

В. В. Щипцов, Т. П. Бубнова, А. В. Гаранжа, Л. С. Скамницкая, Н. И. Щипцова

ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА КАРБОНАТИТОВ ТИКШЕОЗЕРСКОГО МАССИВА (ФОРМАЦИЯ УЛЬТРАОСНОВНЫХ – ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД И КАРБОНАТИТОВ)

Введение

По результатам геолого-съёмочных и научно-исследовательских работ на территории северной Карелии в границах Тикшеозерского массива щелочно-габброидной формации были выявлены апатитоносные карбонатиты, представляющие интерес как индустриальное сырьё. В геологическом отношении Тикшеозерский массив входит в состав Карело-Кольской провинции ультраосновных – щелочных пород и карбонатитов, но этот массив по составу силикатных пород является переходным между двумя щелочными формациями – ультраосновных – щелочных пород и карбонатитов и щелочно-габброидной (Фролов и др., 2003). Таких массивов единицы, как правило, в локализованных карбонатитах отсутствует редкометалльная минерализация или проявляется весьма своеобразно. Непременным минеральным компонентом, как и в нашем случае, является апатит – сквозной минерал.

Тикшеозерское месторождение апатитоносных карбонатитов, расположенное в Лоухском районе на южном берегу оз. Тикшеозеро и соединенное усами лесовозной технологической дороги с пос. Кестеньга, привлекло волну научного и практического интереса после проведения поисковых работ на участке «Карбонатитовый» в 1986–1988 гг. и выявления в них апатитоносной минерализации (Клюнин, Сафронова, 1988; Кирнарский и др., 1990; Сафронова, 1990; Бархатов и др., 1991; Щипцов и др., 1991 и др.). К этому периоду относятся лабораторные испытания на обогатимость апатитовых руд Тикшеозерского и Восточного массивов, выполненные в Институте геологии КарНЦ РАН.

Месторождение действительно характеризуется крупными запасами апатита и карбонатного сырья и может быть отнесено к потенциально-промышленному типу. Рациональное использование многокомпонентного минерального сырья и оценка народнохозяйственной значимости определяются следующими критериями:

- область применения и потребность (дефицитность) в сырье;
- геологическая и технологическая изученность;
- масштабы ресурсов (обеспеченность предприятия) и качество сырья (содержание компонентов, потребительские свойства).

Таблица 1 основана на многофакторной классификации ресурсов недр Ф. Д. Ларичкина (Ларичкин, 2005).

Таблица 1

Многофакторная классификация ресурсов карбонатитов Тикшеозерского массива

| Классификационный признак | Разновидности признака группировки |
|--|--|
| Условия образования | Природные (благоприятные) |
| Расположение относительно земной поверхности | Заглубленные (не более 10 м от поверхности) |
| Взаимное расположение | Взаимосвязанные (мощная залежь) |
| Территориальное распространение | Для Карелии единичное |
| Агрегатное состояние | Твердые |
| Функционально-отраслевое назначение | Многоотраслевое (многоотраслевое) |
| Направление использования | Сырьевое на основе использования апатитовых, карбонатных, магнетитовых и флогопитовых продуктов – многоцелевое |

Краткий обзор геолого-геофизической изученности Тикшеозерского массива

В период 1945–1966 гг. проводились геофизические исследования, включающие аэромагнитную съемку масштабов 1 : 200 000 – 1 : 25 000. На Тикшеозерской площади в результате обнаружения магнитной аномалии и гравirazведкой масштаба 1 : 200 000 выявлены две локальные аномалии, соответствующие Тикшеозерскому и Шапкозерскому блокам массива. В 1972 г. в ходе тематических работ Института геологии Карельского филиала АН СССР при обследовании массивов пироксенитов группой В. Д. Слюсарева на юго-западном берегу Тикшеозера в Лоух-

ском районе Карельской АССР был установлен новый для докембрия Карелии тип щелочного магматизма с ассоциацией оливинитов, тералитов и пород якупирангит-уртитовой серии.

Дальнейшее изучение этого района в 1973–1974 гг. с участием Западного геофизического треста (ЗГТ), поставившего здесь по рекомендации Института геологии комплексные геофизические работы, позволило наметить контуры двух массивов: Тикшеозерского, включающего Северный, Центральный и Шапкоозерский участки, и расположенного к востоку более мелкого Восточного массива. В составе массивов было выявлено значительное разнообразие пород при резком преобладании пироксенитов (до 85%), обнаружены титаномагнетитовые рудопоявления и апатитовая минерализация. В 1977–1980 гг. в ходе АФГК-500 геологи ПГО «Севзапгеология» (А. М. Корнюшин и др.) на Тикшеозерском массиве обнаружили карбонатиты, ранее считавшиеся продуктами изменения пироксенитов.

Сотрудники Института геологии в 1976–1977 гг. на Тикшеозерском массиве установили нефелиновые сиениты, аналогичные ельтьозерским, а также своеобразные высококальциевые щелочные породы, разнообразные метасоматиты, мантийный источник вещества которых подтвердился изотопным составом кислорода кальцита. Эти новые данные и результаты переоценки наряду с геофизическими материалами послужили основанием для рекомендации постановки геолого-поисковых работ в Ельтьозерской металлогенической зоне. Северная геологическая экспедиция в 1977–1981 гг. проводила работы по оценке на апатит в пределах Ельтьозерского и Тикшеозерского массивов (Кириллов и др.), а затем была привлечена Южно-Кольская партия (ЮКП) Центрально-Кольской комплексной геологической экспедиции (ЦККГЭ) для проверки прогнозирувавшейся геологической обстановки (Клюнин, Паничев, 1988 г.) путем проведения в этом районе групповой геологической съемки масштаба 1 : 50 000 и поисковых работ на апатит и другие полезные ископаемые в пределах Тикшеозерского массива (Холодилов, Карпатенков, 1988 г.).

С 1980 г. минералогия, петрология и металлогения Тикшеозерского массива систематически изучались сотрудниками ИГ КарНЦ АН СССР (А. И. Богачев, Г. П. Сафронова, В. В. Щипцов и др.) и сотрудниками ГИ КолНЦ АН СССР (Ю. М. Кирнарский и Е. Г. Балаганская).

Геологические особенности Тикшеозерского массива

На основании пространственной близости Тикшеозерского и Ельтьозерского массивов (Тикшеозерско-Ельтьозерский комплекс) в пределах единой гравитационной аномалии, щелочной направленности эволюции составов, наличия однотипных рудных и полевошпатовых пироксенитов был сделан вывод о принадлежности обоих массивов к

единому эволюционному ряду специфичной клинопироксенит-габбро-щелочной формации (Богачев и др., 1976). Тикшеозерско-Ельтьозерский комплекс объединяет два пространственно близких массива, связанных формированием с единым мантийным источником, но для Тикшеозерского массива интрузивный очаг предполагается более глубинным.

В целом массив представляет собой субмеридионально вытянутое чашеобразное тело, разбитое на три крупных блока – Тикшеозерский, Центральный и Шапкоозерский, сложенных пироксенитами, оливинами, ийолитами, тералитами, щелочными габбро и габброноритами, а также нефелиновыми сиенитами (рис. 1). В центре Центрального блока штокообразное тело слагают карбонатиты. Относительное возрастное соотношение габброноритов с массивом определяется тем, что габбронориты секутся карбонатитами, т. е. являются более древними образованиями, чем породы последней фазы массива.

Тикшеозерский массив на различных уровнях проявляет более слабую дифференциацию в сопоставлении с каледонскими ультраосновными – щелочными породами и карбонатитами Кольского полуострова.

