

## МИНЕРАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО УЛЬТРАМАФИТ-ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОГО ИНТРУЗИВНОГО ТИКШЕОЗЕРСКО-ЕЛЕТЬОЗЕРСКОГО КОМПЛЕКСА (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ, РОССИЯ)

*Щипцов В. В.<sup>1,2</sup>, Бубнова Т. П.<sup>1,2</sup>, Фролов П. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

<sup>2</sup> *Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск*

Данные о минеральном потенциале палеопротерозойского Тикшеозеро-Елетьозерского ультраосновного-щелочно-карбонатитового интрузивного комплекса, расположенного в Северной Карелии, получены в результате геолого-петрологических, минералого-геохимических, геохронологических и минерагенических исследований среднепалеопротерозойского магматизма данной территории [9, 10, 11, 12, 18, 26, 28]. Специфика рассматриваемого комплекса заключается в том, что этот комплекс принадлежит в возрастном отношении к наиболее древним образованиям мира. При оценке минерагенического потенциала выявляется данная специализация, например, относительная «стерильность» по отношению к редким металлам и РЗЭ.

### **Щелочные массивы и карбонатиты докембрия**

Изучение щелочных магматических пород и карбонатитов началось в начале XX века. Карбонатиты были открыты и описаны W.C. Brogger [17] в массиве Фен (Норвегия), геологически связанном с Фенноскандинавским щитом. Это побудило исследователей начать геологическое изучение эндогенных горных пород на Кольском полуострове в России.

А. А. Кухаренко и др [4] опубликовали первый в России петрологический и минералого-геохимический обзор карельского и кольского щелочных комплексов пород. Обширные обзоры щелочных пород и карбонатитов Северной и Южной Америки, стран бывшего СССР

приведены в работах [19, 30]. Россия занимает первое место в мире по распространенности щелочных пород и карбонатитов.

Особое место в мировой иерархии занимает массив Палабора в ЮАР [16]. Этот массив относится к возрастной группе палеопротерозойского комплекса карбонатитовых месторождений в ЮАР, расположен в северо-восточной части провинции Трансвааль, в 400 км к северо-востоку от Йоханнесбурга. Месторождение площадью более 28 км<sup>2</sup> сложено нижнеархейскими гранитными гнейсами, прорванными почти вертикальными штокверковыми телами апатитоносных пироксенитов, карбонатитов и щелочных пород. Для комплекса Палабора проведено комплексное определение U-Pb возраста по циркону и бадделлиту. Различные фазы были синхронно отложены в 2060 млн лет [32]. Комплекс имеет высокий исходный изотопный состав Sr и низкий исходный изотопный состав Nd и Hf. Первичная карбонатитовая магма образовалась из обогащенной мантии. Карбонатитовый магматизм Палабора был инициирован мантийным плюмом, связанным с событием формирования комплекса Бушвельд.

Вызванный в мире интерес к щелочным массивам и карбонатитам из-за их высокого экономического потенциала расширил представления об областях распространения щелочного магматизма. Щелочные породы были найдены на Йилгарнском кратоне Австралии [30], в кратонах Индии [20] и других докембрийских районах мира.

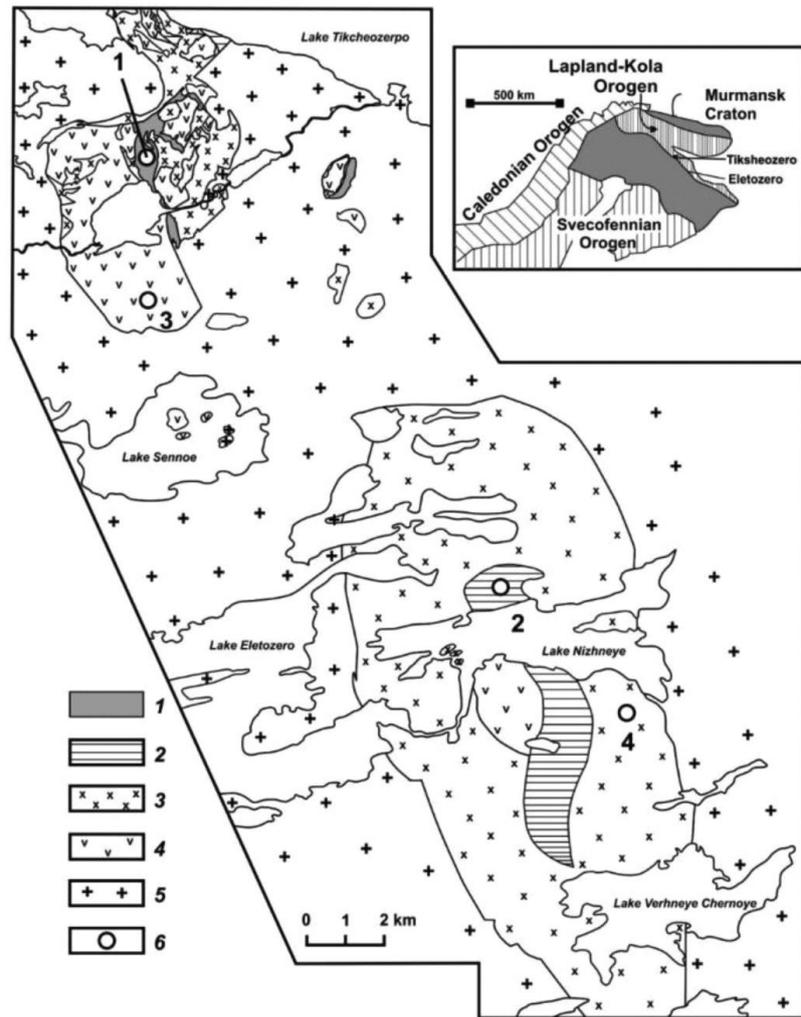


Рис. 1. Схема геологического строения Тикшеозеро-Елетозерского ультрабазит-щелочно-карбонатитового комплекса. Составлена В.В. Щипцовым и Н.И. Щипцовой с использованием материалов [1]

