

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)

Институт наук о Земле

Кафедра минералогии

**Борисов Ярослав Владиславович**

**Содалит из Намибии: химический состав, свойства  
и условия образования**

Выпускная бакалаврская работа  
по направлению 05.03.01 «Геология»

Научный руководитель:  
к.д.г.-м.н. Золотарёв Анатолий Александрович

---

*(подпись руководителя)*

Санкт-Петербург

2023

## Содержание:

<b>Введение</b> .....	3
<b>1 Декоративный содалит</b> .....	6
<b>2 Геология месторождений содалита</b> .....	8
<b>2.1 Геология Тикшеозёрского массива</b> .....	8
<b>2.2 Геология Вишнёвогорского массива</b> .....	10
<b>2.3 Геология массива Свартсбуйсдриф</b> .....	12
<b>3 Минералого-петрографическая характеристика породы</b> .....	15
<b>3.1 Содалитсодержащие породы Тикшеозёрского массива</b> .....	15
<b>3.2 Содалитсодержащие породы Вишнёвогорского массива</b> .....	17
<b>3.3 Содалитсодержащие породы массива Свартсбуйсдриф</b> .....	18
<b>4 Минералогия содалитсодержащих пород</b> .....	20
<b>4.1 Содалитсодержащие породы Тикшеозёрского массива</b> .....	20
<b>4.2 Содалитсодержащие породы Вишнёвогорского массива</b> .....	26
<b>4.3 Содалитсодержащие породы массива Свартсбуйсдриф</b> .....	29
<b>5 Природа окраски содалита из Намибии</b> .....	33
<b>Литература</b> .....	36

## Введение

Содалит – минерал из семейства фельдшпатоидов, относящийся к ювелирно-поделочным камням благодаря своему насыщенному синему цвету.

Известен содалит ещё с глубокой древности. В Перу есть находки, датированные возрастом 3000-1800 гг. до н.э., указывающие на то, что жители священного города Караль использовали образцы с содалитом в качестве «обменной монеты». (Nugra et al., 2014).

Впервые содалит был обнаружен и описан в 1811 году в Илимаусакском щелочном массиве, в Гренландии. (Marks, 2015). Однако использоваться в качестве ювелирно-поделочного камня стал только после 1891 года, когда в Канаде было обнаружено несколько крупных месторождений: Бэнкрофт, Айс-Ривер и Квебек, где содалит встречается в массивной форме, заполняя пустоты и трещины нефелиновых сиенитов (James, 1965)

Во время королевского визита на Всемирную выставку в Буффало, Нью-Йорк, в 1901 году будущей королеве Великобритании (принцессе Маргарет Уэльской) подарили красивый содалит из Бэнкрофта. Принцесса влюбилась в этот минерал и выбрала его для украшения интерьера «Дома Мальборо» (Рис. 1). В связи с этим популярность содалита в мире резко выросла и по сей день продолжает оставаться высокой. (Aronson, 2013).



*Рисунок 1. Камин и тумба из содалита. Дворец Бленхейм, родовое имение герцогов Мальборо, Англия. Фото с сайта [www.fotosselect.ru/blenheim-palace-oxfordshire](http://www.fotosselect.ru/blenheim-palace-oxfordshire)*

Точные записи о заказе хранятся в королевском архиве и подтверждают поставку 130 тонн содалита, который был доставлен из Онтарио в Великобританию по приказу принцессы Маргарет. По этой причине содалит из Бэнкрофта (Канада), в промышленности называют «голубой принцессой».

Помимо Канады, содалит добывают также в США (Ред-Хилл), Бразилии (провинции Айопайя), Германии (горы Эйфель), Португалии (Мончикью), Румынии (массив Дитроу), России (Кольский полуостров, Урал), Гренландии (Иллимаусак) и Намибии (район реки Кунене) (Булах и др., 2014).

Содалит из Намибии пользуется в нашей стране особой популярностью и активно используется в декоративной промышленности благодаря глубокому тёмно-синему цвету и красоте рисунка. Исследование минерального и химического состава, а также свойств содалитовых пород из Намибии и является целью моей выпускной бакалаврской работы.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Изучить литературу по геологии проявлений содалита;
- 2) Определить минеральный состав содалитовых пород;
- 3) Определить химический состав главных минералов;
- 4) Объяснить природу окраски содалита.

Актуальность работы заключается в исследовании ранее не изученного содалита из Намибии. Комплексное изучение (геохимическое, минералогическое) образцов позволит объяснить природу тёмно-синей окраски содалита, определить минеральные фазы, слагающие содалитовые породы, их минералогические особенности и, на основе этого, сделать предположения об условиях образования.

Задачи выполнялись с помощью таких методов как:

- Визуальное определение минералов в прозрачно-полированном шлифе вооруженным глазом при помощи поляризационного микроскопа Leica, кафедры минералогии СПбГУ;
- Порошковая рентгенография использовалась для определения фазового состава минеральных компонентов. Работу проводили в ресурсном центре СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования». Съёмку образцов осуществляли с помощью рентгеновского порошкового дифрактометра Rigaku Miniflex II: излучение рентгеновской трубки –  $\text{CuK}\alpha_{1+2}$ , режим работы трубки 30 кВ/15 мА. Схема фокусировки Брэгга-Брентано, геометрия съёмки  $\theta/2\theta$ ,  $2\theta = 7 - 70^\circ$ , шаг  $2^\circ$ . Определение фазового состава проводили по базе PDF-2.
- Рентгеноспектральный микроанализ с электронным зондом (PCMA). В данной работе использовался сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N с приставкой

для энергодисперсионного анализа Oxford Instruments X-Max 2 (ускоряющее напряжение 20 kV, ток 2.5 нА), расположенный в ресурсном центре «Геомодель». А также для предварительного определения фаз минералов проводились исследования в ресурсном центре «Микроскопии и микроанализа» на настольном сканирующем электронном микроскопе TM 3000 (НИТАСН).

- Рамановская спектроскопия использовалась для выделения определенных фаз. Исследования проводили в ресурсном центре СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования». Съемку образцов производили с помощью ИК-спектрометра Bruker Vertex 70 FTIR в диапазоне 360 – 4000 см<sup>-1</sup> с разрешением 1 см<sup>-1</sup>. Нормировку спектров проводили на линию  $\nu_3$  кремния. Использовался твердотельный лазер 532 нм мощностью 100 мВт и объектив № 100. Время накопления: 6 повторений.
- Производились расчёты формул по химическим составам минералов.

Выражаю благодарность компании «НЭНСИ», Николаю Игоревичу Фришману и Алексею Ильичу Брусницыну за предоставленную возможность в изучении содалитсодержащих пород. Также благодарю Наталью Сергеевну Власенко, инженера РЦ «Геомодель», и Владимира Николаевича Бочарова, специалиста РЦ «Геомодель», и сотрудников РЦ «Микроскопии и микроанализа» за содействие в изучении химического состава минералов. Отдельное спасибо Марии Николаевне Ветровой, старшему преподавателю кафедры минералогии, за добрые слова и веру в мой специфический подход к научным исследованиям. И особую благодарность я выражаю своему научному руководителю Анатолию Александровичу Золотарёву, доценту кафедры минералогии, кандидату геолого-минералогических наук, за значимые замечания, важные советы при проведении исследований, а также за то, что подгонял и всегда был рядом.

## 1 Декоративный содалит

Благодаря своему насыщенному синему цвету содалит повсеместно используется в ювелирной промышленности. Из него изготавливают кольца, подвески, запонки, бусы и т.д. Так, например, в каталоге изделий российской розничной сети мультибрендовых ювелирных магазинов «Sunlight» присутствует больше десяти украшений с содалитом (Рис. 2). Цена таких изделий на современном рынке варьирует от 880 до 9967 рублей.



*Рисунок 2. Серебряные запонки с содалитом и чёрной эмалью (слева). Бусы из содалита (справа).  
Фото с сайта <https://spb.sunlight.net/catalog>*

Однако большей популярностью пользуется не сам минерал, а горная порода с содалитом, известная под торговыми названиями «Blue Jasper» (синяя яшма), «Blue Princess» (голубая принцесса), «Sodalite Blue Quartzite» (синий содалитовый кварцит) и «Sodalite Granite» (содалитовый гранит).

Декоративные свойства содалита как горной породы определяются не только его насыщенным синим цветом, а также белыми прожилками, которые пересекаясь в разных направлениях составляют красивый узор. Благодаря этому уже несколько десятилетий содалитовые породы используются для изготовления слэбов, плит для стен и пола, умывальников, раковин, а также различных столиков и подставок, украшающих интерьер.

Главным экспортёром декоративного содалита является Намибия. И в России есть две крупные компании, изготавливающие содалитовые плиты: «Venezia Stone» и «НЭНСИ», которая существует уже 30 лет, и является лидирующей торговой и камнеобрабатывающей компанией отрасли (Рис. 3).



*Рисунок 3. Текстура слэба декоративного содалита из Намибии (слева). Пример использования содалитовых плит в украшении интерьера (справа). Фото с сайта <https://nensy.ru>*

Компания «НЭНСИ» любезно предоставила небольшой образец декоративной породы с содалитом, пользующейся на рынке наибольшим спросом. Он и послужил главным объектом моих исследований. Так в чём же особенность содалита из Намибии?

## 2 Геология месторождений содалита

Как уже было отмечено ранее, содалит встречается на территории разных стран. В России его проявления известны в Тикшеозёрском массиве Северной Карелии и в Вишнёвогорском щелочном массиве на Южном Урале.

### 2.1 Геология Тикшеозёрского массива

В геолого-структурном отношении Тикшеозёрский массив является частью Карело-Кольской провинции ультраосновных – щелочных пород и карбонатитов (Рис. 4). Однако по составу силикатных пород является переходным между щелочно-габброидной формацией, а также ультраосновными – щелочными породами и карбонатитами (Фролов и др., 2003).

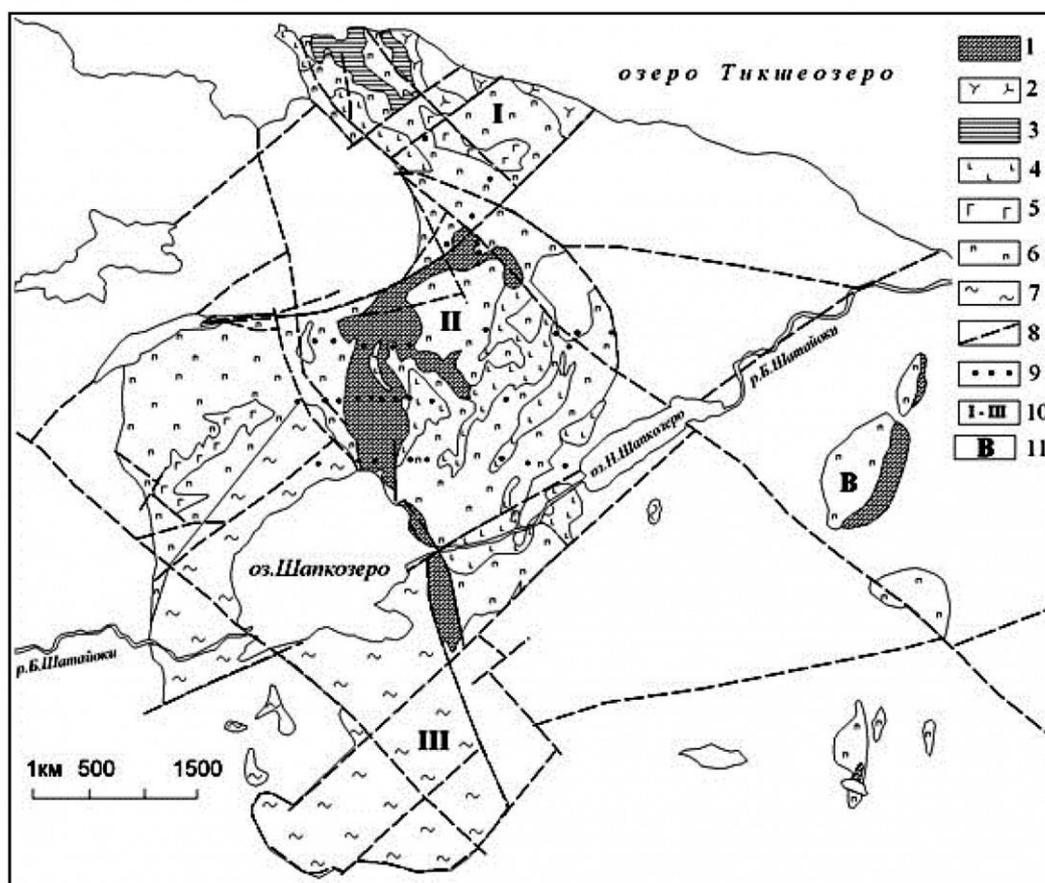


Рисунок 4. Геологическая схема Тикшеозёрского массива (Щипцов и др., 2007): 1-карбонатиты; 2-нефелиновые сиениты; 3-тералиты; 4-мельтейгиты, йолит-уртиты, нефелиновые пироксениты; 5-габбро, оливиновое габбро, плагиопироксенит (расслоенный комплекс); 6-пироксениты, оливиновые пироксениты, рудные пироксениты; 7 – серпентинизированные оливиниты, серпентиниты; 8-разломы; 9-скважины; 10-блоки; I – Тикшеозёрский; II – Центральный; III – Шапкозерский; V – Восточный

В 1945-1966 годах в результате геофизических исследований здесь была выявлена локальная аномалия Тикшеозерского и Шапкозерского блоков массива. Уже после, в 1977-1980 гг. сотрудники Института геологии на Тикшеозерском массиве установили наличие нефелиновых сиенитов, а также карбонатитовые тела, которые до этого считали продуктами пироксенитов. С 1980 г. Минералогия, петрология и металлогения Тикшеозерского массива систематически изучались сотрудниками ИГ КарНЦ АН СССР и сотрудниками ГИ КолНЦ АН СССР (Щипцов и др., 2007).

Генетически содалит связан с карбонатитами, прорывающими ультраосновные и щелочные породы с образованием приконтактовых метасоматических карбонатно-силикатных пород типа фенитов (Шарков и др., 2020).

Николаем Игоревичем Фришманом в северо-западной части Тикшеозерского массива близ озера Шапкоозеро в канаве с выходом содалитсодержащих пород был отобран образец, для исследований (Рис. 5).



*Рисунок 5. Выход содалитсодержащих пород в районе канавы в северо-западной части массива (слева). Фото Фришмана Н. И. Отобранный образец породы с содалитом (справа).*

## 2.2 Геология Вишнёвогорского массива

Вишнёвогорский щелочной массив является северной частью Ильмено-Вишнёвогорского комплекса, который в свою очередь расположен в ядре Сысертско-Ильменогорского антиклинория на границе Южного и Среднего Урала. Максимальная ширина массива составляет 4-6 км, при субмеридиональной протяжённости более 150 км. (Левин и др., 1997). В массиве широко развиты миаскиты, щелочные сиениты и карбонатитовые пегматиты (Рис. 6).