Карбонатиты

В Тикшеозерском массиве, помимо повсеместно развитых мелких карбонатитовых прожилков и жил, образовано крупное карбонатитовое полого залегающее плитообразное тело с неровной верхней поверхностью контакта, осложненной выступами и апофизами, а также, вероятно, разрывными нарушениями со смещением по ним (рис. 2). Для карбонатитов показательным критерием являются отрицательные локальные гравиметрические аномалии. Карбонатиты Тикшеозерского массива в существующей рисовке на геологической карте занимают практически секущее положение по отношению к внутренней структуре массива и имеют различную выраженность в рельефе. Размещение этих тел связано с субмеридиональными разрывами на участках, они пересекаются диагональными северо-восточными и северо-западными разломами. Залегание карбонатитов приурочено к пониженным частям рельефа, и они скрыты рыхлыми отложениями мощностью 5–15 м. В депрессии с долиной ручья, разделяющей возвышенные Шапкоозерский и Центральный блоки, серией скважин карбонатиты прослежены в виде меридиональной полосы шириной до 600 м. Тело карбонатитов занимает явно секущее положение относительно ультраосновных щелочных пород массива. По данным бурения в восточном направлении оно продолжается под расположенными гипсометрически выше пироксенитами – ийолитами и имеет вертикальную мощность 20–400 м (скважины № 204, 161, 169 и др.).

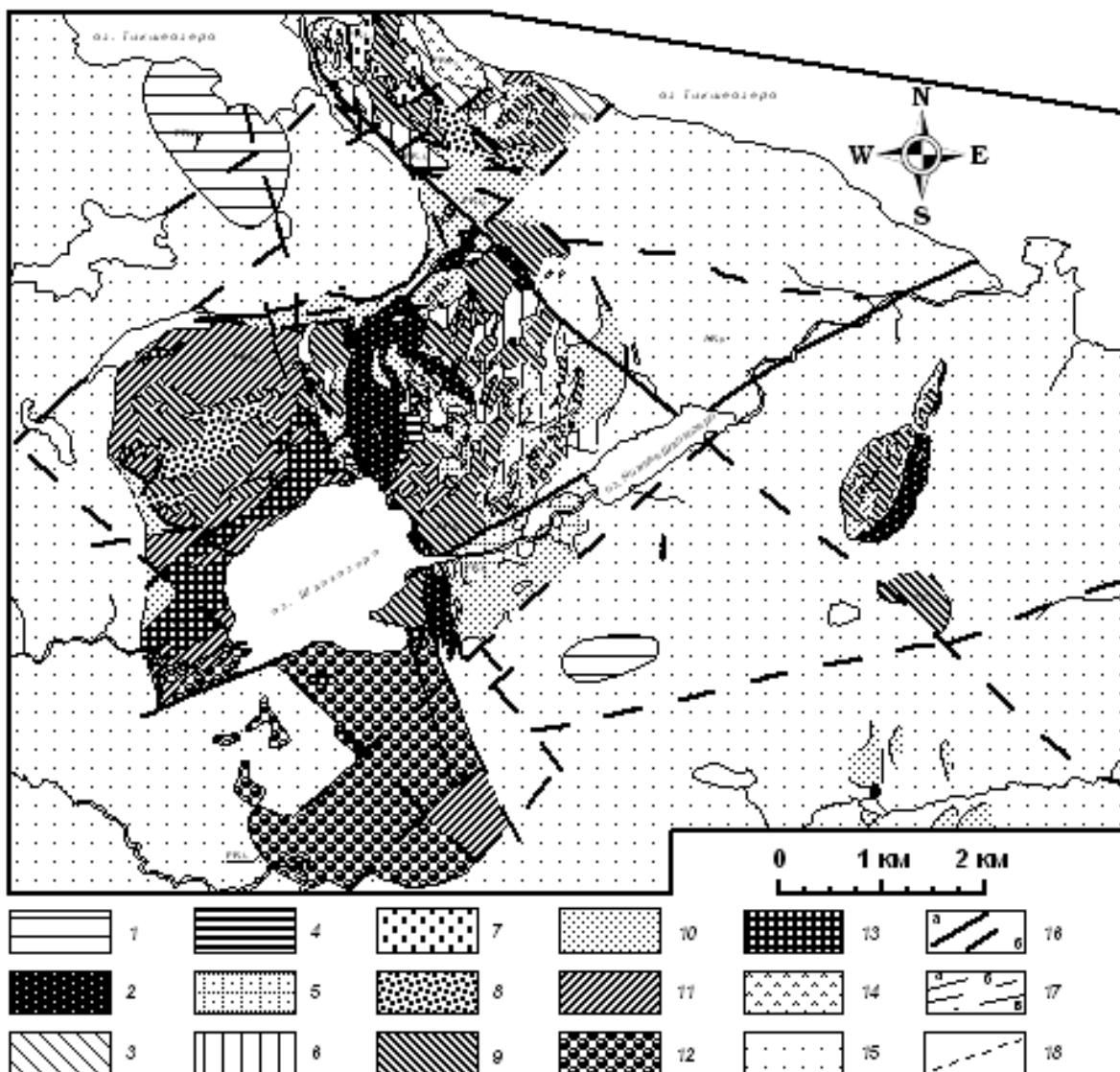


Рис. 1. Карта-схема геологического строения Тикшеозерского массива (составили В. В. Щипцов и Н. И. Щипцова с использованием материалов А. И. Богачева и др., 1988 г.; Н. Р. Холодилова и др., 1988 г.):

тикшеозерский комплекс: 1 – микроклиновые граниты с вкрапленностью голубого дымчатого кварца; 2 – карбонатиты кальцитовые, доломит-кальцитовые и кальцит-доломитовые; 3 – нефелиновые сиениты; 4 – уртиты средне-крупнозернистые до гигантозернистых; 5 – средне-крупнозернистые ийолиты, ийолит-уртиты; 6 – мелко-среднезернистые мельтейгиты, ийолиты, нефелинизированные пироксениты; 7 – тералиты; 8 – нерасчлененные тералиты, габбро, пироксениты; 9 – пироксениты, обогащенные титаномагнетитом; 10 – средне-мелкозернистые титаноавгитовые пироксениты; 11 – оливинные пироксениты; 12 – оливиниты с титаномагнетитом, серпентинизированные оливиниты; 13 – серпентиниты, серпентинизированные оливиниты; олангский комплекс: 14 – габбронориты; пязозерский комплекс: 15 – микроклин-плагиоклазовые граниты, тоналиты, диориты, амфибол-биотитовые и биотит-амфиболовые гнейсы; разрывные нарушения: 16 – достоверные (а) и предполагаемые (б); границы разновозрастных пород: 17 – достоверные (а), предполагаемые – по геологическим (б) и геофизическим (в) данным; 18 – фациальные границы пород

С вмещающими силикатными породами карбонатиты имеют резкие контакты с выраженными экзоконтактовыми ореолами развития катофорито-карбонатных метасоматитов по пироксенитам, цеолитовых агрегатов с содалитом, альбитом, пренитом и эгирином по щелочным породам, с альбитом и эгирином по гранитоидам. Нередко выражено брекчирование вмещающих пород и цементирование их карбонатным материалом. Мощность экзоконтактовых ореолов непостоянна, но обычно, по крайней мере в виде прерывистых зон, превышает 10 м. Тектоническую

активность при формировании карбонатитов отражают нередко развитые в экзоконтактах карбонатитовых тел милониты. Они имеют чаще всего вид тонкозернистых сланцев темно-зеленого цвета, по составу амфибол-карбонатные или биотит-амфибол-карбонатные с магнезиальным карбонатом и рихтеритом.

В карбонатитах также обычны ксенолиты вмещающих пород. Размеры и степень переработки различны – от четко очерченных крупных и мелких угловатых обломков до скиалитов в виде скоплений разноцветных минералов.

