравнения приведем анализ эффективности разведки Паргомчоррского и Ньюркахкского месторождений комплексных апатит-нефелиновых руд, отличающихся сложностью геологического строения, качеством руд и масштабами запасов (табл. 23).

Рассчитанные таким образом показатели эффективности являются усредненными, поскольку не учитывают трудоемкость разведки (различие горно-геологических условий, сложности строения, глубины залегания рудных тел, их мощности, качества руд и т. д.), а также дифференциацию затрат на выявление запасов по категориям разведанности.

Наиболее информативен в системе показателей внутриотраслевой эффективности геологоразведочных работ показатель хозрасчетной эффективности ( $\mathcal{E}_x$ ), учитывающий как степень выполнения геологического задания, так и уровень экономии сметных ассигнований:

$$\mathcal{E}_x = \left(1 + \frac{C_{\text{п}} \cdot C_{\text{ф}}}{C_{\text{п}}}\right) \times \frac{Q_{\text{ф}}}{Q_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{ф}}$  и  $C_{\text{п}}$  — стоимость фактически выполненных работ и сметная стоимость, руб.;  $Q_{\text{ф}}$  и  $Q_{\text{п}}$  — фактический и плановый (по проекту) прирост запасов, г.

## Эффективность разведки месторождений Партомчорр и Ньюркапахк

Показатели	Партомчорр	Ньюркапахк
Исходные		
Степень сложности геологического строения	Группа 1	Группа 2
Проектное задание на разведку по приросту запасов руды, отн. %	100	30
Фактический прирост запасов руды, % к плану	187	104
Плановые ассигнования на выполнение геологического задания, тыс. руб.	7362	3379
Сметная стоимость фактически выполненного объема работ, тыс. руб.	6870	3100
Соотношение запасов, разведанных по категориям А, В, С <sub>1</sub>	9:19:72	0:23:77
Среднее содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в руде, %	7,50	14,05
Расчетные		
Удельные затраты на разведку 1 т запасов, коп.		
руды	0,92	2,48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	12,2	17,6
Экономия ассигнований, полученная в результате выполнения геологического задания, тыс. руб.	492	279
Уровень экономии, % от сметной стоимости	7,2	9,4

При выполнении проектного задания по приросту запасов на 100 % и полном использовании сметных ассигнований показатель хозрасчетной эффективности равен  $\mathcal{E}_x = 1$ . Для Партомчоррского месторождения  $\mathcal{E}_x$  составил 2,0, для Ньюркапахкского  $\mathcal{E}_x = 1,09$ .

Народнохозяйственная эффективность оценивается по соотношению затрат со стоимостью выявленных запасов и прибылью от использования продукции в отраслях промышленности. Техничко-экономическими расчетами установлено, что уровень эффективности промышленного освоения Партомчоррского месторождения зависит от полноты использования конечной продукции. Так, при производстве только апатитового концентрата и переработка его на фосфатные удобрения предприятие является убыточным и становится рентабельным только в случае переработки концентрата сернокислотным способом с извлечением P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и частично фтора. Наибольшая рентабельность достигается при условии комплексной переработки апатитового, нефелинового, сфенового и титаномагнетитового концентратов на конечные продукты.

Для сравнения стоимости товарных концентратов — апатита, нефелина, сфена и титаномагнетита, которые могут быть получены из разведанных руд Партомчоррского и Ньюркапахкского месторождений с затратами на разведку, приняты следующие данные: разведанные запасы промышленно ценных минералов ( $Q, м$ ); действующие цены на апатитовый и нефелиновый концентраты и расчетные цены на сфеновый и титаномагнетитовый продукты П; фактические затраты на геологоразведочные работы ФС.

Народнохозяйственный экономический эффект, рассчитанный по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{нх}} = \frac{Q_{\text{мц}}}{C_{\text{ф}}} (\text{руб.}),$$

показал, что удельная стоимость товарных концентратов, приходящаяся на 1 руб. затрат на производство предварительной и детальной разведок, для Партомчоррского месторождения составила 935 руб/руб, Ньюркахк — 348 руб/руб.

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ФТОРА

До самого последнего времени фторсырьё в нашей стране и почти повсюду за рубежом было представлено исключительно флюоритовыми рудами. Потребность в них всеми промышленно развитыми странами удовлетворяется за счет импорта. В связи с увеличением потребления флюорита и фторсолей во многих областях промышленности в ближайшие годы дефицит фторсырья будет возрастать.

Между тем огромные ресурсы фторсырья содержат фосфатные руды, в том числе апатит-нефелиновые, главным полезным компонентом которых является фторапатит  $\text{Ca}_{10} [\text{PO}_4]_6 \text{F}_2$ . Фтор — обязательная структурная составная часть этого минерала: на каждые три атома фосфора во фторапатите приходится один атом фтора. Содержание фтора в разных типах хибинских руд зависит от содержания апатита и в меньшей степени фена.

Прогнозная оценка запасов фтора в рудах всех хибинских месторождений, выполненная в 1977 г. К.Д. Беляевым, Е.А. Каменевым, Д.А. Минеевым и О.С. Нечаевой, показала, что Хибинь — комплекс крупнейших в мире месторождений фтора. Количество фтора, извлекаемого ежегодно из недр Хибин в апатитовый концентрат, превышает 520 тыс. т или 1,1 млн. т  $\text{CaF}_2$ , что гораздо больше, чем извлекается за год из недр наших отечественных флюоритовых месторождений.

По инициативе и методике Д.А. Минеева и Е.А. Каменева в 1973 г. началась систематическая работа по промышленной оценке запасов фтора в рудах разведываемых месторождений Хибин и комплексной переоценке запасов попутных полезных компонентов, включая фтор, в рудах эксплуатируемых месторождений. В качестве массовых методов анализа, отработанных на эталонных образцах, были использованы количественный спектральный анализ, химический анализ с фторид-селективным электродом и нейтронно-активационный каротаж (НАК).

Разведки только двух хибинских месторождений апатита на фтор, осуществленная с весьма высокой экономической эффективностью, привела к серьезным изменениям в структуре запасов фтора в рудах СССР, утверждение запасов третьего — эксплуатируемого — месторождения сделало долю фторапатитового сырья преобладающей (рис. 28). По данным О.С. Нечаевой, себестоимость разведки 1 т  $\text{CaF}_2$  в Хибинах не превышала 1 коп., тогда как на собственно флюоритовых месторождениях она обычно составляет 1,4—4,6 руб. (табл. 24).

Таблица 24

Сравнительные технико-экономические показатели освоения флюоритовых и фторapatитовых месторождений.  
По О.С. Нечаевой

Показатели	Единицы измерения	Флюоритовые			Апатитовые		
		Вознесенское	Таскайнар Южный	Наранское	Кани-Мансурское	Ньоркпахк	Партомчорр
Годовой выпуск $\text{CaF}_2$	тыс. т	302,7	90,3	54,3	60,4	80,5	111
Себестоимость 1 т $\text{CaF}_2$	руб.	85,5	83,8	135,8	41,1	120	120
Годовая прибыль	млн. руб.	8,0	3,4	3,3	4,4	5,2	7,2
Уровень рентабельности к производственным фондам	%	16,2	14,6	11	17,5	16,2	18,8
Удельные капиталовложения на 1 т $\text{CaF}_2$	руб.	149	246	501	381	360	313
Срок окупаемости капиталовложений	лет	5,6	6,5	8,2	5,2	5,5	4,8
Приведенные затраты на 1 т $\text{CaF}_2$	руб.	108	121	211	98	174	157

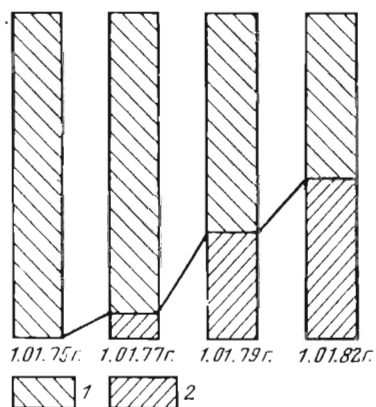


Рис. 28. Эволюция структуры баланса запасов фтора в рудах СССР. По Д.А. Микееву, О.С. Нечаевой  
1 — флюорит; 2 — апатит

потребности народного хозяйства в дефицитных фторпродуктах, улучшить технико-экономические показатели перерабатывающих предприятий, обеспечить охрану окружающей среды от вредного воздействия фтора и его активных соединений.

Обобщение опыта поисков, разведки и геолого-экономической оценки апатитовых руд на примере хибинских месторождений позволяет сделать следующие выводы: 1) эффективность выявления крупных апатитовых залежей зависит от степени научной обоснованности поисковых критериев и соблюдения последовательности геологического изучения: общие поиски — детальные поиски — поисково-оценочные работы; 2) геологоразведочные работы на месторождениях, получивших положительную оценку, должны выполняться комплексно с учетом постоянно возрастающих требований промышленности к качеству, полноте и достоверности разведочных данных. Для крупных месторождений высококачественных руд, выявленных в районах с выраженным дефицитом сырьевых ресурсов, целесообразно совмещать проведение предварительной и детальной разведки, что обеспечит ускорение темпов и экономизацию затрат на их промышленную подготовку; 3) на всех стадиях поисковых и разведочных работ требуется оперативный экономический анализ рентабельности исследуемого объекта; 4) апатитовые руды — комплексное минеральное сырье для ряда отраслей народного хозяйства, причем сфера их практического использования со временем имеет тенденцию к расширению. Эту особенность развития горнорудной промышленности на современном этапе необходимо предвидеть и учитывать в процессе подготовки новых сырьевых баз; 5) полное комплексное использование всех полезных компонентов руд на базе безотходной переработки не только в несколько раз повышает экономическую эффективность промышленного освоения природных ресурсов, но и является важным фактором охраны окружающей среды.

Попутное производство соединений фтора из хибинского апатита в 1979 г. достигло 91 тыс. т и обеспечило 29 % потребности во фторосолях. Переработка части апатитового концентрата по азотнокислотной схеме позволяет поднять попутное извлечение фтора до 65 %. Общий годовой экономический эффект от попутного производства фторосолей из фторапатита, по данным О.С. Нечаевой, должен достигнуть 25,8 млн. руб.

Максимальная утилизация фтора из хибинского апатита — важная проблема специальных технологических исследований ближайшего десятилетия.

Предельное попутное обезфторивание фосфатного сырья позволит решить три важные государственные задачи: удовлетворить возрастающие

## МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ, ГЕНЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЙОЛИТ-УРТИТОВОГО КОМПЛЕКСА И МЕСТОРОЖДЕНИЙ

### ТИПОМОРФНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЙОЛИТ-УРТИТОВ И АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

Исследованием распространенности и распределения редких элементов в Хибинях занимались многочисленные исследователи, начиная с двадцатых годов: И.Д. Борнеман-Старынкевич, А.Е. Ферсман, Б.Н. Мелентьев, позднее О.Б. Дудкин, С.М. Кравченко, Д.А. Минеев и др.

Типоморфными элементами общепризнаны редкоземельные элементы и стронций, особенно концентрирующиеся в апатит-нефелиновых рудах и в апатите. Содержание стронция в хибинской генеральной средней пробе, по А.А. Кухаренко, 0,12 %,  $\Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$  — 0,06 %. Сравнение состава хибинской генеральной средней пробы с кларком и хондритами указывает на общее смещение в сторону накопления более легких (цериевых) лантаноидов (рис. 29).

Тысячами анализов выявлены диапазоны вариаций содержаний всех редких элементов, включая индивидуальные лантаноиды, во всех породах, типах руд и минералах.

Очевидно, существенно сходство средних соотношений:  $\text{SrO}$  и  $\Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$  во всех породах массива между собой и с генеральным средним составом пород Хибинского массива (рис. 30, 31). Единственное существенное исключение составляют ийолит-уртиты и связанные с ними апатит-нефелиновые руды, отличающиеся относительным накоплением стронция и РЗЭ. Это накопление компенсируется некоторым спадом общей редкометальности в поздних интрузивных фазах — лявочорритах и фойяитах центральной части массива (см. рис. 30).

Исследованы распространенность и распределение РЗЭ в минералах и концентратах хибинских месторождений. Впервые охарактеризованы РЗЭ в сосуществующих апатитах, сфенах, титаномагнетитах, эгиринах и нефелинах. Среднее содержание РЗЭ в апатите и сфене существенно выше, чем в других минералах. По спектру РЗЭ они незначительно отклоняются от кларка в апатите в цериевую сторону, в сфене — в иттриевую. Содержание РЗЭ в породообразующих и остальных минералах Хибин, в целом, близко к кларку земной коры. По спектру РЗЭ эти минералы значительно разнообразнее. В среднем они располагаются в ряд возрастающей иттриевости: титаномагнетит < апатит < эгирин < нефелин < сфен. В сосуществующих эгиринах и титаномагнетитах Хибин сумма РЗЭ и иттриевость смещены в сторону эгирина.

Апатит отличается более высоким относительным содержанием стронция, тогда как РЗЭ преимущественно поглощаются сосуществующим сфеном, где  $\text{Sr/TR} \sim 1$ .

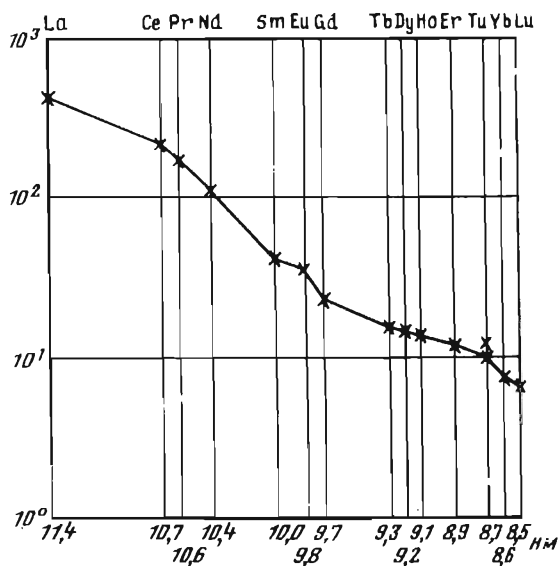


Рис. 29. Содержание индивидуальных лантаноидов в пробе хибинская-генеральная. По А.А. Кухаренко, Г.А. Ильинской, Т.Н. Ивановой и др. [1968 г.]. Нормированное по среднему составу лантаноидов в хондритах. По Герману [Heitmann, 1970 г.]

Минералогии Хибинского массива, ийолит-уртитового комплекса и апатитовых месторождений посвящено множество работ. Наиболее полные сводки по минералогии опубликованы в специальных монографиях [12, 14, 17, 34, 35 и др.]. Задача настоящей работы — изучение минералого-геохимических особенностей ийолит-уртитов и апатит-нефелиновых пород и их генетическая и технолого-минералогическая интерпретации.

В генетических целях обычно предпочитают рассматривать спектр аксессуарных минералов любой ассоциации или же ее главные породообразующие минералы, тогда как для технологической минералогии наибольший интерес представляют минералы, имеющие практическое значение; изучение других минералов необходимо в том случае, если они оказывают какое-то явление на технологические процессы. С этой точки зрения ассоциация минералов ийолит-уртитов и апатит-нефелиновых пород представляется необычно интересной, так как все слагающие ее основные минералы имеют значение для промышленности, и их изучение позволяет одновременно решать и прикладные, и научные задачи.

Главными породообразующими минералами нефелиновых сиенитов Хибинского щелочного массива являются нефелин и калиевый полевой шпат. Вариация их содержаний в породах, различные структурные положения образуют все многообразие нефелиновых сиенитов Хибин. В наиболее щелочных породах Хибинского массива — ийолит-уртитах — главные минералы — нефелин и пироксен. Все многообразие пород ийолит-уртитово-

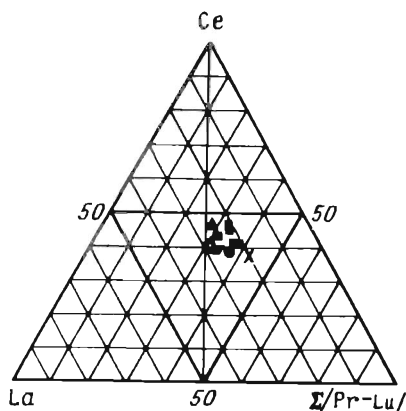
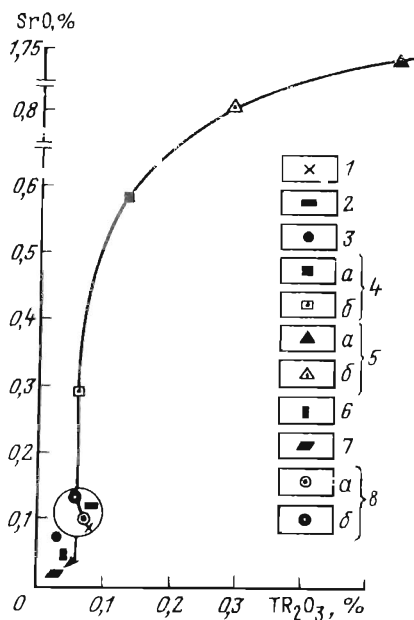


Рис. 30. Стронций и редкие земли в интрузивных комплексах Хибинского массива

1 — хибиниты; 2 — трахитоидные хибиниты; 3 — рисчорриты; 4 — ийолитуртиты; 5 — апатит-нефелиновые породы; 6 — лявочорриты; 7 — фойяиты; 8 — средний состав Хибинского массива. 4, 5, 8: а — по А.В. Галахову, А.А. Кухаренко; б — по С.М. Кравченко, Д.И. Минееву

Рис. 31. Соотношение лантаноидов в интрузивных комплексах Хибинского массива. По А.В. Галахову, С.М. Кравченко, Д.А. Минееву, А.А. Кухаренко. См. условные обозначения к рис. 30

го комплекса определяется шестью минералами: нефелином, пироксеном, апатитом, сфеном, титаномагнетитом и полевым шпатом.

Интенсивное изучение ийолит-уртитов привело к детальной характеристике минералогии комплекса. С ними связана и обнаруженная в последнее время московскими минералогами А.П. Хомяковым, Ю.Л. Капустиним, Б.Е. Борущким и другими ассоциация минералов повышенной щелочности — "ультраагпаитовая ассоциация", в которой открыт ряд новых минералов.

В результате исследований авторов, проведенных в последние годы, удалось показать принадлежность ийолит-уртитового комплекса Хибин к классу расслоенных интрузий. Минеральные ассоциации, последовательно сменяющие друг друга в вертикальном разрезе ийолит-уртитовой инт-



рузии, являются последовательными равновесными парагенезисами, так как их состав в первом приближении определяется приуроченностью к той или иной разновидности породы и положением в разрезе.

В отличие от классических расслоенных интрузий Ловозеро (дифференцированный комплекс), в которых плоскостная ориентировка минералов создает блюдцеобразные субгоризонтальные поверхности, ийолит-уртитовый комплекс представляет собой перевернутый конус (диаметром около 25 км и мощностью от 50 до 2000 м). В расслоенных интрузиях нормальная последовательность пород обычно в первом приближении отвечает их возрастной последовательности. Соотношения пород в составе ийолит-уртитового комплекса могут дополнительно осложняться явлениями отжимания магмы с более глубоких горизонтов в период затвердевания интрузии, тектоническими подвижками и внедрением относительно поздних даект. Однако все эти процессы, например в северо-западном секторе ийолит-уртитовой дуги, проявлены минимально.

В составе дорудной части (субфазы) ийолит-уртитов в обобщенном разрезе выделяются трахитоидные ийолиты с прослоями уртитов и изредка мельтейгитов, постепенно сменяющиеся расслоенными урритами с прослоями ийолитов. В самой нижней части разреза наблюдаются малиньиты. Рудная субфаза сложена массивными урритами и апатит-нефелиновыми породами; надрудная субфаза — трахитоидными ийолитами с прослоями мельтейгитов и трахитоидных уртитов, сменяющимися в верхней части разреза ювитами. Соотношение мощностей всех трех частей обобщенного разреза 1:0,9:1,3, границы между ними, если мощность всего разреза принять за единицу, соответственно 0,7 и 0,4.

При изучении скрытой расслоенности важно различать минералы: по их структурному (возрастному) положению. В ийолит-урритах, где благодаря агапитовому порядку кристаллизации нефелин всегда выделяется первым или одним из первых, ранняя ассоциация сложена нефелином или нефелином и пироксеном. Наиболее характерным примером могут служить массивные урриты второй субфазы, где крупные кристаллы нефелина идиоморфных очертаний составляют до 70 % породы, а все остальные минералы (30 %) находятся в интерстициях между кристаллами нефелина. Различное структурное положение пироксена проявляется в степени идиоморфизма его кристаллов и в вариациях состава: в идиоморфных кристаллах ранней ассоциации преобладает диоксидовый минерал, в ксеноморфных выделениях поздней — эгириновый.

Апатит в силикатных породах относится к поздней структурной ассоциации, в рудах — к ранней. Следствием этого являются различные содержания и, главное, вариации содержания редких элементов в апатитах руд и пород. Стабильное и легко определяемое структурное положение апатита, относительная легкость получения его монофракций, огромное промышленное значение и индикаторные свойства определили наилучшую, по сравнению с другими минералами, изученность апатита.