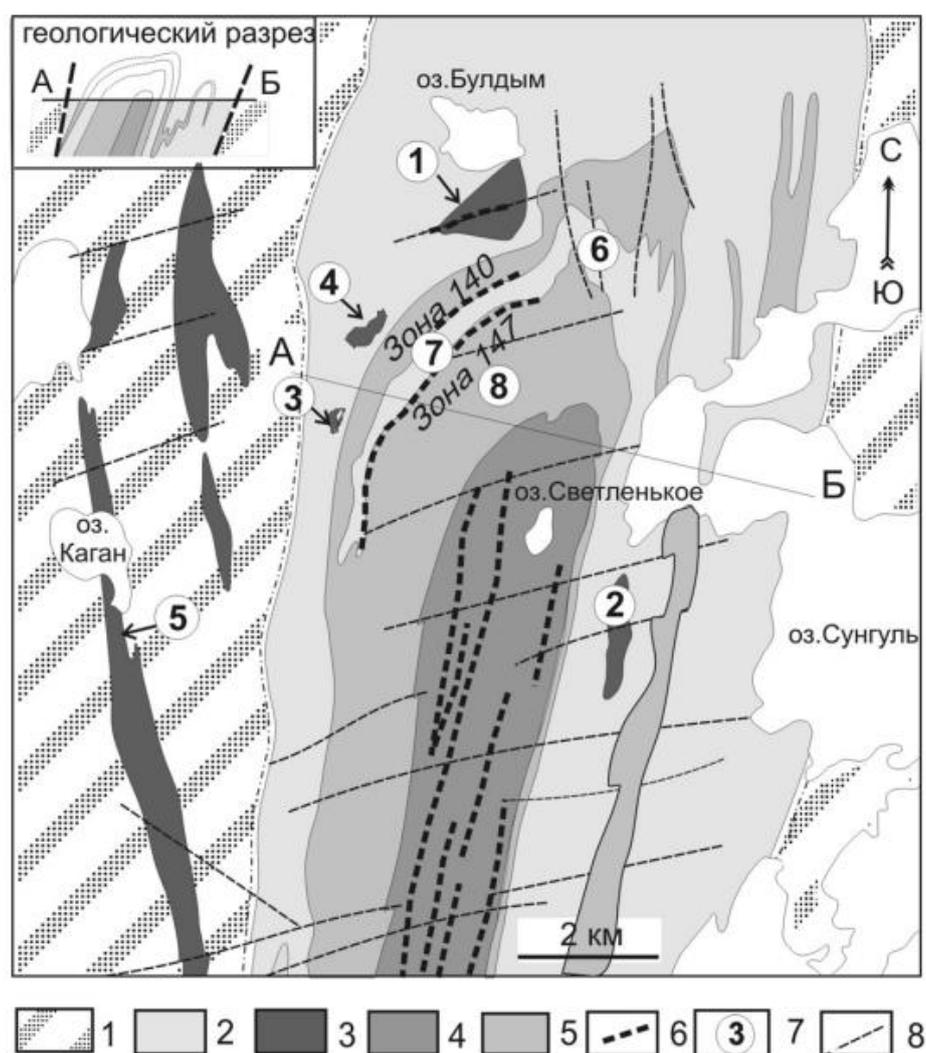
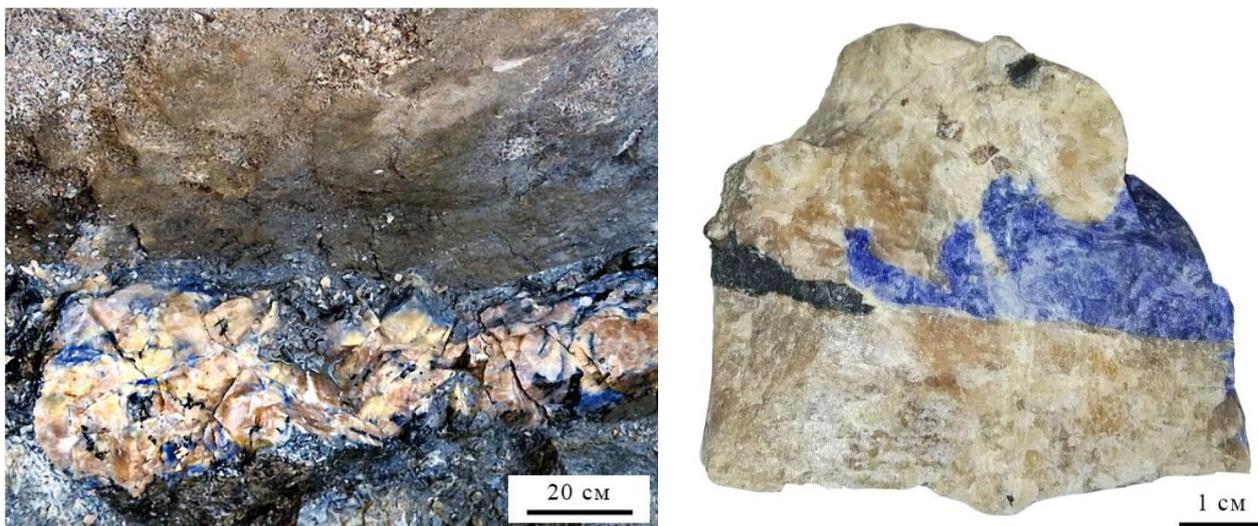


Рисунок 6. Схема геологического строения северной части Ильмено-Вишневогорского комплекса (Левина и др., 1997). 1 – плагиосланцы и кварциты игишской, сайтовской, аргазинской, кыштымской толщ ( $R_{1-2}$ ); 2 – плагиогнейсы, амфиболиты вишневогорской толщ ( $PR_1$ ); 3 – метагипербазиты ( $PR_1?$ ); 4 – метасоматиты Центральной щелочной полосы (фениты, нефелин-полевошпатовые мигматиты, меланократовые силикатно-карбонатные породы, миаскиты, карбонатиты); 5 – миаскиты Вишневогорского массива; 6 – зоны карбонатитов и карбонатно-силикатных пород; 7 – месторождения и рудопроявления карбонатитов (цифры в кружках): 1 – Булдымское, 2 – Сунгульское, 3 – Халдихинское, 4 – Спирихинское, 5 – Каганское, 6 – жила 125, 7 – жила 135; 8 – полевошпатовый карьер г. Долгой; 8 – линии тектонических нарушений.

Содалит, канкринит, а также натролит, анальцит и серицит являются лишь вторичными минералами. И присутствуют в виде жил в составе миаскитов. Так, летом 2014 года при экскурсионном посещении Вишнёвогорского нефелин-полевошпатового месторождения, находящегося в северо-западной части Центрального массива миаскитов, на горизонте 480 м карьера Южного участка на склоне горы Кобелихи в миаскитах была найдена крупная содалит-канкринитовая пегматитовая жила, из которой также был отобран образец (Рис. 7).



*Рисунок 7. Жила содалит–канкринитового пегматита в миаскитах. Фото Нишанбаева Т. П. Образец канкринит-содалитового пегматита Вишнёвогорского массива, отобранный Брусницыным А. И. (справа).*

Как правило, содалит-канкринитовые жилы имеют секущий характер относительно полосчатости миаскитов. Размер жил не превышает 130 см по простиранию и 70 см по падению, при максимальной мощности в раздуве жилы до 40 см. Пегматит неравномерно зернистый, сложен мелко-, средне-, и крупнозернистым содалит-канкринитовым агрегатом, в котором содалит присутствует в подчинённом количестве.

В строении жил прослеживается зональность: содалит преобладает в эндоконтакте и на выклинивании пегматитовой жилы. Небольшие изометричные и жилообразные выделения содалита встречены и в центральной части пегматитового тела. Величина индивидов содалита до 3 см, канкринита – более 5 см. Цвет содалита варьирует от серо-голубого до насыщенно-синего. Канкринит трёх преобладающих цветов: серый, розоватый и жёлтый; серый встречается на выклинивании жилы, розоватый – по краям жилы, а жёлтый – ближе к осевой линии пегматитовой жилы. Центральная зона жилы более крупнозернистая, чем эндоконтактовая (Нишанбаев и др., 2016).

### 2.3 Геология массива Свартбуйсдриф

В Намибии декоративная порода с содалитом добывается из карбонатитового массива Свартбуйсдриф (юго-восточная окраина региона Кунене, северо-западная Намибия). Карбонатиты заложены вблизи юго-западной окраины анортозитового комплекса Кунене, который обнажается в виде вытянутого с севера на юг тела около 350 км в длину и 30-80 км в ширину. Возраст анортозитового комплекса составляет  $1385 \pm 25$  -  $1385 \pm 25$  млн лет (Mayer et al., 2004).

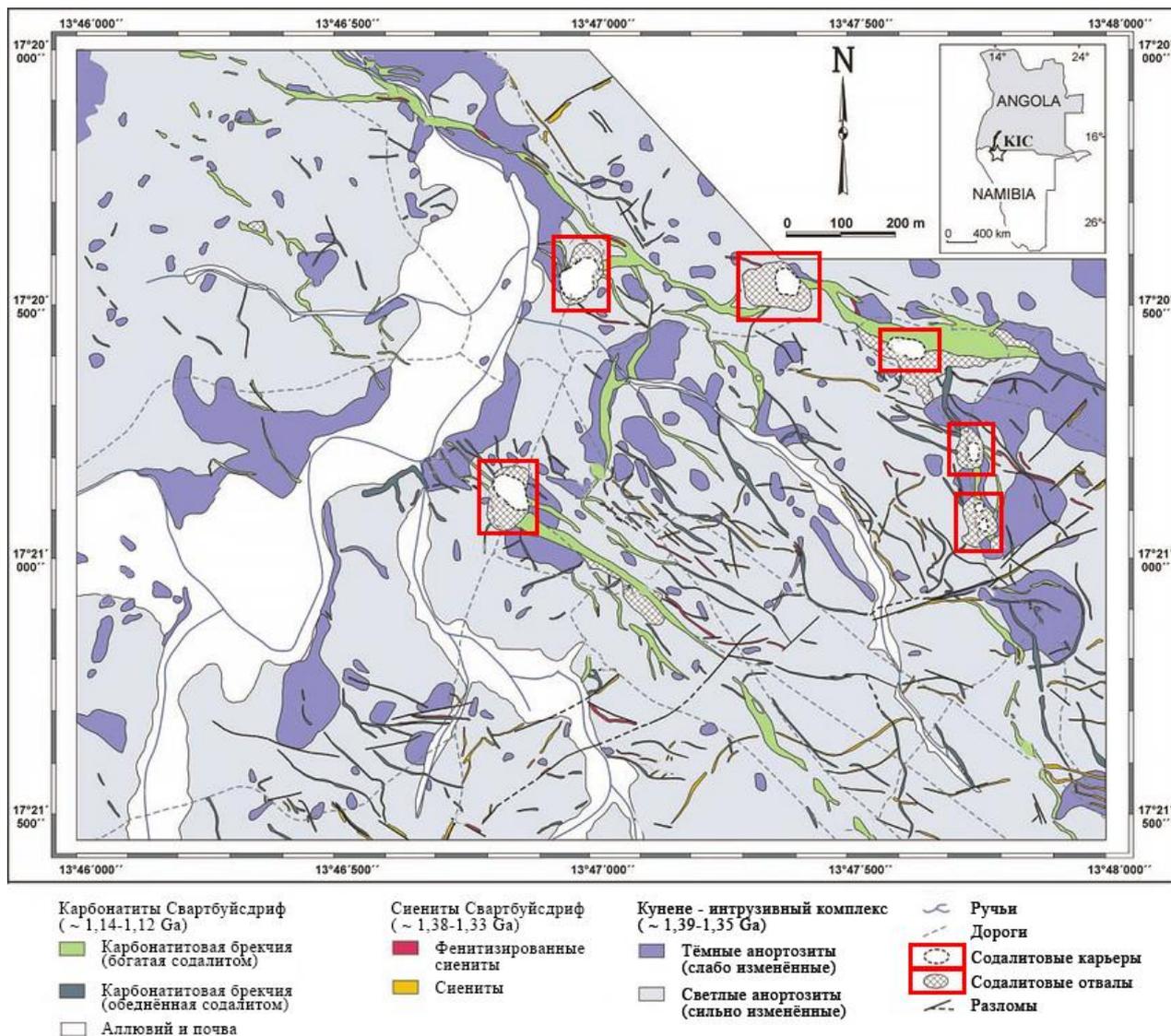


Рисунок 8. Карта района добычи содалита массива Свартбуйсдриф. Анортозитовые породы интрузивного комплекса Кунене пересекаются карбонатитовыми дайками и дайками нефелиновых сиенитов.

Вблизи самого южного края анортозитовый комплекс Кунене пересечён многочисленными разломами, преимущественно юго-западного простирания. В эти разломы внедрились сначала сиенитовые дайки ( $1385\pm 5$  -  $1333\pm 2$  млн лет), а затем карбонатитовые дайки (1140 - 1120 млн лет) (Littmann et al., 2000).

Карбонатитовые дайки содержат большое количество содалита, который добывается здесь на территории площадью свыше  $100 \text{ км}^2$  (Рис. 8).

Дайки, содержащие содалит имеют ширину до 80 м и часто содержат угловатые фрагменты вмещающих анортозитовых и сиенитовых пород, отчего в литературе их называют «карбонатитовой брекчией». Характерной особенностью карбонатитовой брекчии является полосчатая текстура, вызванная чередованием анкеритовых, магнетитовых и силикатных слоев, ориентированных субпараллельно стенкам дайки. Локально карбонатитовая брекчия может также содержать массивные карбонатитовые зоны, почти полностью состоящие из средне- и крупнозернистого анкерита и незначительного количества магнетита. Появление в породе таких однородных карбонатных зон может являться свидетельством неоднократных внедрений карбонатитового расплава (Drupel et al, 2001).

Декоративный содалит добывается в регионах, где несколько крупных карбонатитовых даек пересекается под острыми углами. Переменные количества содалита (10-90 об. %) встречается в виде брекчий, однородных темно-синих линз (большая редкость), а также в узких метасоматических ореолах шириной до 1 м на границе со слабо изменённым анортозитом (Рис. 9-11).



Рисунок 9. Активный карьер добычи содалита массива Свартсбуйсдриф (слева). Слэб декоративной содалитовой породы стоимостью  $315 \text{ \$/м}^2$  по данным <https://www.stonecontact.com> (справа). Фото с сайта <https://abcworldwidestone.com>.