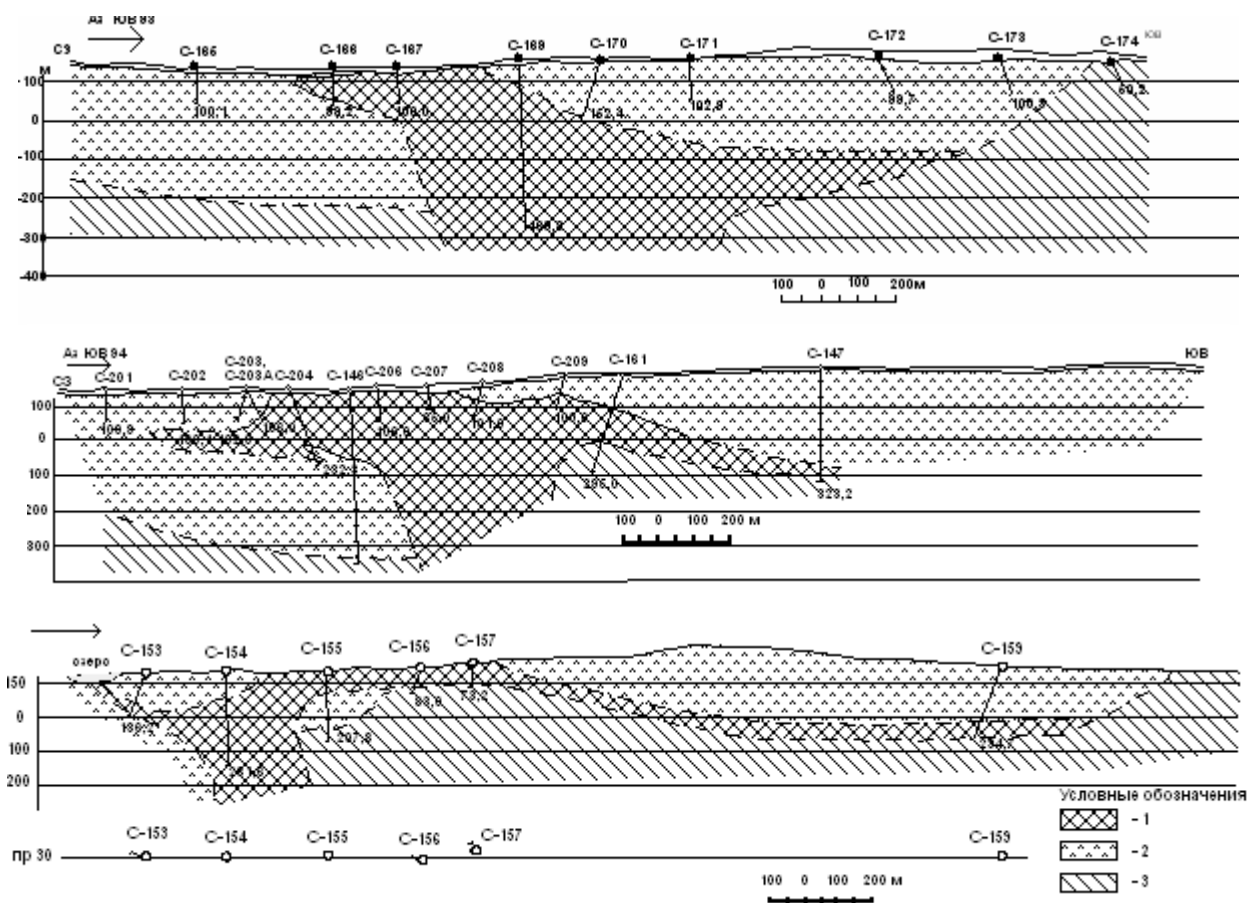


Рис. 2. Геологические разрезы на участке «Карбонатный» по профилям 18, 24 и 30:
 1 – карбонаты; 2 – габбро-пироксенитовый тикшеозерский комплекс; 3 – гранодиоритовый пязозерский комплекс

Изотопные исследования кальцитов подтверждают эндогенный источник. Впервые такой вывод сделан Г. П. Сафроновой (Сафронова, Гаврилова, 1982). Общие вариации изотопных значений не выходят за пределы вариаций, установленных для карбонатов гипабиссальной глубины формирования (Самойлов, 1984). Интрузивная природа карбонатов подтверждается и геологическими наблюдениями характера соотношений.

Данные, полученные нами по изотопному составу кислорода (табл. 2), показывают утяжеленность при гомогенности изотопного состава по $\delta^{13}\text{C}$. Такая «утяжеленность» изотопного состава кислорода может свидетельствовать о неоднократности действия наложенных процессов, более низкотемпературных (Щипцов, 1988).

Сопоставление тикшеозерских карбонатов с нижнепротерозойскими карбонатитовыми комплексами Черниговской тектонической зоны (Русаков и др., 1987) показывает, что те и другие характеризуются весьма низкими содержаниями редкометалльной минерализации. Это прямым образом подчеркивается принадлежностью их к наиболее ранним существенно кальцитовым образованиям. Основными рудными компонентами являются железо и фосфор (концентратом железа в карбона-

татах выступали магнетит, концентратом фосфора – апатит, характеризуемый относительно низкими содержаниями стронция, редких земель и низкой радиоактивностью). Преимущественное развитие высокотемпературных фаций карбонатитов обусловило апатитовый характер оруденения. Фосфор в карбонатитах связан с апатитом. Средний минеральный состав карбонатитов следующий: кальцит – 70%, апатит – 9%, доломит – 9%, магнетит – 5%, флогопит – около 3%, амфибол – около 4%, ед. знаки пироксидов.

Таблица 2

Изотопный состав углерода и кислорода кальцитов из карбонатитов

| № п/п | № обр. | Место отбора образца | Интервал глубин, м | $\delta^{13}\text{C}$, ‰ | $\delta^{18}\text{O}$, ‰ |
|-------|--------|----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 274 | Пр. 32, ГК-324 | Поверхность | -5,59 | 11,9 |
| 2 | 28 | Скв. 146 | 41,4–47,4 | -5,69 | 10,9 |
| 3 | 35 | Скв. 146 | 75,5–81,5 | -5,82 | 11,6 |
| 4 | 41 | Скв. 146 | 111,5–116,2 | -5,75 | 12,6 |
| 5 | 47 | Скв. 146 | 146,2–152,2 | -5,48 | 11,9 |
| 6 | 15 | Скв. 146 | 184,1–190,1 | -5,49 | 11,6 |
| 7 | T-1 | Скв. 146 | Усредненная по скв. | -5,76 | 12,2 |

Примечание. Изотопный анализ выполнен в Опытном комплексном предприятии ИГФМ АН УССР, 1987 г.

Формирование апатита было двухстадийным – в основную интрузивную стадию и стадию метасоматоза (автометасоматоза). Первым присутствию морфологические черты в виде умеренно удлиненных, призматических кристаллов, вторым – короткостолбчатые, таблитчатые. Размер зерен апатита колеблется от сотых долей миллиметра до 1,2–1,6 мм. Значительная часть зерен апатита округлая или слегка вытянутая, редко удлиненные индивиды с коэффициентами удлинения 3 : 1, 3,5 : 1. Зерна обладают сильной трещиноватостью. Микротрещины залечиваются карбонатами, чаще по ним сыпь рудных минералов черного цвета. В отдельных зернах отмечены микровключения слюд (флогопит, биотит), амфибола, пирохлора. Кроме цепочечного расположения и гнездовидного скопления апатита, фиксируются единичные зерна в ассоциации с амфиболом, слюдистыми минералами, магнетитом и сульфидами железа. По окраске апатит светло-зеленоватый, розоватый с желтоватым оттенком. Показатели преломления апатита $n_o = 1,640$ и $n_e = 1,637$.

Исследованные апатиты характеризуются небольшими содержаниями радиоактивных элементов U и Th, а также малой радиогенной составляющей свинца (табл. 3). При рассмотрении изотопных данных в координатах $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ апатиты укладываются на изохрону с возрастом 1,980 млрд лет (Щипцов и др., 1991). Эти данные вписываются в общую схему эволюции ультраосновного – щелочного и карбонатитового магматизма Восточно-Европейской платформы, предложенную Е. Я. Марченко и др. (1987) на примере наиболее древних докембрийских комплексов линейного типа – Черниговский (1,8–2,3 млрд лет) на Украинском щите и Сиилинъярви (1,8–2,5 млрд лет) на Фенноскандинавском щите в центральной Финляндии.

Резко преобладают кальцитовые карбонатиты, подчиненное значение имеют доломит-(анкерит)-кальцитовые и существенно доломитовые карбонатиты. Они характерны для флангов карбонатитового тела и развиваются в виде полос мощностью до 5 м среди кальцитовых карбонатитов или на контакте карбонатитовых тел с магнезиальными вмещающими породами. Максимальная вскрытая мощность карбонатитов составляет 360 м (скв. 169), мощность апофиз – 10–45 м.