В породах ийолит-уртитового комплекса Хибин различается несколько морфологических типов кристаллов апатита: 1 — тонкораспыленный апатит (0,1–0,4 мкм), находящийся в виде включений в кристаллах сфена, пироксена, нефелина; 2 — аксессуарный апатит силикатных пород и близкий по форме “сахаровидный” апатит руд, представленный призматическими зернами размером 0,01–0,3 мм; 3 — включенные в агрегаты “сахаровидного” апатита игольчатые кристаллы апатита сечением 0,1–3,0 мм и длиной 4–25 мм; 4 — перекристаллизованный апатит руд, представленный грубозернистыми (2–8 мм) изометричными зернами, слагающими мономинеральные выделения [34].

По химическому составу апатит Хибинского массива представляет собой фторапатит с постоянной изоморфной примесью гидроксила, стронция и редких земель. Спектр лантаноидов существенно лантан-цериевый. Европиевая аномалия в спектре РЗЭ апатита отсутствует.

Стронций и редкие земли в апатитах впервые были обнаружены И.Д. Борнеман-Старынкевич в 1924 г. Тогда же было показано, что стронций и редкие земли входят в состав апатита изоморфно [5]. Экспериментально установлено, что  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Sr}^{2+}$  могут полностью замещать друг друга, и между  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot (\text{OH})\text{F}_2$  и  $\text{Sr}_{10}(\text{PO}_4)_6 (\text{OH}, \text{F})_2$  существует непрерывный изоморфный ряд (Collin, 1959 г., Науск, Petter, 1960 г.).

Характерная особенность апатитов большинства хибинских пород — преобладание стронция над редкими землями. Исключение составляют лишь апатиты из поздних альбититовых жил. Соотношение стронция и редких земель в хибинских апатитах сильно изменяется и оказывается максимальным в ийолит-уртитах. Абсолютные содержания стронция и редких земель в апатитах нефелиновых сиенитов выше, чем в ийолит-уртитах, и намного выше, чем в апатит-нефелиновых породах [33]. Соотношение  $\text{Sr}/\text{TR} \sim 2,7$  в рудах удивительно постоянно. Вариации этого соотношения в рудных апатитах более значительны.

Свойства апатита Хибинского массива во многом определяются примесями Sr и TR, максимально изменяющимися по сравнению с другими его компонентами. Изменения в составе анионной группы не оказывают значительного влияния на параметры элементарной ячейки и оптические свойства, так как в апатитах хибинских месторождений отношение F:OH достаточно постоянно и близко 10:1.

Б.П. Романчев детально изучал включения в хибинских апатитах. Он определил близкие температуры гомогенизации включений в аксессуарном апатите силикатных пород и в апатите руд. С помощью термобарогеохимических исследований было установлено, что минералы ассоциации ийолит-уртитов кристаллизуются из относительно “сухих” расплавов при температурах 1000–700 °С. Кроме того, было установлено, что в ийолит-уртитах и рудах апатит представлен по крайней мере двумя генерациями — высокотемпературный, образовавшийся в магматическую стадию в интервале температур 910–750 °С, слагающий основную массу руд и встречаю-

щийся в качестве акцессорного в ийолит-уртитях, и более низкотемпературный (перекристаллизованный) апатит, образовавшийся при температуре до 400 °С [20].

В ийолит-уртитях и генетически связанных с ними апатит-нефелиновых породах апатит играет различную роль: в силикатных породах он является акцессорным минералом, в рудах — породообразующим. Нет резкой границы между вмещающими рудное тело породами и рудами. Переход между ними постепенный.

Состав апатита ийолит-уртитов и апатит-нефелиновых пород принципиально не различается, отличия наблюдаются только в количественном содержании примесей Sr и TR. Апатит из руд содержит этих элементов меньше, чем апатит из ийолит-уртитов. Апатиты перекрывающих пород богаче редкими землями по сравнению с апатитами подстилающих и внутрирудных уртитов. В табл. 25 показаны средние содержания TR и Sr в апатитах из руд и пород месторождения Партомчорр. Хорошо видны различия в содержании примесей в рудном и акцессорном апатитах.

В целом, по степени обогащенности редкими элементами апатитов вмещающих пород устанавливается следующая последовательность: уртиты—мельтейгиты—ийолиты. Чем крупнее и богаче апатитом рудное тело, тем меньше изоморфных примесей содержится в апатите [13]. Эта зависимость наблюдается и в плане ийолит-уртитовой интрузии: апатит из руд разведанных фланговых месторождений дуги, где его содержание ниже, чем в рудах эксплуатируемых месторождений центральной части, содержит большее количество микропримесей (табл. 26).

Заметное влияние на содержание примесей в апатите оказывают процессы перекристаллизации, в результате которых содержание Sr и TR в апатитах обычно увеличивается (табл. 27).

Содержание Sr и TR в апатитах ийолит-уртитов связано с положением образца в нормальном разрезе интрузии. Эту особенность для руд отмечал еще А.Е. Ферсман. Многие исследователи обращали внимание на то, что от подошвы к кровле рудного тела содержание Sr и TR в апатитах (как и в сосуществующих сфенах) увеличивается. Работами авторов эта зависимость установлена не только для рудного, но и для акцессорного апатита интрузии ийолит-уртитов.

Возрастание содержания редких элементов в апатите по разрезу — проявление одного из основных следствий расслоенности ийолит-уртитовой интрузии, возникшей в результате процессов кристаллизационной дифференциации — первичной скрытой расслоенности, благодаря которой содержание Sr и TR в апатите детерминировано положением образца в нормальном разрезе интрузии. Зависимость состава от положения в разрезе описывается разными уравнениями для акцессорного и рудного апатита.

Содержание фосфора в апатите отчетливо зависит от содержания стронция и редких земель. Вхождение в апатит на место кальция элементов более тяжелых вызывает закономерное уменьшение весового содержания фосфора. Эта зависимость имеет важное технологическое значение. Авторы рассчитали теоретическое уравнение зависимости весового содержания  $P_2O_5$  в апатитах от содержания SrO при среднем для рудного апатита Хи-

Средние содержания редких земель и стронция в апатитах Партомчорра по данным нейтронно-активационного анализа (в вес. %)

Породы	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	$\Sigma TR_2O_3$	SrO
Сегчатые	0,300	0,48	0,10	0,019	0,0060	0,0010	0,0019	1,07	3,5
Линзовидно-полосчатые и полосчатые	0,312	0,48	0,13	0,033	0,0060	0,0020	0,0020	1,20	3,5
Пятнистые	0,297	0,45	0,11	0,020	0,0060	0,0017	0,0020	1,04	3,5
Сплошные и массивные	0,298	0,47	0,11	0,020	0,0060	0,0014	0,0020	0,92	3,5
Апатит-магнетитовые и апатит-сфеновые	0,380	0,65	0,115	0,020	0,0030	0,0016	0,0016	1,33	5,4
Ййолит-уртиты внутрирудные	0,350	0,50	0,100	0,030	0,0050	0,0012	0,0018	1,19	4,5
Ййолит-уртиты наружные	0,390	0,57	0,150	0,019	0,0056	0,0020	0,0018	1,35	5,4

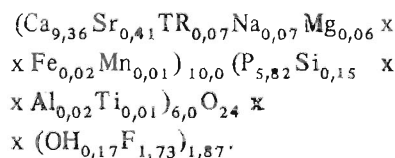
бин содержания  $TR_2O_3$ , равном 1 % (при расчете было учтено, что вместе с редкими землями в состав апатита входят натрий и кремний):

$$P_2O_5 = 41,94\% - 0,192 SrO. (2)$$

Эта зависимость изображена на рис. 32.

На месторождении Партомчорр апатит представлен тремя основными разновидностями: мелкозернистый первичный рудный апатит, средне- и крупнозернистый перекристаллизованный апатит и аксессуарный апатит ийолит-уртитов. Встречается апатит Партомчорра в тех же ассоциациях, что и на других месторождениях. В отличие от эксплуатируемых месторождений, где агрегат "сахаровидного" апатита образует значительные скопления, для Партомчоррского месторождения характерно частое и незакономерное чередование первичного и перекристаллизованного апатита. Преобладающий размер зерен первичного рудного и аксессуарного апатита 0,2–0,4 мм, удлинение 1:1,5 – 1:1,3; для перекристаллизованного апатита характерны изометричные зерна размером 1–4 мм.

Средний состав отвечает формуле



По составу это фторапатит с постоянной примесью стронция, натрия, редких земель.

Средний состав руд и апатита разных рудных полей Хибин

Рудное поле	Месторождения	Содержание, вес. %		
		в руде P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	в апатите	
			SrO	ΣTR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Юго-западное	Эксплуатируемые (богатые руды)	24-31	1,8-2,0	0,9-1,1
	Руды текущей добычи	14-16	2,4-2,6	0,9-1,1
Юго-восточное	Эксплуатируемые	16,2	2,7	0,9
	Разведанные	13,5	3,0	1,1
	Разведываемые	12,9	3,5	0,9
Северо-западное	Разведанные	6,5	4,2	1,2

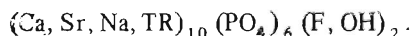
Таблица 27

Содержание стронция, PЗЭ и иттрия (в вес. %) и спектр лантаноидов (в отн. %) в первичном и перекристаллизованном апатитах

Элемент	Первичный				Перекристаллизованный			
	1	2	3	4	1	2	3	4
SrO	2,5	2,3	2,2	1,9	2,9	2,6	2,5	3,3
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,87	0,87	0,84	—	0,9	0,91	1,20
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,04	0,037	—	—	0,04	0,040	—
La	—	—	29,5	28,7	—	29,1	30,9	29,0
Ce	—	—	43,9	44,1	—	43,7	47,1	45,4
Pr	—	—	4,0	4,1	—	4,1	4,5	4,0
Nd	—	—	15,4	15,8	—	15,9	10,5	15,5
Sm	—	—	2,6	2,3	—	2,4	2,6	2,2
Fu	—	—	0,64	0,57	—	0,70	0,77	0,59
Ga	—	—	1,9	1,4	—	2,0	2,0	1,6
Tb	—	—	0,24	0,18	—	0,21	0,24	0,19
Dy	—	—	0,98	0,68	—	0,94	0,98	0,76
Ho	—	—	0,14	0,15	—	0,17	0,15	0,15
Er	—	—	0,38	0,37	—	0,37	0,37	0,29
Tm	—	—	0,11	0,06	—	0,12	0,11	0,09
Yb	—	—	0,19	0,14	—	0,17	0,20	0,16
Lu	—	—	0,06	0,04	—	0,05	0,05	0,07

Примечание. 1, 2, 3, 4 — номера образцов.

В отличие от апатитов руд и пород других частей ийолит-уртитовой интрузии, апатит Паргомчорра характеризуется большими содержаниями стронция и редких земель (см. табл. 26). На рис. 33 показаны составы (в атомных количествах в кристаллохимической формуле) апатитов Паргомчорра и других месторождений Хибин (исходя из идеализированной формулы)



Увеличение содержания более тяжелых, чем кальций, элементов делает более заметной, чем на других месторождениях, зависимость весового содержания  $P_2O_5$  от содержания стронция [уравнение (2)]. Это усложняет технологическую задачу получения кондиционного апатитового концентрата из руд Партомчоррского месторождения (в монофракциях Партомчоррского апатита весовое содержание  $P_2O_5$  не превышает 41 %, а, как правило, ниже). Акцессорный апатит пород в среднем содержит больше примесей, чем рудный апатит

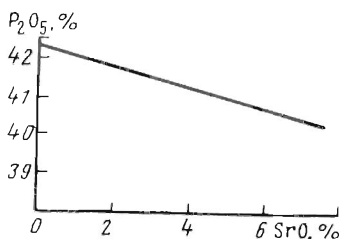


Рис. 32. Теоретическая зависимость весовых содержаний фосфора и стронция в апатите при содержании  $\Sigma TR = 1\%$

(см. табл. 25). Перекристаллизованный апатит содержит примесей стронция и редких земель столько же или больше, чем первичный (см. табл. 27). При перекристаллизации изменяются некоторые свойства апатита, например, смачиваемость, которая влияет на флотационные особенности.

Кроме отмеченных различий в свойствах первичных и перекристаллизованных апатитов, связанных с самим процессом перекристаллизации, основные вариации свойств Партомчоррского апатита вызываются изменениями его состава, в первую очередь замещением Ca на Sr и TR. Колебания содержаний этих элементов в составе Партомчоррского апатита весьма значительны и связаны частично с процессами перекристаллизации, но в основном с процессами кристаллизационной дифференциации, формирующими скрытую расслоенность пород. Содержание SrO в апатите пород комплекса в районе Партомчорра колеблется от 1,9 до 11,5 %,  $TR_2O_3 - 0,81$  до 2,04 %.

На серии образцов апатита с различными содержаниями SrO и  $TR_2O_3$  были исследованы некоторые физические свойства. Рентгеноструктурные исследования проводились методом порошка на дифрактометре ДРОН-2,0. Излучение  $CuK_{\alpha}$  с графитовым монохроматором по плоскости 001. Напряжение и сила тока составляли соответственно 38 кВт и 30 мА. Съемка велась со скоростью 0,5 град/мин с внешним эталоном.

Изученные апатиты дают похожие дифракционные картины с незначительными колебаниями межплоскостных расстояний и интенсивности некоторых линий. Исследования первичного и перекристаллизованного апатитов показали некоторые различия в их спектрах, выразившиеся в изменении интенсивностей линий в области углов  $2\theta$  50-54° и 63-65°. Интенсивность линий 004, 410, 502 и 510 существенно различается.

По рентгенограммам были рассчитаны параметры элементарной ячейки. Они незначительно различаются в зависимости от количества примесей, возрастая с увеличением содержания стронция и редких земель. Эту зависимость можно выразить аналитически:

$$a_0 = 9,369 + 0,006 SrO, r_{5\%} = 0,90;$$

$$c_0 = 6,885 + 0,005 SrO, r_{5\%} = 0,77.$$

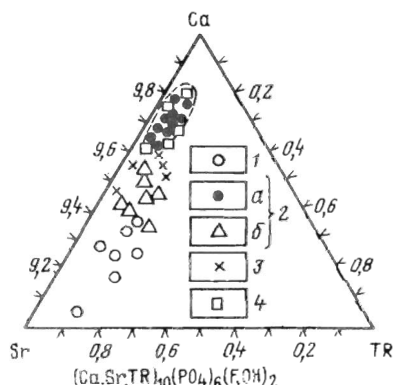


Рис. 33. Состав апатита месторождения Партомчорр и других месторождений хибинского массива.

Субфазы: 1 — пострудная; 2 — рудная: а — руды, б — уртиты; 3 — до-рудная; 4 — руды других месторождений

нескольких генераций апатита. Действительно, в тех образцах, где количество перекристаллизованного апатита существенно, гистограммы имеют бимодальный характер. Наличием нескольких пиков характеризуется распределение содержаний стронция ( $n = 138$ ) и редких земель ( $n = 121$ ) в апатитах (рис. 34), что также объясняется существованием генераций апатита с различным составом.

Всеми исследователями отмечено увеличение содержания Sr и TR в апатитах месторождений от лежачего блока рудного тела к висячему. Эта зависимость обнаружена авторами и на Партомчоррском месторождении. На рис. 35 приведены разрезы через рудное тело Партомчоррского место-

На термоградиентной трубке была изучена плотность Партомчоррского апатита.

Измерения проводились в смесях тяжелых органических жидкостей методом с двумя эталонными реперами. По результатам измерений рассчитывалась средняя плотность ( $\text{г/см}^3$ ) образцов. Она закономерно увеличивается с возрастанием содержания Sr и TR в апатите, что выражается следующим уравнением:

$$\rho = 3,210 + 0,008 (\text{SrO} + \text{TR}_2\text{O}_3),$$

$$r_s \% = 0,64.$$

Вариации плотности зерен одного образца могут объясняться наличием включений, неравномерностью распределения Sr и TR и наличием

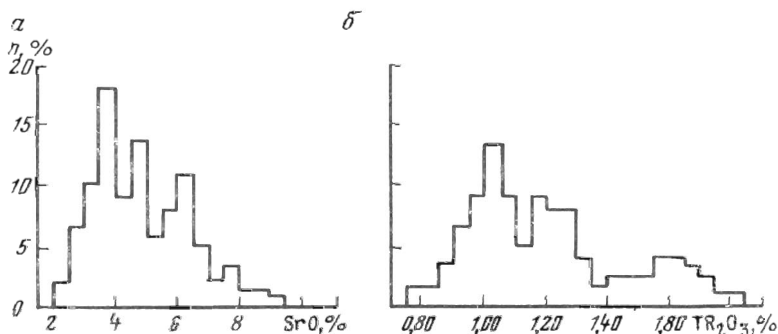


Рис. 34. Гистограммы распределения содержаний стронция (а) и редких земель (б) в апатитах месторождения Партомчорр

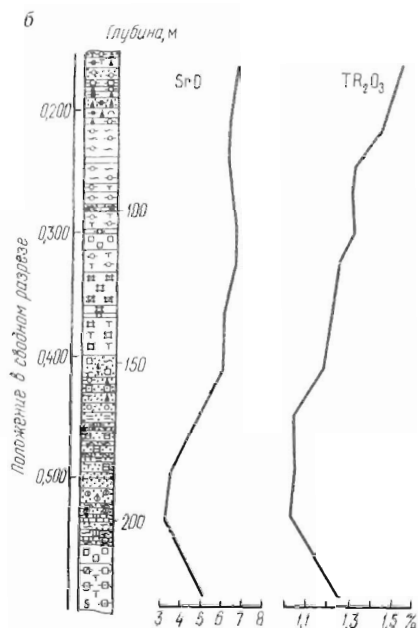
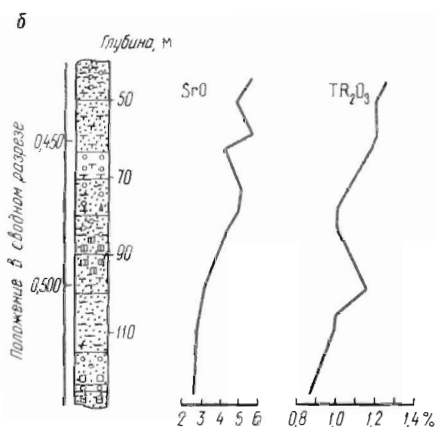
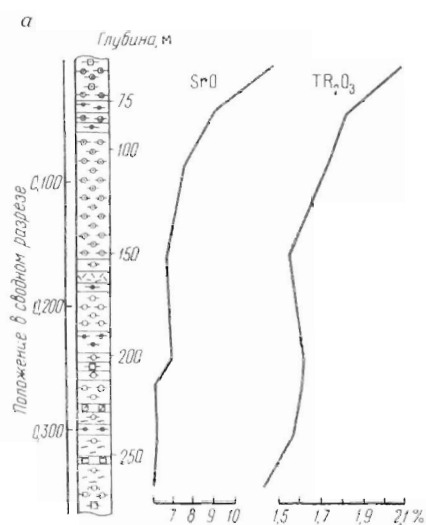
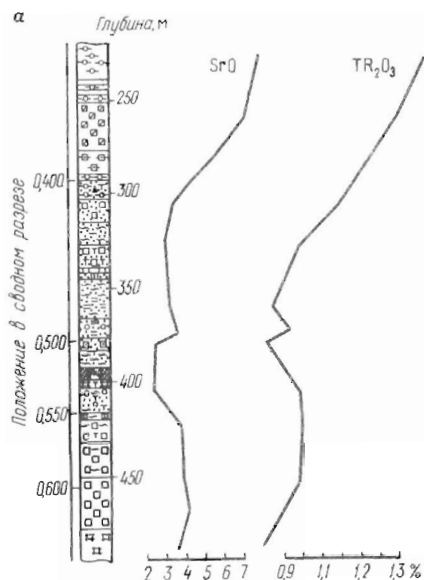


Рис. 35. Вариации состава апатита в вертикальных разрезах через рудное тело месторождения Партомчорр

а - скв. 1043; б - скв. 921. См. условные обозначения на рис. 3

Рис. 36. Вариации состава акцессорного апатита в вертикальных разрезах ийолит-уртитовой интрузии месторождения Партомчорр

а - скв. 985; б - скв. 983



рождения и изменения содержания примесей в апатитах. Направленное увеличение количества примесей в апатитах не вызывает сомнений.

Исследованиями авторов установлено наличие скрытой расслоенности в акцессорном апатите ийолит-уртитов [25]. На рис. 36 показаны разрезы по скважинам через ийолит-уртитовую интрузию и содержание SrO и  $TR_2O_3$  в акцессорном апатите. Как видно, содержание этих элементов в акцессорном апатите выше, чем в рудном, и так же возрастает снизу вверх по разрезу.

Направленное увеличение содержания стронция и редких земель в апатите из руд и пород происходит на фоне иногда значительных колебаний, связанных с изменениями минерального состава породы.

Таким образом, скрытая расслоенность проявляется у апатита в породах всего ийолит-уртитового комплекса, но при разных абсолютных значениях содержаний Sr и TR в апатитах руд и пород. Поскольку особенности апатита ийолит-уртитов и, в частности, Партомчорра зависят в основном от содержаний в нем стронция и редких земель, а вариации содержания этих элементов являются в основном следствием скрытой расслоенности, то можно считать, что особенности апатита ийолит-уртитов связаны преимущественно с положением каждого образца в разрезе интрузии.