*Рисунок 10. Геолог на фоне огромной однородной содалитовой линзы  
Фото с сайта <https://www.marmoelite.com>.*



*Рисунок 11. Слэб декоративной содалитовой породы стоимостью 1992,94 \$/м<sup>2</sup>.  
Данные и фото с сайта <https://www.stonecontact.com>.*

### 3 Минералого-петрографическая характеристика породы

#### 3.1 Содалитсодержащие породы Тикшеозёрского массива

Порода зеленовато-чёрного цвета с синими пятнами. Текстура породы массивная. Структура полнокристаллическая, тонкозернистая, равномернозернистая. Минеральный состав представлен содалитом, альбитом, карбонатом, клинопироксеном, канкринитом, а также магнетитом и слюдой (Рис. 12).

Альбит (30%). Форма зёрен ксеноморфная, однако изредка присутствуют гипидиоморфные кристаллы. Размер зёрен варьирует от 0,1 до 0,8 мм, хотя есть отдельные зёрна до 3-5 мм. В проходящем свете бесцветный. В скрещенных николях цвет меняется от тёмно- до светло-серого. В некоторых зёрнах присутствуют полисинтетические двойники. Зёрна трещиноватые с большим количеством включений.

Содалит (20%). В проходящем свете прозрачный. В скрещенных николях не просветляется, так как изотропен. Имеет отчётливо отрицательный рельеф. Форма зёрен преимущественно изометричная, ксеноморфная. Размер изометричных зёрен изменяется от 0,1 до 0,25 мм.

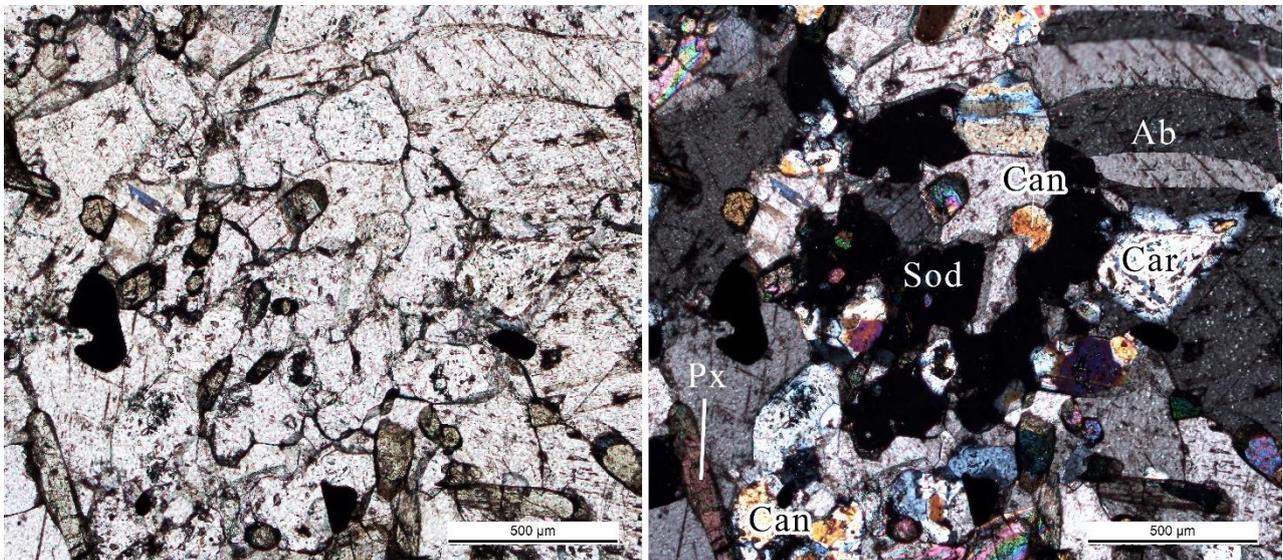


Рисунок 12. Общий вид образца в шлифе в проходящем свете (слева) и в скрещенных николях (справа). Sod – содалит, Can – канкринит, Car – карбонат, Px – пироксен, Ab – альбит.

Карбонат (20%). Имеет хорошо развитую спайность. Характерны перламутровые цвета интерференции, полисинтетические двойники и псевдоадсорбция. Размер кристаллических зёрен 0,1 до 0,4 мм.

Канкринит (15%). В проходящем свете прозрачный. В скрещенных николях цвет меняется от ярко-жёлтого до голубовато-зелёного. Рельеф отрицательный. Форма зёрен ксеноморфная, преимущественно изометричная. Размер зёрен изменяется от 0,05 до 0,3 мм.

Клинопироксен (14%). В проходящем свете прозрачный, со буроватым оттенком. В скрещенных николях имеет достаточно пёструю окраску: от малиново-синей до желто-зелёной. Спайность совершенная в двух направлениях под углами близкими к прямым. Рельеф средний положительный, шагреневая поверхность заметна. Форма зёрен изометричная и призматическая, ксеноморфная. Размер зёрен изменяется от 0,05 до 0,8 мм (Рис. 13).

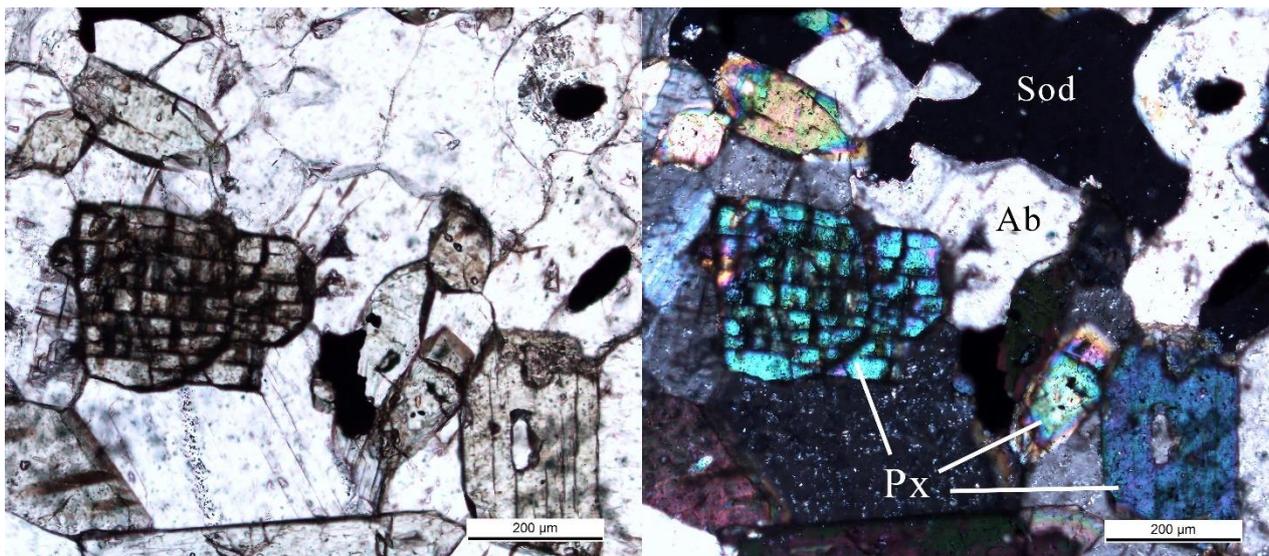


Рисунок 13. Зерно клинопироксена с пересекающейся под прямым углом спайностью в проходящем свете (слева), в скрещенных николях (справа). Sod – содалит, Px – пироксен, Ab – альбит.

Магнетит (1%) Непрозрачный. В косом отраженном свете имеет слабый металлический блеск с стально-синим отливом. Размер зёрен варьирует от 0,05 до 0,4 мм (Рис. 14).

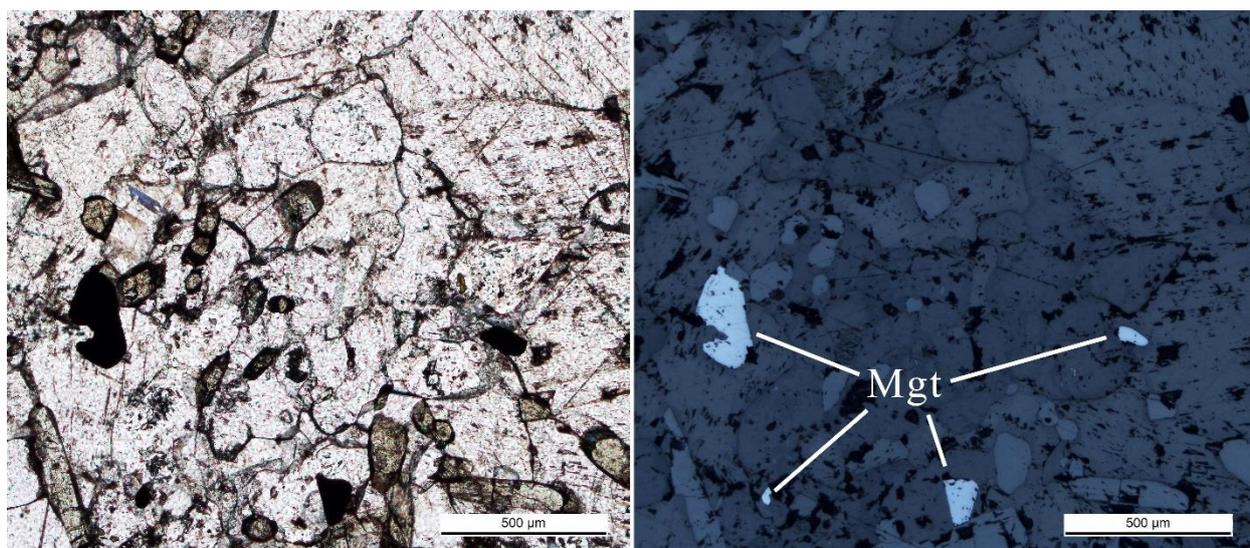


Рисунок 14. Зёрна магнетита (Mgt) в проходящем свете (слева), в косом отражённом свете (справа).

### 3.2 Содалитсодержащие породы Вишнёвогорского массива

Порода оранжево-бежевого цвета с синими пятнами и линзами рудного минерала. Текстура породы массивная. Структура полнокристаллическая. Содалитовый агрегат мелко-тонкозернистый. Основная минеральная масса, представленная канкринитом, крупно-тонкозернистая, равномернозернистая. Минеральный состав представлен канкринитом, содалитом, цеолитами и магнетитом. Магнетит не попал в шлиф, поэтому был диагностирован под оптическим бинокляром по характерным свойствам: железо-чёрному цвету, металлическому блеску, твёрдости 6 по шкале Мооса и ферромагнитным свойствам.

Содалит (40% площади шлифа). В проходящем свете прозрачный. В скрещенных николях не просветляется, так как изотропен. Имеет отчётливо отрицательный рельеф. Форма зёрен преимущественно изометричная, ксеноморфная. Размер изометричных зёрен изменяется от 0,1 до 1,0 мм.

Канкринит (45% площади шлифа). В проходящем свете прозрачный. В скрещенных николях цвет меняется от ярко-жёлтого до голубовато-зелёного. Рельеф отрицательный. Форма зёрен гипидиоморфная. Есть трещины, заполненные цеолитами, возможно, натролитом. Размер зёрен изменяется от 2 до 10 мм. Стоит отметить, что канкринит, изображённый на снимке ниже, представляет из себя часть единого большого зерна (Рис. 15).

Цеолиты, возможно натролит (5% от площади шлифа). В виде игольчато-волокнистых агрегатов заполняют трещины в канкрините. В проходящем свете бесцветны. Двупреломление слабое, поэтому в скрещенных николях имеют серые цвета. Размер отдельных зёрен не превышает 0,01 мм.

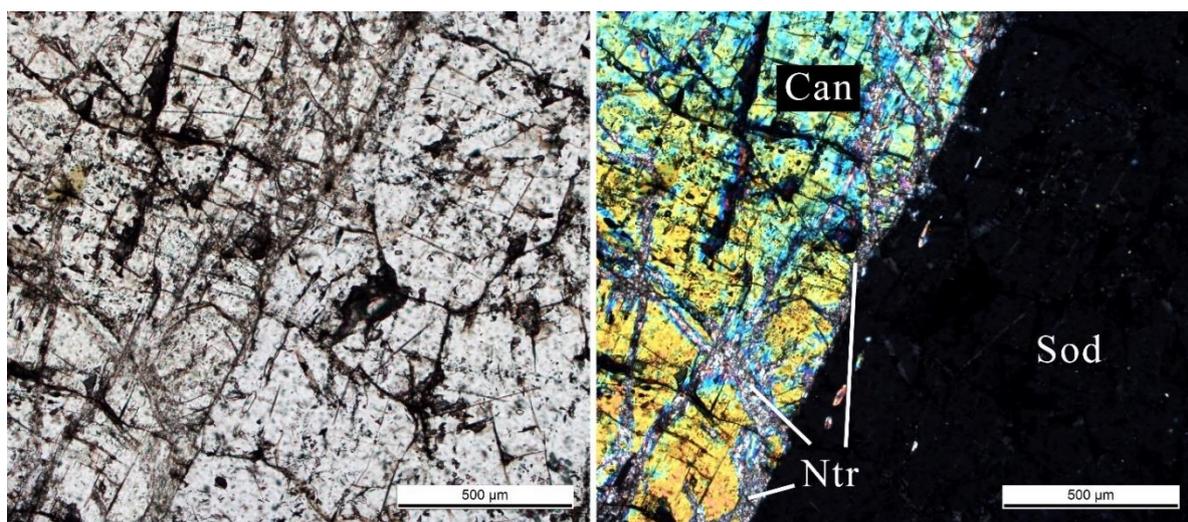
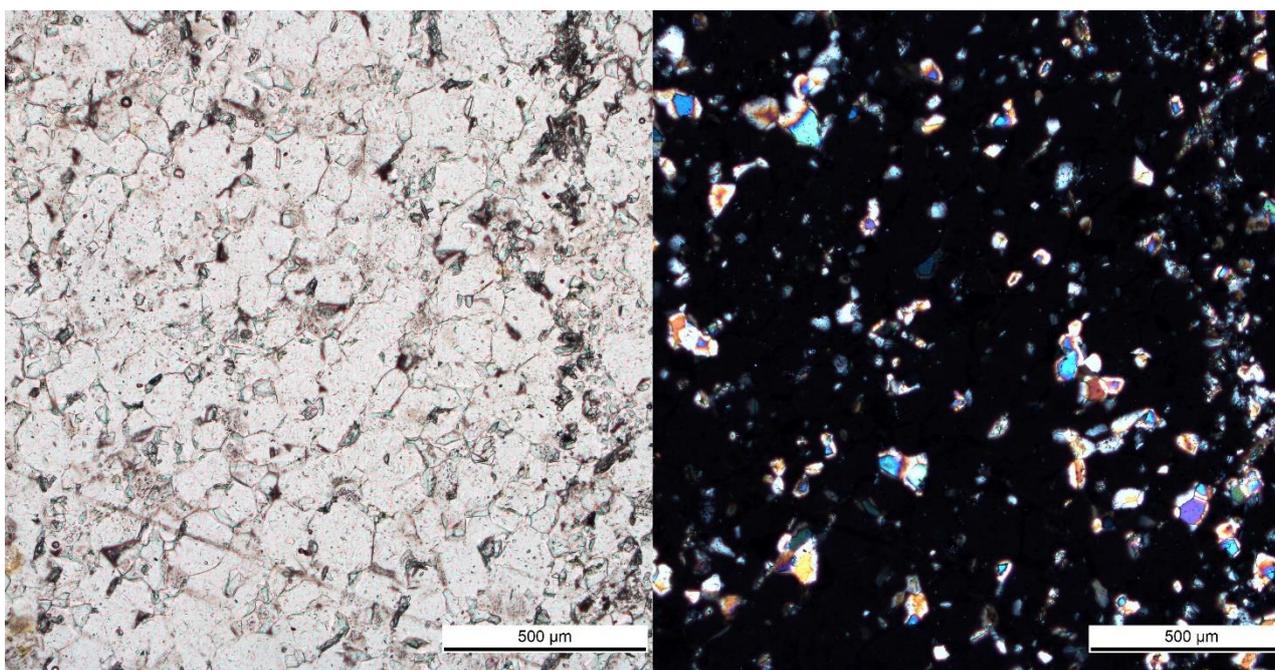


Рисунок 15. Общий вид образца в шлифе. В проходящем свете (слева), в скрещенных николях (справа). Sod – содалит, Can – канкринит, Ntr – натролит.