Минеральный состав по данным керна скв. 169 также отражает преобладание (около 90% и более) в составе карбонатитов карбонатов, главным образом, кальцита, начиная с первых горизонтов. По петрохимическим характеристикам различаются высококальциевые и менее распространенные магнезио-кальциевые карбонатиты (табл. 3).

Крупно- и гигантозернистые разновидности кальцитовых карбонатитов (севиты) цементируют зоны дробления в пироксенитах, образуют мелкие жилы, выходящие в габбронориты, а также отмечаются в центральной части карбонатитового тела.

Таблица 3

Вариации химического состава двух основных разновидностей карбонатитов

| Разновидность карбонатитов | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | P ₂ O ₅ |
|----------------------------|------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| Высококальциевые | 0,65–14,87 | 2,49–35,42 | 1,11–6,51 | 35,11–51,80 | 1,04–6,22 |
| Магнезио-кальциевые | 1,14–21,74 | 4,39–10,66 | 12,32–14,64 | 23,36–39,40 | 1,72–4,94 |

Доминируют в карбонатитовом теле мелко- и среднезернистые серые и светло-серые полосчатые, реже массивные, иногда с пятнистой структурой карбонатиты, связанные постепенными переходами с более крупнозернистыми лейкократовыми карбонатитами, имеющими розовый и розовато-белый цвет. Возрастные соотношения между этими разновидностями определяются тем, что розовые карбонатиты образуют прожилки, секущие серые карбонатиты. Если решить задачу комплексного использования при обязательном извлечении из карбонатитов меланократовых минералов и апатита, то остаток, сложенный кальцитовой разновидностью, становится наиболее ценным из всех других извлеченных компонентов (табл. 4).

Характерным элементом, присутствующим в кальците тикшеозерских карбонатитов, как и в кальците других массивов, является стронций. Согласно количественным спектральным определениям, содержание стронция в кальците обычно колеблется в пределах 0,4–0,8% и характеризуется слабо асимметричным распределением с максимумом в интервале 0,6–0,8%. Обогащение кальцита стронцием (до 1,58%) установлено лишь в прожилках карбонатитов в экзоконтактных ореолах крупных карбонатитовых тел в цеолитизированных щелочных породах. Отношение Sr/Ba в кальците колеблется около 7–8, что соответствует соотношению этих элементов в ранних карбонатитах многих массивов мира (Карбонатиты, 1969). Массивные карбонатиты часто имеют такситовую текстуру, которая связана с неравномерным распределением магнетита и силикатных минералов, создающих пятнистый рисунок или темный крап на светлом фоне карбонатной породы.

Таким образом, в отличие от карбонатитов Ковдора карбонатиты Тикшеозерского массива обеднены рудной минерализацией и специализированы лишь на фосфор и железо.

Длина основного рудного тела по простиранию 5,4 км, ширина в раздувах до 600 м. Форма карбонатитового тела неправильная, в горизонтальном близповерхностном сечении серповидная с извилистыми контурами. Прогнозные ресурсы (P₁ и P₂) составляют около 900 млн т карбонатитовой руды, около 40 млн т в пересчете на P₂O₅ со средним содержанием 4,3%. Следует отметить, что апатит из карбонатитов Тикшеозерского массива содержит на порядок меньше стронция, чем хибинский, что делает его экологически более пригодным.

Таблица 4

Содержание основных породообразующих минералов в карбонатах, %

| № пробы | № скв. | Интервал опробования, м | CO ₂ | Кальцит CaCO ₃ | P ₂ O ₅ средневзвешенное | Апатит Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F, Cl, OH) |
|---------|--------|-------------------------|-----------------|---------------------------|--|--|
| 1 | 153 | 114,0–128,2 | 31,5 | 71,5 | 4,33 | 10,25 |
| 2 | 155 | 7,6–19,9 | 32,0 | 72,63 | 3,76 | 8,92 |
| 3 | | 19,9–34,4 | 38,5 | 87,40 | 4,13 | 9,78 |
| 4 | | 34,9–48,7 | 37,5 | 85,10 | 4,64 | 10,99 |
| 5 | 157 | 12,0–19,0 | 36,5 | 82,91 | 3,44 | 8,15 |
| 6 | | 28,5–41,0 | 34,6 | 78,60 | 4,54 | 10,76 |
| 7 | | 41,9–55,4 | 30,9 | 68,90 | 3,99 | 9,46 |
| 8 | 166 | 28,0–41,2 | 36,8 | 83,40 | 3,58 | 8,48 |
| 9 | | 42,8–53,0 | 29,5 | 67,0 | 4,51 | 10,69 |
| 10 | | 53,5–64,0 | 35,6 | 80,80 | 5,17 | 12,25 |
| 11 | | 65,0–77,0 | 37,3 | 84,70 | 4,71 | 11,15 |
| 12 | 167 | 20,0–30,5 | 34,9 | 79,20 | 3,84 | 9,11 |
| 13 | | 30,5–42,5 | 37,2 | 84,50 | 4,15 | 9,83 |
| 14 | | 45,0–53,0 | 33,5 | 76,00 | 4,79 | 11,36 |
| 15 | | 53,0–64,0 | 33,3 | 75,60 | 5,28 | 12,51 |
| 16 | | 64,4–78,0 | 32,2 | 73,00 | 3,19 | 7,57 |
| 17 | | 79,8–93,0 | 37,5 | 85,10 | 4,63 | 10,97 |
| 18 | 169 | 70,0–83,0 | 31,0 | 70,50 | 4,06 | 9,62 |
| 19 | | 97,5–109,0 | 32,8 | 74,50 | 5,10 | 12,09 |
| 20 | | 110,6–120,0 | 35,0 | 79,50 | 4,80 | 11,38 |
| 21 | | 147,0–154,9 | 37,2 | 85,84 | 4,20 | 9,95 |
| 22 | | 155,5–173,0 | 33,5 | 76,00 | 4,08 | 9,67 |
| 23 | | 177,5–193,0 | 33,5 | 76,00 | 4,71 | 11,17 |
| 24 | | 194,6–201,0 | 32,5 | 73,80 | 4,98 | 11,80 |
| 25 | | 368,5–378,0 | 32,5 | 73,80 | 4,39 | 10,40 |
| 26 | | 382,0–396,3 | 33,7 | 76,60 | 4,38 | 10,37 |
| 27 | | 399,0–411,2 | 29,0 | 65,80 | 4,99 | 11,84 |
| 28 | | 414,2–426,7 | 37,0 | 84,00 | 3,84 | 9,00 |
| 29 | | 431,5–443,8 | 35,8 | 81,30 | 4,04 | 9,58 |

Редкометалльная минерализация Тикшеозерского массива, как уже подчеркивалось, проявлена слабо, хотя редкие металлы – это основные полезные компоненты карбонатитовых комплексов (Фролов и др., 2003). По данным геохимических исследований (Холодилов, Карпатенков, 1988 г.), в карбонатах отмечается иногда повышенное содержание Nb. Минералом-концентратором этого элемента выступает пирохлор. В апатит-карбонатных рудах Тикшеозерского массива наряду с ниобием (0,05–0,08% в карбонатах из керна скв. 146) отмечено повышенное содержание циркония, достигающее сотых долей процента. Минералами-концентраторами Zr являются циркон, реже бадделейт.

Технология обогащения апатитсодержащего сырья, представленного карбонатными породами

При обогащении апатитсодержащих карбонатитов Тикшеозерского объекта может и должна решаться задача по выделению апатита и доводке кальцитового продукта.