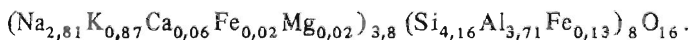
Зависимость состава апатита от положения его в разрезе удалось использовать в прикладных целях, как геохимический критерий при поисках скрытых на глубине апатитовых тел [26].

#### НЕФЕЛИН

Нефелин — один из главных минералов пород Хибинского массива. Вместе с полевым шпатом в нефелиновых сиенитах и пироксенем в ийолит-уртитах он составляет до 95 % объема породы. В различных комплексах пород, слагающих Хибинский массив, нефелин различается по составу, свойствам, морфологии кристаллов [8, 34]. Являясь первым минералом, кристаллизующимся из расплава, хибинский нефелин в наибольшей степени отражает его состав и эволюцию.

Нефелин представлен порфиroidными идиоморфными кристаллами в существенно нефелиновых массивных уртитах, трахитоидных ийолитах. Ксеноморфные кристаллы нефелина характерны для мельтейгитов, богатых руд, существенно апатитовых агрегатов. Размеры кристаллов нефелина колеблются от 0,1–0,8 мм в мелкозернистых ийолитах до 10–15 мм, изредка до 40 мм, в крупнозернистых уртитах.

Средний состав нефелина Партомчорра соответствует формуле



В составе нефелина постоянно наблюдается повышенное содержание кремнезема и железа по сравнению со стехиометрическим, также постоянна в нефелинах ийолит-уртитового комплекса околоскарская примесь редких щелочей и галлия (табл. 28). Содержания названных элементов колеблются в узких пределах.

Средние околоскарковые содержания аксессуарных рубидия, цезия и галлия в нефелинах Партомчорра (в г/т)

Субфаза	Rb	Cs	Ga
Пострудная	165	1,6	49
Рудная			
руды	130	0,8	36
уртиты	177	1,8	35
Дорудная	138	4,0	36

В составе нефелина отмечается определенная зависимость от положения в разрезе интрузии. В нефелинах пострудной субфазы относительно повышено содержание кальциевого минала (рис. 37). В верхних частях разреза ийолит-уртитового комплекса увеличивается содержание редких щелочей и галлия в составе нефелина (см. табл. 28).

Для нефелина отдельных локальных зон характерны процессы вторичного изменения, в результате которых по нему развивается полиминеральный агрегат, называемый шпреуштейном, состоящий из канкринита, цеолитов, гидрослюд, сильно ухудшающий флотационные свойства нефелина.

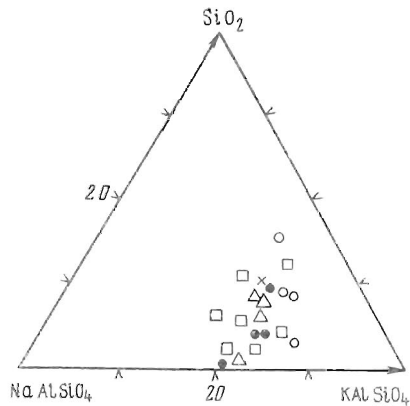


Рис. 37. Состав нефелина месторождения Партомчорр. См. условные обозначения к рис. 34

### ПИРОКСЕН

Пироксен, как и нефелин, — главный минерал пород Хибинского массива. По составу относится к группе эгирина — диопсида — геденбергита.

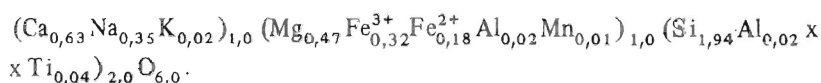
В породах Хибинского массива присутствует несколько генераций пироксенов. Это пироксен-I — ранняя генерация, представленная короткопризматическими кристаллами черного цвета; пироксен-II и пироксен-III — поздние генерации минерала, представленные зелеными длиннопризматическими кристаллами, часто образующими радиально-лучистые агрегаты. Характерно преобладание в ранних пироксенах диопсидового минала, в поздних — эгиринового.

В породах ийолит-уртитового комплекса в районе месторождения Партомчорр содержание пироксенов колеблется от 5–6 % в апатит-нефелиновых породах до 70–80 % в мельтейгитах. Пироксен представлен несколь-

кими морфологическими разновидностями. Идиоморфные призматические кристаллы развиты в трахитоидных ийолитах и бедных (сетчатых) рудах. Ксеноморфные выделения характерны для массивных уртитов, богатых руд и ювитов. Части мелкие игольчатые кристаллы эгирина, включенные в нефелин и образующиеся в результате распада твердого раствора [33]. В поздних жилах наблюдается зеленый волокнистый эгирин. Размер кристаллов пироксена колеблется от 0,2–0,4 мм до 29–30 мм в пегматоидных уртигах.

Пироксены, характеризующиеся идиоморфными очертаниями кристаллов и относящиеся к минералам ранней структурной ассоциации, являются наименее щелочными и наиболее магнезиальными. Железистые и сильно щелочные пироксены типичны для поздней структурной ассоциации минералов, характеризующейся ксеноморфными кристаллами.

Средний состав пироксена месторождения Партомчорр отвечает формуле



Изучение пироксенов I генерации позволило установить определенные закономерности в вариациях их состава. Состав пироксенов изменяется в пределах каждого типа пород за счет наличия двух структурных ассоциаций минералов. На диаграмме (рис. 38) отчетливо выделяется поле наиболее щелочных пироксенов поздней структурной ассоциации из массивных уртитов второй субфазы.

При анализе вариаций состава пироксенов одной структурной ассоциации видно, что содержание эгиринового минала закономерно увеличивается от ранних пород к поздним, от пород дорудной субфазы к породам пострудной (см. рис. 38).

Вариации состава пироксенов в пределах породы и в масштабе всего ийолит-уртитового комплекса обуславливают закономерные вариации их свойств. С увеличением содержания эгиринового минала в составе пироксена увеличивается и его удельная магнитная восприимчивость. Увеличение содержания эгиринового минала вызывает увеличение плотности пироксена, закономерное изменение параметров кристаллической решетки.

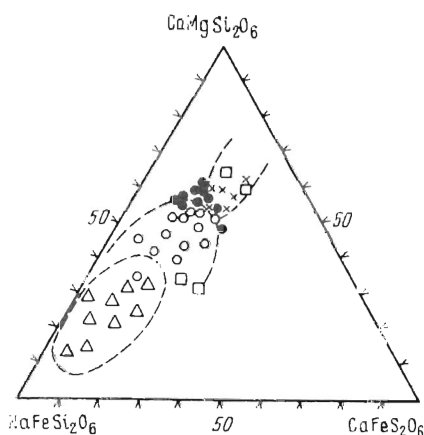


Рис. 38. Состав пироксенов месторождения Партомчорр. См. условные обозначения к рис. 34

Средние составы пироксенов Партомчорра (в %)

Субфаза	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	SrO
Пострудная	0,42	13,2	0,10	2,2	14,3	0,25
Рудная	0,43	12,6	0,11	2,0	15,0	0,17
руды	0,41	12,6	0,11	2,0	15,0	0,17
уртиты	—	—	0,17	—	—	0,15
Дорудная						

Таблица 30

Среднее содержание аксессуарных редких земель и стронция в минералах Партомчорра (в г/т)

Минералы	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Sr
Пироксен (РЗЭ-17; Sr-60)	36	97	7	3	1	4	2114
Нефелин (9)	15	28	1,8	2,4	0,8	0,9	1180
Калиевый полевой шпат (4)	2,5	4	0,4	0,6	0,1	0,4	460
Титаномагнетит (36)	18	39	1,8	1,7	1,7	1,8	254

Примечание. В скобках — число анализов.

В составе пироксенов ийолит-уртитового комплекса месторождения Партомчорр постоянно содержатся примеси микрокомпонентов (табл. 29, 30). Содержание микропримесей в составе пироксенов закономерно изменяется по разрезу интрузии: содержание стронция и РЗЭ увеличивается, ванадия — уменьшается.

### СФЕН

Распространен практически во всех типах пород Хибинского массива. В ийолит-уртитовых сфен — второстепенный минерал, в сфеновых породах играет более существенную роль. В породах и рудах месторождения Партомчорр содержание сфена колеблется от 2–25 % в рудах и апатитовых урритах до 50–60 % в существенно сфеновых породах. В всячем боку рудного тела залегают практически мономинеральные сфениты.

В различных комплексах по морфологии и свойствам выделяют несколько разновидностей сфена [33]. Преобладают светло-коричневые призматические удлиненные кристаллы, характерные для трахитоидных ийолитов, мелкозернистых ийолитов и урритов и сфенапатитовых пород. Ксеноморфные кристаллы сфена распространены в меньшей степени и находятся преимущественно в массивных урритах. Размеры кристаллов сфена изменяются от 0,1 до 20 мм.

Средние содержания акцессорных стронция, ниобия и циркония в сфенах Партомчорра (в %)

Субфаза	SrO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZrO <sub>2</sub>
Пострудная	0,70	0,38	0,29
Рудная:			
руды	0,43	0,33	0,30
уртиты	0,40	0,35	0,33
Дорудная	0,32	0,35	0,27

Таблица 32

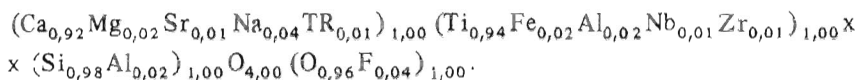
Средние содержания акцессорных редких земель в сфенах Партомчорра (в %)

Породы, руды	La	Ce	Nd	Sm
Ийолит-уртиты надрудные	0,120	0,270	0,122	0,020
Руды				
пятнистые	0,078	0,180	0,108	0,017
линзовидно-полосчатые	0,088	0,200	0,084	0,020
сетчатые	0,117	0,237	0,096	0,021
сплошные и массивные	0,160	0,370	0,123	0,031
Ийолит-уртиты подрудные	0,082	0,200	0,085	0,018

Продолжение табл.32

Породы, руды	Eu	Tb	Yb	ΣTR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ийолит-уртиты надрудные	0,0065	0,0014	0,0017	0,566
Руды				
пятнистые	0,0058	0,0014	0,0019	0,445
линзовидно-полосчатые	0,0062	0,0016	0,0018	0,458
сетчатые	0,0068	0,0021	0,0020	0,543
сплошные и массивные	0,0097	0,0022	0,0032	0,829
Ийолит-уртиты подрудные	0,0053	0,0017	0,0018	0,395

Средний состав сфена месторождения Партомчорр соответствует формуле



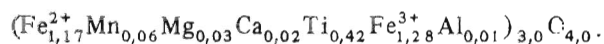
В составе сфена постоянно содержится заметное количество примесей стронция, РЗЭ, ниобия, тантала, циркония (табл. 31,32). Вариации содержаний этих элементов сказываются на параметрах кристаллической решетки, микротвердости и других свойствах сфена. Вариации в составе сфена носят закономерный характер: снизу вверх по разрезу увеличивается содержание редкометалльных микрокомпонентов.

### ТИТАНОМАГНЕТИТ

Титаномagnetит — характерный аксессуарный минерал пород Хибинского массива. В некоторых меланократовых разновидностях пород ийолитуритового комплекса он породообразующий минерал. Характерная черта хибинских титаномagnetитов — тонкое взаимное срастание magnetита и ульвошпинели с более крупными пластинчатыми включениями ильменита.

В породах и рудах в районе месторождения Партомчорр количество титаномagnetита изменяется значительно: ст 0,1 % в урритах и апатитовых урритах до 50 % в мельтейгитах и якулирангитах. Представлен в основном ксеноморфными кристаллами. Идиоморфные октаэдрические кристаллы характерны только для трахитоидных ийолитов и урритов. Размер зерен минералов колеблется от 0,2 до 0,15 мм. Преобладают зерна размером 0,2—0,4 мм.

Средний состав титаномagnetита Партомчорра отвечает формуле



В составе титаномagnetита Партомчоррского месторождения содержание magnetитового минала относительно постоянно; изменяется в основном соотношение ильменитового и ульвошпинелевого миналов (рис. 39). Наблюдается определенная закономерность в вариациях состава титано-

Таблица 33

Средние составы титаномagnetитов Партомчорра (в %)

Субфаз	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Пострудная	16,6	2,1	61,3	0,36
Рудная:				
руды	18,0	2,0	59,7	0,47
урриты	18,6	2,0	60,2	0,53
Дорудная	19,8	2,0	58,3	0,65

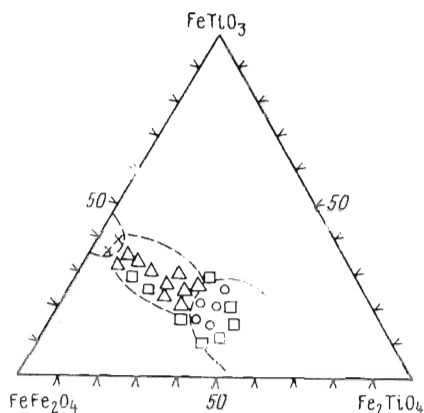


Рис. 39. Состав титаномагнетита месторождения Партомчорр. См. условные обозначения к рис. 34

магнетита: от пород дорудной субфазы к породам пострудной в составе титаномагнетита возрастает содержание ульвошпинелевого минала (см. рис. 39), т. е. увеличивается содержание железа.

Методом нейтронной активации определено содержание редких земель и стронция в титаномагнетитах северо-западной части дуги месторождения Партомчорр. Отмечается некоторая корреляция между содержаниями стронция и редких земель. Максимальные содержания стронция и редких земель характерны для титаномагнетитов сетчатых пород, минимальные — для титаномагнетитов внутрирудных уртитов. Титаномагнетиты подстилающих уртитов

и перекрывающих ийолитов по содержанию названных элементов различаются незначительно.

Спектральным анализом установлено содержание Ni, Co и Cr в пределах 0,008–0,024 %; 0,020–0,37 % и 0,01–0,2 % соответственно.

В табл. 33 приведены результаты определений содержаний в титаномагнетитах Ti, V, Mn, Fe. От лежачего бока месторождения к висячему наблюдается тенденция возрастания содержаний железа в титаномагнетитах и уменьшение содержаний титана и ванадия. Эти соотношения свидетельствуют о последовательном фракционировании компонентов при кристаллизации титаномагнетита.

## РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ГЕНЕЗИСА ИЙОЛИТ-УРТИТОВОГО КОМПЛЕКСА И ОРУДЕНЕНИЯ

Породы ийолит-уртитовой серии обогащены легкими лантаноидами и довольно часто обнаруживают положительную европиевую аномалию. Наиболее высокими значениями европиевой аномалии характеризуются ювиты и уртиты. Концентрации РЗЭ возрастают в последовательности уртиты — мельтейгиты — ийолиты.

Относительно бедные редкими землями нефелин (наиболее ранний по времени кристаллизации), калиевый полевой шпат (наиболее поздний по времени кристаллизации) и эгирин-диопсид характеризуются наличием от-

Среднее содержание акцессорных редких земель и стронция в апатитах и сфенах южной (I) и северо-западной (II) частей дуги ийолит-уртитового комплекса по данным нейтрон-активационного анализа (в  $n \cdot 10^{-4} \%$ )

Порода	$\Sigma TR$	La	Ce	Sm	Nd	Eu	Tb	Yb	Sr	Eu
Апатит-I (15)	9440	2700	3750	170	1110	49	10	12	36380	1,03
	5460-14490	1500-4100	2280-6020	100-210	600-1540	27-63	5-15	9-22	21150-60070	
Сфен-I (13)	4390	1050	2030	170	960	66	13	15	6850	1,09
	2650-8030	680-2050	1140-3580	120-200	600-1370	40-78	17	14	3300-14400	
Апатит-II (14)	8780	2640	3660	160	1030	47	17	14	26230	1,02
	6040-13830	1800-3400	2600-5700	90-230	650-1460	27-63	9-25	8-18	16000-43000	
Сфен-II (14)	3480	780	1710	180	630	51	17	25,5	2790	0,90
	2730-4550	550-1100	1040-2200	140-230	440-940	39-60	13-25	10,5-22	1690-5080	
Апатит апатит-нефелиновых пород	8200	2300	3500	160	1030	51	16	14	25040	1,01
	5460-10430	1500-3070	2280-4400	100-200	600-1500	27-63	5-25	9,6-16,7	16000-40610	
Сфен тех же пород (13)	3730	850	1710	160	800	50	16	14	3720	0,93
	2650-8030	590-2050	1140-3580	120-230	600-1370	39-78	9-23	9,6-22	1520-9300	
Апатит-ийолитов, уртитов, ювитов (13)	9850	2800	3700	170	1200	47	14	12	39760	0,94
	6040-13830	1800-4200	2520-6020	90-230	600-1630	27-63	5-22	8-17,6	24530-60070	
Сфен тех же пород (13)	3890	940	1950	170	850	53	16	15	5930	0,99
	2650-5380	770-1280	1460-2440	140-230	510-1370	42-60	11-22	9,6-24,6	4400-14380	
Апатит <sub>ср</sub> (29)	9120	2670	3700	170	1080	47	14	13,2	31300	
Сфен <sub>ср</sub> (26)	4880	1100	2340	270	790	64	17	25,5	4800	

Примечание. Здесь и далее цифры в скобках — число анализов; числитель — среднее; знаменатель — примерные колебания.



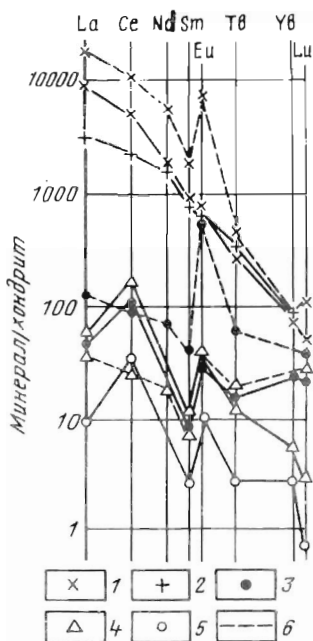


Рис. 40. Содержание редких земель, нормированных по среднему составу хондритов, в минералах ийолит-уртитов Хибинского массива

1 – апатит; 2 – сфен; 3 – пироксен; 4 – нефелин; 5 – кальцевый полевой шпат; 6 – минералы карбонатитового комплекса Ока (Канада)

Такой тип фракционирования может быть назван хибинским и описан с помощью уравнения (вес. %)

$$\lg \text{Sr} = 1,45 \lg \text{Ce} + 1,12.$$

Родоначальной для хибинских интрузий предполагается мантийная нефелинитовая магма [24]. Одним из возможных механизмов относительного обогащения поздних дифференциатов церием может быть фракционирование минералов со Sr/Ce, близким к единице.

Породы ийолит-уртитового комплекса обогащены легкими пантанонидами, что характерно для дифференциатов щелочнобазальтовых и ультраосновных – щелочных мантийных магм (табл. 35, рис. 41). Положительная европиевая аномалия в составе пород может рассматриваться

четкой европиевой положительной аномалии (табл. 34, рис. 40). В показанных для сравнения составах РЗЭ пироксена и нефелина ийолитов, мельтейгитов и уртитов комплекса Ока (Канада) европиевая аномалия выражена более резко, чем в хибинских породах (Ебу, 1975 г.).

Результаты минералогического анализа протолок породы ийолит-уртитовой дуги, свидетельствующих о том, что аксессуарные минералы, кроме апатита и сфена, не играют существенной роли в валовом содержании РЗЭ и Sr в породе. Используя новые данные по среднему содержанию РЗЭ и Sr в минералах и количественно-минералогическому составу некоторых пород ийолит-уртитового комплекса, можно рассчитать примерный баланс распределения редких элементов в главных типах пород. Из этих расчетов следует, что основную массу РЗЭ и Sr в составе пород, как и руд, несут апатит, сфен и лишь иногда породообразующие минералы, в которых их концентрация ниже на порядок и более.

Анализ соотношений логарифмов концентраций церия и стронция в пробе "Хибинская-генеральная" [22] и в средних составах апатит-нефелиновых пород и апатитах рудного тела обнаруживает их пропорциональность. Это позволяет рассматривать породы ийолит-уртитового комплекса как комагматическую серию, в которой изменение концентраций стронция и церия обусловлено фракционированием апатита.

как доказательство отсутствия предшествовавших этапов фракционирования, связанных с осаждением кристаллов плагиоклаза. Это позволяет сделать вывод о вероятной связи ийолит-уртитов Хибинского массива с ультраосновной — щелочной, а не базальтовой магмой, что согласуется с выводами Л.Н. Когарко [24], полученными в результате анализа вариаций Sr/Ca.

Соотношение концентраций  $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ , которое можно рассчитывать по методу Филлпотса на основании данных о распределении TR и Sr между равновесными фазами, при прочих равных условиях (постоянные температура и давление) является показателем окислительно-восстановительных условий формирования пород. Определение  $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$  во вкрапленниках и основной массе вулканических пород позволило рассчитать парциальное давление кислорода в период их формирования (средний  $\log f\text{O}_2$  для базальтов  $-7,0 \pm 1,6$ ; для андезитов  $8,1 \pm 5,7$ ; для дацитов и риодацитов  $-9,1 \pm 4,0$ ) (Drake, 1975 г.). Окислительно-восстановительные условия формирования ийолит-уртитов соответствуют кварц-фаялит-магнетитовому буферу (Л.Н. Когарко, 1977 г.).