### 3.3 Содалитсодержащие породы массива Свартсбуйсдриф

Порода насыщенного тёмно-синего цвета с бледно-голубыми и белыми прожилками. Текстура породы массивная. Структура полнокристаллическая.

Содалит (85%). В проходящем свете прозрачный. В скрещенных николях не просветляется, так как изотропен. Имеет отчётливо отрицательный рельеф. Форма зёрен изометричная, преимущественно гипидиоморфная. Размер кристаллических зёрен варьирует от 0,05 до 0,2 мм (Рис. 16).



*Рисунок 16. Общий вид образца в шлифе. Гипидиоморфные зёрна содалита со светлой слюдой в проходящем свете (слева), в скрещенных николях (справа).*

Канкринит (10% площади шлифа). В проходящем свете прозрачный. В скрещенных николях цвет меняется от ярко-жёлтого до голубовато-зелёного. Рельеф отрицательный. Форма зёрен ксеноморфная, жилообразная. Есть трещины, заполненные цеолитами, возможно, натролитом. Размер зёрен изменяется от 2 до 10 мм.

Цеолиты, возможно натролит (5% от площади шлифа). В виде игольчато-волокнистых агрегатов развиваются по содалиту и канкриниту. В проходящем свете бесцветны, некоторые разновидности имеют буроватые цвета. Двупреломление слабое, поэтому в скрещенных николях серого цвета. Размер отдельных цеолитовых жил достигает 0,5 мм (Рис 17).

Светлая слюда (пока предположительно мусковит). В проходящем свете прозрачная. В скрещенных николях цвета изменяются от фиолетово-голубого до жёлто-красного. Форма зёрен ксеноморфная. Размер варьирует от 0,02 до 0,1 мм.

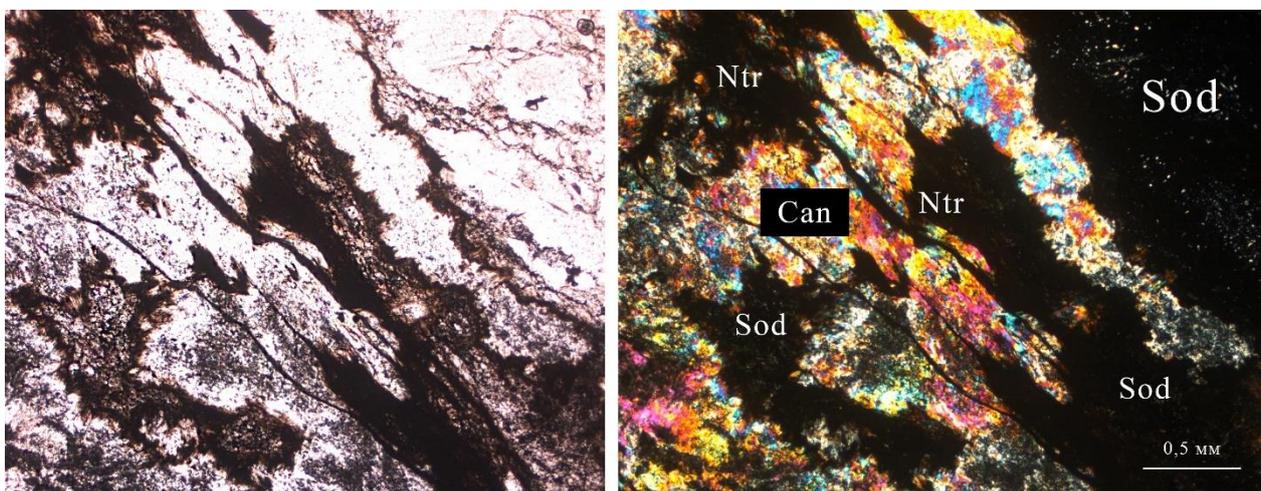


Рисунок 17. Общий вид образца в шлифе. В проходящем свете (слева), в скрещенных николях (справа). Sod – содалит, Can – канкринит, Ntr – натролит.

## 4 Минералогия содалитсодержащих пород

### 4.1 Содалитсодержащие породы Тикшеозёрского массива

Некоторые минералы, обнаруженные в шлифе, требуют уточнений. Поэтому дополнительно был проведён ряд анализов с привлечением дополнительных методов. Главными минералами являются - доломит, альбит, канкринит, содалит, эгирин и флогопит, второстепенные представлены натролитом.

**Доломит** крупнозернистый, с хорошо проявленной спайностью по ромбоэдру, размер зерен до 2 мм. Минерал обладает высокими цветами интерференции. Образует идиоморфные кристаллы. Был подтверждён методом рамановской спектроскопии (Рис. 18).

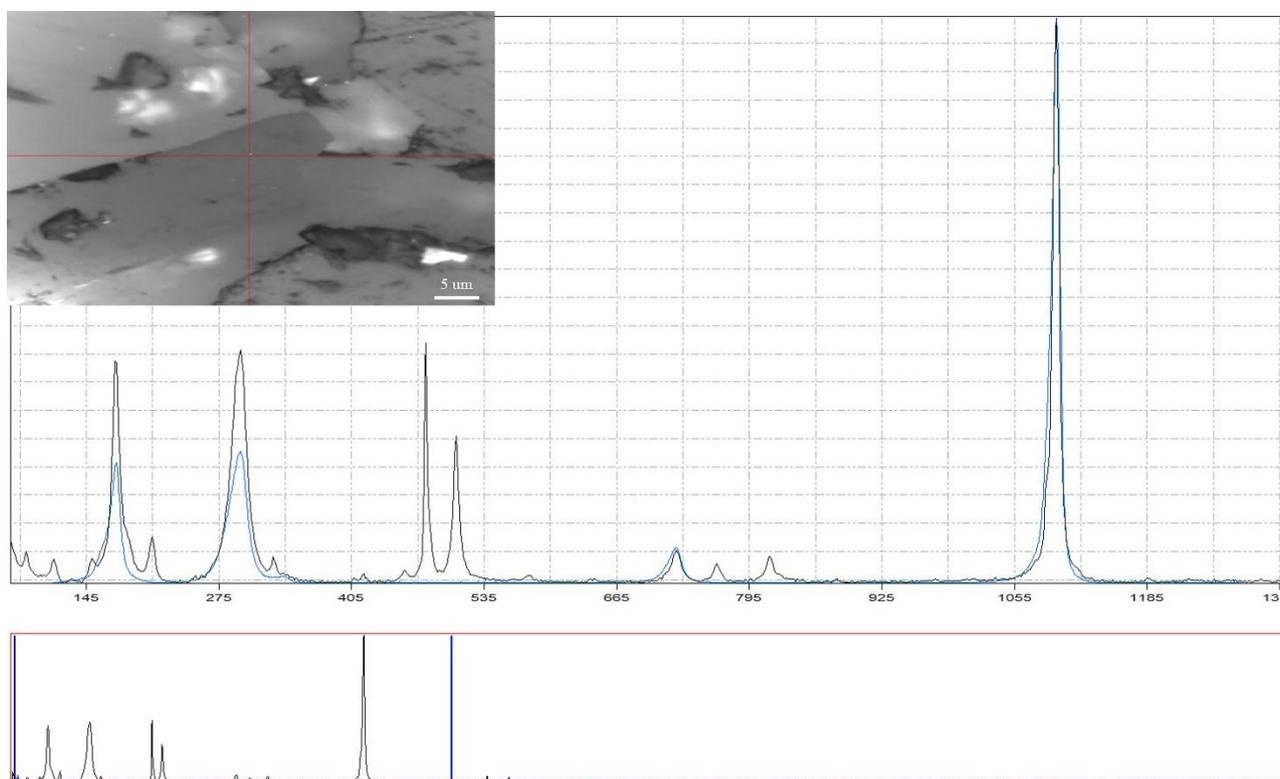


Рисунок 18. Спектр комбинационного рассеяния доломита (черный – мои результаты, синий – эталон). По горизонтальной оси – величина рамановского сдвига ( $\text{см}^{-1}$ ), по вертикальной оси интенсивность в относительных единицах.

**Альбит** образует ксеноморфные зерна, изредка присутствуют таблитчатые и гипидиоморфные кристаллы с хорошо проявленными полисинтетическим двойникованием. Размер зёрен варьирует от 0,8 до 3 мм. Встречаются крупные изометричные срастания нескольких индивидов альбита. Диагностика минерала также подтверждена рамановским спектром (Рис. 19).

**Канкринит** зеленого цвета и по нему развивается содалит. Выделения изометричной формы. В проходящем свете бесцветный, интерференционная окраска яркая пёстрая, рельеф отрицательный, шагрень отсутствует. Минерал был подтвержден рамановской спектроскопией, а также рентгенофазовым анализом, проведённым в исследовательской работе Поповой Е.А. 2023 года (Рис. 20, Табл. 1).

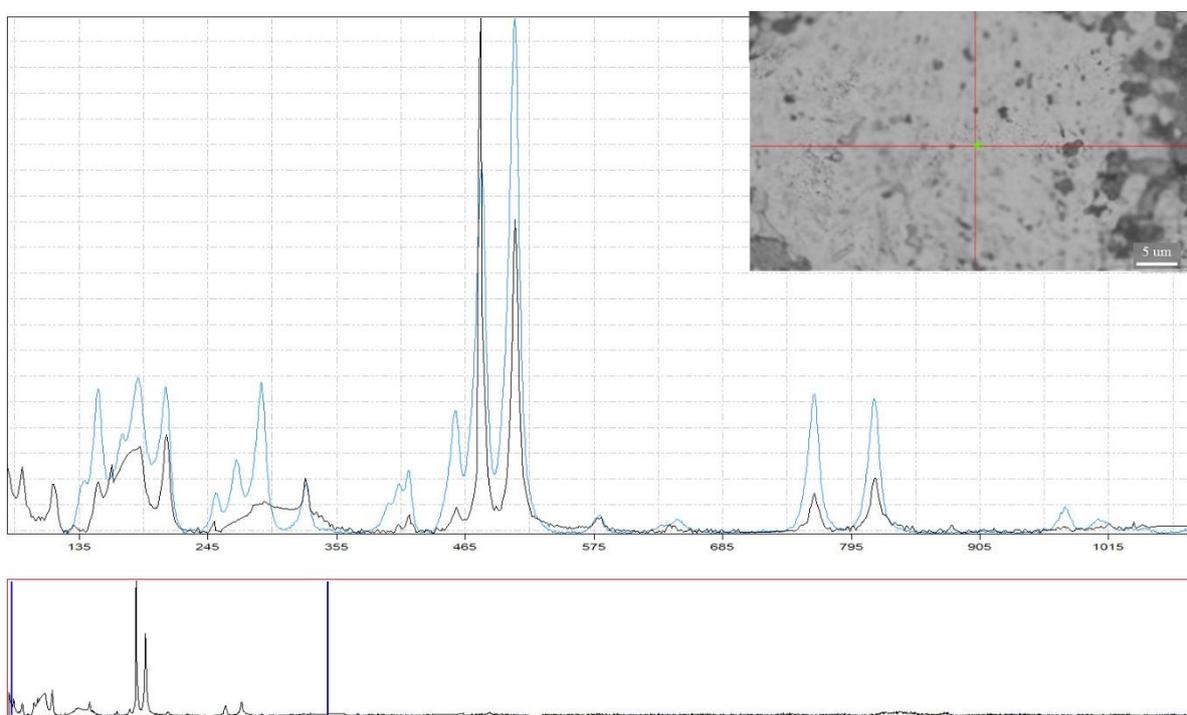


Рисунок 19. Спектр комбинационного рассеяния альбита (черный – мои результаты, синий – эталон). По горизонтальной оси – величина рамановского сдвига (см<sup>-1</sup>), по вертикальной оси интенсивность в относительных единицах.