1 – карбонатиты; 2 – нефелин и щелочные сиениты; 3 – породы основного состава; 4 – породы ультраосновного состава; 5 – гранитоиды; 6 – месторождения: 1 – Карбонатитовое; 2 – оз. Нижнее; 3 – Шапкозерское; 4 – Суриваара

На территории Финляндии архейский интрузивный комплекс с апатитсодержащими карбонатитами был описан К. Puustinen [25] (карбонатитовый комплекс Siilinjärvi, Восточная Финляндия). На протяжении нескольких десятилетий на месторождении Siilinjärvi добываются апатитовые руды [24]. Их возраст 2.6 млрд лет [23].

В северной части Фенноскандинавского щита известны среднепалеопротерозойские ультраосновно-щелочные и карбонатитовые интрузии (финская Лапландия – Latvajoki, Petaikko-Suvantovaara, Kortajarvi и Iivaara с возрастом около 1880–1800 млн лет [21; 22] и Кольский полуостров – докембрийские ультраосновные фойдолиты и карбонатиты в массиве Гремяха-Вырмес [14] и ультраосновной массив р. Иоканга [5]), имеющие минерагеническое сходство с Елетозерским и Тикшеозерским массивами [29] (рис. 1). Палеопротерозойские массивы многофазны и представляют собой смесь основных и щелочных мантийных магм [24].

Тикшеозерский ультрамафит-щелочно-карбонатитовый (~2000 Ma) [18] и Елетозерский сиенит-габбровый комплекс (2086 ± 30 Ma) [26] входят в состав среднепалеопротерозойской Ятулийско-Людиковийской крупной изверженной провинции в восточной части Фенноскандинавского щита [26].

### Промышленные минералы

#### Тикшеозерско-Елетозерского комплекса

История открытия объектов началась в первой половине XX века. Конкретные шаги по практической оценке промышленных минералов относятся к более позднему периоду – Елетозерский массив [1, 2] и Тикшеозерский массив [3, 8].

Елетозерский массив представляет собой концентрически зональное тело эллиптической формы с изгибной осевой линией. Он занимает площадь около 100 км<sup>2</sup>, протянувшись на 18–20 км по длинной оси и на 6–8 км по короткой. Массив был открыт Ю. С. Неуструевым в 1936 году. В 1954–

1956 годах было осуществлено картирование, поиски и оценка титановых руд Суриваары [2]. Геология, петрография и рудный потенциал массива изучались исследователями Геологического отдела Карельского отделения Академии наук СССР в 1954–1959 годах. Результаты этих исследований представлены в монографии [1].

Тикшеозерский комплекс площадью около 24 км<sup>2</sup> сечет архейские гранитогнейсы и раннепалеопротерозойские граниты. В 1972 г. массивы пироксенитов на юго-западном берегу озера Тикшеозеро были изучены коллективом Института геологии КарНЦ АН СССР [8, 3], выявлен новый тип щелочного магматизма с ассоциацией оливинитов, тералитов и пород якупирангит-уртитовой серии, ранее неизвестный для докембрия Карелии. Геологами «Севзапгеологии» были обнаружены карбонатиты.

### Титаномагнетитовые и ильменитовые руды

Титаномагнетитовый минеральный тип широко развит в сиенит-габбровых интрузивных комплексах Елетьозера, что является важным ресурсом Fe и Ti. Известно, что в настоящее время существует проблема происхождения такого типа. Одна группа исследователей связывает образование оксидных руд с осаждением плотного титаномагнетита в исходной феррогабброидной магме [15], другая – с ликвацией высокожелезистой жидкости при кристаллизации Fe-Ti-базальтовой магмы [33].

Титановые руды на Елетьозерском массиве отмечены на нескольких участках. В габброидах всего массива выделены два рудных поля – Западное и Восточное [1]. Рудные тела представлены вкрапленными и массивными рудами. Вкрапленные Fe-Ti оксидные руды образуют согласные с общей расслоенностью линзы и слои. Массивные руды развиты в подчиненном количестве; они образуют слои и линзы, а также секущие жилы. Наличие в Fe-Ti оксидах повышенных содержаний Nb и Ta позволяет рассматривать эти руды в качестве комплексных.

В рудном поле «Западное» выявлены существенно титаномагнетитовые в мелкозернистом и крупнозернистом габбро, ильменит-титаномагнетитовые в среднезернистом габбро (апатит-титаномагнетит-ильменитовые рудные проявления в комплексах серии ортоклаз-слюдистого габбро и слюдистого габбро-перидотита. Одним из таких участков является Кукаваара в северной оконечности Елетьозерского массива. Титаномагнетитовый минеральный тип руд связывается с сидеронито-

выми клинопироксенитами. Здесь по данным ранних работ [2] определены содержания TiO<sub>2</sub> в клинопироксенитах от 3 до 8%.

Рудное поле «Восточное» (Суриваара) Елетьозерского массива является наиболее перспективным. В 50-е годы здесь были обнаружены и опробованы несколько залежей с различной минерализацией, представленной титаносодержащим магнетитом и ильменитом. Выделены 5 залежей – «Северная», «Западная», «Центральная», «Параллельная» и «Главная» (рис. 2).