Метод Филлпотса использован авторами для определения  $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$  в сосуществующих апатитах и сфенах. Расчеты показали, что в ряде случаев эти минералы не равновесны. Такими, в частности, оказались почти все апатиты и сфены юго-восточной части ийолит-уртитовой дуги, породы которой обогащены поздним перекристаллизованным крупнокристаллическим апатитом. Среди полученных значений  $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$  апатита наблюдается существенный разброс.

Таким образом, определение  $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$  в сосуществующих минералах позволяет различать неравновесные соотношения, а также выделять их поздние генерации, характеризующиеся минимальной величиной названного отношения.

Как видно из приведенных данных (см. табл. 34, 35), в породах комп-

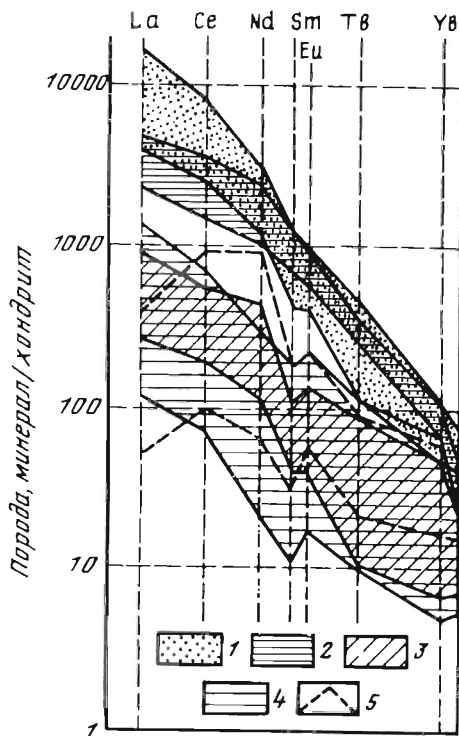


Рис. 41. Содержание редких земель, нормированное по среднему составу хондритов, в породах и минералах ийолит-уртитового комплекса

1 — апатит; 2 — сфен; 3 — уртиты нижней части разреза южной части дуги; 4 — ийолиты; 5 — уртиты, мельтейтиты карбонатитового комплекса Ока (Канада)

Среднее содержание редких земель и стронция в породах южной (I) и северо-западной (II) частей ийолит-уртитовой дуги по данным нейтронно-активационного анализа ( $\% \cdot 10^{-4}$ )

Порода	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Sr	$\delta$ Eu
Ийолит-I (9)	220	370	140	20	7	2,6	6,6	4040	1,17
	77-560	160-8900	43-260	10-42	4,3-15	0,9-4	3,5-18	1940-10150	0,99-1,46
Уртит-I (22)	110	230	110	14	5	2,2	6,1	2280	1,13
	46-370	65-760	19-390	4-37	1,7-15	0,9-5	2,6-15	850-3890	0,86-1,42
Ювит-I (6)	140	230	110	11	5	2	3,8	2620	1,33
	43-230	80-360	60-210	4-15	1,7-9	0,9-3	0,9-8	1440-3980	1,05-1,75
Мельтейгит-I (5)	180	360	170	16	6	2,4	9	4060	1,17
	43-350	130-680	17-230	10-27	1,7-9	1,7-3,4	5,3-13,2	1780-8120	1,04-1,25
Ийолит-II (13)	160	280	130	21	6,7	3,9	4,5	2450	1,07
	120-340	240-540	86-190	19-32	5,5-9,5	0,9-3,4	2,6-7	1600-4990	0,94-1,17
Уртит-II (2)	140	280	100	21	7,3	3,9	7	1780	1,0
	94-180	230-340	70-140	11-20	6-9	1,7-2,2	6-8	1010	0,95-1,05
Ювит-II (2)	78	130	62	9	3,1			1010	1,0
	71-85	120-150	39-86	9-10	2,7-3,5	1,7	1,7	930-1100	0,95-1,05
Ийолиты (все)	260	330	132	21	7	2,2	5,3	3250	1,12
Уртиты	130	250	110	17	6,2	2,2	6,6	2030	1,19
Ювиты	110	180	86	10	4	1,7	2,6	1800	1,16
Мельтейгиты	180	360	170	16	6	2,6	9	4040	1,17
Породы-I	160	290	140	15	6	2,2	6,1	3200	1,20
Породы-II	170	240	94	17	6	2,0	4,5	1780	1,11
Общее среднее	170	260	110	16	6	2,1	5,3	2490	1,16

лекса наблюдается некоторое фракционирование TR и Sr между их главными носителями — апатитом и сфеном и породообразующими минералами — нефелином, пироксеном и калиевым полевым шпатом, аномально обогащенным европием. Этот же тип фракционирования сказывается и в разрезах ийолит-уртитов, в которых минимальные значения европия соответствуют интервалам апатит-сфеновых и апатит-нефелиновых пород.

Большая относительная обогащенность апатита легкими лантаноидами по сравнению с породообразующими минералами отражается в возрастании La/Yb и Nd/Yb отношений пропорционально возрастанию концентрации апатита.

Наличие скрытой расслоенности в составе апатитов и сфенов ийолит-уртитов, по-видимому, — прямое подтверждение гипотезы о преобладающей роли кристаллизационной дифференциации в их генезисе и о формировании интрузий в направлении от лежачего бока к висячему. Различия коэффициентов распределения Sr между кристаллами апатита и расплавом ( $K > 1$ ) и комбинированного коэффициента распределения между ассоциацией кристаллов апатита, нефелина, пироксена и других минералов и расплавом ( $K_k < 1$ ) объясняют резкие колебания концентраций Sr (и TR) в апатите по разрезу интрузий. Направленное изменение концентраций TR и Sr в апатитах и сфенах по разрезу комплекса (на фоне некоторых колебаний) представляет важнейшую геохимическую характеристику ийолит-уртитов и позволяет сопоставить конкретные интервалы разреза с обобщенным разрезом комплекса.

Коэффициенты распределения компонентов между фазами пород определяются их химическими потенциалами и, таким образом, являются константами процессов петрогенезиса при заданных термодинамических условиях. В последнее время появилась возможность сопоставления коэффициентов распределения ряда компонентов, полученных различными методами (экспериментально, с помощью термодинамических расчетов, по соотношению концентраций во вкрапленниках и основной массе порфировых пород) и проверки достоверности тех или иных петрографических моделей.

В результате систематических исследований ийолит-уртитового комплекса Хибинского массива впервые удалось получить достаточно данных о составе его пород и минералов для того, чтобы попытаться использовать вывод о принадлежности комплекса к классу расслоенных интрузий и рассчитать коэффициенты распределения редких земель и стронция между минералами и ийолит-уртитовым расплавом, из которого они кристаллизовались.

Для анализа всех полученных данных по северо-западному сектору ийолит-уртитовой дуги авторы используют так называемый "обобщенный разрез", мощность которого принята за единицу. Наличие маркирующих горизонтов, а также отчетливо диагностируемых в любом участке ийолит-уртитовой дуги массивных уртитов и рудного фосфатного тела позволяет достаточно точно привязать исследованные образцы к обобщенному разрезу.

Возможность вычисления коэффициентов распределения элементов

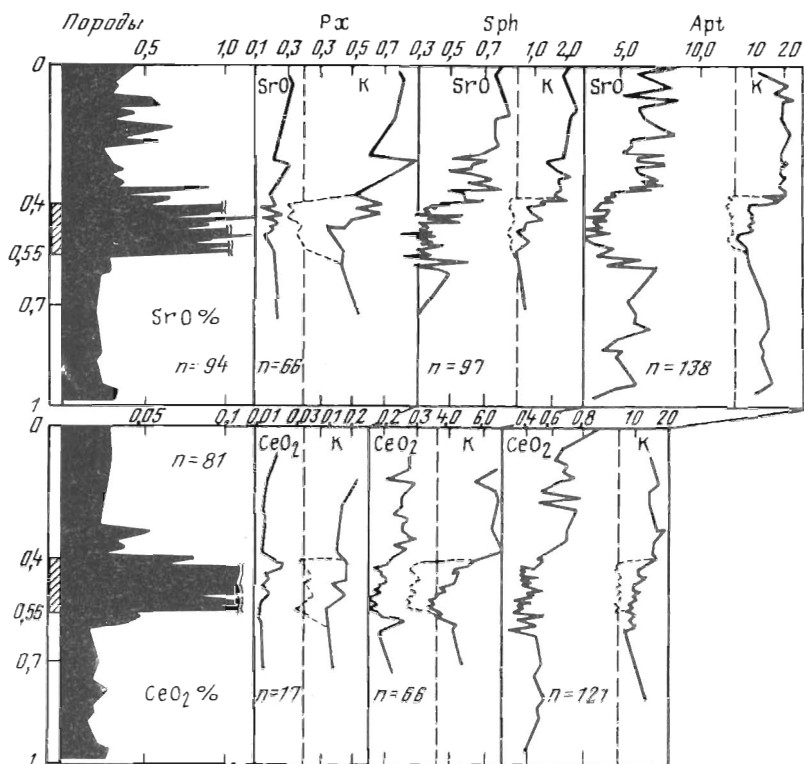


Рис. 42. Концентрация стронция и церия в породах и минералах ийолит-уртитового комплекса Хибинского массива

между минералами и ийолит-уртитовой магмой обусловлена тем, что кристаллизовавшаяся магматическая камера, как об этом свидетельствует скрытая расслоенность, заполнялась кристаллическими фазами от подошвы к кровле и представляла собой закрытую систему. Таким образом, если принять модель направленной кристаллизации, минеральные ассоциации любого уровня расслоенной интрузии находились в равновесии с расплавом, состав которого должен совпадать со средним составом всей вышележащей части интрузии.

Как видно из рис. 42, содержания стронция и редких земель в разрезе комплекса постепенно возрастают от подошвы к кровле в пределах ийолит-уртитов и рудного тела, которому соответствует резкое увеличение концентраций названных элементов. Средняя концентрация редких элементов в конкретных частях разреза определена методом графического интегрирования. Содержания редких земель и стронция в апатите, сфене и пироксене постепенно возрастают от подошвы к кровле интрузии. Содержание стронция в апатите апатит-нефелиновых пород, как известно,

существенно ниже, чем в акцессорном апатите ийолит-уртитов. Та же тенденция менее отчетливо выражена для сфена и не отмечается для пироксена.

Коэффициенты распределения редких земель и стронция между апатитом, сфеном и пироксеном и ийолит-уртитовым расплавом (табл. 36) отчетливо возрастают от лежачего бока интрузии к висячему (см. рис. 45). Коэффициенты сокристаллизации Sr/Ca для апатита тех же трех субфаз и варианта с ликвацией (II<sup>П</sup>) фосфатно-силикатной жидкости соответственно составляют 2,3; 1,5 и 1,1; 2,6; для пироксена 0,25, 0,22 и 0,15; 0,25; для сфена 0,25; 0,31 и 0,19; 0,45. Таким образом, эти величины также возрастают для апатита и сфена от первой субфазы к третьей. Как следует из анализа величин коэффициентов сокристаллизации Sr/Ca, по-видимому, главным фактором являлось интенсивное фракционирование стронция, а не соотношение концентраций Sr и Ca, который всегда находился в избытке. Для объяснения резкого обогащения апатитом рудной части комплекса, если исходить из седиментационной модели, являющейся разновидностью модели кристаллизационной дифференциации, требуются дополнительные допущения. Целесообразно рассмотреть альтернативную модель ликвации на стадии образования рудного тела и рассчитать, исходя из этих допущений, коэффициенты распределения Sr апатита, сфена и пироксена для порции расплава, давшей начало рудному телу. Отметим, что ликвация фосфатно-силикатной жидкости зафиксирована в основной массе стекловатых андезитов (6,7 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 17 % TiO<sub>2</sub> и 30 % SiO<sub>2</sub>).

Следует подчеркнуть, что данные авторов исключают гипотезу многократной ликвации и что предполагаемая ликвация являлась подчиненным процессом, вызванным накоплением фосфора на фронте кристаллизации доминирующим процессом — кристаллизационной дифференциацией. Величины коэффициента распределения стронция между апатитом и предполагаемым фосфатно-силикатным расплавом довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Косвенными аргументами, подтверждающими гипотезу ликвации на стадии формирования рудного тела является возрастание в более кислотном фосфатно-силикатном расплаве (если судить по величине  $\Delta Z$ , рассчитанной по методу А.А. Маракушева) Sr/Ca в сторону более основного стронция, что согласуется с концепцией кислотно-основного взаимодействия компонентов Д.С. Коржинского.

Кроме коэффициентов распределения редких земель и стронция между апатитом, сфеном и пироксеном, авторами рассчитаны также коэффициенты распределения этих элементов между нефелином, калиевым полевым шпатом и ийолит-уртитовым расплавом (см. табл. 36).

Скрытая расслоенность комплекса может быть как следствием направленной кристаллизации минералов от подошвы к кровле интрузии, так и кристаллизации у верхнего контакта и последующей их седиментации. Первая модель кажется предпочтительнее, так как дает возможный механизм накопления фосфора перед поднимающимся фронтом кристаллизации. Кроме того, коэффициенты распределения редких элементов между апатитом и пироксеном и расплавом, рассчитанные, исходя из модели

Средние значения коэффициентов распределения стронция лантаноидов для основных минералов ийолит-уртитового комплекса Хибин

Субфаза, порода	Sr	Лантаноиды					
		La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb
Апатит							
Пострудная Рудная	19,6	25,7	18,6	9,5	7,2	7,0	4,5
руды	3,3	3,5	4,0	4,3	3,7	4,7	2,6
уртиты	11,5	13,2	11,6	7,4	6,2	7,0	4,5
Дорудная	12,1	10,8	9,0	5,2	4,6	3,9	3,0
Пироксен							
Пострудная Рудная	0,73	0,21	0,22	0,36	0,31	0,56	1,4
руды	0,16	0,04	0,11	0,18	0,25	0,63	0,53
уртиты	0,51	0,34	0,39	0,49	0,53	0,41	1,3
Дорудная	0,41	0,10	0,16	0,29	0,22	0,34	1,6
Сфен							
Пострудная Рудная	1,9	6,6	7,8	10,4	7,7	8,1	4,9
руды	0,3	1,1	1,7	3,9	3,7	5,0	2,0
уртиты	1,1	3,9	5,1	7,7	6,5	6,9	4,2
Дорудная	0,53	2,6	3,4	—	—	—	—
Нефелин							
Пострудная Рудная	0,33	0,1	0,09	0,09	0,29	0,38	0,26
руды	0,11	0,02	0,03	0,03	0,14	0,17	0,11
уртиты	0,27	0,06	0,06	0,07	0,24	0,29	0,19
Дорудная	0,27	0,05	0,05	0,06	0,20	0,26	0,19
Калиевый полевой шпат							
Пострудная Рудная	0,12	0,016	0,013	0,019	0,071	0,048	0,12
руды	0,04	0,033	0,004	0,007	0,034	0,022	0,047
уртиты	0,10	0,009	0,009	0,015	0,061	0,036	0,083
Дорудная	0,11	0,008	0,008	0,013	0,050	0,032	0,083

направленной кристаллизации, согласуются с коэффициентами распределения, полученными другими методами. Так, величины коэффициентов распределения редких земель *апатит/расплав*, полученные авторами, весьма близки к тем же величинам, полученным В.И. Коваленко для двух нефелинитов из Монголии. Коэффициенты распределения стронция *апатит/расплав* близки к полученным экспериментально в лаборатории Л.Н. Когарко, если допустить участие процессов ликвации в формировании апатит-нефелиновых пород. В то же время эти величины существенно возрастают с увеличением щелочности расплава, если судить по тенденции, полученной Ирвингом [Irving, 1978 г.], и должны быть близки к величинам,

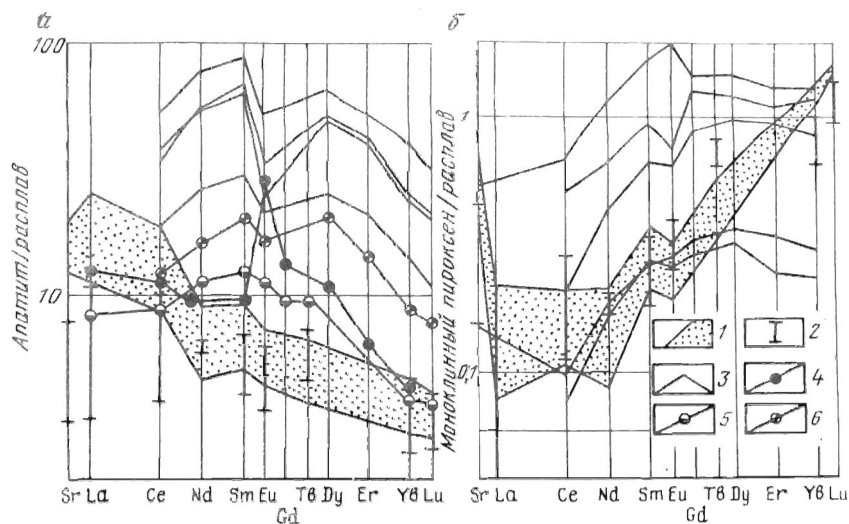


Рис. 43. Соотношение коэффициентов распределения редких земель и стронция: апатит/расплав (а) и пироксен/расплав (б).

Ионные радиусы рассчитанные: 1 – для модели направленной кристаллизации; 2 – для рудного тела двух моделей, направленной кристаллизации (большее значение) и ликвации; 3 – по соотношению концентраций во вкрапленниках и основной массе эффузивов для апатита по данным Нагасавы [Nagasawa, 1970 г.] – дациты и лапириты и для пироксена по данным Филлипотса [Phillipots, 1970 г.] и Шнетцлера [Schnetzer, 1970 г.] – андезиты, базальты, анкармиты; 4 – по данным В.И. Коваленко для двух нефелинитов Монголии (среднее); 5 – по соотношению их концентраций во вкрапленниках и основной массе фоновита по данным Шен Су-сан [Shen Su-san, 1976 г.]; 6 – по соотношению концентраций во вкрапленниках и основной массе щелочного базальта по данным Ирвинга [Irving, 1978 г.]

полученным для процессов кристаллизации апатита при формировании ийолит-уртитов (рис. 43).

Для большей части редких земель коэффициенты распределения *моноклинный пироксен/расплав*, полученные авторами, совпадают с данными, рассчитанными по соотношению концентраций их во вкрапленниках и основной массе анкармита Филлипотсом и Шнетцлером [Phillipots, Schnetzler, 1970 г.]. Коэффициент распределения стронция *пироксен/расплав* несколько выше, чем для анкармитов, но совпадает с теми же величинами для более кремнекислотных эффузивов (см. рис. 43). В то же время коэффициенты распределения для седиментационной модели существенно ниже, чем для модели направленной кристаллизации, и дают худшее соответствие с коэффициентами распределения, полученными другими методами. Эти соотношения могут рассматриваться как аргумент в пользу модели направленной кристаллизации, осложненной ликвацией на стадии формирования рудного тела.



## ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ ИЙОЛИТ-УРТИТОВ И АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

“Основы законодательства Союза ССР и союзных республик о недрах” предусматривают комплексное использование руд, потребность в новых видах сырья, усиливающую охрану минеральных ресурсов и окружающей среды и неизбежное ухудшение качества руд эксплуатируемых месторождений и т. д. В последнее время в нашей стране на стыке минералогии и технологии минерального сырья стало развиваться новое научное направление — технологическая минералогия. В ряде работ рассмотрены вопросы и проблемы, которые могут быть решены технологической минералогией, — от изучения минерального состава руд и продуктов их обогащения до разработки и усовершенствования технологических схем предела минерального сырья [3, 4, 10, 11, 47].

Для руд хибинских месторождений, особенно новых, исследования в области технологической минералогии представляют несомненный интерес. Ухудшение качества руд, их комплексный характер выдвигает новые вопросы, касающиеся минералогии и геохимии, решение которых важно для обеспечения технологических задач переработки руд.

Руды месторождений Хибин комплексные. Известно, что комплексными могут быть ведущий рудный минерал; руды, содержащие несколько полезных минералов; породообразующие нерудные минералы; отходы производства.

Все основные минералы, слагающие породы и руды хибинских месторождений (апатит, нефелин, сфен, пироксен, титаномагнетит), представляют интерес для промышленности. Кроме того, каждый минерал этой ассоциации сам по себе является комплексным источником: апатит — фосфора, фтора, стронция и редких земель; нефелин — алюминия, редких щелочей и галлия, сфен — титана, стронция, редких земель, ниобия, тантала и циркония; титаномагнетит — железа, титана и ванадия.

Иными словами, руды месторождений Хибинского массива можно перерабатывать практически без отходов, и каждый из минералов руд может быть предметом добычи. Уникальным технологическим свойством ийолит-уртитов Хибин является то, что породы вмещающие апатит-нефелиновые руды, отличаются от них только количественным соотношением минералов; качественно минеральный состав ийолит-уртитов и апатит-нефелиновых пород одинаков, переходы между ними постепенные.