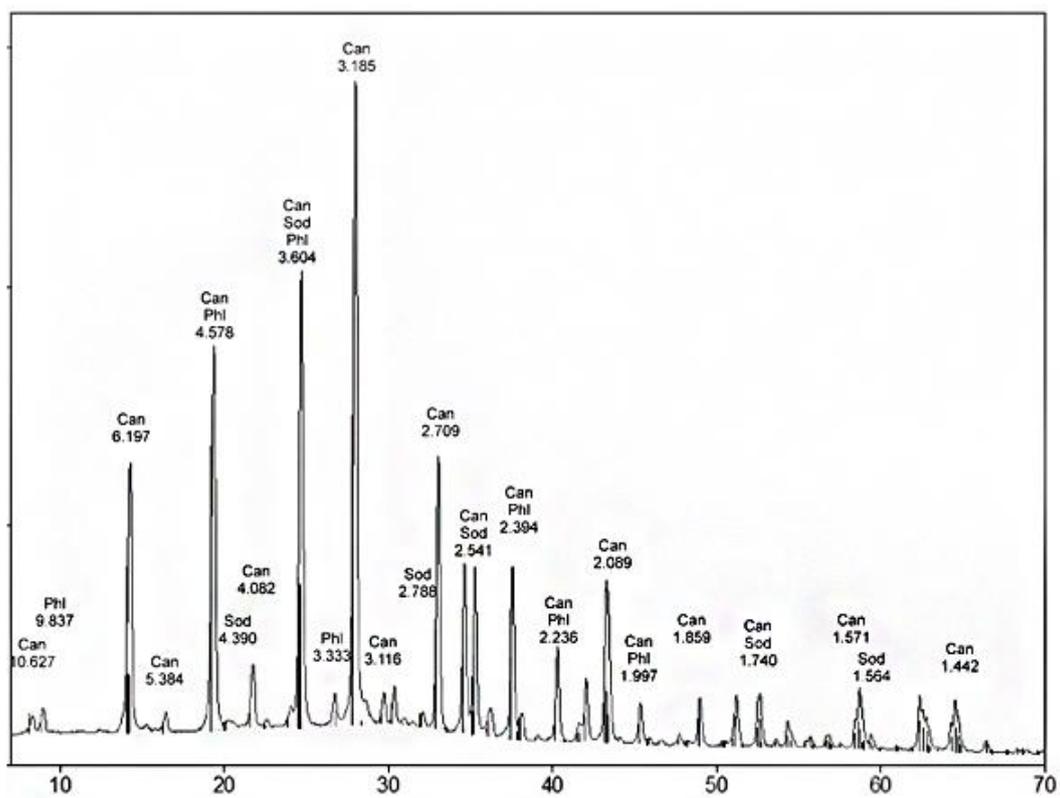


Рис. 20. Рентгенограмма канкринита. По горизонтальной оси угол  $2\text{-theta}$ , по вертикальной - интенсивность. Can – канкринит, Sod – содалит, Phi – флогопит (по данным Попова, 2023)

## Результаты расчета рентгенограммы канкринита

Наши данные		№ 00-084-0516			Наши данные		№ 00-084-0516		
d	I	d	I	hkl	d	I	d	I	hkl
10.627	2.38	10.903	6.0	100	2.357	3.22	2.370	1.8	112
6.197	39.95	6.295	51.9	110	2.304	0.70	2.316	1.0	202
5.384	3.08	5.452	3.1	200	2.236	15.98	2.247	12.3	321
4.579	56.96	4.632	89.7	101	2.167	2.87	2.181	2.5	500
4.082	9.38	4.121	8.6	210	2.148	9.90	2.157	8.9	411
3.936	0.96	3.971	1.1	111	2.089	24.88	2.098	18.8	330
3.700	2.01	3.731	2.4	201	2.081	11.36	2.092	17.7	302
3.604	67.42	3.634	47.9	300	2.052	0.66	2.061	0.8	240
3.185	100.00	3.210	100.0	121	1.997	6.33	2.006	6.7	501
3.116	2.40	3.148	0.7	220	1.976	0.74	1.985	0.3	222
3.003	4.49	3.024	2.9	130	1.946	0.72	1.958	0.3	150
2.941	5.59	2.963	6.7	301	1.904	1.67	1.911	1.7	241
2.709	42.09	2.726	32.6	400	1.859	8.10	1.865	9.7	402
2.587	26.07	2.603	25.8	131	1.810	0.69	1.817	0.7	600
2.541	26.06	2.559	26.3	002	1.783	8.17	1.792	2.8	430
2.478	3.95	2.501	2.7	230	1.740	8.76	1.746	6.5	250
2.394	27.72	2.406	27.4	401	1.708	1.37	1.712	1.5	601
2.369	2.66	2.379	2.7	140	1.687	4.77	1.692	4.0	431
1.680	1.53	1.685	2.6	103	1.487	10.52	1.490	11.1	701
1.656	1.09	1.660	1.5	502	1.479	5.11	1.486	9.0	133
1.648	1.93	1.652	2.1	251	1.465	0.48	1.468	0.9	432
1.623	1.74	1.628	2.9	203	1.449	5.05	1.450	5.9	261
1.618	1.57	1.622	2.2	332	1.442	8.50	1.446	9.4	403
1.601	0.91	1.605	1.3	422	1.406	2.25	1.409	3.3	323
1.578	4.99	1.581	5.5	611	1.372	0.81	1.374	0.9	360
1.571	11.01	1.576	10.3	123	1.361	0.59	1.363	0.7	800
1.564	1.73	1.574	7.3	440	1.345	0.53	1.347	0.5	541
1.554	2.73	1.558	2.6	530	1.487	10.52	1.490	11.1	701
1.538	0.18	1.544	0.4	303	1.479	5.11	1.486	9.0	133

**Содалит** присутствует в виде пятен и ксеноморфных выделений размером до 2 см, размер кристаллических зёрен варьирует 0,1 до 0,25 мм. Цвет изменяется от светло-голубого до сине-фиолетового, в зависимости от степени замещения канкринита, по которому он и развивается. В проходящем свете прозрачный. В скрещенных николях не просветляется, так как изотропен. Имеет отчётливо отрицательный рельеф и заметную шагрень. В некоторых местах по содалиту развивается натролит. Минеральный вид подтверждён рентгенофазовым анализом (Рис. 21, таблица № 4).

Минеральный вид клинопироксена был установлен методом рамановской спектроскопии – им оказался **эгирин** (Рис. 22). Он встречается в виде удлинённых призматических гипидиоморфных кристаллов, а также изометричных ксеноморфных выделений. Размер зёрен изменяется от 0,05 до 0,8 мм. Есть зёрна с хорошо проявленной спайностью под углами близкими к прямым (см рис. 13). В проходящем свете прозрачный, со буроватым оттенком. Наблюдается плеохроизм от практически бесцветного до светло-зеленоватого. В скрещенных николях имеет достаточно пёструю окраску: от малиново-синей до желто-зелёной. Рельеф средний положительный, шагреневая поверхность заметна.

**Флогопит** (как и натролит) был определён во время рентгенофазового анализа и подтверждён рамановской спектроскопией (Рис. 23).

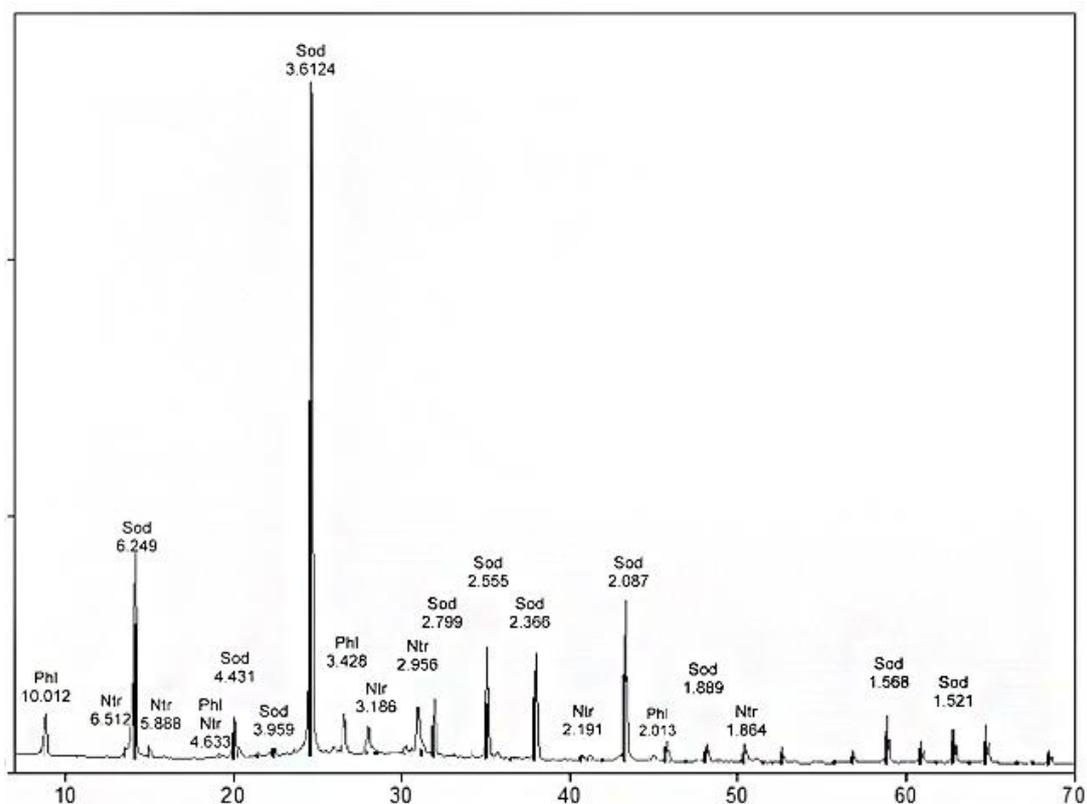


Рисунок 21. Рентгенограмма канкринита, флогопита и содалита. По горизонтальной оси угол 2-theta, по вертикальной -интенсивность. Ntr – натролит, Sod – содалит, Phl – флогопит (по данным Попова, 2023)

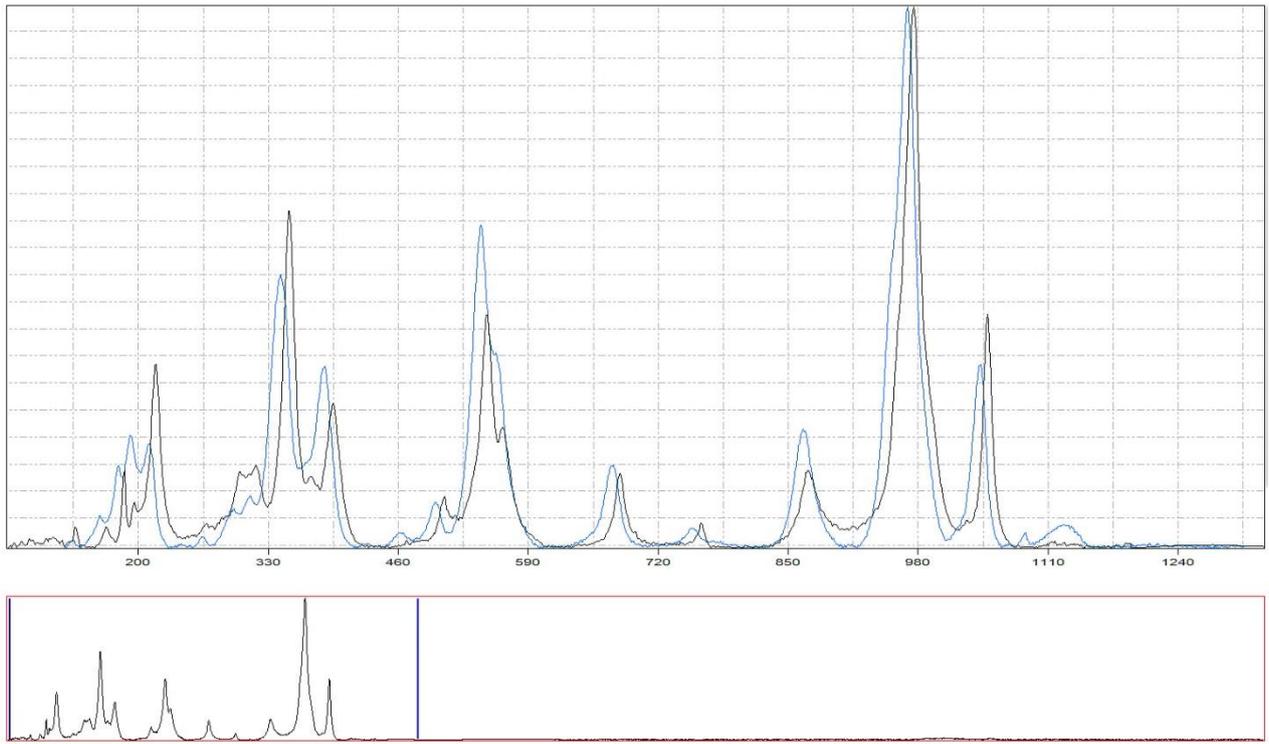


Рисунок 22. Спектр комбинационного рассеяния эгирина (черный – мои результаты, синий – эталон). По горизонтальной оси – величина рамановского сдвига ( $\text{см}^{-1}$ ), по вертикальной оси интенсивность в относительных единицах.

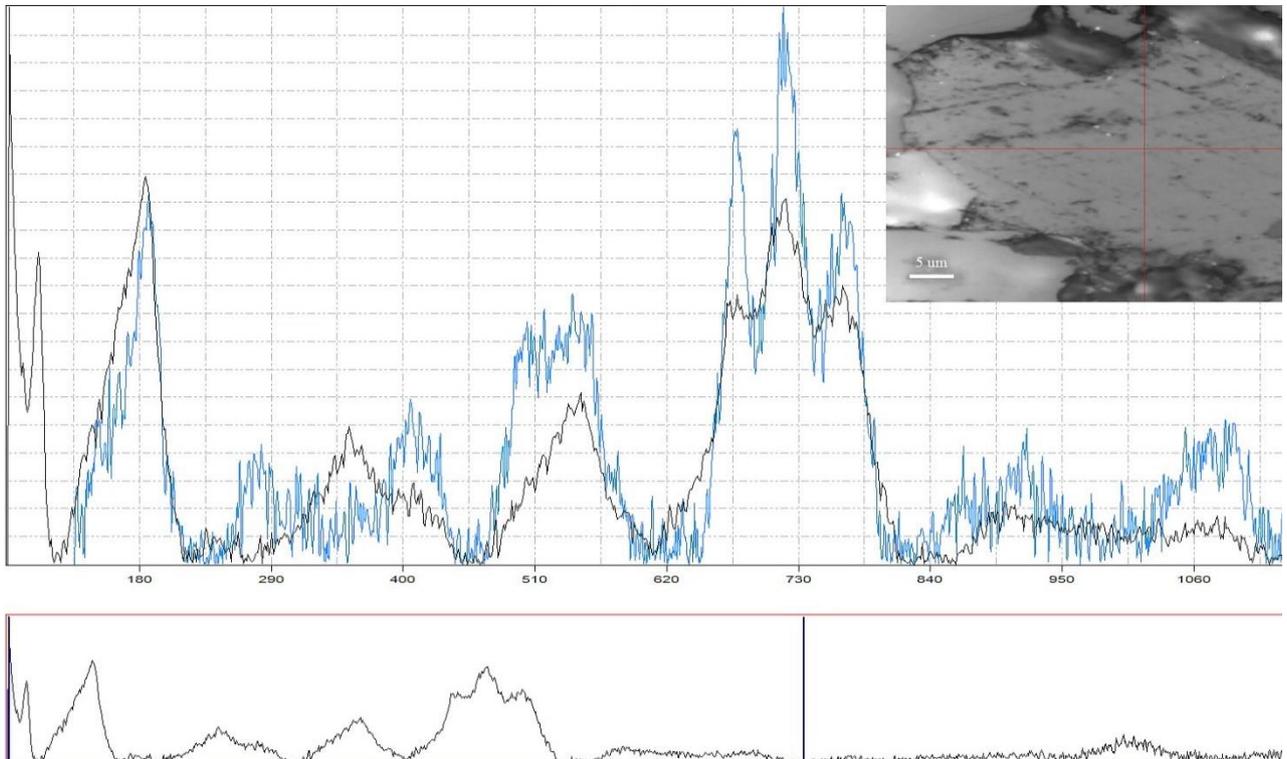


Рисунок 23. Спектр комбинационного рассеяния флогопита (черный – мои результаты, синий – эталон). По горизонтальной оси – величина рамановского сдвига ( $\text{см}^{-1}$ ), по вертикальной оси интенсивность в относительных единицах.