Субмеридиональная залежь «Северная» представлена меланократовым оливиновым габбро, перидотитами и пироксенитами с крутым падением на запад, имеет мощность около 100 м. В висячем боку залежи установлены ильменит-титаномагнетитовые руды, в лежачем – титаномагнетит-ильменитовые. Основная часть запасов сосредоточена

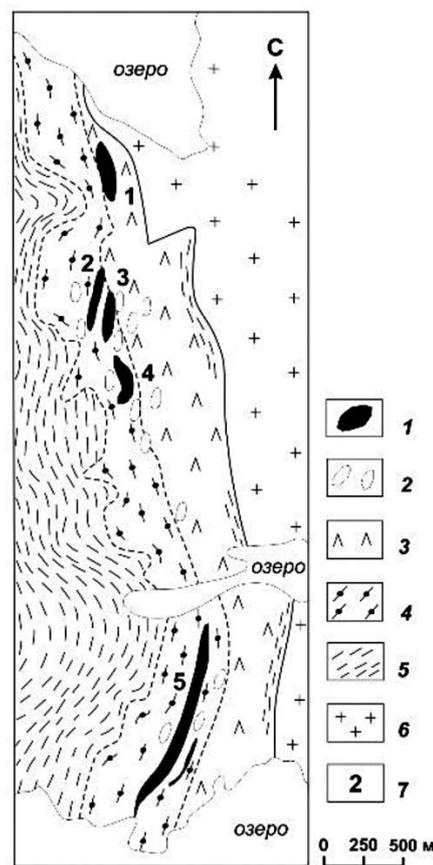


Рис. 2. Геологическая схема рудного поля Суриваара (по материалам [1])

1 – титаномагнетитовые и ильменитовые руды (руды оливиновых габбро, перидотиты, слюдистые перидотиты, амфиболиты); 2 – щелочные и нефелиновые сиенитовые пегматиты; 3 – слюдяные габбро, слюдяные перидотиты; 4 – крупнозернистые габбро; 5 – ортоклазовые лейкократовые габбро, средне- и мелкозернистые габбро; 6 – гранодиориты; 7 – рудные залежи: 1 – Северная; 2 – Западная; 3 – Центральная; 4 – Параллельная; 5 – Главная

в залежи «Главная». Она сложена рудными оливиновыми крупнозернистыми и мелкозернистыми габбро, перидотитами и пироксенитами. Рудная залежь имеет падение на северо-запад под углами 40–75°. Максимальная рудоносность приурочена к лежащему боку и представлена титаномагнетит-ильменитовым типом.

По содержанию диоксида титана руды подразделяются на три сорта: 1 сорт – выше 12%

TiO<sub>2</sub>; 2 сорт – 8–12% TiO<sub>2</sub>; 3 сорт – 5–8% TiO<sub>2</sub>. Химический и минеральный состав этих руд охарактеризован в более ранней работе [12]. По минеральному составу рудные минералы представлены магнетитом, титаномагнетитом и ильменитом. Из других минералов главными являются полевой шпат, оливин, амфибол. Особенности ильменитовых руд месторождения Суриваара показаны на рисунке 3.