Для руд хибинских месторождений актуальны исследования как в области обогатительной минералогии, так и в области технической [3]: комплексный характер руд, постоянное и закономерное ухудшение их качества (рис. 44) делают необходимым изучение минералогических особенностей, важных для обогащения и получения пяти концентратов; комплексный характер самих концентратов определяет необходимость

минералого-геохимического изучения минералов, распределения полезных компонентов по минералам и концентратам.

Авторы провели минералого-геохимическое изучение ийолит-уртитов и апатит-нефелиновых пород. Материалом для изучения были в основном породы месторождения Партомчорр. Изучение проведено в рамках обогатительной минералогии. Ниже приведены результаты изучения контрастности и обогатимости пород, влияния особенностей минералов и пород на технологические процессы, возможности обогащения руд в различных классах крупности.

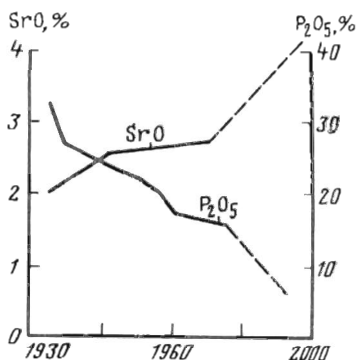


Рис. 44. Динамика изменения качества руд и состава апатита по мере отработки хибинских месторождений

### КОНТРАСТНОСТЬ И ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ РУД

При изучении технологических свойств руд важно оценить теоретическую обогатимость их — возможность разделения при определенной крупности дробления на качественно различные продукты в случае применения идеального технологического процесса. На обогатимость руды влияет множество факторов: ее текстурно-структурные особенности, физические свойства минералов (как основа процессов сепарации), состав минералов и руды и др.

Понятие контрастности и фазового раскрытия и классификация руд по обогатимости. Существуют различные способы оценки обогатимости, позволяющие путем расчетов или моделирования обогатительного процесса получить теоретические технологические показатели обогащения, по которым могут быть оценены показатели реального процесса.

Существенными недостатками большинства способов являются, во-первых, зависимость полученных технологических показателей не только от свойств самой руды, но и от методов и аппаратов, с помощью которых они получены, в результате чего с развитием техники обогащения эти показатели могут измениться, и, во-вторых, то, что полученные показатели характеризуют обогатимость руды вполне определенной крупности — оценить по ним обогатимость этой же руды при другой крупности дробления нельзя.

В.А. Мокроусовым [35] для оценки обогатимости руды была предложена характеристика, названная им контрастностью руды и зависящая только от свойств самой руды.

При обогащении важно концентрировать минералы таким образом, чтобы содержание полезного компонента в концентрате и в хвостах различалось максимально. Это зависит от того, насколько отдельные куски руды различаются по содержанию этого компонента. Степень этого различия —

контрастность руды – количественно определяется по формуле

$$M = \frac{\sum |(y - a) q|}{100 a}, \quad (3)$$

где  $M$  – показатель контрастности руды;  $a$  – среднее содержание полезного компонента в руде, %;  $y$  – содержание полезного компонента в отдельных кусках или группе однородных кусков руды, %;  $q$  – доля веса куска или группы однородных кусков в общей массе пробы.

Величина показателей контрастности зависит от минерального состава руды [29]. Максимальная контрастность полностью раскрытой руды называется показателем руды  $P$  и равна

$$P = M_{\max} = 0,02 (100 - A), \quad (4)$$

где  $A$  – содержание полезного минерала в руде.

От этого недостатка (зависимости  $M$  не только от технологических свойств руды, но и от минерального состава) свободен предложенный Б.С. Лаговым [28] показатель фазового раскрытия  $\Phi$ , представляющий собой относительную контрастность – отношение показателя контрастности  $M$  руды к максимально возможному при данном содержании в руде минерала или полезного компонента:

$$\Phi = \frac{M}{0,02 (100 - K a)}, \quad (5)$$

где  $a$  – содержание полезного компонента в руде, %;  $K$  – поправочный коэффициент, учитывающий содержание полезного элемента в минерале ( $K a = A$ ).

Показатель фазового раскрытия  $\Phi$  может быть рассчитан по формуле

$$\Phi = \frac{\sum |(C - a) q|}{\sum |(C_0 - a) q_0|}, \quad (6)$$

где  $C$  – содержание полезного компонента в отдельных кусках или группе однородных кусков, %;  $C_0$  – содержание полезного компонента в минералах, слагающих руду, %;  $q$  – выход куска или группы однородных кусков, %;  $q_0$  – содержание минералов в руде, %.

Показатель контрастности руды может принимать любые значения от 0 до 2. Показатель фазового раскрытия  $\Phi$  принимает значения от 0 до 1 и не зависит от состава руды. Используя показатели контрастности и фазового раскрытия руды, можно для ее обогатимости получить объективную оценку, зависящую только от свойств руды. На рис. 45 показана номограмма для оценки теоретической обогатимости руд с помощью показателей контрастности и фазового раскрытия [28].

Зная состав руды, слагающих ее минералов и частиц, образовавшихся при дроблении, можно с помощью формул (3), (5) или (4) рассчитать показатели  $M$  и  $\Phi$  и по номограмме определить теоретическую обогатимость руды.

Теоретическая обогатимость руд и пород месторождения Партомчорр. С помощью описанных выше характеристик была изучена теоретическая обогатимость руд и пород месторождения Партомчорр. Изучение проводилось на материале технологических проб. Руду характеризовала технологическая проба № 14 (табл. 37). Состав этой пробы соответствует среднему составу руды месторождения, которая будет поступать в переработку на обогатительную фабрику.

Покрывающие рудное тело породы характеризовала проба № 10 (см. табл. 37). Она состоит из трахитоидных ийолитов, уртитов, полевошпатовых уртитов, мельтейгитов и слюдяных мельтейгитов. Подстилающие породы: представлены пробой № 11, состоящей, в основном, из массивных уртитов, пегматитов и меланократовых пород.

В табл. 37 и 38 приведены минеральный и химический составы изученных проб.

Основную трудность при изучении обогатимости хибинских руд представляет их комплексность. Надо оценивать обогатимость с учетом получения из руд пяти концентратов. Дополнительную трудность создает то, что в каждом концентрате содержится несколько полезных компонентов и можно оценить обогатимость по любому из них. Авторы оценивали обогатимость руды по основным элементам: фосфору, алюминию, титану и железу.

Полученные данные по контрастности и фазовому раскрытию руд и пород вместе с балансовыми расчетами распределения полутно извлекаемых элементов дают полную картину технологических свойств руды.

На основании данных о химическом и минеральном составе руды, пород и минералов месторождения Партомчорр по формулам (3) и (5) были рассчитаны величины показателей контрастности и фазового раскрытия. Из сравнения результатов, приведенных в табл. 39, с результатами номограммы (см. рис. 45) видно, что по теоретической обогатимости полностью дезинтегрированные ийолит-уртитовые и апатит-нефелиновые породы месторождения относятся к хорошо- и легкообогатимым по всем основным элементам, что должно облегчать их комплексную переработку.

Обогащение руд хибинских месторождений сейчас ведется при такой крупности измельчения, которая обеспечивает практически полное отсут-

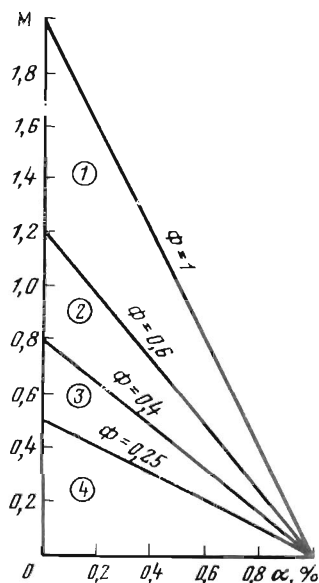


Рис. 45. Теоретическая обогатимость руд. По Б.С. Лагову [29]

Цифры в кружках: 1 — легкообогатимые; 2 — хорошо обогатимые; 3 — удовлетворительно обогатимые; 4 — необогатимые;  $\alpha$  — содержание полезного компонента;  $M$  — показатель контрастности;  $\Phi$  — показатель фазового раскрытия

Минеральный состав технологических проб руд и пород  
месторождения Партомчорр  
(г %)

Минералы	Покрывающие породы	Руда	Подстилающие породы
	10	14	11
Апатит	2,3	15,2	1,0
Нефелин	39,5	49,6	41,9
Нефелин с включениями	2,6	4,8	6,7
Пироксен	29,2	17,2	20,2
Сфен	6,1	3,7	6,3
Гитаномagnetит	5,2	4,6	3,0
Лепидомелан	6,1	1,7	4,1
Лампрофиллит	1,1	0,7	0,8
Полевой шпат	5,3	3,0	14,4
Натролит	0,6	1,0	0,8
Прочие	0,2	0,4	0,1

\* Здесь и далее 10, 14, 11 — номера проб.

Таблица 38

Химический состав технологических проб руд и пород  
месторождения Партомчорр (в вес. %)

Компоненты	Покрывающие трахитоидные ийолитуртиты	Руды	Подстилающие массивные уртиты
	10	14	11
SiO <sub>2</sub>	40,88	35,28	44,07
TiO <sub>2</sub>	3,19	2,93	2,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,25	17,83	18,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,87	6,58	6,51
FeO	3,31	1,58	2,06
MnO	0,36	0,26	0,31
MgO	4,46	1,79	3,05
CaO	8,91	13,25	5,99
Na <sub>2</sub> O	8,35	8,44	8,11
K <sub>2</sub> O	4,64	5,05	7,34
H <sub>2</sub> O	0,07	0,09	0,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,13	6,52	0,47
F	0,11	0,67	0,04
CO <sub>2</sub>	0,36	0,12	0,12
Сумма	99,99	99,10	99,54

Анализы выполнены в химической лаборатории ТИГХС.

Показатели контрастности, фазового раскрытия и содержание элементов (в %) в породах и рудах месторождения Партомчорр

Элементы, по которым оценена обогатимость	Основной концентрирующий минерал	Концентрат	Покрывающие породы			Руда			Подстилающие породы		
			10			14			11		
			М	Ф	а	М	Ф	а	М	Ф	а
Фосфор	Апатит	Апатитовый	1,71	0,88	1,13	1,63	0,96	6,52	1,69	0,85	0,47
Алюминий	Нефелин	Нефелиновый	0,86	0,71	15,25	0,80	0,79	17,83	0,61	0,52	186,47
Титан	Сфен	Сфеновый	1,52	0,81	3,19	1,39	0,72	2,93	1,61	0,86	2,91
Титан	Титаномагнетит	Титаномагнетитовый	1,52	0,80	3,91	1,39	0,73	2,93	1,61	0,84	2,91
Железо	Пироксен	Пироксеновый	0,87	0,61	12,55	1,18	0,71	8,29	1,01	0,63	8,80
Железо	Титаномагнетит	Титаномагнетитовый	0,86	0,46	12,55	1,18	0,62	8,29	1,01	0,52	8,80

стве в технологических помоллах сростков. Поэтому данные, приведенные в табл. 39, практически характеризуют технологические помолы и являются предельными показателями.

Показатели контрастности  $M$  и фазового раскрытия  $\Phi$  даже при полном отсутствии сростков не достигают максимальных теоретических значений ( $\Phi = 1$ ). Одна из причин этого в рудах хибинских месторождений — то, что элементы, по которым оценена обогатимость, содержатся в тех или иных количествах практически во всех основных минералах, а алюминий, железо и титан сразу в нескольких минералах являются основными. Даже фосфор, главный концентрат которого в Хибинах — апатит, рассеян в некоторых количествах в кристаллических решетках других минералов и содержится в них в виде микровключений апатита [13]. Другая причина кроется в текстурно-структурных особенностях пород и руд месторождений Хибин. Наиболее ярко она проявляется в изменении показателей фазового раскрытия и контрастности, определяемых по фосфору.

В породах ийолит-уртитового комплекса Хибин часто наблюдаются микровключения одних минералов в других, в результате чего некоторая часть апатита оказывается включенной в другие минералы. Поэтому, когда содержание фосфора в породе незначительно, количество его в свободном и в захваченном апатите соизмеримо, что обуславливает низкое значение показателя фазового раскрытия даже в технологическом поле. В руде содержание фосфора в несколько раз выше и свободный апатит доминирует над пойкилитовым, что увеличивает значение показателя фазового раскрытия.

#### ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНО ДОСТИЖИМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КРУПНОСТИ ДРОБЛЕНИЯ

На величину показателя фазового раскрытия влияют только степень различия кусков руды по полезному компоненту и степень раздробленности руды. Чем мельче дробится руда, тем меньше в ней остается сростков, и увеличивается показатель фазового раскрытия. Одновременно с этим создаются лучшие условия для обогащения руды.

Связь показателя фазового раскрытия руды с технологическими показателями обогащения. Величину показателя фазового раскрытия можно определить не только по уравнениям (5) и (6), но и через технологические показатели обогатительного процесса. Проведем для этого следующие преобразования\*.

Будем считать, что в результате дробления в руде образуются два типа кусков, отличающихся по содержанию полезного компонента. Куски с более высоким содержанием образуют при обогащении концентрат, с низким — хвосты. Тогда

---

\* Аналогичные расчеты выполнил В.Э. Блисковский для фосфоритовых руд Каратау.

$$\gamma_K \beta_K + \gamma_{XB} \beta_{XB} = 100\alpha \quad (7)$$

и

$$\beta_{XB} = \frac{100\alpha - \gamma_K \beta_K}{100 - \gamma_K}, \quad (8)$$

где содержание полезного компонента:  $\beta_K$  — в концентрате, %;  $\beta_{XB}$  — в хвостах;  $\gamma_K$  — выход концентрата, %;  $\gamma_{XB} = 100 - \gamma_K$  — выход хвостов, %.

Подставив выражения (2) и (7) в формулу (4) и упростив, получим следующее выражение для величины показателя фазового раскрытия:

$$\Phi = \gamma_K \frac{(\beta_K - \alpha)}{\alpha (100 - K\alpha)}. \quad (9)$$

Выход концентрата  $\gamma_K$  можно выразить через извлечение полезного компонента в концентрат  $\epsilon_K$ :

$$\gamma_K = \frac{\epsilon_K - \alpha}{\beta_K}. \quad (10)$$

С учетом формулы (10) формулу (9) можно переписать в следующем виде:

$$\Phi = \epsilon_K \frac{\beta_K - \alpha}{\beta_K (100 - K\alpha)}. \quad (11)$$

Таким образом, формулы (9) и (11) для руды с известными  $\alpha$  и  $K$  характеризуют связь показателя фазового раскрытия с содержанием полезного компонента в концентрате, извлечением его в концентрат и выходом концентрата.

Показатель фазового раскрытия можно выразить и через технологические параметры хвостов обогащения.

Воспользовавшись формулой (6) и преобразуя (8), получаем

$$\Phi = \gamma_{XB} \frac{(\alpha - \beta_{XB})}{(100 - K\alpha)}. \quad (12)$$

Выразив выход хвостов через потерю извлечения полезного компонента в хвостах  $\epsilon_{XB}$ , %,

$$\beta_{XB} = \frac{\epsilon_{XB} \alpha}{\gamma_{XB}} \quad (13)$$

и подставив (13) в (12), получаем

$$\Phi = \frac{\gamma_{XB} - \epsilon_{XB}}{100 - K\alpha}. \quad (14)$$

Таким образом выявляется связь показателя фазового раскрытия с содержанием полезного компонента в хвостах, потерей извлечения его в хвостах и выходом хвостов. С помощью уравнений (9), (11), (12) и



(14) можно оценивать предельно допустимые при различных значениях показателя фазового раскрытия показатели обогащения руды.

Теоретическая обогатимость руд хибинских месторождений при разной степени дробления. В настоящее время из руд хибинских месторождений получают два концентрата — апатитовый и нефелиновый. Качество апатитового концентрата контролируется ГОСТ 22275—76, согласно которому в кондиционном концентрате должно содержаться 39,4 %  $P_2O_5$ .

Государственный стандарт на нефелиновый концентрат разрабатывается; считается, что в кондиционном нефелиновом концентрате должно содержаться 29 %  $Al_2O_3$ . Коэффициент  $K$  для апатита ийолит-уртитов постоянен и сильно зависит от содержания в апатите стронция и редких земель. Состав рудного апатита более выдержан, и на основании наших данных и результатов других авторов принят для апатита (фосфора)  $K = 2,45$ . Для алюминия в нефелине, согласно данным О.Б. Дудкина,  $K = 3,07$ .

Используя указанные величины, мы построили с помощью уравнения (8) графики зависимости  $\Phi$  от  $\alpha$  для апатитового и нефелинового концентратов (рис. 46, 47). На этих графиках каждая из линий отвечает определенному выходу кондиционного концентрата. Естественным ограничением этих линий служит кривая, соответствующая полному извлечению полезного компонента з концентрат  $\epsilon_{хв} = 0$  в уравнении (14), или

$$\gamma_K \beta_K = 100\alpha. \quad (15)$$

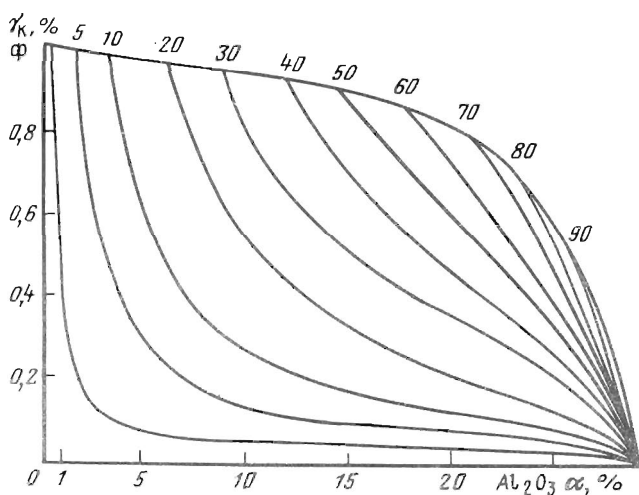


Рис. 46. Связь показателя фазового раскрытия ( $\Phi$ ) с содержанием  $Al_2O_3$  в руде при различных значениях выхода нефелинового концентрата ( $\gamma_K$ )

Так, чтобы получить кондиционный концентрат с выходом 100 %, нужно иметь руду с  $\alpha = \beta_K$ ; с выходом 90 % —  $\alpha = 0,9\beta_K$ ; с выходом 50 % —  $\alpha = 0,5\beta_K$  и т. д.

Из приведенных диаграмм следует, что из руды с показателем фазового раскрытия, например,  $\Phi = 0,4$ , можно получить кондиционный апатитовый концентрат, с выходом 1 % при содержании в руде  $P_2O_5 = 1,6\%$ , с выходом 10 % — при  $P_2O_5 = 10,4\%$ , с выходом 50 % — при  $P_2O_5 = 33,2\%$  и т. д.; кондиционный нефелиновый концентрат: с выходом 5 % при содержании  $Al_2O_3 = 3,9\%$ , с выходом

30 % — при  $Al_2O_3 = 18,6\%$  и т. д. Или, наоборот, из руды с содержанием 20 %  $P_2O_5$  можно получить кондиционный апатитовый концентрат с выходом 10, 20, 30 %, при  $\Phi$  руды, равном соответственно 0,17, 0,36, 0,58; с содержанием 15 %  $Al_2O_3$  — кондиционный нефелиновый концентрат с выходом 20, 30 % при  $\Phi$  руды, равном 0,34, 0,52 соответственно.