Традиционным методом извлечения апатита из карбонатных руд является флотация. Флотационные свойства апатита связаны с особенностями строения кристаллической решетки, обуславливающими взаимодействие с реагентами-собирателями анионного типа. Наилучшие условия флотации апатита карбок-

сильными собирателями находятся в щелочной области значений pH. Возможно применение в качестве собирателя флотации апатита гидроксамовых кислот (реагент ИМ-50), ацилированных аминокислот, флотола и др., однако в настоящее время в практике обогащения апатитсодержащих руд они не применяются. В качестве депрессора сопутствующих минералов используется жидкое стекло. Разработана и используется группа реагентов амфотерного типа – это таллактамы, N-ацилированные аминокислоты (ААК), флотола-7,9. За рубежом широко используются реагенты этой группы с фирменными названиями OS-100.OLP-40.N-замещенный саркозин (Финляндия) (Тихонов и др., 1983).

По составу карбонатиты близки к известным зарубежным месторождениям карбонатитов Якупиранга в Бразилии и Сиилинъярви в Финляндии. Карбонатиты месторождений Якупиранга и Сиилинъярви сравнительно легко обогащаются, и поэтому эксплуатация месторождения экономически выгодна. Максимальная частота встречаемости содержания P₂O₅ в карбонатитах Тикшеозерского массива приходится на значения содержаний 4–5% (рис. 3).

Слюды в породе представлены магнезио-железистыми разновидностями – флогопитом и биотитом, среди которых преобладает флогопит. Составы слюд приведены в табл. 5.

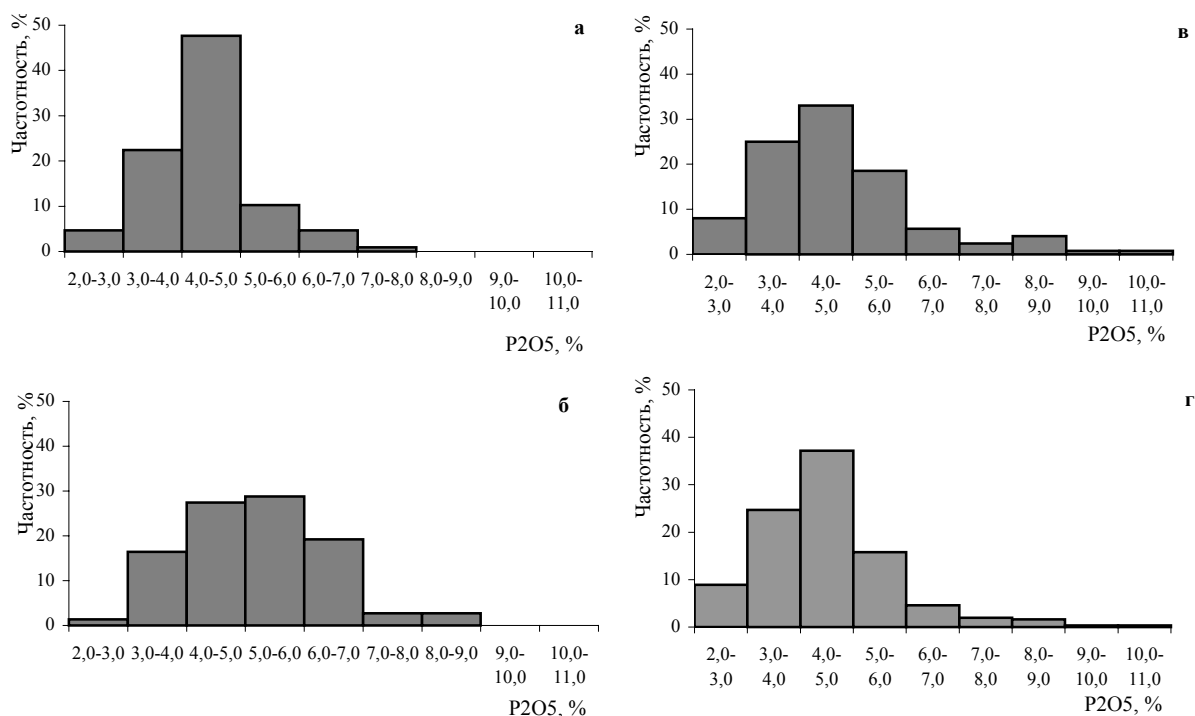


Рис. 3. Гистограммы распределения содержаний P_2O_5 в апатитоносных карбонатах (месторождение Тикшеозеро):

а – профиль 24; б – профиль 30; в – профиль 18; г – весь участок

Таблица 5
Химический состав слюды

| Оксиды | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------|--------|---------|--------|
| SiO ₂ | 37,73 | 31,15 | 36,29 |
| TiO ₂ | 1,08 | 0,99 | 0,78 |
| Al ₂ O ₃ | 12,44 | 9,35 | 13,32 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,80 | 15,10 | 2,27 |
| FeO | 11,52 | 9,81 | 8,15 |
| MnO | 0,062 | 0,10 | 0,05 |
| MgO | 17,14 | 19,22 | 22,37 |
| CaO | 3,08 | 2,80 | 2,80 |
| Na ₂ O | 2,34 | 0,26 | 1,42 |
| K ₂ O | 0,50 | 7,87 | 7,87 |
| H ₂ O | 0,06 | 0,06 | 0,20 |
| ппп | 2,78 | 3,39 | 4,11 |
| P ₂ O ₅ | – | – | – |
| Cr ₂ O ₃ | 0,005 | Не обн. | – |
| V ₂ O ₅ | 0,04 | 0,04 | – |
| CoO | 0,012 | – | 0,012 |
| NiO | 0,016 | 0,07 | 0,008 |
| CuO | 0,013 | 0,003 | 0,004 |
| ZnO | 0,028 | 0,017 | 0,026 |
| LiO | 0,0057 | 0,0021 | 0,0032 |
| Rb ₂ O | 0,0263 | 0,0407 | 0,0481 |
| Cs ₂ O | 0,0019 | 0,0025 | 0,0003 |
| BaO | – | – | – |
| Сумма | 99,62 | 99,68 | 100,21 |

Примечание. 1 – чешуйчатый биотит из скопления в карбонате (скв. 204 на глубине 83 м); 2 – тетраферрифлогопит из карбоната (скв. 204 на глубине 213 м); 3 – тетраферрифлогопит из крупнозернистого карбоната с рихтеритом (скв. 206 на глубине 70 м).

Магнетит в пробах карбоната содержится в заметных количествах. Химические анализы монофракций магнетита и титаномагнетита приведены в табл. 6.

Таблица 6

Состав монофракций магнетита и титаномагнетита

| Оксиды | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------|---------|-------|-------|
| SiO ₂ | 0,24 | 1,45 | 2,05 |
| TiO ₂ | 2,48 | 7,27 | 3,20 |
| Al ₂ O ₃ | 4,22 | 1,67 | 0,18 |
| Fe ₂ O ₃ | 62,43 | 54,28 | 57,98 |
| FeO | 29,33 | 32,81 | 32,38 |
| MnO | 0,018 | 0,33 | 0,09 |
| MgO | 0,47 | 0,76 | 1,06 |
| CaO | – | 0,32 | 1,02 |
| Na ₂ O | 0,07 | – | – |
| K ₂ O | 0,04 | – | – |
| ппп | Не обн. | – | – |
| Zn | – | 0,09 | 0,00 |
| CeO | 0,012 | – | – |
| V ₂ O ₅ | 0,244 | 0,42 | 1,05 |
| NiO | 0,006 | – | – |
| Cr ₂ O ₃ | 0,012 | 0,02 | 0,00 |
| CuO | 0,06 | – | – |
| S _{общ} | – | 0,05 | 0,32 |
| Сумма | 99,61 | 99,44 | 99,17 |

Примечание. 1 – технологическая проба Т-1 (сборная из скв. 41, 48, 56) – апатитоносные карбонаты; 2 – обр. 169/77,7; скв. 169, глубина 77,7 м; 3 – образец 169/421 – скв. 169, глубина 421 м – обособление амфибол-карбонат-магнетитовой породы в карбонате.

Усредненный минеральный состав изученных проб карбонатов следующий: апатит – 9%, карбонаты – 78%, амфибол – 4%, слюды (биотит, флогопит) – 4%, рудные (магнетит, ильменит, пирротин) – 3%, второстепенные и акцессорные минералы представлены сфеном, полевым шпатом, кварцем, пироклором, бадделеитом.