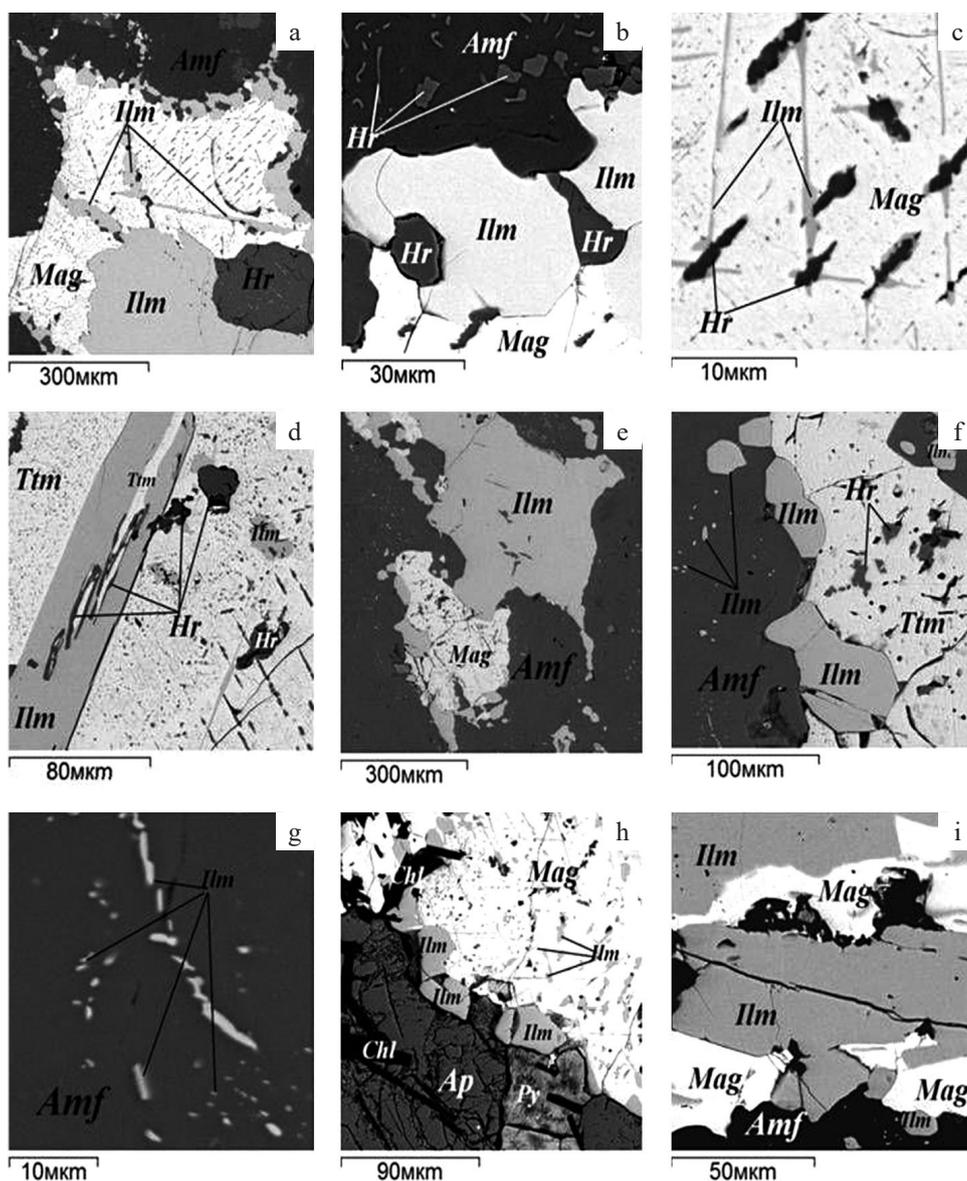


Рис. 3. Изображения в отраженных электронах (BSE). Руды Суриваары: (а) ильменит в виде отдельных неидеальных зерен разного размера и структуры разложения в магнетите; (б) срастание герцинит-ильменита на границе магнетита и амфибола; (с) мелкодисперсная структура разложения в магнетите, состоящая из удлиненного ильменита, а также в виде вкраплений эмульсии; (д) ангидридные включения ильменита и герцинита различных размеров в титаномагнетите; (е) большое срастание в амфиболе ильменита и титаномагнетита; (ф) ильменит неправильной формы; (г) микровкрапление ильменита в амфиболе; (h) ильменит в виде мелких автоморфных зерен на границе зерен апатита и магнетита и микронных вкраплений в магнетите; (i) сложный ильменит-магнетитовый агрегат. Сокращения по минералам: Amf – амфибол, Ilm – ильменит, Mag – магнетит, Hr – герцинит, Ttm – титаномагнетит, Chl – хлорит, Ap – апатит. а – d, i – среднезернистый габбро, е – h – метагаббро

## Щелочные сиениты

Щелочные сиениты (месторождение оз. Нижнее) (рис. 1, 4) состоят главным образом из микроклина  $Ab_{7.5-8.5}-Or_{91.5-92}$ , на долю которого приходится около 70–75% объема. Он образует таблитчатые кристаллы, часто с микродвойниковой решеткой и пертитовой структурой, обусловленной наличием тонких выделений альбита. Наряду с этим, альбит состава  $Ab_{99.6}An_{0.2}Or_{0.2}$  образует и более крупные самостоятельные зерна; в целом на долю альбита приходится 15–20% объема. Нефелин в породах развит неравномерно – от практического отсутствия до 5–6 и более %; он концентрируется локально. Содержания темноцветных минералов также варьируют от нескольких процентов до 15–20%. Среди них преобладают эгирин и щелочной амфибол ряда арфведсонита, который часто замещает эгирин; в подчиненном количестве встречены железистый Ti-биотит ряда лепидомелана, магнетит и титанит.

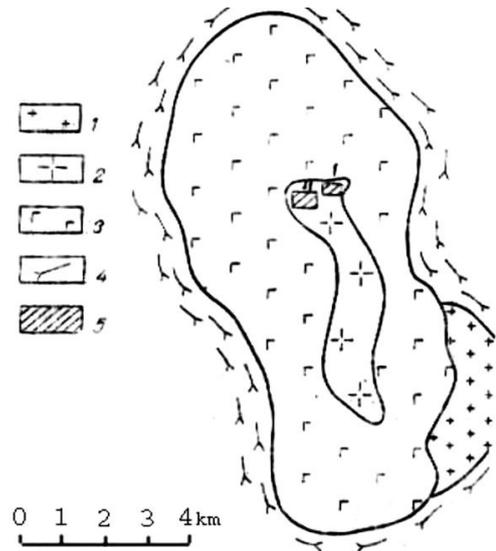


Рис. 4. Карта-схема с перспективными участками (месторождение оз. Нижнее)

Условные обозначения: 1 – гранит; 2 – щелочной сиенит; 3 – габброид; 4 – комплекс основания; 5 – детали участки

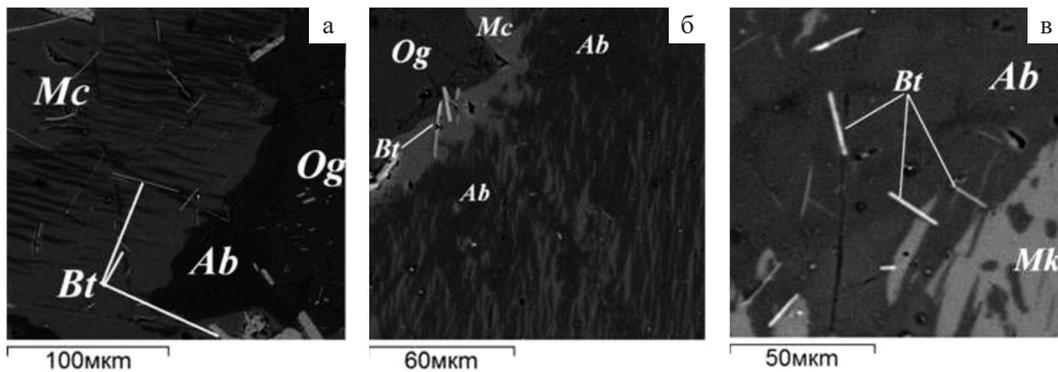


Рис. 5. Изображения в отраженных электронах (BSE) показывающие микроструктурные особенности щелочных сиенитов: (а) микроклин с пертитовыми вкраплениями альбита, включениями биотита и каймой плагиоклаза вдоль границы зерен; (б) микроклин-пертитовое срастание; (в) микровключения биотита в альбите. Mc – микроклин, Bt – биотит, Ab – альбит, Og – олигоклас