## 4.2 Содалитсодержащие породы Вишнёвогорского массива

Главные минеральные фазы представлены канкринитом, содалитом, магнетитом и анальцимом (Рис. 24). В качестве аксессуарных присутствует пиррохлор.

**Канкринит.** В образце цвет минерала изменяется от бежевого до голубовато-жёлтого в зависимости от степени замещения содалитом. В скрещенных николях цвет меняется от ярко-жёлтого до голубовато-зелёного. Рельеф отрицательный. Форма зёрен гипидиоморфная. Чётко видны трещины по плоскостям спайности, заполненные анальцимом. Размер зёрен изменяется от 2 до 5 мм.

**Содалит** имеет светло-синий цвет. В макрообразце присутствует в виде линз и пятен размером до 2,5 см. В скрещенных николях изотропен, имеет отчётливо отрицательный рельеф. Форма зёрен преимущественно изометричная, ксеноморфная. Размер изометричных зёрен изменяется от 0,1 до 1,0 мм.

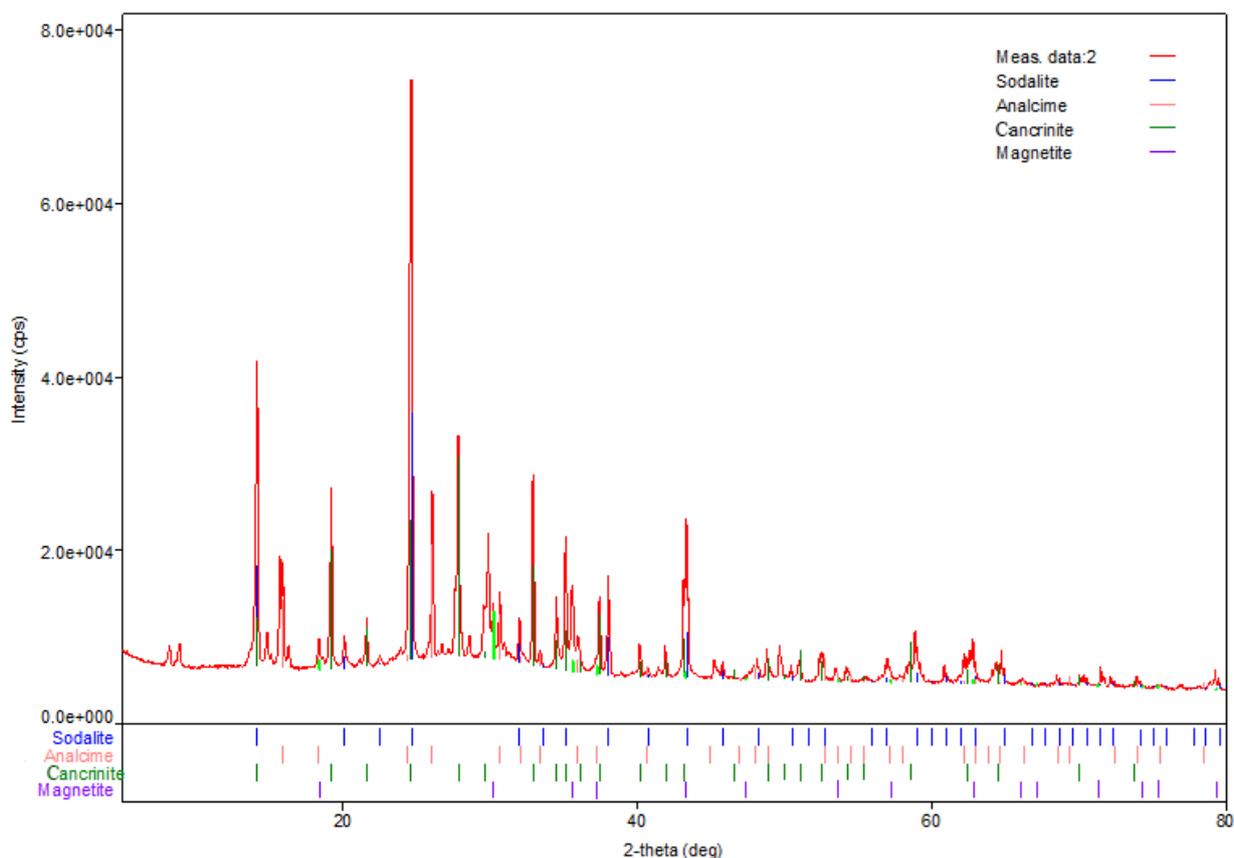


Рисунок 24. Рентгенограмма содалитовой породы Вишнёвогорского массива.

**Магнетит** железо-чёрного цвета, с металлическим блеском. Встречается в виде линз и прожилков толщиной до 1 см. Был диагностирован по ферромагнитным свойствам и подтверждён методом рамановской спектроскопии (Рис. 25).

**Анальцим** развивается в виде игольчато-волоконистых агрегатов и заполняет трещины в канкрините. В проходящем свете бесцветен. В скрещенных николях серых цветов разной яркости. Размер отдельных зёрен не превышает 0,01 мм.

**Пирохлор** встречается в канкрините в виде микровключений. Был диагностирован методом рамановской спектроскопии (Рис. 26)

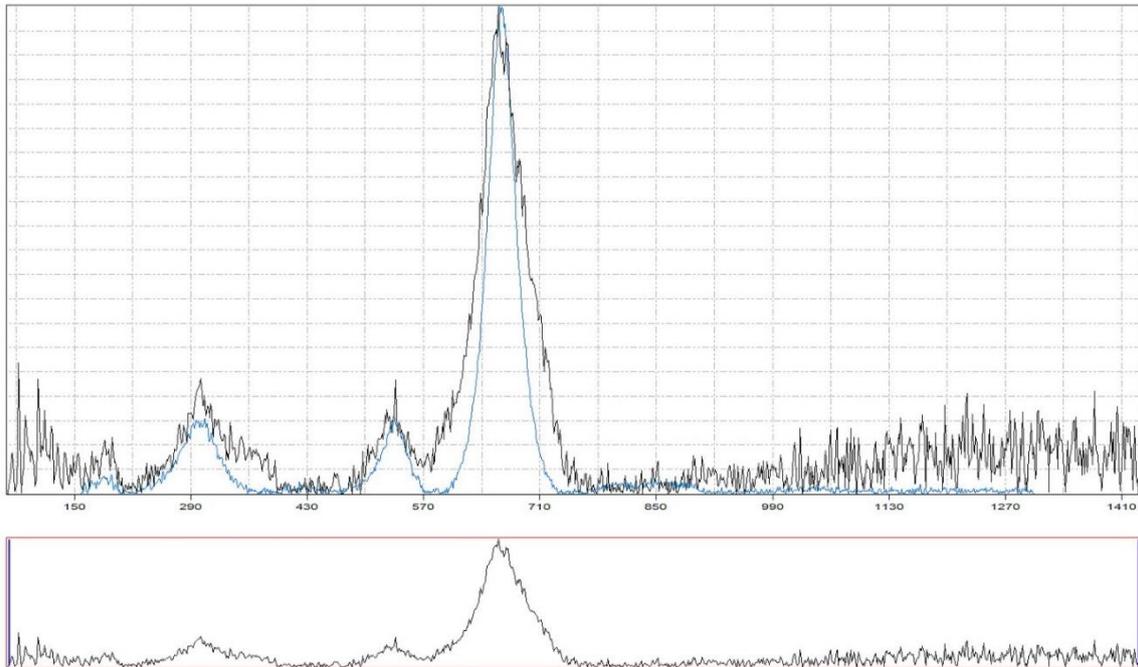


Рисунок 25. Спектр комбинационного рассеяния магнетита (черный – мои результаты, синий – эталон). По горизонтальной оси – величина рамановского сдвига ( $\text{см}^{-1}$ ), по вертикальной оси интенсивность в относительных единицах.

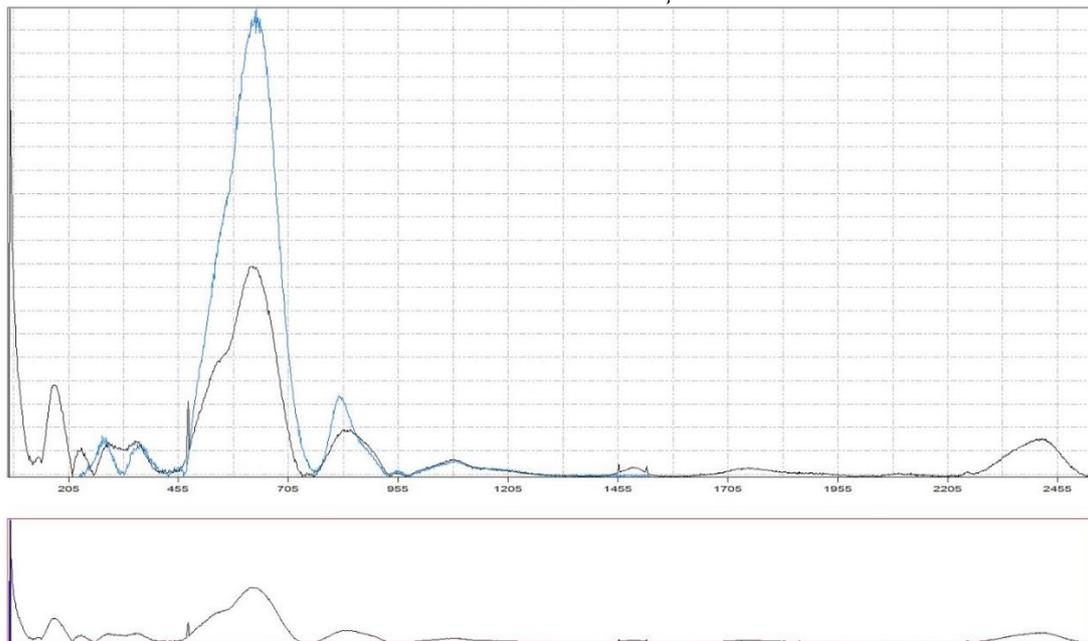


Рисунок 26. Спектр комбинационного рассеяния пирохлора (черный – мои результаты, синий – эталон). По горизонтальной оси – величина рамановского сдвига ( $\text{см}^{-1}$ ), по вертикальной оси интенсивность в относительных единицах.

## Результаты расчета рентгенограммы содалита и анальцима

Содалит				
Наши данные		№ 00-037-0476		
d	I	d	I	hkl
6.262	51.40	6.280	40.0	110
4.425	5.010	4.440	5.0	200
3.954	1.34	3.970	1.0	210
3.612	100.00	3.824	100.00	211
2.797	8.85	2.807	8.0	310
2.554	26.61	2.563	16.0	222
2.364	21.99	2.373	16.0	321
2.217	1.52	2.219	1.0	400
2.086	32.69	2.093	20.0	330
1.979	3.61	1.985	3.0	420
1.888	3.73	1.893	3.0	332
1.807	2.69	1.812	2.0	422
1.739	4.52	1.741	2.0	510
1.613	2.98	1.621	2.0	521
1.499	1.21	1.501	1.0	531
1.358	0.31	1.354	1.0	533
1.318	4.71	1.324	5.0	630
1.259	0.45	1.255	1.0	710

Анальцим				
Наши данные		№ 00-041-1478		
d	I	d	I	hkl
5.575	17.37	5.590	50	211
4.828	4.40	4.844	11	220
3.418	30.95	3.425	100	400
2.915	12.28	2.921	40	332
2.797	8.85	2.797	8.0	422
2.683	2.64	2.687	12	431
2.495	5.17	2.501	11	521
2.416	1.66	2.423	8.0	440
2.217	1.52	2.222	9.0	611
1.898	2.27	1.901	10	640
1.856	0.95	1.855	7.0	721
1.739	4.52	1.741	20	651
1.713	2.50	1.713	8.0	800
1.687	1.68	1.687	6.0	741
1.613	2.98	1.615	3.0	660
1.593	0.92	1.593	4.0	831
1.491	6.53	1.495	2.0	842
1.410	0.90	1.414	5.0	932
1.368	2.42	1.371	3.0	860
1.358	0.31	1.357	8.0	772
1.280	2.24	1.284	4.0	871
1.259	0.45	1.282	3.0	961

### 4.3 Содалитсодержащие породы массива Свартсбуйсдриф

Главными минералами декоративных содалитсодержащих пород из Намибии являются содалит, натролит и мусковит. Второстепенные минералы представлены канкринитом, а также аргентопиритом, которые были диагностированы рамановской спектроскопией (Рис. 27-31, Табл. 3-7).

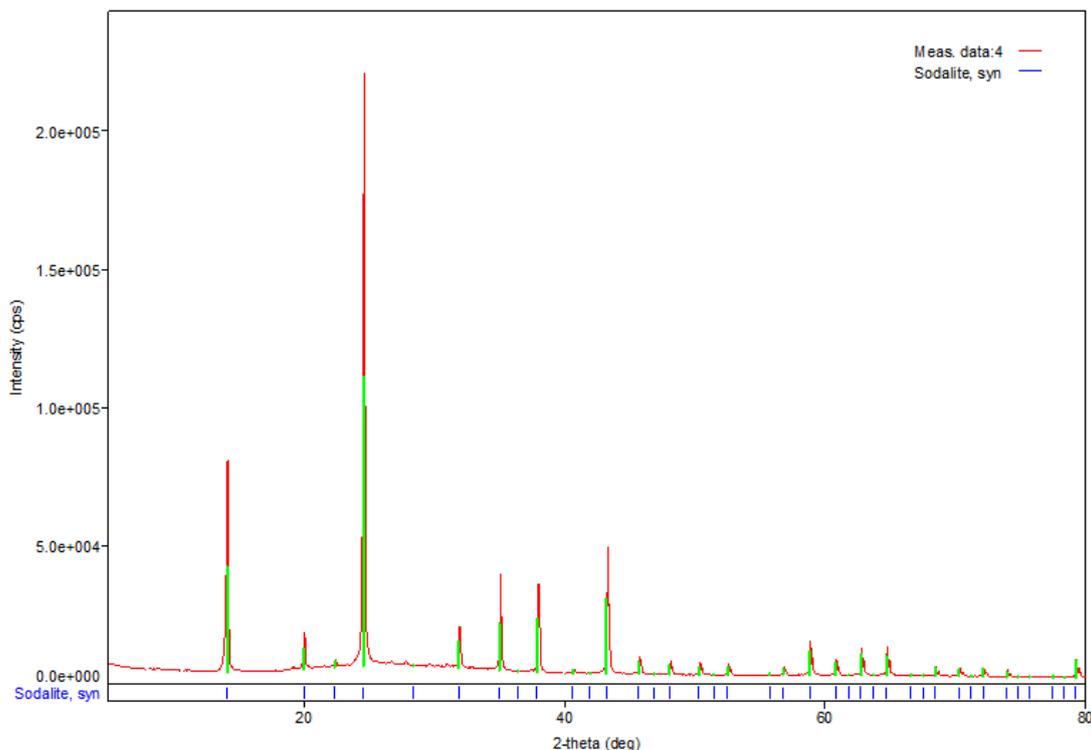


Рисунок 27. Рентгенограмма содалитовой породы массива Свартсбуйсдриф.