Технологические пробы отбирались по керну скважин 146, 153, 154, 155, 157, 161, 166, 167, 169. Исследования обогатимости карбонатитов выполнялись в тесном содружестве со специалистами ГИГХС (И. С. Малинская, В. Н. Лыгач и др.) с использованием соответствующего оборудования, методик и реагентов. Анализы апатита в ходе экспериментов проводились в аналитической лаборатории Института геологии по методике, разработанной Горным институтом Кольского НЦ РАН.

Разнородность состава карбонатитов в определенных пределах подчеркивается вариациями минерального состава, структурно-текстурными особенностями и другими особенностями. Для получения стабильных качественно-количественных показателей следует предусмотреть усреднение руды перед обогащением.

В практике используются три метода для получения кальцитовых концентратов:

- Прямая селективная флотация кальцита
- Магнитно-флотационная технология
- Обратная флотация кальцита

Селективная флотация кальцита, используемая на месторождении Сиилинъярви (Финляндия), представляется трудноразрешимой задачей для карбонатитов Тикшеозерского массива. Дело в том, что в хвостах сиилинъярвинских карбонатитов содержится не более 24% карбонатов, в то время как в хвостах тикшеозерских карбонатитов по данным лабораторных испытаний – более 80% кальцита. В этом варианте подъем в пенные продукты такой массы сопряжен со сложностью технологической схемы, большими расходами собирателя и соответственно с энергетическими затратами. Флотация кальцита из хвостов апатитовой флотации осуществлялась собирателем ТКЖ с шестью перемешивателями. Концентрат оставался, в определенной мере, загрязнен магнетитом и флогопитом. В связи с этим отмечается повышенное содержание оксидов железа и магния в карбонатном продукте.

По схеме магнитно-флотационного метода хвосты флотации апатита подвергались магнитной сепарации сначала в слабом (анализатор «Углеприбор»), а затем в сильном (полиградиентный сепаратор «Боксмаг-Рапид» или 259-СЭ) магнитных полях. В немагнитной фракции загрязняющими минералами оставались флогопит, амфиболы, пирит и др. В этих

условиях было принято решение флотировать темноцветные (слюды) собирателем АНП, эффективно действующим в кислой среде с pH 4–5. Для создания pH использовалось сернокислородное железо, являющееся одновременно и депрессором кальцита. К недостаткам магнитно-флотационного метода следует отнести сложности и энергетические затраты по введению дополнительной операции флотации, а также изменение среды от щелочной до кислой во флотационной пульпе при флотационном удалении темноцветных минералов.

Наиболее предпочтительным является метод обратной флотации кальцита, когда в пенный продукт извлекаются силикатные минералы. В качестве собирателя флотации силикатов может быть использован реагент из группы аминацетатов (флотигам). По методу обратной флотации прорабатывался ряд вариантов флотационной схемы.

В целом способ обратной флотации кальцита обладает определенной технологической простотой исполнения, по сравнению с двумя другими методами. В результате проведенных исследований были получены кальцитовые концентраты, содержащие 92–97% кальцита, что соответствует требованиям к качеству сырья для производства строительной извести, силикатного кирпича, известкования кислых почв, а также известняка, используемого для получения глинозема при переработке нефелина. Извлечение кальцита в концентрат составляет 78%. С целью получения более чистого кальцитового концентрата камерный продукт обратной флотации после сушки подвергался сухой магнитной сепарации.

В таком концентрате магния не обнаружено, P_2O_5 – 0,36–0,47%, S – 0,02%, SiO_2 – 0,16%, железа – около 1%. Практически удалось извлечь все слюды, на что косвенно указывает полное отсутствие окиси магния в составе кальцитового концентрата. Для выделения магнетитового концентрата может быть применена двухстадийная магнитная сепарация в слабом поле.

Схемы комплексного обогащения апатитонесущих карбонатитов и комплексного использования карбонатитов Тикшеозерского месторождения приведены на рис. 4 и 5, а сравнительные данные химического состава кальцитовых продуктов и основные технологические показатели – в табл. 7.

Таблица 7

Качественно-количественные показатели обогащения карбонатитов

| Продукт | Содержание в руде | Размер зерен, мм | Выход | P_2O_5 | | CO_2 | |
|--------------------|-------------------|------------------------------------|-------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | Содержание | Извлечение | Содержание | Извлечение |
| Апатит по P_2O_5 | 4,31 | 0,1×0,2, до 2×2 | 8,65 | 38,34 | 76,95 | | |
| Кальцит | 79,72 | Мелкие – 0,5–1,0 Крупные – до 3 | 66,10 | 0,47 | 7,21 | 35,80 | 78 |
| Магнетит | 4,03 | | 4,20 | 0,1 | 0,1 | | |
| Флогопит | 5,60 | | 2,14 | 0,68 | 0,34 | | |
| Шлам | | | 15,65 | 2,80 | 10,17 | | |
| Отвальные хвосты | | | 3,26 | 6,91 | 5,23 | | |
| Руда | | | 100 | 4,31 | 100 | | 100 |