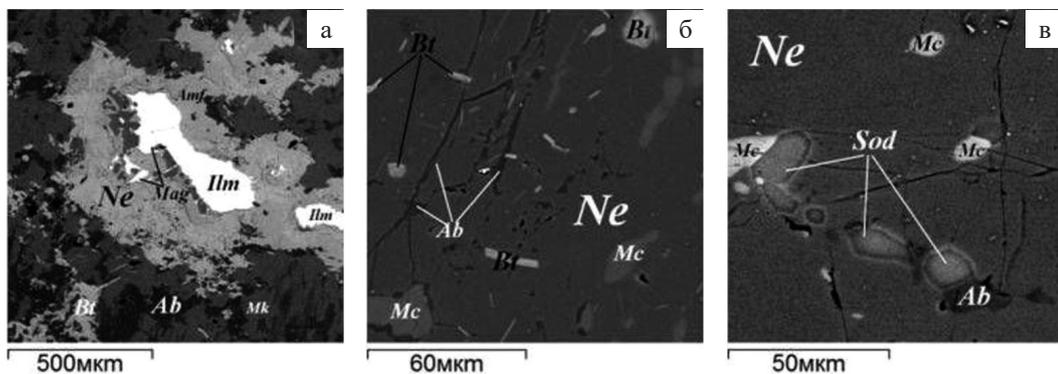


Рис. 6. Изображения в отраженных электронах (BSE), показывающие микроструктурные особенности нефелина: (а) удлиненное зерно нефелина с неровными границами, наблюдается замещение микроклина; (б) микроминеральные включения биотита и полевых шпатов в нефелине; (в) микроминеральные включения микроклина, альбита и содалита в нефелине. Mc – микроклин, Bt – биотит, Ab – альбит, Ne – нефелин, Ilm – ильменит, Amf – амфибол, Mag – магнетит

Химический и минеральный составы Елетьозерских сиенитов приводятся в работе [12]. При электронно-микроскопическом исследовании выявлены детали минеральных включений в щелочных сиенитах (рис. 5, 6).

При обогащении методом многостадийной электромагнитной сепарации получены высококачественные концентраты, состоящие из микроклина и нефелина. Нефелин-полевошпатовые концентраты сопоставимы по качеству с продуктами из нефелиновых сиенитов компании Stjern'у (Норвегия).

### Карбонатиты

Карбонатиты месторождения «Карбонатитовое» размещены к югу от береговой зоны оз. Тикшеозеро. Они охватывают площадь около 2 км<sup>2</sup>. Длина основного рудного тела по простиранию 5.4 км, ширина в раздувах до 600 м. Форма карбонатитового тела неправильная, в горизонтальном близповерхностном сечении с извилистыми контурами [10] (рис.7).

Для карбонатитов показательным критерием являются отрицательные локальные гравиметрические аномалии. Карбонатиты Тикшеозерского массива занимают секущее положение по отношению к общей структуре массива. С вмещающими силикатными породами карбонатиты имеют резкие контакты с выраженными экзоконтактовыми ореалами развития катофорито-карбонатных метасаматитов 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.

Изотопные исследования кальцитов подтверждают эндогенный источник. Впервые такой вывод сделан Г.П. Сафроновой [7]. Общие вариации изотопных значений не выходят за пределы вариаций, установленных для карбонатитов гипабиссальной глубины формирования [6].

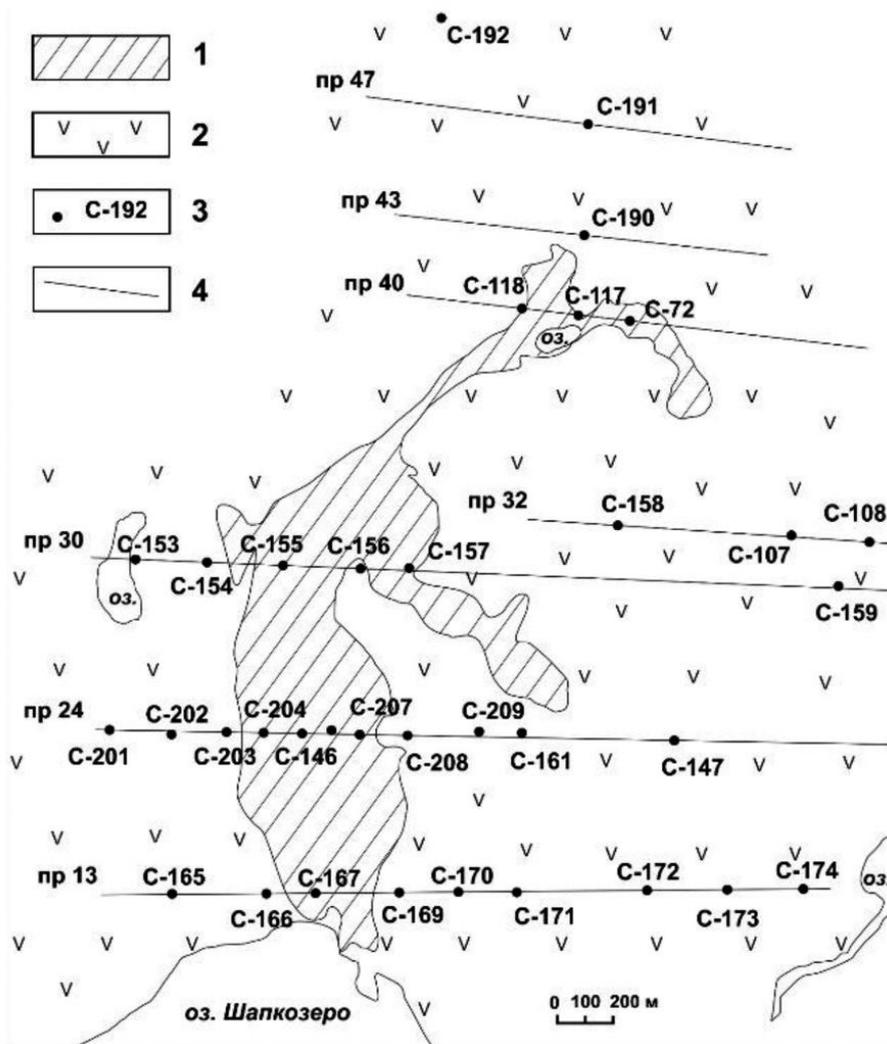


Рис. 7. Месторождение «Карбонатитовое» и разрезы (три профиля – № 30, № 24, № 13). Условные обозначения: 1 – карбонатиты; 2 – ультрабазиты и базиты. Примечание: скважины и их номера по профилям отмечены черными кружками. Составитель В. В. Щипцов