Таблица № 3.

#### Результаты расчета рентгенограммы содалита

Наши данные		№ 00-088-2086		
d	I	d	I	hkl
6.253	32.19	6.278	36.6	110
4.425	5.90	4.439	6.9	200
3.959	1.03	3.971	1.9	210
3.612	100.00	3.625	100.0	211
2.798	7.50	2.808	8.6	310
2.554	18.42	2.563	16.1	222
2.365	17.89	2.373	18.3	321
2.212	0.88	2.220	1.1	400
2.086	25.64	2.093	25.8	411
1.980	3.53	1.985	4.2	420
1.888	2.89	1.893	3.0	332
1.808	2.76	1.812	2.7	422
1.738	2.36	1.741	2.8	431

Наши данные		№ 00-088-2086		
d	I	d	I	hkl
1.646	0.14	1.649	0.4	432
1.619	1.94	1.621	2.2	521
1.567	7.31	1.570	8.2	440
1.521	3.47	1.523	4.1	530
1.478	5.75	1.480	6.9	442
1.439	6.23	1.440	6.7	532
1.402	0.39	1.404	0.4	620
1.368	2.05	1.370	2.6	541
1.337	1.84	1.339	2.5	622
1.308	1.95	1.309	2.6	631
1.280	1.56	1.282	1.8	444
1.254	0.09	1.256	0.1	543
1.230	0.34	1.231	0.4	640

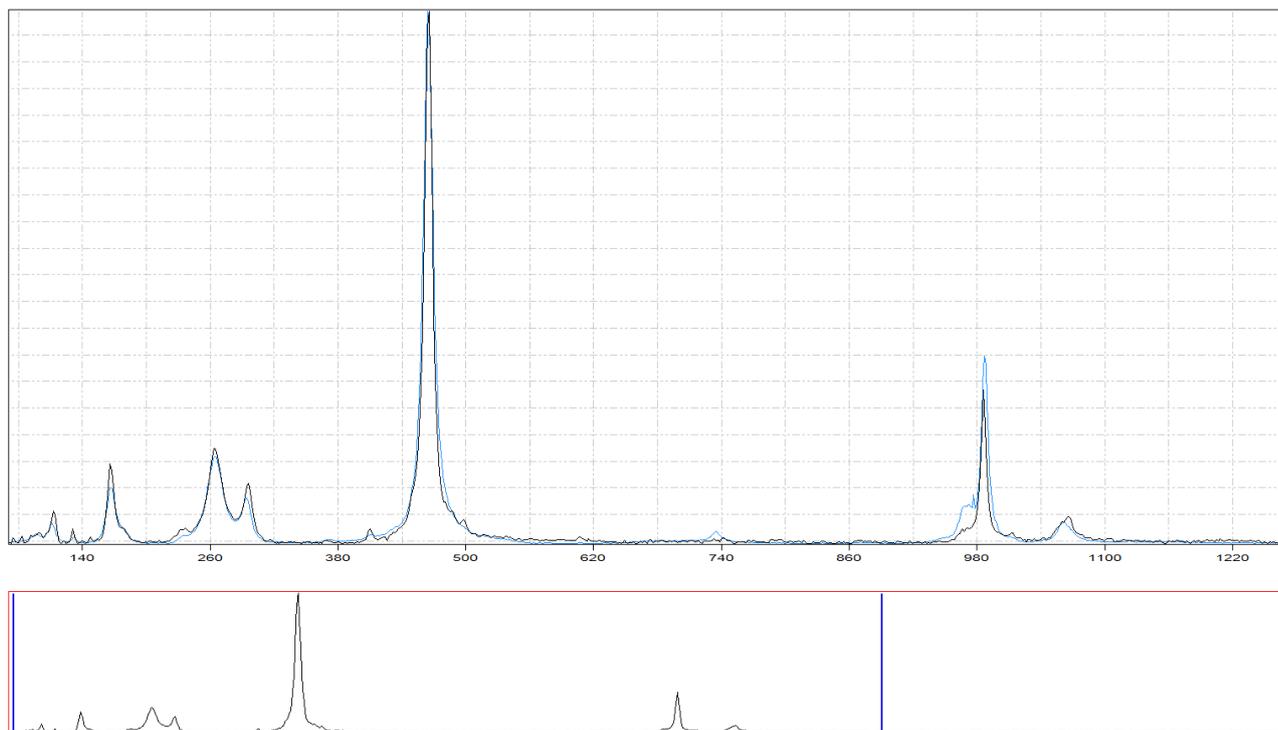


Рисунок 28. Спектр комбинационного рассеяния содалита (черный – мои результаты, синий – эталон). По горизонтальной оси – величина рамановского сдвига ( $\text{см}^{-1}$ ), по вертикальной оси интенсивность в относительных единицах.

Таблица № 4.

#### Расшифровка рамановского сдвига для содалита

Рамановский сдвиг, $\text{см}^{-1}$	Расшифровка	Источник
166	Колебания катионной подрешетки при $175 \text{ см}^{-1}$	Mikuła et al. (2015)
263	Na–O с изгибом Al/Si-тетраэдров	Hettmann et al. (2012)
	Полоса комбинационного рассеяния из-за аниона $\text{S}_3$	Lede et al. (2007)
296	Симметричный изгиб Al/Si-тетраэдров	Hettmann et al. (2012)
464	$\text{SiNa}_4$ -растяжение тетраэдров	Hettmann et al. (2012)
	Полоса комбинационного рассеяния из-за аниона $\text{SiO}_4$ , изгиб Si-O	Dutta and Del Barco (1985)
986	Растяжение симметричных Al/Si-тетраэдров/частота растяжения $A_1 V_1$ содалитового каркаса	Hettmann et al. (2012)
1057	Асимметричное растяжение Al/Si-тетраэдров	Hettmann et al. (2012)
	Сдвиг полосы комбинационного рассеяния аниона $\text{CO}_3$	Frezzotti et al. (2012)

## Химический состав содалита

Результаты		Атомное количество	Общий делитель	Коэффициенты (рассчитаны на сумму зарядов)
Na <sub>2</sub> O	24,10			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,50	0,62	6,02	
SiO <sub>2</sub>	37,77	0,63	6,11	
Cl	7,26	0,21	2,94	
Сумма	99,37			
Сумма - Cl <sub>II</sub>	97,72			

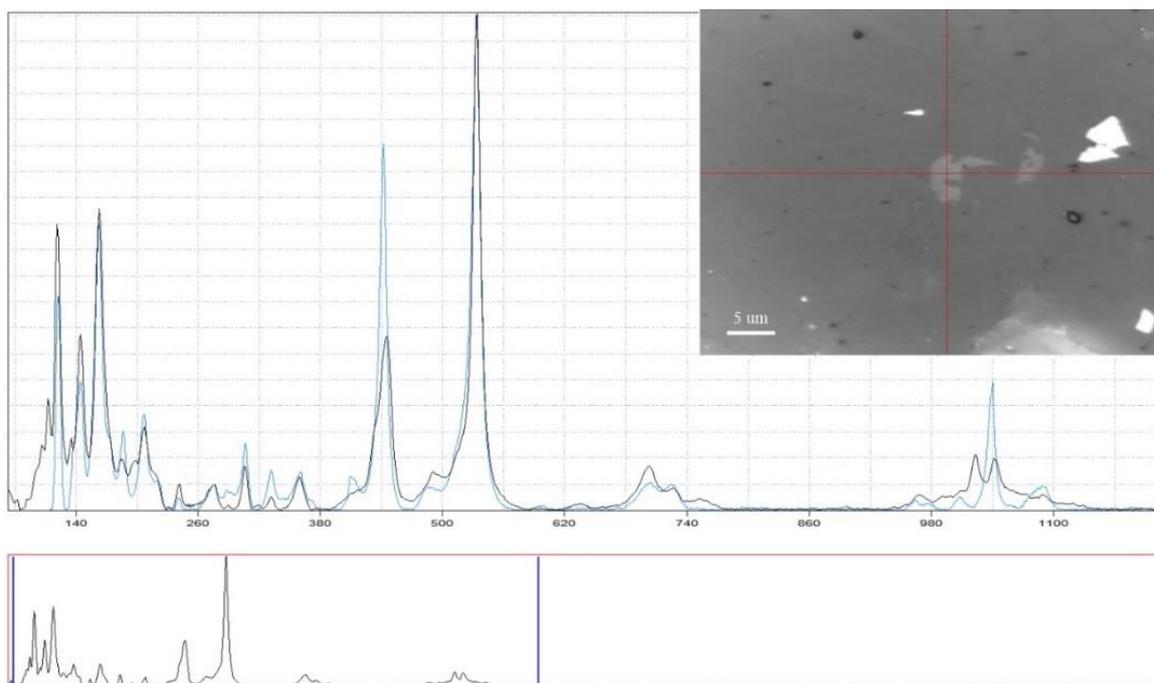


Рисунок 29. Спектр комбинационного рассеяния натролита (черный – мои результаты, синий – эталон). По горизонтальной оси – величина рамановского сдвига ( $\text{см}^{-1}$ ), по вертикальной оси интенсивность в относительных единицах.

## Химический состав натролита

Результаты		Атомное количество	Общий делитель	Коэффициенты (рассчитаны по кислороду)
Na <sub>2</sub> O	15,02			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,77	0,53	1,99	
SiO <sub>2</sub>	49,06	0,81	3,05	
Сумма	90,85			

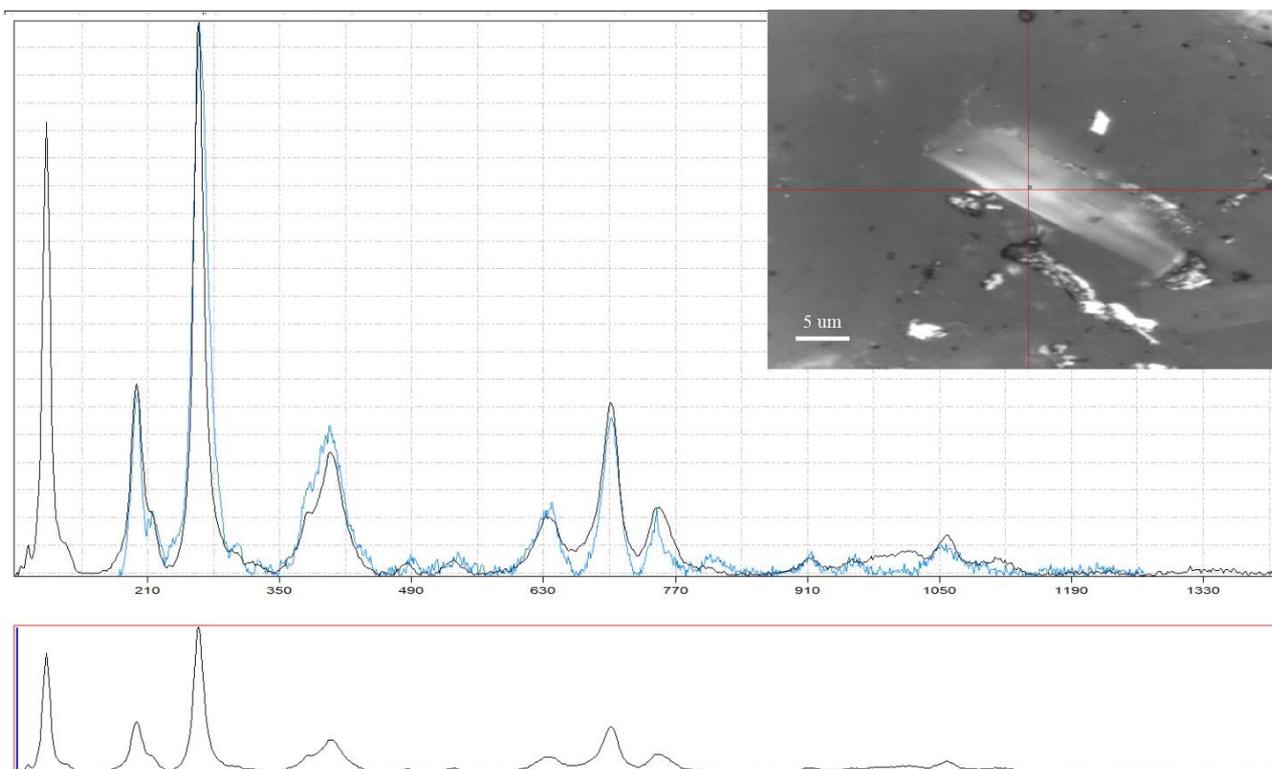


Рис. 30. Спектр комбинационного рассеяния мусковита (черный – мои результаты, синий – эталон). По горизонтальной оси – величина рамановского сдвига ( $\text{см}^{-1}$ ), по вертикальной оси интенсивность в относительных единицах.

Таблица №7

### Химический состав мусковита

Результаты		Атомное количество	Общий делитель	Коэффициенты (рассчитаны на 22 заряда)
Na <sub>2</sub> O	0,56	0,01	0,257	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39,85	0,78		3,04
SiO <sub>2</sub>	46,07	0,77		2,99
K <sub>2</sub> O	10,94	0,23		0,89
Сумма	97,42			

## 5 Природа окраски содалита из Намибии

Декоративные свойства содалита из Намибии в первую очередь определяются его цветом, который варьирует от насыщенно-синего до тёмно-сине-фиолетового. Такая окраска обуславливается наличием элемента-хромофора – серы. Она входит в структуру минерала в форме  $S_3^-$  радикал аниона.

В ИК-спектре образца из Намибии наблюдаются (Рис. 31): отчётливая полоса при  $580,49\text{ см}^{-1}$ , что указывает на присутствие  $S_3^-$  радикал аниона; слабая полоса S-O растягивающих колебаний при  $1136,90\text{ см}^{-1}$ ; полоса при  $667,77\text{ см}^{-1}$ , указывающая на возможное присутствие молекул  $S_4$  (Chukanov, 2020). У более светлых образцов содалита из Карелии и Урала полоса, отвечающая за присутствие  $S_3^-$  радикал аниона практически не проявлена (Рис. 32, 33).