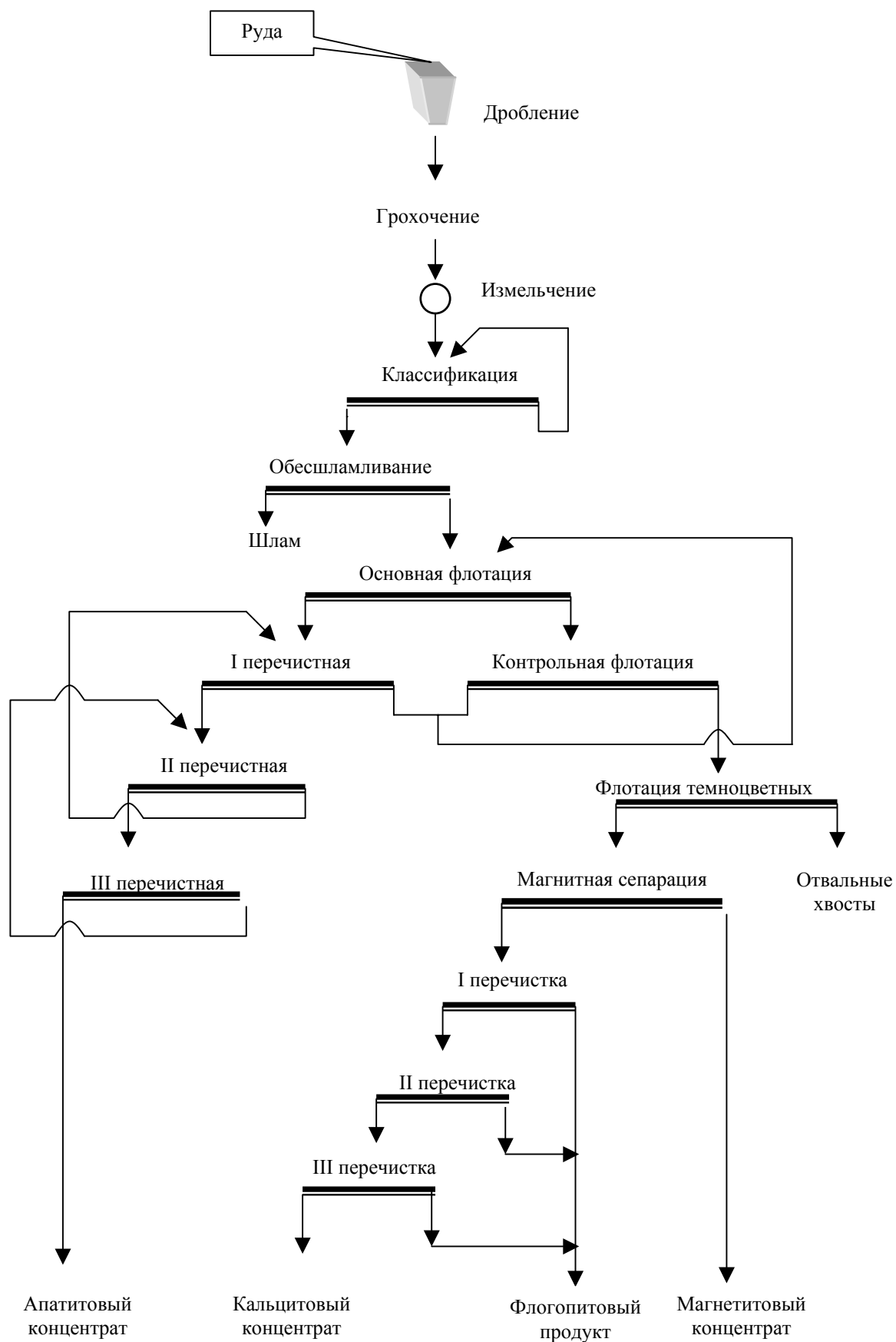


Рис. 4. Технологическая схема комплексного обогащения апатитоносных карбонатитов

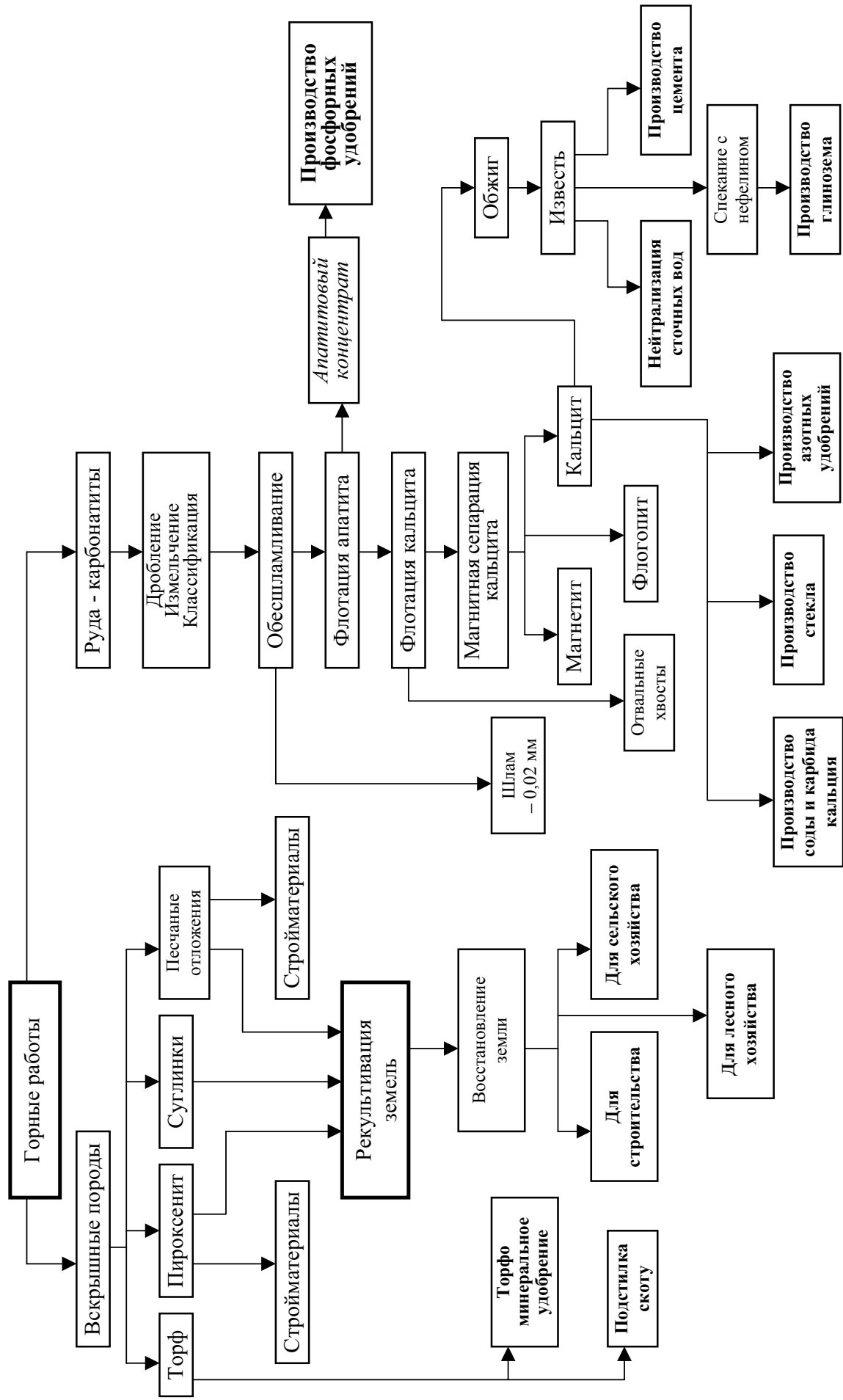


Рис. 5. Принципиальная схема комплексного использования карбонатов Тикшеозерского месторождения

Таблица 8

Капитальные вложения

| Объекты | Годовая производительность – 2 млн т | | | |
|--|--------------------------------------|---------------|---------------------------|--------|
| | Оборудование, млн руб. | СМР, млн руб. | Всего с прочими затратами | |
| | | | млн руб. | млн \$ |
| 1. Геологоразведочные работы | | | 5 | 0,19 |
| 2. Строительство карьера | 470 | 370 | 840 | 31,12 |
| 3. Горновскрышные работы | | | 6,5 | 0,24 |
| 4. Обогащительная фабрика, включая хвостохранилище | 540 | 260 | 800 | 29,6 |
| 5. Строительство цементного завода | 3100 | 950 | 4050 | 150 |
| 6. Транспорт и АТЦ | 40,03 | 14,3 | 54,33 | 2,01 |
| 7. Сооружение ЛЭП 220 кВ, 40 км | 40 | 36,96 | 76,96 | 2,85 |
| 8. Строительство ж/д, 40 км | 2000 | 1780 | 3780 | 140 |
| Итого | 6190,03 | 3411,26 | 9612 | 356,01 |

По данным настоящих исследований суммарный выход апатитового и кальцитового концентратов из карбонатных пород составляет в среднем 74–75%.

При условии выделения флогопит-биотитового продукта этот показатель возрастает, что позволяет прогнозировать малоотходную разработку апатит-карбонатных пород на Тикшеозерском массиве. Качество получаемого при обогащении кальцитового продукта определяется применяемой технологией и регулируется увеличением числа перемесочных операций при выделении апатита до 6.

Экономическая оценка (укрупненные технико-экономические расчеты)

Выполнены укрупненные технико-экономические расчеты по определению показателей добычи, обогащения руды с получением магнетита, флогопита, кальцита и апатитового концентрата, а также производства цемента.

Расчеты производились в ценах 2006 г. с применением коэффициентов-дефляторов и с переводом в долларовое исчисление по курсу 1\$ = 27 руб. Для расчета стоимости товарной продукции приняты цены с учетом текущих цен на российском и мировом рынках (апатитовый концентрат – 45 \$/т; флогопитовый продукт – 400 \$/т, магнетит – 2 \$/кг, цемент – 95 \$/т). Расчеты строительства карьера, обогащительной фабрики, цементного завода приняты по аналогии с действующими предприятиями соответствующей мощности. Стоимость сооружения линии электропередачи определена по аналогии и рекомендациям компании «ЭЛСИ» «Технико-экономическое сравнение вариантов строительства ВЛ 220 кВ при использовании традиционных опор типа П220-3 и опор ПС220П». В расчет стоимости 1 км оборудованной железной дороги приняты официальные данные оценки строительства ОАО «РЖД».

В рассматриваемом варианте годовая производительность карьера по добыче руды условно определена как 2 млн т.

Технико-экономическая оценка комплексного безотходного использования карбонатов на базе Тикшеозерского месторождения состоит из шести блоков расчета капитальных затрат:

1. Затраты на геологоразведочные работы;
2. Затраты по строительству и развитию карьера;
3. Добыча вскрыши;

4. Строительство и работа обогащительной фабрики;
5. Строительство цементного завода;
6. Затраты на создание хвостохранилища.

Сводка потребности в капитальных вложениях для освоения Тикшеозерского месторождения в ценах 2006 г. и инвестиционные расходы в прогнозных ценах приведены в табл. 8.