Формирование апатита было двухстадийным: в основную интрузивную стадию и стадию метасоматоза (автометасоматоза). 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. Резко преобладают кальцитовые карбо-

натиты, подчиненное значение имеют доломит и анкерит.

Последние характерны для флангов карбонатитового тела и развиваются в виде полос мощностью до 5 м среди кальцитовых карбонатитов или на контакте карбонатитовых тел с магнетиальными вмещающими породами. На рис. 8 изображены в отраженных электронах формы апатитовой минерализации в карбонатах месторождения «Карбонатитовое».

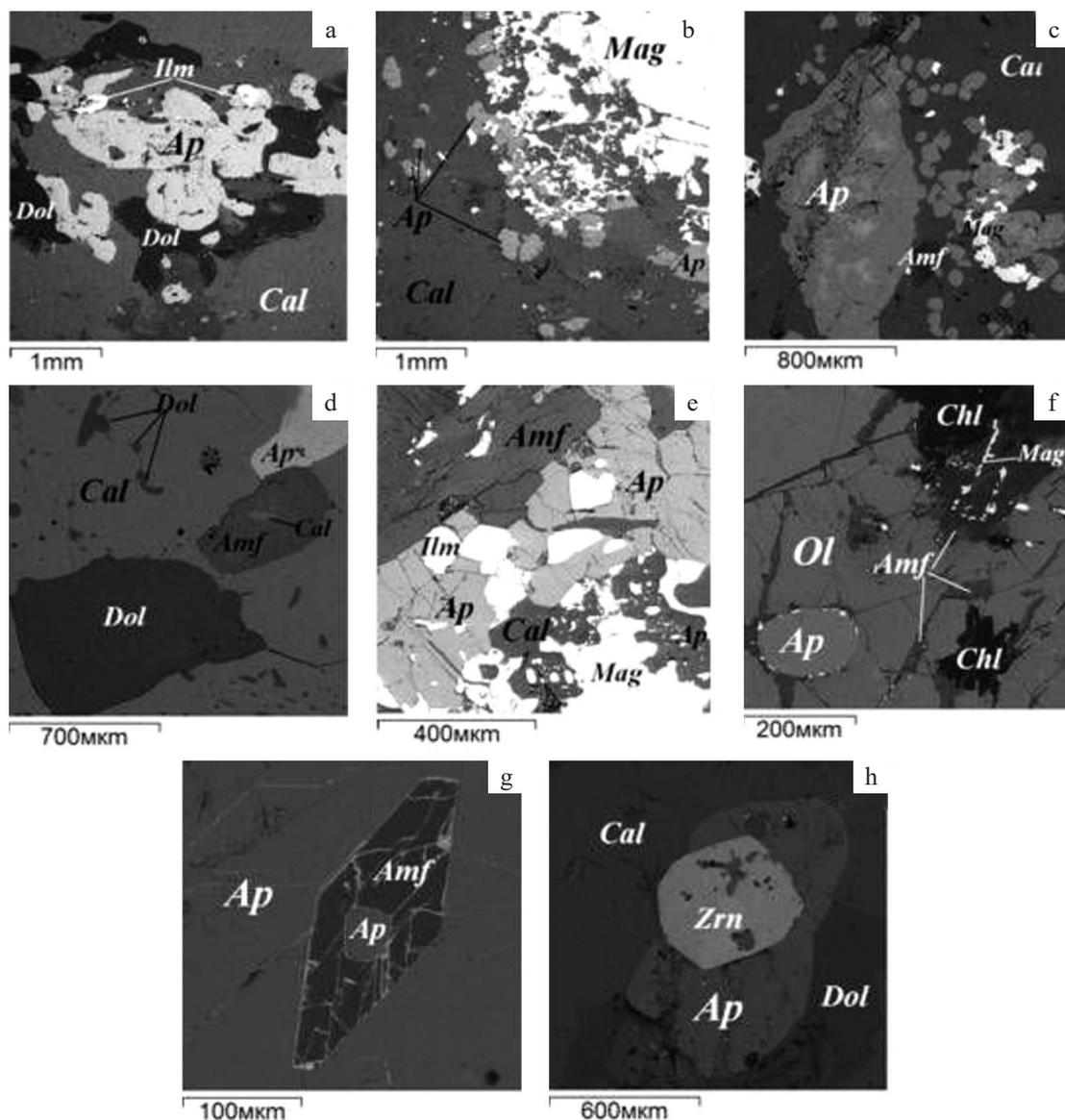


Рис. 8. Изображения в отраженных электронах (BSE). Типичные формы апатитовой сегрегации и основные минеральные ассоциации апатитсодержащих карбонатитов: (а) крупные зерна апатита неправильной формы в сростании с ильменитом, доломитом; (б) апатит-магнетитовая ассоциация в объеме кальцита; (с) крупные зерна апатита и мелкие округлые зерна апатита, сроставшиеся с магнетитом; (д) зерно апатита неправильной формы, состаренное амфиболом; (е) сложный агрегат апатит-ильменит-кальцит-магнетит; (ф) включения в оливине – мелкие округлые зерна апатита, хлорита, амфибола, магнетита; (г) включение амфибола в апатите; (h) включение циркона в апатите. Ap – апатит, Dol – доломит, Cal – кальцит, Ilm – ильменит, Mag – магнетит, Amf – амфибол, Ol – оливин, Zrn – циркон

### Оливиниты

В западной части Тикшеозерского массива нами выделен Шапкоозерский блок площадью 15 км<sup>2</sup>, включающий помимо дунитов оливиниты, оливиновые пироксениты и оливиновые габбро (рис. 1). Он отделен от Центрального

блока меридиональной системой разломов. Вертикальная мощность меняется от 20–100 м в южной части до 200–250 м в центре и на севере блока. Химический состав оливинитов (месторождение Шапкоозерское) приводится в таблице.