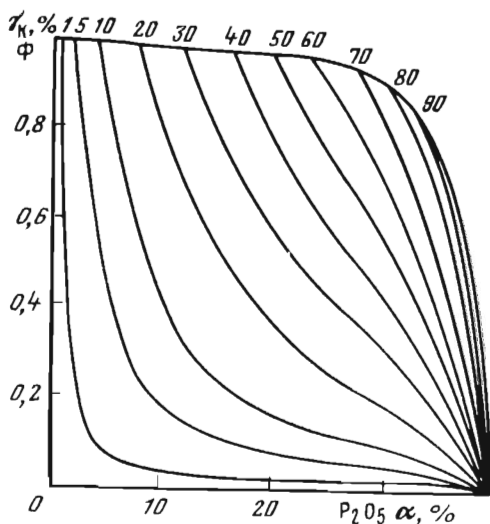


Рис. 47. Связь показателя фазового раскрытия ( $\Phi$ ) с содержанием  $P_2O_5$  в рудах при различных значениях выхода апатитового концентрата ( $\gamma_K$ )

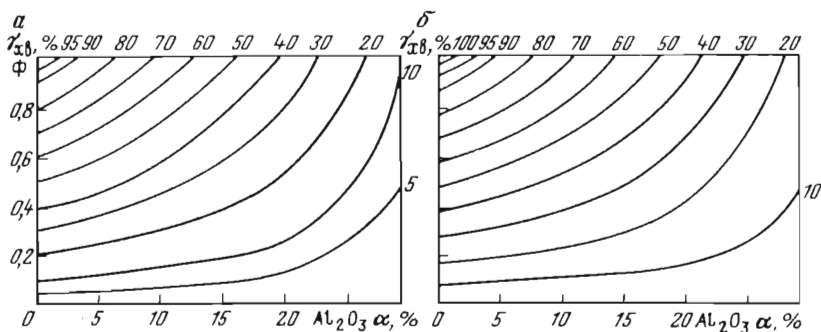


Рис. 48. Связь показателя фазового раскрытия ( $\Phi$ ) с содержанием  $Al_2O_3$  в рудах при различных значениях выхода хвостов обогащения ( $\gamma_{xb}$ ) при потере извлечения  $Al_2O_3$  в хвостах  $\epsilon_{xb} = 0\%$  (а);  $\epsilon_{xb} = 5\%$  (б)

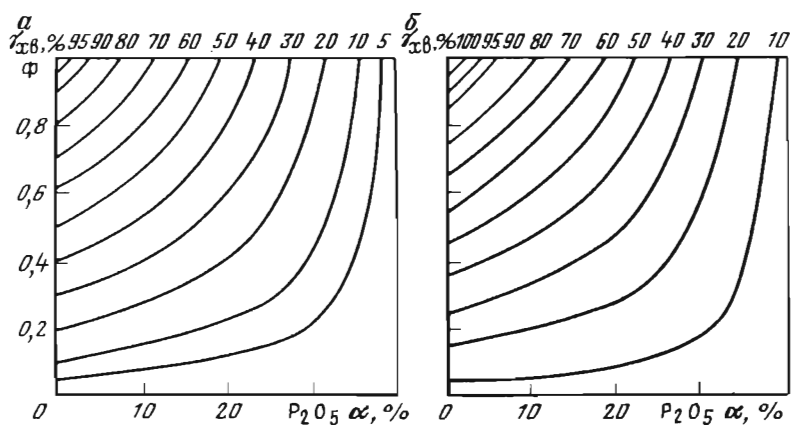


Рис. 49. Связь показателя фазового раскрытия с содержанием  $P_2O_5$  в рудах при различных значениях выхода хвостов обогащения  $\gamma_{xb}$  при потере извлечения  $P_2O_5$  в хвостах  $\epsilon_{xb} = 0\%$  (а)  $\epsilon_{xb} = 5\%$  (б)

С использованием уравнения (13) построены графики зависимости  $\Phi$  от  $\alpha$ , связанные через технологические показатели хвостов обогащения. Эта зависимость при  $\epsilon_{xb} = 0$  и  $\epsilon_{xb} = 5\%$  показана на рис. 48, 49. Для других значений  $\epsilon_{xb}$  зависимость будет иметь аналогичный вид. По этим графикам можно определить, при каких значениях  $\Phi$  и  $\alpha$  можно при обогащении получить хвосты с определенным выходом при определенной потере в извлечении.

Если совместить на одном рисунке графики уравнений (8) и (14), то можно получить серию линий, каждая из которых будет отвечать определенному извлечению полезного компонента в концентрат или в хвосты при изменяющихся значениях  $\Phi$  и  $\alpha$ . Эти изолинии извлечения получаются путем соединения точек пересечения линий  $\gamma_K$  и  $\gamma_{xb}$ , в которых  $\gamma_K + \gamma_{xb} = 100\%$ . Были построены такие диаграммы для апатитового и нефелинового концентратов (рис. 50). По ним, зная содержание в руде полезного компонента, можно установить, какого выхода кондиционного концентрата и каких потерь извлечения в хвостах можно ожидать при обогащении руды с различными показателями фазового раскрытия или каких технологических показателей можно добиться при обогащении руд с различным содержанием  $\alpha$ , но при фиксированном значении  $\Phi$ .

Так, при обогащении руды с содержанием  $P_2O_5 = 20\%$  можно получить кондиционный концентрат: с выходом  $10\%$  при  $\Phi = 0,17$ ,  $20\%$  — при  $\Phi = 0,36$ ,  $30\%$  — при  $\Phi = 0,58$  и при потере в извлечении с хвостами соответственно  $83, 63, 41\%$ . Или при обогащении руд, дробленных до крупности, обеспечивающей  $\Phi = 0,4$ , можно получить кондиционные концентраты с выходами  $10\%$  и содержанием  $P_2O_5 = 10,4\%$ ; с выходом  $50\%$  и содержанием  $P_2O_5 = 33,2\%$  при потерях в извлечении соответственно  $61,5, 42\%$ .

Аналогично можно получить данные для нефелинового концентрата.

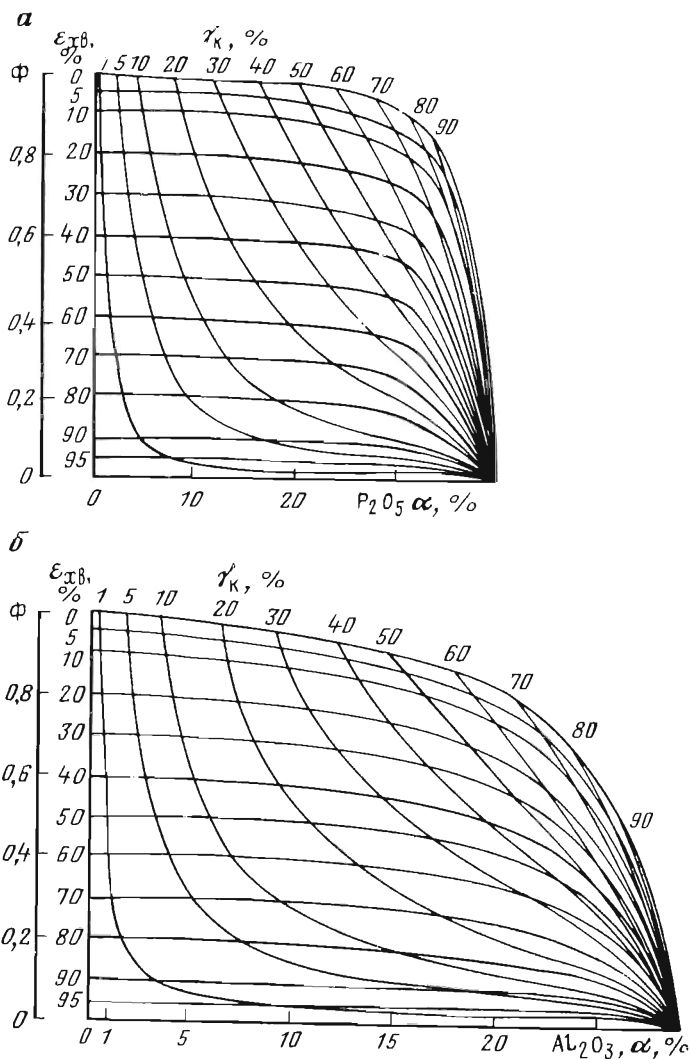


Рис. 50. Связь показателя фазового раскрытия ( $\Phi$ ) с составом хибинских руд при различных значениях параметров обогащения при получении концентратов апатитового (а) и нефелинового (б)

Используя уравнение (11), можно построить зависимость в координатах  $\Phi - \epsilon$ . Эта зависимость на рис. 51 изображена для апатитовых и нефелиновых концентратов. В пучке прямых, проходящих через начало координат, каждая линия отвечает определенному содержанию полезного компонента в руде, при условии получения из нее кондиционного концентрата. Из рис. 51 следует, что получить кондиционный апатитовый концентрат из ру-

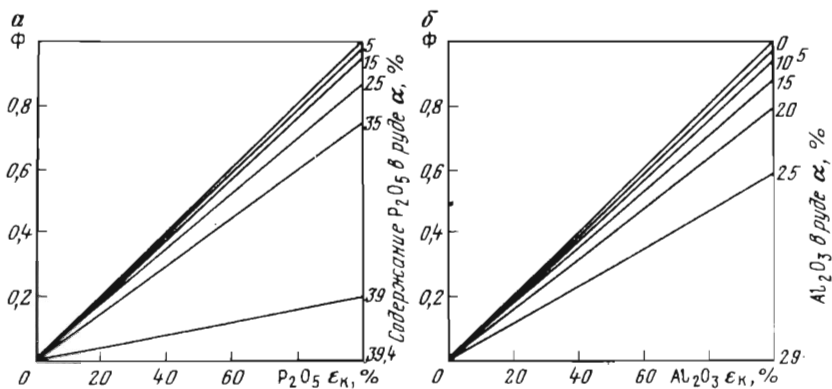


Рис. 51. Связь показателя фазового раскрытия ( $\Phi$ ) и извлечения полезного компонента в концентрат  $\epsilon_k$  при различных составах хибинских руд  
 а - апатитовый концентрат ( $\beta_k = 39,4\% \text{ P}_2\text{O}_5$ ); б - нефелиновый концентрат ( $\beta_k = 29\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ )

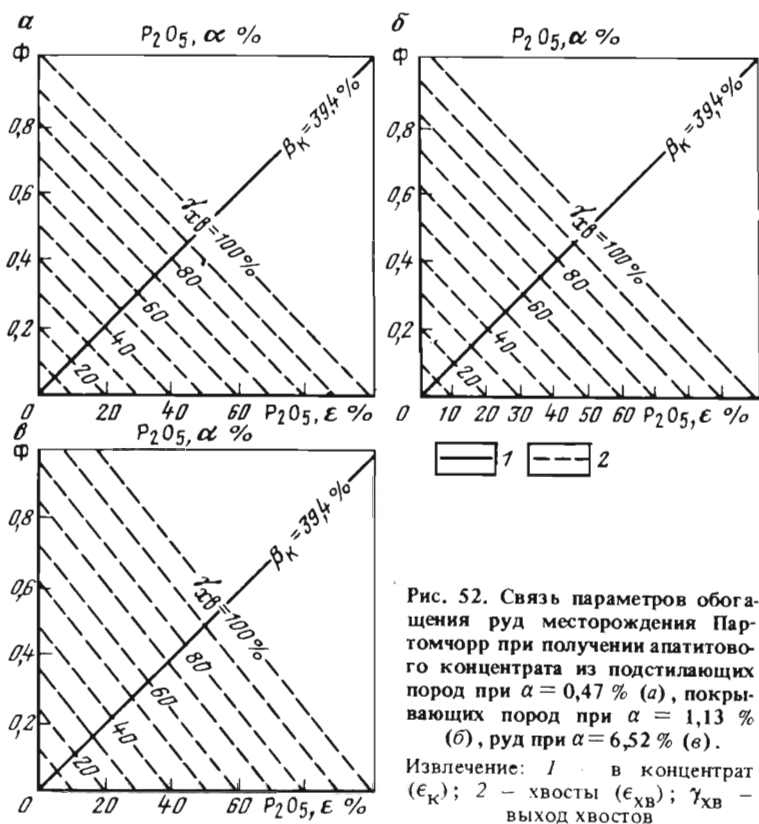


Рис. 52. Связь параметров обогащения руд месторождения Партомчорр при получении апатитового концентрата из подстилающих пород при  $\alpha = 0,47\%$  (а), покрывающих пород при  $\alpha = 1,13\%$  (б), руд при  $\alpha = 6,52\%$  (в).  
 Извлечение: 1 - в концентрат ( $\epsilon_k$ ); 2 - хвосты ( $\epsilon_{xb}$ );  $\gamma_{xb}$  - выход хвостов

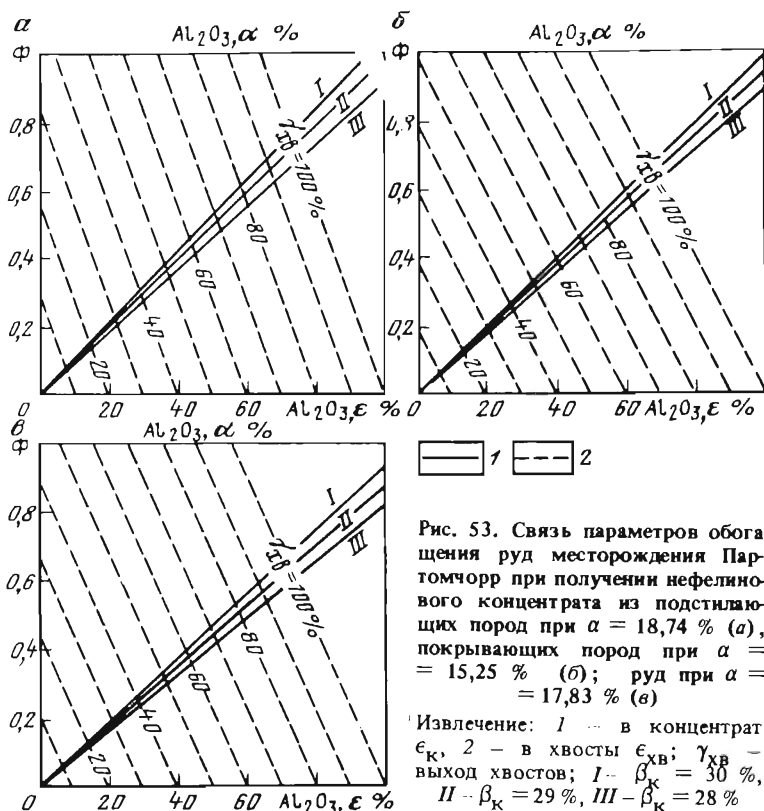


Рис. 53. Связь параметров обогащения руд месторождения Партомчорр при получении нефелинового концентрата из подстилающих пород при  $\alpha = 18,74\%$  (а), покрывающих пород при  $\alpha = 15,25\%$  (б); руд при  $\alpha = 17,83\%$  (в)

Извлечение: 1 — в концентрат  $\epsilon_K$ , 2 — в хвосты  $\epsilon_{xb}$ ;  $\gamma_{xb}$  — выход хвостов; I —  $\beta_K = 30\%$ , II —  $\beta_K = 29\%$ , III —  $\beta_K = 28\%$

ды с содержанием  $P_2O_5 = 35\%$  можно при  $\Phi = 0,1$  с  $\epsilon_K = 12,5\%$ ; при  $\Phi = 0,5$  с  $\epsilon_K = 65\%$ ; при  $\Phi = 0,76$  с  $\epsilon_K = 100\%$ .

Из руды с содержанием  $Al_2O_3 = 25\%$  аналогично можно получить кондиционный нефелиновый концентрат при  $\Phi = 0,1$  с  $\epsilon_K = 17,5\%$ ; при  $\Phi = 0,4$  с  $\epsilon_K = 68,7\%$  и т. д.

Таким образом, установив по приведенным выше уравнениям и диаграммам величину  $\Phi$ , при которой можно получить определенные технологические показатели обогащения, и определив зависимость параметра  $\Phi$  от степени дробления руды, тем самым определим предельно достижимые показатели обогащения руды при различной крупности ее дробления. Зависимость параметра  $\Phi$  от крупности дробления руды устанавливается по результатам рудоразборки или любого другого метода разделения руды на группы однородных кусков.

Теоретическая обогатимость при различной крупности дробления руд и пород месторождения Партомчорр. С помощью приве-

денных выше уравнений и диаграмм построены графики зависимости  $\Phi$  и  $\epsilon$  для апатитового и нефелинового концентратов, которые можно получить из руды и вмещающих рудное тело пород месторождения Партомчорр (рис. 52, 53). Для нефелиновых концентратов сделаны расчеты, в которых учтены различные содержания  $Al_2O_3$  в концентрате — 28, 29, 30%. На тех же рисунках пунктиром показаны линии зависимости параметра  $\Phi$ , выхода отвальных хвостов  $\gamma_{хв}$  и потерь извлечения в хвостах  $\epsilon_{хв}$  для этих проб. Например, для руды (проба 14) при  $\Phi = 0,5$  в отвал можно удалить 30% материала при потерях в извлечении  $Al_2O_3$  8%; 40% материала — при потерях в извлечении  $Al_2O_3$  18% и т. д.

Как видно из рис. 52, 53, руды и породы месторождения можно обогащать с получением кондиционных концентратов или отвальных хвостов при значениях  $\Phi$  меньших, чем мы наблюдаем в технологических помоллах (см. табл. 39), т. е. при меньшей степени измельчения руд. Поскольку дробление руды — самый энергоемкий обогатительный процесс, а неизбежное ухудшение качества руд приводит к увеличению массы измельчаемого материала, обогащение руды в крупных классах может быть очень выгодным.

## РАЗДЕЛЕНИЕ РУД ХИБИНСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В КРУПНЫХ КЛАССАХ

Возможность обогащения хибинских руд в крупных классах определяется, с одной стороны, полярностью состава и свойств минералов, с другой — структурными и гранулометрическими особенностями руд.

Контрастность состава и свойств минералов руд и пород Хибинского массива. Данные о свойствах основных минералов ийолитуртитов и апатит-нефелиновых пород Хибин приведены в табл. 40. Обращает внимание резкая полярность в их составе и свойствах. Так, единственным концентратором фосфора среди них является апатит. Алюминий концентрируется в основном в двух минералах: в полевом шпате и нефелине. Титан — также в двух минералах: сфене и титаномагнетите; такая же контрастность проявлена и в распределении редких элементов.

Магнитные свойства у одних минералов проявлены весьма интенсивно (титаномагнетит), у других — практически отсутствуют (apatит, нефелин). По плотности минералы месторождений можно разделить на легкие с плотностью меньше  $2,70 \text{ г/см}^3$  и тяжелые с плотностью выше  $3,20 \text{ г/см}^3$ . В первую группу входят полевой шпат и нефелин, во вторую — апатит, сфен, пироксен и титаномагнетит.

Отмеченная полярность определяет возможности разделения минералов. Принципиально можно разделять минералы, используя любое из свойств, однако в технологических целях важно проводить сепарацию так, чтобы в результате ее получились определенные технологические продукты — богатые концентратные фракции или бедные отвальные хвосты.

С этой точки зрения только плотность минералов пригодна для сепара-

Свойства основных минералов ийолит-уртитов и руд  
Хибинского массива

Минерал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная магнитная восприимчивость	Диэлектрическая проницаемость
Полевой шпат	2,54–2,55	$1 \times 10^{-6}$	5,0–6,9
Нефелин	2,62–2,66	$(1-4) \times 10^{-8}$	6,6–8,5
Апатит	3,23–3,30	$(1-5) \times 10^{-6}$	5,8–8,0
Диопсид	3,30–3,40	$(6-40) \times 10^{-6}$	7,8–8,0
Эгирин	3,41–3,72	$(48-54) \times 10^{-6}$	9,3–10,6
Сфен	3,45–3,48	$(4,4-10) \times 10^{-6}$	4,0–6,6
Титаномагнетит	4,60–4,80	$(1,6-2,4) \times 10^{-2}$	

ции хибинских руд, так как позволяет сразу отделить легкие минералы, концентрирующие алюминий, от тяжелых, которые его практически не содержат. Одновременно с этим происходит и разделение микроэлементов. Использование электромагнитных свойств минералов в целях комплексной переработки хибинских руд позволяет получить сфеновый, пироксеновый и титаномагнетитовый концентраты.

Гранулометрическая характеристика пород и руд месторождения Партомчорр. Для пород и руд ийолит-уртитового комплекса Хибин характерно широкое развитие крупно- и даже гигантозернистых структур. Наиболее развиты они в подстилающих рудное тело массивных уртигах, где размеры отдельных кристаллов нефелина и пироксена достигают 20–25 мм и более.

В табл. 41 приведена ситовая характеристика, полученная в результате изучения гранулометрического состава пород и руд месторождения Партомчорр, раздробленных до крупности –25 мм и –2 мм. Материал проб распределяется по классам крупности довольно равномерно. Лишь в пробе из подстилающих пород наблюдается преобладание крупных классов. Из данных, приведенных в табл. 41, видно, что кристаллы апатита, которые по своим размерам значительно меньше кристаллов нефелина и располагаются, в основном, в интерстициях между ними, накапливаются в мелких классах. В пробе подстилающих пород, где содержание апатита весьма незначительно (1%), при дроблении он практически весь захватывается сростками кристаллов нефелина и не попадает в мелкие классы.

Показатель гравитационного разделения и фазового раскрытия крупных классов пород и руд месторождения Партомчорр. Отмеченные особенности состава и свойств минералов, возможность обогащения в крупных классах позволяют гравитационным методом осуществить разделение руды в крупных классах с получением продуктов, обогащенных и обедненных алюминием. На материалах проб вмещающих пород и руд месторождения Партомчорр была изучена возможность гравитационного разделения в крупных классах с получением технологических



Таблица 41

Гранулометрический состав пород и руд месторождения Партомчорр,  
дробленных до –25 мм и –2 мм

Крупность дробления, мм	Класс, мм	Выход класса, %			Содержание, %					
					P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
		10	14	11	10	14	11	10	14	11
–25	–25+10	40,2	46,7	65,0	0,80	5,50	0,56	15,21	18,83	17,78
	–10+5	16,6	27,6	13,5	0,64	5,50	0,51	15,92	17,78	18,27
	–5+2	12,6	5,81	8,0	1,05	5,50	0,38	15,38	18,03	18,98
	–2+0,5	9,9	9,0	6,0	0,43	7,60	0,36	23,66	17,10	16,25
	–0,5	20,7	10,9	7,5	2,20	13,13	0,32	10,69	14,22	26,04
	Всего	100	100	100	1,13	6,52	0,47	15,25	17,83	18,47
–2	–2+0,5	47,8	40,1	62,5	0,54	3,37	0,47	15,98	19,30	18,50
	–0,5	52,2	59,9	37,5	1,17	8,63	0,47	14,50	16,85	18,42
	Всего	100	100	100	1,13	6,52	0,47	15,25	17,83	18,47

Примечание. Подстилающие породы – проба 11, руда – проба 14, покрывающие породы – проба 10.