На основании расчета необходимых капиталовложений произведен расчет инвестиционных расходов на проект, а в табл. 9 представлены основные технико-экономические показатели.

Таблица 9

Основные технико-экономические показатели

| Показатель | Ед. изм. | Величина |
|---|---------------------|----------|
| 1. Добыча руды | тыс. т | 2000 |
| 2. Вскрышные работы | тыс. м ³ | 4000 |
| 3. Годовой выпуск продукции | | |
| апатитовый концентрат | тыс. т | 150 |
| флогопитовый продукт | тыс. т | 20 |
| магнетит | тыс. т | 10 |
| цемент | тыс. т | 1000 |
| 4. Стоимость товарной продукции за период | млн \$ | 130 |
| 5. Инвестиционные расходы за период | млн \$ | 395,81 |
| 5.1. Капитальные вложения, в т. ч. | млн \$ | 356,01 |
| геологоразведочные работы | млн \$ | 0,19 |
| строительство карьера | млн \$ | 31,12 |
| горновскрышные работы | млн \$ | 0,24 |
| обогащительная фабрика | млн \$ | 29,6 |
| строительство цементного завода | млн \$ | 150 |
| транспорт и АТЦ | млн \$ | 2,01 |
| сооружение ЛЭП 220 кВ | млн \$ | 2,85 |
| строительство ж/д, 40 км | млн \$ | 140 |
| 5.2. Затраты на замену оборудования | млн \$ | 17,8 |
| 5.3. Оборотные средства | млн \$ | 22 |
| 6. Себестоимость в текущих ценах | | |
| добычи 1 т руды | \$ | 11,58 |
| обогащения 1 т руды | \$ | 3,2 |
| производства 1 т цемента | \$ | 18,26 |
| 7. Эксплуатационные расходы за период | млн \$ | 55,18 |
| 8. Затраты на 1 \$ товарной продукции | \$ | 0,42 |
| 9. Балансовая прибыль за период | млн \$ | 74,82 |
| 10. Чистая прибыль за период | млн \$ | 57,82 |
| 11. Амортизация за период | млн \$ | 3,33 |
| 12. ЧДД | млн \$ | 47,31 |
| 13. Индекс прибыльности | | 1,02 |
| 14. Срок окупаемости простой | лет | 6,8 |
| 15. Срок окупаемости дисконтированный | лет | 12,1 |
| 16. Рентабельность | % | 35 |

Заключение

Комплексное освоение недр в настоящее время находится на начальном этапе формирования и уточнения самого понятия, сущности, особенностей, выработки путей, принципов, технологических, организационных, экономических подходов и формулирования научных проблем, поэтому сделанный вывод о необходимости комплексного освоения Тикшеозерского объекта не может быть совершенно ясным и прозрачным, но он весьма перспективный. Тикшеозерский узел может стать основой формирования крупного, малоотходного горнопромышленного узла в Северной Карелии, выгодного в экономическом отношении, что на практике станет примером формирования эффективной системы недропользования на основе комплексного освоения и использования всей совокупности ресурсов недр.

Карбонатное сырье, карбонатная составляющая апатит-карбонатных руд рудопоявления Карбонатитовое, является основным видом минерального сырья Тикшеозерского массива. С другой стороны, по прогнозам потребность на внутреннем рынке в апатитовом концентрате будет значительно расти. Если

обращаться к апатиту как товарному продукту, получаемому из тикшеозерских карбонатитов, то этот продукт будет иметь ряд качественных преимуществ по сравнению с рыночным апатитовым концентратом, выпускаемым ОАО «Апатит».

Полученные показатели экономической эффективности проекта свидетельствуют об инвестиционной привлекательности проекта в настоящих экономических условиях для горнодобывающей промышленности. По масштабам запасов – обеспеченности предприятия сырьевой базой и качеству сырья – потребительским свойствам ресурсы оцениваются по группе ожидаемой средней рентабельности.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства промышленности и природных ресурсов РК подпрограммы «Минерально-сырьевые ресурсы» на 2006 г. республиканской целевой программы «Экология и природные ресурсы Республики Карелия на 2004–2010 годы» (контракт 2-2006), РФФИ-Север (грант 05-05-97524с) и ОНЗ РАН по направлению 3: Техногенное преобразование недр Земли: развитие теоретических основ эффективного использования и сохранения георесурсов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бархатов А. В., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. и др. Технологические исследования карбонатитов Тикшеозерского массива // Минеральное сырье Лоухского района. Петрозаводск, 1991. С. 20–35.
- Богачев А. И., Слюсарев В. Д., Кравченко А. Н. и др. Новый тип щелочного протерозойского магматизма в Карелии // ДАН СССР. 1976. Т. 230, № 5. С. 1169–1172.
- Карбонатиты / Под ред. О. Таттла и Дж. Гиттинса. М., 1969. 486 с.
- Кирнарский Ю. М., Осокин А. С., Шолохнев В. В., Холодильников Н. Р. Новые данные о минеральном составе пород Тикшеозерского массива (Северная Карелия) // Новое в минералогии Карело-Кольского региона. Петрозаводск, 1990. С. 39–58.
- Клюнин С. Ф., Паничев В. Ф. Геологическое строение и полезные ископаемые Панаярвинской зоны и ее обрамления: Отчет о результатах групповой геологической съемки и геологического доизучения площади м-ба 1 : 50 000, литохимических общих поисков м-ба 1 : 100 000 и общих поисков м-ба 1 : 10 000 – 1 : 25 000 апатитовых руд (Северо-Карельский объект), проведенных в 1981–1987 гг. Листы (Q-36-VII, VIII, XIII, XIX). 1988. Фонды ЦКГЭ.
- Клюнин С. Ф., Сафронова Г. П. О карбонатитах Тикшеозерского массива // Оперативно-информ. материалы ИГ Карел. фил. АН СССР за 1984 г. Петрозаводск, 1984. С. 8–13.
- Ларичкин Ф. Д. Оценка экономической эффективности комплексного использования минерального сырья. Апатиты, 2005. 143 с.
- Марченко Е. Я. и др. Черниговский и Силинъярвинский карбонатитовые комплексы докембрия Восточно-Европейской платформы // Тез. докл. IV регион. петрограф. совещ. по европейской части СССР. Петрозаводск, 1987. С. 50.
- Русаков Н. Ф. и др. О металлогенической специализации карбонатитового комплекса южных проявлений черниговской тектонической зоны (Приазовье) // Тез. докл. IV регион. петрограф. совещ. по европейской части СССР. Петрозаводск, 1987. С. 113–114.
- Самойлов В. С. Геохимия карбонатитов. М., 1984. 191 с.
- Сафронова Г. П. Породообразующие карбонаты и апатит Тикшеозерского массива // Новое в минералогии Карело-Кольского региона. Петрозаводск, 1990. С. 25–39.
- Сафронова Г. П., Гаврилова М. М. О карбонатитах Тикшеозерского массива (данные изотопного анализа кислорода карбонатитов) // Металлогения Карелии. Петрозаводск, 1982. С. 161–167.
- Тихонов С. А., Еременко Г. К., Попова Р. М., Люшня Л. М. Вещественный состав и обогатимость бедных апатит-карбонатных комплексных руд. М., 1983. 38 с.
- Фролов А. А., Толстов А. В., Белов С. В. Карбонатитовые месторождения России. М., 2003. 403 с.
- Холодильников Н. Н., Карпатенков В. Н. Отчет о результатах поисковых работ на апатит и другие полезные ископаемые в пределах Тикшеозерской группы массивов Северной Карелии за 1985–1988 гг. 1988. Фонды ЦКГЭ.
- Щитцов В. В. Изотопно-геохимическое изучение карбонатитов Тикшеозерской группы массивов (Северная Карелия) // Тез. докл. XIV семинара «Геохимия и физико-химическая петрология магматизма». М., 1988.
- Щитцов В. В., Цюнь О. В., Желдаков Ю. А. Распределение U-Th-Pb и редкометалльных элементов в апатитах Карелии // Минералогический журнал. 1991. Т. 13, № 4. С. 92–98.