Химический состав оливинитов Тикшеозерского массива (месторождение Шапкоозерское), мас. %

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ппп	NiO	CoO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
5.67–38.1	0–0.16	0.29–1.18	4.87–7.11	7.13–7.64	0.16	39,3–41.7	0–0.12	0.05–0.2	0.05	0.75–7.77	0.14–0.32	0.02–0.04	0.02	0.17	0.38–0.47

### Редкометалльная и РЗЭ минерализация

Редкометалльная и РЗЭ минерализация выявлена в жилах щелочных пегматитов среди ильменит-магнетитовых руд Елетьозера, содержания редких металлов достигают (%): Nb – 0.5%, Ta – 0.015, Y – 0.5%, La – 0.1%, Ce – 0.3%, Hf – 0.03, Zr – 1%, Be – 0.3%. В титаномагнетитовых рудах отмечаются устойчиво повышенные содержания ниобия (~100 г/т), а во вмещающих их клинопироксенитах – скандия (30–40 г/т) [13]. Редкометалльная и редкоземельная минерализации Тикшеозерско-Елетьозерского комплекса коррелируются с завершающей фазой становления интрузива – щелочные и нефелиновые сиениты и связанные с ними дайки бостонитов, сиенит-порфиоров, жилы щелочных пегматитов, лампрофиоров и брекчии взрыва [1].

Главными минералами всех разновидностей Елетьозерских пегматитов являются щелочные полевые шпаты (микроклин-пертит и альбит). В массиве выявлены 35 жил щелочных пегматитов с редкометалльным и редкоземель-

ным оруденением, в т. ч. 25 жил расположены на участке Суриваара [1].

### Заключение

Таким образом, комплексные исследования на участках с развитием в них промышленно ценного минерального сырья, как ильменит, титаномагнетит, сиениты, апатиты, оливиниты, показали промышленную значимость этих объектов. Совершенствование технологических методов переработки позволит оценить доступность недр с позиций современного взгляда на геологию, технологию, экономику и экологию и как следствие на формирование новых минерально-сырьевых потоков.

Авторы пришли к выводу, что Тикшеозерский и Елетьозерский массивы могут стать основой для формирования масштабного экономически прибыльного горнопромышленного комплекса на территории Арктической зоны Республики Карелия.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГ КарНЦ РАН, тема № 102204404400124-6-1.5.5*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Богачев А. И., Зак С. И., Сафронова Г. П., Инина К. А. Геология и петрология Елетьозерского массива габброидных пород Карелии. Л.: Наука, 1963. 159 с.
2. Зак С. И., Киселев Ю. Ф. Отчет о поисково-разведочных работах на Елетьозерском титановом месторождении в 1954–1956 гг. Петрозаводск, фонды КГЭ, 1957.
3. Ключин С. Ф., Сафронова Г. П. О карбонатитах Тикшеозерского массива // Опер.-инф. материалы ИГ Карельский фил. АН СССР за 1984 г. Петрозаводск, 1984. С. 8–13.
4. Кухаренко А. А., Орлова, Булах А. Г. и др. Каледонский комплекс ультраосновно-щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Карелии. Москва: 1965, Недра. 350 с.
5. Петровский М. Н., Петровская Л. С. Палеопротерозойский щелочной магматизм Мурманского не-

- оархейского кратона Кольского полуострова // ЗРМО. 2019. № 2. С. 1–11.
6. Самойлов В. С. Геохимия карбонатитов. М., 1984. 191 с.
7. Сафронова Г. П., Гаврилова М. М. О карбонатитах Тикшеозерского массива (данные изотопного анализа кислорода карбонатитов) // Металлогения Карелии. Петрозаводск. 1982. С. 161–167.
8. Слюсарев В. Д., Кравченко А. Н., Козлов Н. Е. Новый тип щелочного магматизма Северной Карелии // Опер. информ. мат. за 1974 г. Петрозаводск, 1975. С. 98–105.
9. Шарков Е. В., Чистяков А. В., Богина М. М., Богатиков О. А., Щипцов В. В., Беляцкий Б. В., Фролов П. В. Ультрамафит-щелочно-карбонатитовые комплексы как результат двухстадийного плавления

мантийного плюма (на примере среднепалеопротерозойского Тикшеозерского интрузива, Северная Карелия, Россия) // ДАН. 2019. Т. 486. С. 460–465.

10. Щипцов В.В., Бубнова Т.П., Гаранжа А.В., Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С., Щипцова Н.И. Геолого-технологическая и экономическая оценка ресурсного потенциала карбонатитов Тикшеозерского массива (формация ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2007. № 10. С. 159–170.

11. Щипцов В.В., Бубнова Т.П., Фролов П.В. Геолого-минералогическая и технологическая оценка карбонатитов и щелочных сиенитов палеопротерозойского Тикшеозерско-Елетьозерского интрузивного комплекса (Северная Карелия) // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья «Плаксинские чтения – 2021»: Материалы Международной конференции. Владикавказ: 2021, изд. СКТМИ (ГТУ). С. 126–130.