продуктов. Изучался материал, раздробленный до  $-25$  мм (классы  $-25 + 10$  мм,  $-10 + 5$  мм,  $-5 + 2$  мм и  $-2 + 0,5$  мм) и до  $-2$  мм ( $-2 + 0,5$  мм).

Контрастность руды определяется степенью различия кусков руды по содержанию полезного компонента. Если куски руды группировать не по содержанию полезного компонента, а по какому-нибудь свойству, то эффективность такого процесса будет зависеть от степени соответствия между содержанием ценного компонента и интенсивностью проявления этого свойства. Количественно степень этого соответствия выражается показателем признака разделения

$$\Pi = \frac{\sum |(Z - a) \gamma|}{100 a}, \quad (16)$$

где  $a$  — среднее содержание полезного компонента в руде: %;  $Z$  — содержание полезного компонента во фракциях, %;  $\gamma$  — выход фракции, % [36]. Показатель признака разделения обычно меньше показателя контрастности. Чем ближе их величины, тем целесообразней использование данного свойства для сепарации руд.

Показатель гравитационного разделения крупных классов месторождения Партомчорр определен следующим методом. В тяжелых неорганических жидкостях получены фракции плотности  $2,70$  г/см<sup>3</sup>,  $2,70-3,00$  г/см<sup>3</sup>,  $3,00$  г/см<sup>3</sup>. При этом во фракции  $2,70$  г/см<sup>3</sup> сконцентрировались куски, обогащенные нефелином и полевым шпатом и содержащие большую часть алюминия пород; во фракции  $3,00$  г/см<sup>3</sup> — сфеном, пироксеном, титаномагнетитом и апатитом; в промежуточную фракцию попали куски, состоящие из сопоставимых количеств этих минералов. Выделенные фракции анализировались на содержание алюминия и фосфора. По полученным данным вычислен  $\Pi$  для классов крупности. Для руд и пород в целом он рассчитывался как средневзвешенный (табл. 42, 43).

Кроме того, была проведена рудоразборка руды, выполненная по принципу разделения кусков руды на группы, концентрирующие и не концентрирующие алюминий. Она показала, что минеральный состав группы кусков, обогащенных алюминием, и минеральный состав фракции плотности  $-2,70$  г/см<sup>3</sup> очень близки. В них резко преобладают нефелин и полевой шпат, суммарное содержание которых составляет  $95-97\%$ .

Полученная с помощью рудоразборки группа кусков, обогащенных апатитом, не соответствует фракции плотности  $3,00$  г/см<sup>3</sup>, так как, хотя в последней и сконцентрирован почти весь апатит руды, кроме него там концентрируются и другие минералы с плотностью выше  $3,00$  г/см<sup>3</sup>.

Таким образом, показатель гравитационного разделения руды, рассчитанный для алюминия, приближается к показателю контрастности руды по алюминию. Для фосфора соответствие этих показателей значительно хуже. Однако при гравитационном способе разделения добиться лучших показателей контрастности по фосфору вряд ли возможно, так как для этого нужно выделять фракции плотности  $3,50$  г/см<sup>3</sup> и выше, а это трудно в связи с ограниченной плотностью тяжелых жидкостей.

Таким образом, результаты гравитационного разделения для руд мес-

Показатель руды Р и гравитационного разделения П по фосфору  
и алюминию для крупных классов пород и руд  
месторождения Партомчорр

Дробление, мм	Класс крупности, мм	Порода	Фосфор			Алюминий		
			Р	П	П/Р	Р	П	П/Р
-25	-25+10	Покрывающие	1,96	0,44	0,22	1,10	0,29	0,26
	-10+5		1,96	0,36	0,18	1,05	0,27	0,26
	-5+2		1,94	0,61	0,31	1,10	0,40	0,36
	-2+0,5		1,98	0,48	0,24	0,60	0,47	0,78
-25	-25+10	Руды	1,74	0,25	0,14	0,96	0,19	0,20
	-10+5		1,74	0,28	0,16	0,94	0,22	0,23
	-5+2		1,64	0,75	0,45	0,92	0,32	0,35
	-2+0,5		1,62	0,82	0,51	1,00	0,56	0,56
-25	-25+10	Подстиляющие	1,96	0,15	0,08	0,96	0,11	0,11
	-10+5		1,96	0,36	0,18	0,90	0,21	0,23
	-5+2		1,98	0,15	0,08	0,88	0,35	0,40
	-2+0,5		1,96	0,48	0,24	1,04	0,54	0,52

Таблица 43

Показатель руды и гравитационного разделения по фосфору и алюминию  
для руд и пород месторождения Партомчорр при различной крупности дробления

Породы	Дробление -25 мм					
	класс -25+0,5 мм					
	фосфор			алюминий		
	Р	П	П/Р	Р	П	П/Р
Покрывающие	1,94	0,46	0,24	1,27	0,30	0,25
Руда	1,63	0,36	0,21	1,01	0,25	0,25
Подстиляющие	1,99	0,20	0,10	1,17	0,17	0,15

Продолжение табл. 43

Породы	Дробление -2 мм					
	класс -2+0,5 мм					
	фосфор			алюминий		
	Р	П	П/Р	Р	П	П/Р
Покрывающие	1,97	0,21	0,11	1,02	0,47	0,46
Руда	1,83	0,64	0,35	0,81	0,43	0,53
Подстиляющие	1,98	0,29	0,15	0,86	0,37	0,43

торождения Партомчорр предельны или близки к ним. Поэтому величина  $\Pi/0,02 (100 \cdot A) = \Pi/P$  для алюминия будет очень близка к величине показателя фазового раскрытия; для фосфора они будут соответствовать друг другу в значительно меньшей степени, но так как полученные значения  $\Pi$  и  $P$  предельны при гравитационном способе сепарации, а мы установили, что этот способ единственно приемлемый для разделения с получением технологических продуктов руд и пород в крупных классах, в дальнейшем мы будем пользоваться  $\Pi/P$  вместо параметра фазового раскрытия, помня о неполном их соответствии.

Как видно из табл. 39, 42, 43, величина  $\Pi/P$  во всех классах крупности ниже, чем величина  $\Phi$  для технологических помолов. От крупных классов к мелким величина этого отношения заметно возрастает, а в классе  $-2+0,5$  мм достигает высоких значений, которые позволяют получить продукты с хорошими показателями обогащения.

Для руды, дробленной до  $-25$  мм,  $\Pi/P$  в целом существенно меньше, чем для руд, дробленных до  $-2$  мм. Таким образом, величины  $\Pi$  (аналогичная  $M$ ) и  $\Pi/P$  (аналогичная  $\Phi$ ) в крупных классах руд и пород месторождения Партомчорр говорят о том, что при гравитационном разделении крупных классов трудно добиться хороших результатов в отношении фосфора. Однако можно в классе  $-2+0,5$  мм получить в легкой фракции продукт с кондиционным содержанием алюминия и заметным его извлечением. Одновременно с этим в тяжелых фракциях можно получить отвальный продукт с низким содержанием и потерей извлечения алюминия. На рис. 54, 55 показано, как изменяются содержание и извлечение

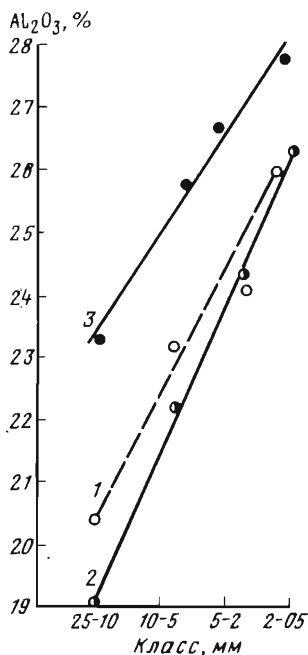


Рис. 54. Изменение извлечения  $Al_2O_3$  во фракцию  $-2,70$  г/см<sup>3</sup> в классах различной крупности 1 — покрывающие породы, 2 — подстилающие породы, 3 — руды

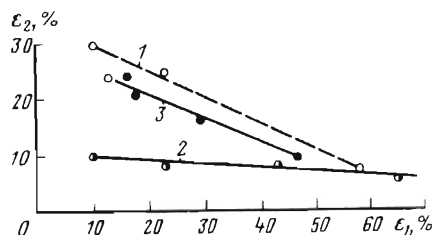


Рис. 55. Изменение извлечения  $Al_2O_3$  из фракций  $2,70$  г/см<sup>3</sup> ( $\epsilon_1$ ) и  $3,00$  г/см<sup>3</sup> ( $\epsilon_2$ ) в классах различной крупности 1 — покрывающие породы; 2 — подстилающие породы; 3 — руды

алюминия в различных классах крупности и по различным фракциям плотности.

Реально полученные результаты несколько меньше тех, которые можно ожидать по диаграммам, рассчитанным для идеального процесса обогащения. Из класса  $-2+0,5$  мм в легкой фракции получен продукт с кондиционным содержанием  $Al_2O_3$  при извлечении его около 50 %. В тяжелой фракции получен продукт с содержанием  $Al_2O_3$  4–6 % и извлечением до 10 % (см. рис. 54, 55). Поскольку руды месторождения Партомчорр на 50 % состоят из нефелина (см. табл. 37), гравитационное обогащение их в крупных классах может на четверть сократить массу измельчаемого материала.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГИИ АПАТИТА ХИБИНСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В ийолит-уртитых и апатит-нефелиновых породах Хибин содержится фторапатит с постоянной примесью стронция и редких земель, что обуславливает его комплексный характер. Представлен апатит несколькими генетическими и морфологическими разновидностями.

Корреляция содержаний редких элементов и фосфора в апатитах хибинских месторождений и ее технологические следствия. Как показывают балансовые расчеты, наибольшая часть стронция и редких земель пород и руд хибинских месторождений концентрируется в апатите, изоморфно замещая в его структуре кальций. Содержания этих элементов в породах и в апатите определяются геохимическими особенностями ийолит-уртитового комплекса и закономерно изменяются. Связь фосфора и редких элементов апатита отчетливо прослеживается на трех различных уровнях: 1) корреляция этих элементов в породах; 2) зависимость содержания стронция и редких земель в апатите от содержания апатита в породе; 3) зависимость весовых содержаний фосфора и редких элементов в апатите.

Между содержаниями фосфора, редких земель, а также фосфора и стронция в породах и рудах ийолит-уртитового комплекса наблюдается сильная положительная связь (коэффициенты корреляции между содержаниями фосфора и стронция, а также фосфора и редких земель равны соответственно 0,80 и 0,78,  $n = 295$ ), в результате чего наибольшая часть этих редких элементов концентрируется в апатите. Этой связью в основном определяется распределение стронция и редких земель в ийолит-уртитых и рудах. Изменения содержаний фосфора в породах и рудах ийолит-уртитового комплекса вызывает аналогичные вариации содержаний редких элементов, связанных с апатитом.

Снижение содержания фосфора (apatита) в рудах сопровождается повышением содержания стронция и редких земель в апатите и наоборот, что сопровождается колебаниями редких элементов в апатите, связанными с фракционированием при кристаллизации ийолит-уртитов и становлением расколотой интрузии и с процессами перекристаллизации апатита.

Результатом отмеченных геохимических особенностей распределения

стронция и редких земель в породах и в апатите является то, что средние содержания редких земель в апатите руд и пород колеблются незначительно, средние содержания стронция сильно изменяются.

Связь весовых содержаний фосфора с редкими элементами в самом апатите функциональная. При замещении кальция более тяжелыми стронцием и редкими землями происходит уменьшение весового содержания фосфора в апатите. Теоретическая зависимость весовых содержаний  $P_2O_5$  и  $SrO$  при среднем содержании для апатита Хибин изображена формулой (2) (см. рис. 32). Реально эта связь проявлена несколько слабее и носит статистический характер (коэффициент корреляции равен  $K = -0,89$ ,  $n = 75$ ), что объясняется вхождением в структуру совместно с редкими землями натрия, более легкого, чем кальций.

Таким образом, уменьшение количества фосфора в рудах и породах влечет за собой увеличение содержания стронция и редких земель в апатите, что вызывает уменьшение весового содержания фосфора в нем, т. е. чем беднее фосфором руды, тем меньше (в весовом отношении) фосфора содержит апатит. Поэтому ухудшение качества руд по мере их отработки (см. рис. 50, табл. 26) усложняет получение кондиционного апатитового концентрата не только в результате технологических трудностей обогащения бедных руд, но и в результате уменьшения весового содержания фосфора в апатите. В результате этого при обогащении возникает необходимость получения (и без того затрудненного ухудшением качества руд) тем более чистого концентрата, чем больше стронция и редких земель содержит апатит. Так, в кондиционном апатитовом концентрате, который в соответствии с ГОСТ 22275-76 содержит 39,4 %  $P_2O_5$ , состоящем из условного апатита, не содержащего стронция и редких земель, должно было бы находиться 93,3 % апатита; при содержании в апатите 13,2 %  $SrO$  кондиционный концентрат должен состоять из апатита на 100 % (табл. 44, рис. 56).

Таким образом, наличие в составе апатита стронция и редких земель приводит к необходимости добиваться очень высокой чистоты концентрата для соблюдения кондиций. При этом содержание  $P_2O_5$  в концентрате в значительной степени зависит от содержания редких элементов в апатите, а не от качества технологического процесса. Например, концентрат, содержащий 2,50 %  $SrO$ , 1 %  $TR_2O_3$  и 39,4 %  $P_2O_5$ , кондиционный, а концентрат, содержащий 4,0 %  $SrO$ , 1 %  $TR_2O_3$ , 39,1 %  $P_2O_5$ , некондиционный. Оба состоят из апатита на 95 %. В первом концентрате апатит содержит, согласно фор-

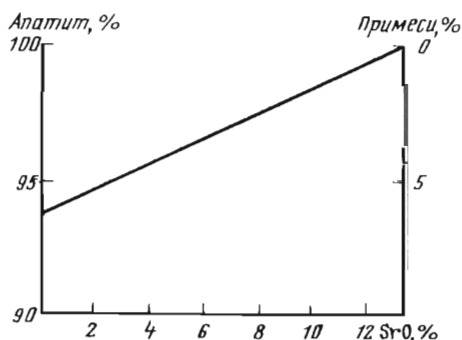


Рис. 56. Зависимость чистоты апатитового концентрата от содержания стронция в апатите

**Изменение состава кондиционного апатитового концентрата  
в зависимости от содержания в апатите стронция  
и редких земель (в %)**

Содержание в апатите				Минеральный состав концентрата	
$TR_2O_3$	SrO	CaO	$P_2O_5$	Апатит	Другие минералы
0,0	0,0	55,60	42,25	93,3	6,7
1,0	0,0	54,87	41,94	93,9	6,1
1,0	1,0	54,08	41,74	94,4	5,6
1,0	2,0	53,29	41,56	94,8	5,2
1,0	2,5	52,89	41,46	95,0	5,0
1,0	3,0	52,49	41,36	95,3	4,7
1,0	4,0	51,70	41,17	95,7	4,3
1,0	13,2	44,42	39,40	100,0	0,0
0,0	69,86	0,0	28,69	—	—

Таблица 45

**Динамика изменения состава апатита и апатитового концентрата  
на обогатительных фабриках АНОФ-1 и АНОФ-2.  
По Г.И. Бобрышеву, В.Т. Хищенко [1979 г.]**

Год	АНОФ-1			АНОФ-2		
	Содержание $P_2O_5$ , %		Содержание апатита в концентрате, %	Содержание $P_2O_5$ , %		Содержание апатита в концентрате, %
	в апатите	в концентрате		в апатите	в концентрате	
1978	40,65	39,48	97,12	40,65	39,45	97,05
1977	40,65	39,48	97,12	40,65	39,45	97,05
1976	40,65	39,50	97,17	40,65	39,49	97,15
1975	40,65	39,51	97,17	40,65	39,50	97,17
1974	40,65	39,47	97,10	40,65	39,49	97,15
1973	40,82	39,48	96,73	41,02	39,48	96,26
1972	40,90	39,47	96,50	40,82	39,44	96,63
1971	40,82	39,48	96,73	40,82	39,49	96,75
1970	40,98	39,51	96,40	40,98	39,58	96,58
1961	—	—	96,18	—	—	—

муле (16), 41,46 %  $P_2O_5$ , во втором — 41,17 %  $P_2O_5$ . Поэтому целесообразно контролировать качество концентрата не только по содержанию  $P_2O_5$ , которое зависит в значительной степени не от качества технологического процесса, а от количества примесей в апатите, но и по содержанию апатита в концентрате.

Применяемый метод контроля за качеством апатитового концентрата по содержанию  $P_2O_5$ , не учитывающий зависимости между весовыми содержаниями фосфора и редких элементов в апатите, приводит к тому, что содержание апатита в концентратах, по данным ПС "Апатит", получаемых

на фабриках АНОФ-1 и АНОФ-2, постоянно увеличивается (табл. 45) и сейчас повышено на 0,96 %. Контроль качества апатитовых концентратов по содержанию в них  $P_2O_5$  и количество в концентрате апатита позволяют объективно оценивать эффективность процессов обогащения руд.

Флотационные особенности апатита хибинских ийолит-уртитов в связи с его составом и генезисом. Свойства апатитов из ийолит-уртитов Хибинского щелочного массива в наибольшей степени зависят от содержания в нем стронция и редких земель, изоморфно замещающих кальций.

Степень этого изоморфизма определяется рядом причин, главными из которых являются: 1) принадлежность ийолит-уртитового комплекса к классу расслоенных интрузий, в результате чего в нем проявлена скрытая расслоенность — закономерное увеличение содержания стронция и редких земель в апатите от подошвы к кровле интрузии; 2) процессы высокотемпературной перекристаллизации пород, в результате которых апатит в ийолит-уртитах представлен двумя главными разновидностями — мелкозернистым светло-зеленым первичным апатитом руд и пород и среднезернистым зеленым и темно-серым перекристаллизованным апатитом, различающимися по форме и размеру минерала, составу и свойствам. Указанные причины приводят к значительным колебаниям содержания стронция и редких земель в апатите.

Авторы изучали флотационные свойства апатитов из ийолит-уртитов в зависимости от их генетических особенностей и химического состава. Для этого были выделены мономинеральные фракции первичного и перекристаллизованного апатитов. Первый представлен кристаллами светло-зеленого, почти белого цвета, призматического облика, размером 0,3—0,5—1 мм, слагающими практически мономинеральный агрегат пятнистой руды. Перекристаллизованный апатит также образует мономинеральный агрегат, сложенный зернами темно-зеленого цвета, изометричной формы, размером 2—5 мм. Мономинеральность исследуемых проб апатита контролировалась под микроскопом и химически. Были изучены химический состав и некоторые физические свойства первичного и перекристаллизованного апатита (табл. 46). Первичный апатит, в результате изменения которого образовался изучаемый перекристаллизованный, представлен незначительным количеством мелких (0,2—0,5 мм) кристаллов белого цвета и содержит 1,34 % SrO.

Флотационные свойства апатита исследовала А.П. Пиккат-Ордынская на флотомашинке ФМ-2 (объем флотационной камеры 75 мм). Проводились серии опытов по флотации с различным расходом реагента-собираателя, в качестве которого использовалась олеиновая кислота. В каждом опыте флотировалась мономинеральная навеска апатита массой 10 г, составленная из трех классов крупности — 0,15—0,10; 0,10—0,07 и 0,074—0,043 мм в соотношении 6:1:3; каждый опыт повторялся три раза. В хвостах и концентратах, полученных при флотации каждой навески, определялось содержание стронция (табл. 47).

Оказалось, что апатит из концентратов во всех опытах содержит строн-



Химический состав и свойства первичного и перекристаллизованного апатитов (в вес. %)

Компоненты	Апатит		Компоненты	Апатит	
	первичный	перекристаллизованный		первичный	перекристаллизованный
SiO <sub>2</sub>	0,25	0,20	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40,05	40,92
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,05	F	2,88	3,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,12	Сумма	101,15	100,79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18	0,19	-O = F <sub>2</sub>	1,18	1,27
MgO	—	0,05	Сумма	99,97	99,52
CaO	52,75	53,30	Плотность	3,259	3,234
SrO	3,72	1,89	a <sub>0</sub>	9,397	9,382
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,18	0,84	c <sub>0</sub>	6,905	6,895

Примечание. Аналитик В.Н. Архангельская (ИМГРЭ).

Таблица 47

## Результаты флотаций апатита

Расход олеино- вой кис- лоты, мг/л	Перекристаллизованный				Первичный			
	Номер опыта	Извлече- ние в кон- центрат, %	Содержание SrO, %		Номер опыта	Извлече- ние в кон- центрат, %	Содержание SrO, %	
			концент- рат	хвосты			концент- рат	хвосты
0	1	33	1,87	1,85	6	0	0	3,72
1,33	2	38	1,99	1,77	7	18	4,00	3,68
4	3	90	1,90	1,41	8	49	3,90	3,66
8	4	96	1,86	1,27	9	87	3,81	3,58
12	—	—	—	—	10	97	3,80	3,33

ция больше, чем апатит из хвостов, т. е. примесь стронция улучшает флотационные свойства апатита.