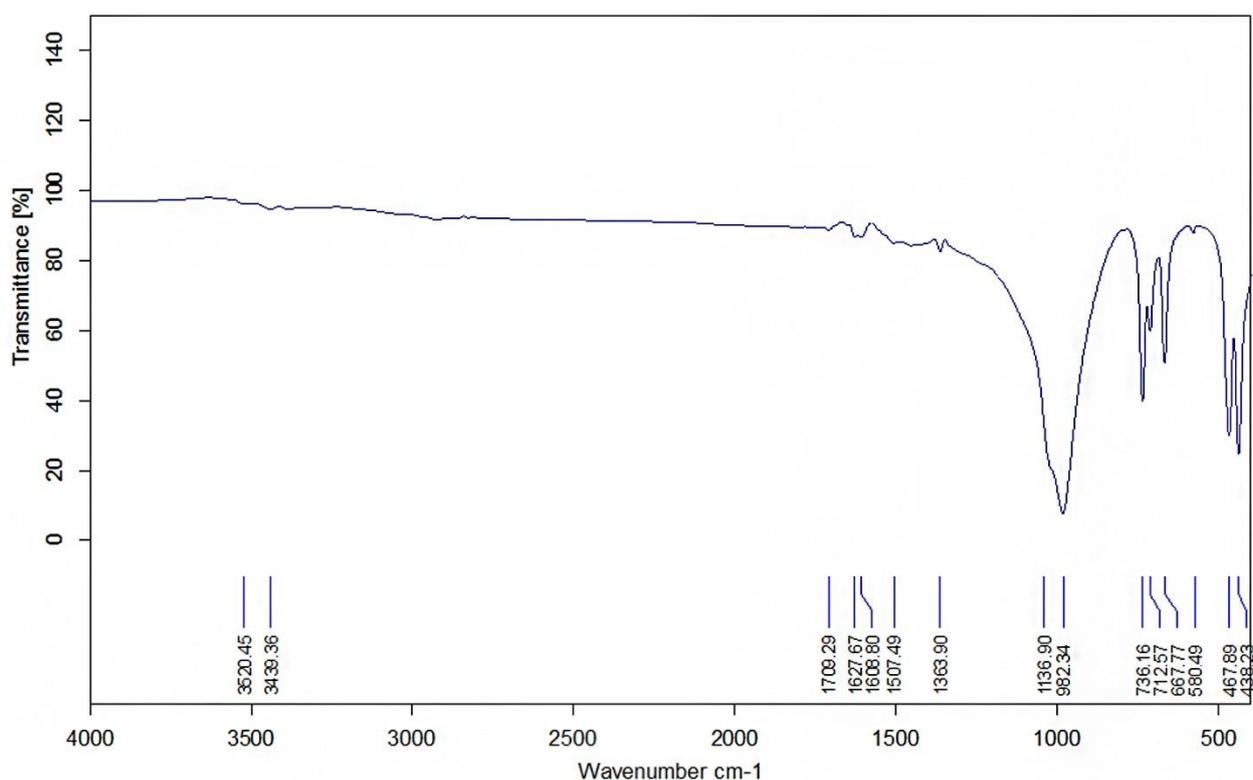


Рисунок 31. Инфракрасный спектр содалита из массива Свартбуйсдриф

Также стоит упомянуть, что некоторые области содалита могут флуоресцировать в оранжевом цвете. За это явление отвечает анион  $S_2^-$  (он не имеет внутренних степеней свободы и, следовательно, его полосы поглощения не могут наблюдаться в диапазоне волновых чисел  $360\text{--}3800\text{ см}^{-1}$ ). Пик возбуждения для образца содалита находится на длине волны  $385\text{ нм}$ , в длинноволновом ультрафиолетовом диапазоне (<https://www.fluomin.org>).

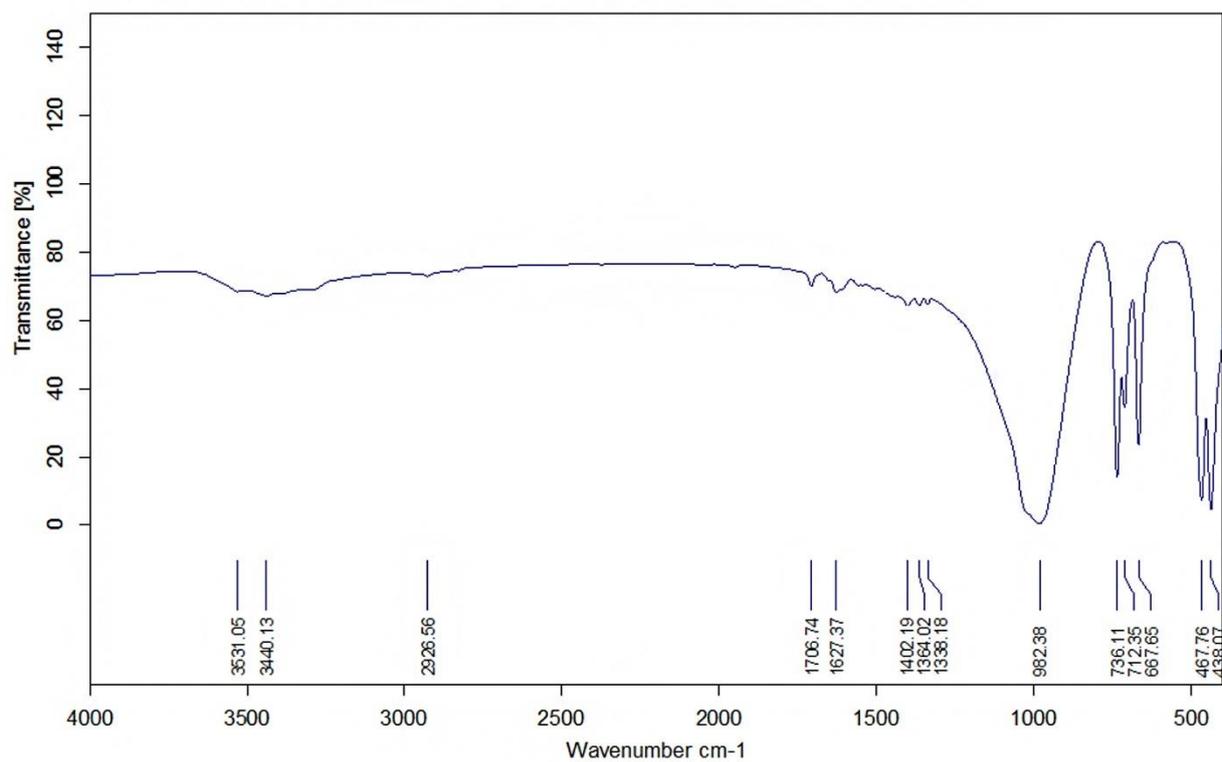


Рисунок 32. Инфракрасный спектр содалита из Тикшеозёрского массива

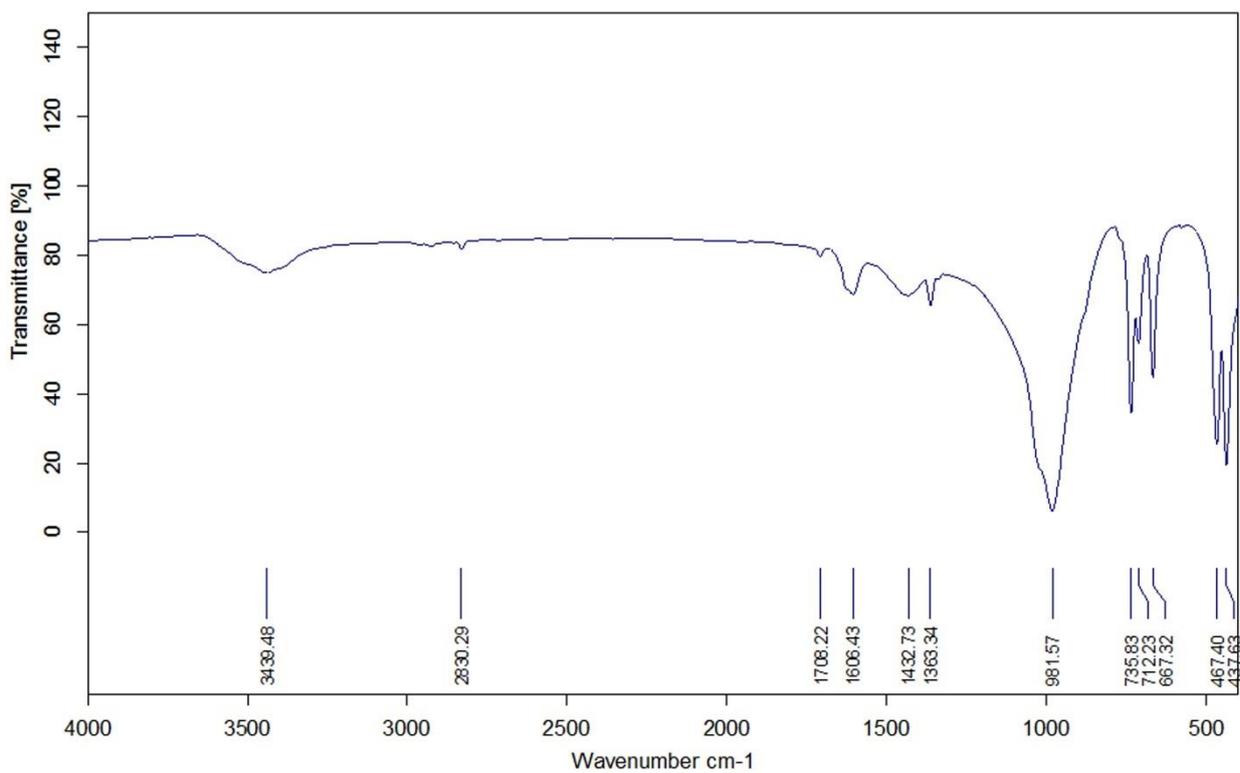


Рисунок 33. Инфракрасный спектр содалита из Вишнёвогорского массива

## Заключение

В данной работе были проведены исследования, направленные на изучение декоративных свойств, а также минерального и химического состава содалитовых пород из Намибии, Карелии и Урала.

Для определения минералов использовались навыки, полученные в ходе обучения за четыре года бакалавриата «Геологии». Была изучена литература по геологии проявлений содалита, произведено петрографическое описание минералов и определён химический состав главных минералов. А также объяснена природа синей окраски содалита, определяющая его главные декоративные свойства. Все задачи выполнены, поставленная цель исследования достигнута.

По итогу можно составить сводную таблицу, отражающую минеральный состав, а также метод анализа, которым минерал был диагностирован (Табл. 8).

Таблица №8

Сводная таблица минерального состава содалитовых пород из Намибии

	Содалит	Натролит	Мусковит	Канкринит	Аргентопирит
Визуальный анализ	+	-	-	-	-
Петрографический анализ	+	+	+	+	-
Рентгенофазовый анализ	+	-	-	-	-
Рамановская спектроскопия	+	+	+	-	+
Электронно-зондовый микроанализ	+	+	+	-	-

## Литература

1. Булах А.Г., Золотарёв А. А., Кривовичев В. Г. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб: Изд-во С-Петербур. Ун-та 2014-133 с
2. Левин В. Я., Роненсон Б. М., Самков В. С. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Геолком, 1997. 274 с.
3. Нишанбаев Т. П., Рассомахин М. А., Блинов И. А., Попова В. И. Минералы содалит-канкринитового пегматита в Вишнёвогорском миаскитовом массиве (Южный Урал). Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, 2016.
4. Попова Е. А. Минеральная ассоциация содалит содержащих пород Тикшеозерского массива (Северная Карелия). Санкт-Петербургский государственный университет. 2023.
5. Фролов А. А., Толстов А. В., Белов С. В. Карбонатитовые месторождения России. М., 2003. 403 с
6. Шарков Е. В., Богина М. М., Чистяков А. В. Ультрамафит-щелочно-карбонатитовые интрузивные комплексы как результат порционного плавления головных частей мантийных плюмов, обогащенных карбонатитовым флюидом (на примере Тикшеозерского комплекса, Северная Карелия) // Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований. Труды к 90-летию ИГЕМ РАН.2020. с. 489-492
7. Щитцов В. В., Бубнова Т. П., Гаранжа А. В., Скамницкая Л. С., Щитцова Н. И. Геолого-техническая и экономическая оценка ресурсного потенциала карбонатитов Тикшеозерского массива (Формация ультраосновных – щелочных пород и карбонатитов), 2007.
8. Chukanov N.V., Sapozhnikov A.N., Shendrik R.Y., Vigasina M.F and Ralf Steudel. Spectroscopic and Crystal-Chemical Features of Sodalite-Group Minerals from Gem Lazurite Deposits. (2020)
9. Dutta PK, Del Barco B. Raman spectroscopic studies of zeolite framework. Hydrated zeolite A and the influence of cations. J Phys Chem US 89:1861–1865. (1985)
10. Druppel, K., von Seckendorff, V. & Okrusch, M. Subsolidus reaction textures in anorthosites of the Kunene Intrusive Complex, NW Namibia. European Journal of Mineralogy 13, 289–309. (2001)
11. Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. Journal of Geochemical Exploration 112. (2012)

12. *Hettmann K, Wenzel T, Marks M, Markl G.* The sulfur speciation in S-bearing minerals: new constraints by a combination of electron microprobe analysis and DFT calculations with special reference to sodalite-group minerals. *Am Miner* 97:1653–1661. (2012)
13. *Lede B, Demortier A, Gobeltz-Hautecœur N, Lelieur JP, Picquenard E, Duhayon C.* Observation of the  $\nu_3$  Raman band of S3 inserted into sodalite cages. *J Raman Spect* 38:1461–1468. (2007).
14. *Littmann, S., Romer, R.L. & Okrusch, M.* Nephelinsyenite der Epembe–Swartbooisdrif-Alkali-Provinz (ESAP)/NW Namibia. *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Beihefte zum European Journal of Mineralogy* 12, 115. (2000)
15. *Marks, Michael.* The Ilímaussaq Alkaline Complex, South Greenland. 10.1007/978-94-017-9652-1\_14. (2015).
16. *Mayer, A., Hofmann, A. W., Sinigoi, S. & Morais, E.* Mesoproterozoic Sm–Nd and U–Pb ages for the Kunene Anorthositic Complex of SW Angola. *Precambrian Research* 133, 187–206. (2004)
17. *Mikula A, Krol M, Kolezynski A.* The influence of the longrange order on the vibrational spectra of structures based on sodalite cage. *Spectrochim Acta A* 144:273–280. (2015)
18. *Nuria, S., Bernardo, A., and Vivien, S.* The Chinchorro culture. UNESCO. (2014).
19. *Richard Stephen James B.Sc.* The Properties of Sodalite and its Petrogenesis at the Princess Quarry, Bancroft, Ontario. McMaster University. (1965).
20. *Theo Aronson.* Princess Margaret: A Biography (Theo Aronson Royal History). (2013)
21. <https://www.mindat.org>
22. <https://www.fluomin.org>
23. <https://nensy.ru>
24. <https://spb.sunlight.net/catalog>
25. <https://www.fotosselect.ru/blenheim-palace-oxfordshire>