12. Щипцов В.В., Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П. Промышленные минералы Елетьозерского массива и их аналоги на Фенноскандинавском щите // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2008. № 11. С. 203–220.

13. Щипцов В.В., Иващенко В.И. Минерально-сырьевой потенциал арктических районов Республики Карелия // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 2. С. 3–33.

14. Arzamastsev A. A., Wu Fu-Yuan. U-Pb Geochronology and Sr-Nd Isotopic Systematics of Minerals from the Ultrabasic Alkaline Massifs of the Kola Province // *Petrology*. 2014. 22, 5. P. 462–479.

15. Bai Z. J., Zhong H., Naldrett A. J., Zhu W. G., Xu G. W. Whole-rock and mineral composition of constraints on the genesis of the giant Hongge Fe-Ti-V oxide deposit in the Emeishan Large Igneous Province, Southwest China // *Econ. Geology* 2012. V. 107, N 3. P. 481–506.

16. Basson I., Lourens P., Paetzold H.-D., Brazier T. R., Molabe P. Structural analysis and 3D modelling of major mineralizing structures at the Phalaborwa copper deposit // *Ore Geology Reviews*. 2017. 83. P. 30–42.

17. Brogger W. C. Due Eruptivgesteinen des Kristianiagebietes, IV. Das Fengebiet in tele marken. Norwegen – Norske Vidensk. Selsk. Skrift, I math-naturv. 1921. 39. P. 210–222.

18. Corfu F., Bayanova T., Shchiptsov V., Frantz N. U-Pb ID-TIMS age of the Tikshozero carbonatite: expression of the 2.0 Ga alkaline magmatism in Karelia, Russia // *Cent. Eur. J. Geosci.* 2011. V. 3. P. 302–308.

19. Kogarko L. K., Kononova V. A., Orlova M. R., Wooley A.R. Alkaline Rock and Carbonatites of the world. Part. 2. Russia; British Museum: London, UK, 1995. P. 226.

20. Leelanandam C.; Burke K.; Ashwal L.D.; Webb S. Proterozoic mountain building in Peninsular India: An analysis based primarily on alkaline rock distribution // *Geological Magazine* 2006, 143 (02), P. 1–18.

21. Lintinen P. Preliminary results from new drillings and geochemical studies on the apatite deposits Kortejarvi and Petaikko-Suvantovaara carbonatites, Pudasjarvi-Posio district, Northern Finland. GSF. // *Report of Investigation* 207, 2014. P. 100–103.

22. Nykänen J., Laajoki K., Karhu J. Geology and Geochemistry of the Early Proterozoic Kortejärvi and Laivajoki Carbonatites, Central Fennoscandian Shield // *Bull. Geol. Soc. Finland* 1997, part. 1–2, 5–30.

23. O'Brien H., Heilimo E., Heino P. The Archean Siilinjärvi carbonatite complex / In: Maier W., O'Brien H., Lahtinen R. (Eds.) *Mineral Deposits of Finland*, Elsevier, Amsterdam» 2015. P. 327–343.

24. Precambrian geology of Finland key to the evolution of the Fennoscandian Shield / Eds M. Lehtinen, P.A. Nurmi, O. T. Rämö // *Developments of Precambrian Geology*, 14. 2005. 736 p.

25. Puustinen K. Geology of the Siilinjärvi carbonatite complex, Eastern Finland // *Bulletin of the Geological Society of Finland* 1971. V. 249. P. 43.

26. Sharkov E. V., Belyatsky B. V., Bogina M. M., Chistyakov A. V., Shchiptsov V. V.; Antonov A. V., Lepekhina T.N. Genesis and Age of Zircon from Alkali and Mafic Rocks of the Elet'ozero Complex, North Karelia // *Petrology*. 2015. V. 23. P. 259–280.

27. Sharkov E.V., Chistyakov A.V., Shchiptsov V.V., Bogina M.M., Frolov P.V. Origin of Fe-Ti Oxide Mineralization in the Middle Paleoproterozoic Elet'ozero Syenite-Gabbro Intrusive Complex (Northern Karelia, Russia) // *Geology of ore deposits*. 2018. V. 60 (2). P. 172–200.

28. Sharkov E.V., Chistyakov A.V., Bogina M.M., Shchiptsov V.V., Belyatsky B.V., Frolov P.V. Petrology of the Mid-Paleoproterozoic Tiksheozero Ultramafic-Alkaline-Carbonatite Complex (Northern Karelia) // *Petrology*. 2021. V. 29. N. 5. P. 475–501.

29. Shchiptsov V. V. Industrial minerals of the Tiksheozero-Eletozero alkaline ultramafic-carbonatitic and alkaline gabbroic complexes in Karelia, Russia // In *Mineral deposit research for a high-tech world. 12th SGA Meeting*; Uppsala, Sweden. 2013. V. 4. P. 1781–1789.

30. Smithies R. H.; Champion D. C. Late Archaean felsic alkaline igneous rocks in the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia: a result of lower crustal delamination? // *Journal of the Geological Society* 1999. 156 (3). P. 561–576.

31. Wooley A.R. Alkaline Rock and Carbonatites of the world. Part. 1: North and South America; British Museum: London, UK. 1987. P. 215.

32. Yuhara M., Kohno R., Kagami H., Hiroi Y., Tsuchiya T. Geochemistry of syenite of the Phalaborwa Carbonatite Complex, South Africa // *Polar Geosci.* 2003. V. 16. P. 176–195.

33. Zhou M.F., Chen W.T., Wang C.Y., Prevec S.A., Liu P.P., Howarth G. Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzihua-type of Fe-Ti-V oxide deposits, SW China // *Geoscience Frontiers*, China. 2013. V. 4 (5). P. 481–502.