Известно, что при флотации апатита олеатом натрия происходит химическая сорбция реагента [23]. По-видимому, олеат натрия и олеиновая кислота реагируют со стронцием легче, чем с кальцием. Поэтому при флотации апатита хибинских ийолит-уртитов, который характеризуется сильной неоднородностью химического состава (содержания стронция) даже в пределах штучной пробы, при небольшом расходе реагента-собирателя (см. табл. 47, опыты 2 и 7), флотируются зерна, имеющие максимальное содержание стронция. При большом расходе олеиновой кислоты резко увеличивается извлечение апатита в концентрат и уменьшается — в хвосты (см. табл. 47, опыты 3, 4, 8, 9, 10). При этом в хвостах остаются зерна, содержащие наименьшее количество стронция.

Таким образом, при "голодном" режиме флотации олеиновой кислоты хватает только на реакцию с зернами апатита, имеющими наибольшее из

возможных содержаний стронция. С увеличением количества олеиновой кислоты в реакцию с ней вступает все большее количество зерен апатита, но таким образом, что зерна с наименьшим содержанием стронция флотируются последними.

Процессы перекристаллизации оказывают сильное влияние на флотационные свойства апатита, увеличивая гидрофобность его поверхности. Из табл. 47 и рис. 57 видно, что при одинаковых условиях перекристаллизованный апатит флотируется лучше, чем первичный. Значительная часть перекристаллизованного апатита флотировалась даже без реагента-собираателя дистиллированной водой (см. табл. 47, опыт 1). При этом и апатит концентрата, и апатит хвостов содержат одинаковое количество стронция. Первичный апатит при этих условиях не флотируется (см. табл. 47, опыт 6).

Таким образом, даже при более низком содержании стронция (как в данном случае) перекристаллизованный апатит флотируется лучше первичного, т. е. условия образования апатита более существенны для его флотационных свойств, чем изменения состава. Влияние на флотационные особенности апатита колебаний содержания стронция оказывается явлением второго порядка по сравнению с процессами перекристаллизации.

Хотя условия флотации руд существенно отличаются от условий флотации мономинеральных проб, влияние особенностей генезиса и состава апатита ийолит-уртитов Хибин должно проявиться в технологических процессах, особенно при обогащении руд месторождений, расположенных на флангах ийолит-уртитовой дуги, где заметно повышается содержание стронция в апатитах, а процессы перекристаллизации максимальны.

**Типоморфизм в обогатительной минералогии.** Руда полезного ископаемого — основной объект обогатительной минералогии — представляет собой не столько генетическую или парагенетическую, сколько пространственную ассоциацию минералов. Степень генетической неоднородности минералов в объеме технологической руды выше, чем в собственно рудном генетически едином геологическом образовании. В технологической руде каждый минеральный вид представлен индивидами, имеющими большие различия в свойствах. Особенности, обуславливающие эти различия, могут проявляться: 1) на уровне петрографической структуры или текстуры руды — разница в размерах, форме, взаимоотношениях зерен и их агрегатов; 2) на уровне частицы измельченной руды — форма частиц,

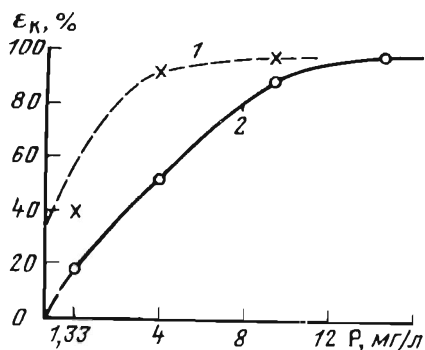


Рис. 57. Флотационные свойства первичного (1) и перекристаллизованного (2) апатитов

P — расход олеиновой кислоты;  $\epsilon_k$  — извлечение в концентрат

разница в характере и количестве включений в них; 3) на кристаллохимическом уровне – разница в изоморфных замещениях, дефектах решетки и др. У минералов руд и пород Хибинского массива проявлены генетически обусловленные особенности на всех трех уровнях.

Структурными и гранулометрическими особенностями руд, полярностью состава и свойств минералов обусловлена возможность гравитационного разделения руд в крупных классах. На уровне частицы измельченной руды типоморфизм в обогащительной минералогии Хибин проявляется в невозможности получения в технологических помолах величины показателя  $\Phi = 1$ , что связано с широким развитием пойкилитических структур. На кристаллохимическом уровне типоморфные особенности проявляются в резкой полярности свойств минералов.

Существенное отличие титаномагнетита от остальных минералов по магнитным свойствам используется при получении титаномагнетитового концентрата с помощью магнитной сепарации. В то же время наличие электромагнитных свойств и у пироксена, и у сфена затрудняет их разделение на этой основе. Отделить наиболее магнитные зерна сфена от наименее магнитных зерен пироксена трудно, что приводит при электромагнитной сепарации к загрязнению получаемых продуктов. Пироксены руд и пород Хибинского массива представлены различными членами изоморфного ряда эгиринов – диопсид. В результате скрытой расслоенности ийолит-уртитов в составе пироксенов снизу вверх по разрезу увеличивается количество эгиринового минерала, при этом изменяются магнитные свойства минерала: наименьшей магнитной восприимчивостью обладают наиболее кальциевые (диопсидовые), наибольшей – железистые (эгириновые) пироксены. К особенностям кристаллохимического уровня относятся флотационные свойства апатита.

Приведенные примеры иллюстрируют важную практическую технологическую роль типоморфных свойств минералов. Исследования типоморфизма минералов в обогащительной минералогии позволяет предварительно оценить по самым общим геолого-генетическим параметрам технологические свойства руд и их эволюцию при отработке месторождений.

Из приведенных выше данных можно сделать следующие выводы:

1. Комплексность руд хибинских месторождений, закономерное ухудшение качества руд по содержанию  $P_2O_5$  вызывают необходимость специальных технологических исследований.

2. Руды хибинских месторождений по технологическим свойствам относятся к хорошо- и легкообогащаемым. Благодаря удачному сочетанию текстурно-структурных особенностей руд и полярности свойств минералов можно проводить предварительное обогащение руд в крупных классах.

3. Многие особенности минералов заметно влияют на технологические процессы. Некоторые из этих особенностей можно использовать для улучшения процессов обогащения.

Исследования ийолит-уртитов Хибинского щелочного массива существенно дополняют наши знания о его минералогии и геохимии и оказываются ценными в прикладном аспекте. Естественное сочетание научных и

прикладных исследований позволяет наиболее полно использовать минералого-геохимические данные для разработки теоретических моделей, а также схем извлечения и переработки минералов из руд и пород. Принадлежность ийолит-уртитов к расслоенным интрузиям, наличие в них скрытой расслоенности, установление которой -- результат научных исследований, позволило разработать метод определения глубины залегания рудного тела по особенностям состава и свойств апатита [6]. Выявленные закономерности состава апатита позволяют усовершенствовать метод анализа качества апатитового концентрата. Прикладные исследования минералогии и геохимии ийолит-уртитов служат для развития теоретических основ технологической минералогии.

Одна из основных задач конкретных топоминералогических исследований -- изучение типоморфных физических и химических свойств минералов. В описательной и генетической минералогии изучение свойств минералов служит для решения общегеологических задач и выяснения генетических проблем. В прикладных разделах минералогии типоморфные свойства минералов могут служить поисковыми критериями или способствовать решению технологических задач. Направленность изучения свойств минералов зависит от тех проблем, для решения которых оно осуществляется.

Типоморфизм как явление отражает взаимосвязь между условиями минералообразования и свойствами минералов. В генетической минералогии он используется как инструмент для выяснения геологического прошлого минералов. В обогатительной минералогии особенности состава и свойств минералов предопределяют то или иное поведение их в технологических процессах. Следовательно, цель технологической минералогии, основываясь на типоморфных признаках, предсказать и объяснить технологическое будущее минералов. Типоморфизм, таким образом, представляет собой связующее звено между генезисом минералов и технологией, между их прошлым и будущим.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Л.Б. Апатитовые месторождения Хибинской тундры. - В кн.: Хибинские апатиты, сб. VII, ОНТИ - Госхимтехиздат, 1934, с. 1-196.
2. Беляков А.Ю., Циккат-Ордынская А.П., Архангельская В.Н. Флотационные особенности апатита хибинских ийолит-уртитов в связи с его генезисом. - Докл. АН СССР, 1980, т. 253, №6, с. 1446-1448.
3. Блисковский В.З. Обогащительная минералогия - самостоятельный раздел минералогической науки. - Труды ГИГХС, вып. 30, 1975, с. 3-29.
4. Блисковский В.З., Беляков А.Ю. Типоморфизм минералов в обогащительной минералогии. - В кн.: Новые данные о типоморфизме минералов. М., Наука, 1981, с. 264-268.
5. Борнеман-Старынкевич И.Д. Редкие земли в апатите Хибинских тундр. - Докл. АН СССР. Сер. А, 1924.
6. Влодавец В.И. Общая характеристика апатитовой дуги. - В кн.: Хибинские апатиты. Сб. I, вып. 1, 1930, с. 38-47.
7. Воробьева О.А. Геология и петрография Эвселогчорра и прилегающих к нему высот в хибинских тундрах. - В кн.: Материалы по петрографии и геохимии Кольского полуострова. Л., Труды СОПС. Сер. кольская, 1932, ч. I, вып. 2, с. 73-104.
8. Галахов А.В. Петрология Хибинского щелочного массива. Л., Наука, 1975.
9. Голованов Г.А. Флотация кольских апатитосодержащих руд. М., Химия, 1976.
10. Гинзбург А.И. Выявление новых видов минерального сырья - важнейшая задача прикладной минералогии. - Минералогический журнал, 1980, т. 2, №1, с. 9-20.
11. Гинзбург А.И., Александрова И.Т., Шманенков И.П. Задачи технологической минералогии, пути и методы их решения. - Советская геология, 1977, №5, с. 7-20.
12. Дорфман М.Д. Минералогия пегматитов и зон выветривания в ийолит-уртигах горы Юкспор Хибинского массива. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1962.
13. Дудкин О.Б. Геохимия и закономерности концентрации фосфора. Л., Наука, 1977.
14. Дудкин О.Б., Козырева Л.В., Померанцева Н.Г. Минералогия апатитовых месторождений хибинских тундр. М.-Л., Наука, 1964.
15. Елисеев Н.А., Ожинский И.С., Володин Е.Н. Геологическая карта хибинских тундр. М.-Л., ГОНТИ, 1939, 68 с.
16. Зак И.С., Каменев Е.А. Новые данные по геологии Хибинского щелочного массива. - Советская геология, 1964, №7, с.42-51.
17. Иванов Т.Н. Апатитовые месторождения хибинских тундр. М., Госгеолтехиздат, 1963.
18. Калинин М.М. Новые данные о глубинном строении продуктивного комплекса ийолит-уртитов в Хибинском массиве. - Геология рудных месторождений, 1976, т. 18, №5, с. 15-25.
19. Каменев Е.А., Химич С.Н. Геотермические параметры Хибинского массива. - Докл. АН СССР, 1971, т. 201, №1, с. 195-197.
20. Каменев Е.А. Геология и структура Коашвинского апатитового месторождения. Л., Недра, 1975.
21. Каменев Е.А., Пешев Н.Г., Минеев Д.А. Апатито-нефелиновые руды - эффективный комплексный источник фосфатного, алюминиевого, редкометалльного сырья и фтора. - В кн.: Комплексное обогащение фосфорсодержащего сырья. Апатиты, 1977, с. 3-20.
22. Кларки Хибинского щелочного массива / А.А. Кухаренко, Г.А. Ильинский, Т.Н. Иванова и др. - Зап. Всесоюз. минер. об-ва, 1968, ч. 97, вып. 2, с. 133-149.
23. Кнубовец Р.Г., Масляников Б.М. Исследование адсорбции флотационных реагентов минералами методами инфракрасной спектроскопии. - Докл. АН СССР, 1965, т. 164, №2, с. 387-389.
24. Когарко Л.Н. Проблемы генезиса агпаитовых магм. М., Наука, 1977.
25. Кравченко С.М., Беляков Л.Ю., Минеев Д.А. Новые данные по минералогии северо-западного сектора расслоенной ийолит-уртитовой интрузии Хибинского мас-

сива. - В сб.: Новые данные по минералогии месторождений щелочных формаций. М., 1979, с. 29 -65.

26. *Кравченко С.М., Каменев Е.А., Минаков Ф.В.* Способ определения глубины залегания скрытого апатитового оруденения. 1979, №2638793/18-25 (065027).

27. *Куплетский Б.М.* Петрографический очерк хибинских тундр. - В кн.: Хибинские и ловозерские тундры, вып. 39. М., изд-во науч.-техн. упр. ВСНС, 1928.

28. *Лагов Б.С.* Показатель фазового раскрытия и его использование для радиометрической обогатимости руд. - В кн.: Минеральное сырье, 1975, вып. 26, ВИМС, с. 14-23.

29. *Мелентьев Б.Н., Ольшанский Я.И.* Равновесие несмешивающихся жидкостей в системе  $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  - Докл. АН СССР, 1952, 86, № 6, с. 110-113.

30. *Минаков Ф.В., Каменев Е.А., Калинин М.М.* Об исходном составе и эволюции ийолит-уртитовой магмы Хибинского щелочного массива. - Геохимия, 1967, №8, с. 901-915.

31. *Минаков Ф.В.* Связь апатитовых месторождений с ийолит-уртитовой интрузией Хибинского массива. - В сб.: Апатиты, М., Наука, 1968, с. 85-90.

32. *Минеев Д.А.* Лантаноиды в рудах. М., Наука, 1974.

33. *Минералогия* Хибинского массива. Т. 1, 2 / Е.Е. Костылева-Лабунцова, Б.Е. Боруцкий, М.Н. Соколова и др. М., Наука, 1978.

34. *Минералы хибинских и ловозерских тундр.* М.-Л., Изд-во АН СССР, 1937.

35. *Мокроусов В.А., Лилив В.А.* Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. М., Недра, 1979.

36. *Онохин Ф.М.* Особенности структуры Хибинского массива и апатит-нефелиновых месторождений. Л., Наука, 1975.

37. *Пешев Н.Г.* Экономические проблемы рационального использования фосфатного сырья. Л., Наука, 1980.

38. *Ратобыльская Л.Д., Колесникова В.М., Кайтмазова Т.И.* Исследование минерального состава продуктов прямой и обратной флотации нефелина из хвостов апатитового цикла АНОФ-1. - Труды ГИГХС, М., 1977, вып. 38, с. 88-94.

39. *Редкие земли и стронций в породах и минералах ийолит-уртитового комплекса Хибинского массива / С.М. Кравченко, Д.А. Минеев, Е.А. Каменев и др.* - Геохимия, 1979, №7.

40. *Тихоненков И.П.* Нефелиновые сиениты и пегматиты Хибинского массива. М., изд-во АН СССР, 1963.

41. *Ферсман А.Е.* Апатит, его месторождения, запасы и экономика. - В кн.: Хибинские апатиты, сб. 3, Л., Госхимтехиздат, 1931, с. 124-168.

42. *Ферсман А.Е.* Освоение Кольского полуострова и его богатств. - В кн.: За полярным кругом. Л., 1932, с. 3-7.

43. *Ферсман А.Е.* Полезные ископаемые Кольского полуострова. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1941.

44. *Фивег М.П.* Краткие итоги работ разведочных партий Горно-геологического Отдела НИУ в хибинской тундре. - В сб.: Хибинские апатиты, 1936, сб. 2, Тр. НИУ, вып. 128, с. 5-35.

45. *Хибинский щелочной массив / С.И. Зак, Е.А. Каменев, Ф.В. Минаков и др.* Л., Недра, 1972.

46. *Челищев Н.Ф.* Основные направления технологической минералогии. Изв. АН СССР. Сер. геол., 1977, №11, с. 86-94.

47. *Шевченко М.И.* Результаты поисковых и разведочных работ в восточной части апатит-нефелиновой дуги хибинских тундр. - В кн.: Хибинские апатиты, сб. 6, Л., 1933, с. 35-36.

48. *Широшкин Н.В.* Геогностический обзор берега Кандалакшской губы и Бело-го моря до г. Кеми в Архангельской губернии. - Горный журнал, 1835, ч. 1, кн. 3, с. 397-427.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Глава 1. История исследования. Геологическое строение Хибинского массива и ийолит-уртитового комплекса <i>Е.А. Каменев</i> . . . . .	6
Основные этапы геологических исследований . . . . .	6
Развитие знаний о геологическом строении Хибинского массива . . . . .	13
Глава 2. Новые апатит-нефелиновые месторождения <i>Е.А. Каменев</i> . . . . .	33
Юго-восточное рудное поле . . . . .	40
Коашвинское месторождение . . . . .	40
Ньюрклахское месторождение . . . . .	48
Эвеслочоррское месторождение . . . . .	60
Месторождение Олений ручей . . . . .	67
Северо-западное рудное поле . . . . .	75
Партомчоррское месторождение . . . . .	75
Структурная зональность и структурно-морфологическая классификация месторождений . . . . .	84
Глава 3. Методика геологоразведочных работ и комплексная оценка месторождений <i>Е.А. Каменев, Д.А. Минеев, О.С. Нечаева, Н.Г. Пешев</i> . . . . .	91
Стадии и система поисков и разведки месторождений . . . . .	91
Рациональный комплекс геологоразведочных работ . . . . .	96
Комплексное исследование состава апатитовых руд . . . . .	99
Методика аналитических работ. Аттестация внутренних стандартных образцов . . . . .	100
Технологическая изученность апатит-нефелиновых руд . . . . .	107
Экономическая оценка месторождений апатит-нефелиновых руд . . . . .	114
Экономическая эффективность геологоразведочных работ . . . . .	120
Промышленная оценка заласов фтора . . . . .	122
Глава 4. Минералого-геохимические, генетические и технологические особенности ийолит-уртитового комплекса и месторождений <i>А.Ю. Беляков, С.М. Кравченко, Д.А. Минеев, Е.А. Каменев</i> . . . . .	125
Типоморфные геохимические особенности ийолит-уртитов и апатит-нефелиновых руд . . . . .	125
Редкие элементы как индикаторы генезиса ийолит-уртитового комплекса и оруденения . . . . .	142
Технологическая минералогия апатит-нефелиновых руд . . . . .	152
Список литературы . . . . .	180

## НОВЫЕ ХИБИНСКИЕ АПАТИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Редактор издательства Р.В. Добровольская  
Обложка художника А.Е. Чучканова  
Художественный редактор Е.Л. Юрковская  
Технический редактор Л.С. Гладкова  
Корректор И.Ю. Каменская  
Оператор Г.Г. Алексеева

Н/К

---

Подписано в печать 20.05.82. Т-09731. Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная № 1.  
Набор выполнен на наборно-печатающей машине типа ИБМ "Композер". Печать  
офсетная. Усл.печл. 11,5. Усл.кр.-отт. 11,75. Уч.-издл. 13,55. Тираж 500 экз.  
Заказ 583 /12508-14. Цена 70 коп. Заказнос.

---

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра", 103633, Москва, К-12,  
Третьяковский проезд, 1/19

Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете  
СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
Москва Ж-33, Волочаевская, 40.



**УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ!**  
**В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ "НЕДРА" ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ**  
**НОВЫЕ КНИГИ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ бериллия, щелочных и щелочноземельных элементов в минеральном сырье** / Столярова И.А., Хитров В.Г., Воронкова М.А. и др. 14 л. 75 к.

Рассмотрен анализ минерального сырья на бериллий, литий, натрий, калий, рубидий, цезий, магний, кальций, стронций и барий. Для каждого из них приведены геолого-минералогическая и аналитическая характеристики. Описаны современные методы их определения в различных геологических объектах и дана сравнительная оценка методов. Приведены рабочие прописи химических, физико-химических и физических методов анализа. Особое внимание уделено полному анализу карбонатных пород и гипса.

Для геологов, минералогов и других специалистов, занимающихся изучением вещественного состава минерального сырья, а также для научно-технического персонала аналитических лабораторий геологической службы.

**ТОЛКАЧЕВ М.В. Финансово-кредитный механизм геологоразведочной отрасли.** 14 л. 75 к.

Освещены структура финансово-кредитного механизма, источники экономического роста и финансовые ресурсы геологоразведочной отрасли. Дана характеристика расчетного финансового плана, оборотных средств и кредитных вложений. Рассмотрены геологоразведочный цикл инвестиционного процесса и возможности его оптимизации. Изложены методические и практические вопросы повышения экономической эффективности финансово-кредитного механизма отрасли. Предложены меры по сокращению незавершенного производства, согласованию народнохозяйственной и отраслевой эффективности, организации финансового контроля.

Для инженерно-технических работников геологоразведочных организаций. Может быть использована в системе экономического образования в отрасли.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел "Книга-почтой" магазинов:

№17 – 199178, Ленинград, В.О., Средний проспект, 61;  
№59–127412, Москва, Коровинское шоссе, 20

*Издательство "Недра"*