

*На правах рукописи*

**Акбарпуран Хайяти Сима Абдолрахимовна**



**Р-Т ТРАЕКТОРИИ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ  
ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ  
КОМПЛЕКСОВ НЮ ФРИСЛАНДА, АРХИПЕЛАГ  
ШПИЦБЕРГЕН**

*Специальность 1.6.4. Минералогия, кристаллография.  
Геохимия, геохимические методы поисков полезных  
ископаемых*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный руководитель:**

доктор геолого-минералогических наук, доцент

*Гульбин Юрий Леонидович*

**Официальные оппоненты:**

*Козловский Василий Михайлович*

доктор геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, лаборатория метаморфизма и метасоматизма, заведующий лабораторией;

*Скобленко Анфиса Владимировна*

кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук, лаборатория геодинамики позднего докембрия и фанерозоя, старший научный сотрудник.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», г. Петрозаводск.

Защита диссертации состоится **25 апреля 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.3 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 25 февраля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВ  
Евгений Алексеевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Несмотря на большое число работ, посвященных древним метаморфическим комплексам Шпицбергена, они продолжают оставаться в центре внимания геологов. Во многом это связано с тектонической позицией архипелага, являющегося северо-западным окончанием Евразии и обладающего сложным геологическим строением, расшифровка которого имеет ключевое значение для понимания последовательности тектоно-термальных событий, определявших докембрийскую и фанерозойскую историю региона. К числу дискуссионных вопросов относится роль Шпицбергена в становлении и эволюции протерозойских и ранне-среднепалеозойских складчатых систем Северной Европы и Восточной Гренландии.

Полуостров Нью Фрисланд расположен на севере острова Западный Шпицберген. Эта область считается тектонотипом кристаллического фундамента архипелага (Красильщиков, 1970). В западной части полуострова находится протяженный антиклинорий, сложенный метаморфическими породами, многие вопросы генезиса которых остаются открытыми. Речь идет, в первую очередь, о термобарической эволюции и возрасте метаморфических комплексов (и, как следствие, геодинамических обстановках их формирования). Решению этих вопросов может помочь использование современных методов минералого-геохимических исследований (геохронологических, методов минеральной термобарометрии и физико-химического моделирования минеральных парагенезисов).

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблемами геологии и геохронологии архипелага Шпицберген занимались многие отечественные (Раабен, Забродин, 1969; Красильщиков, 1973; Евдокимов, 2000; Тебеньков и др., 2004, и др.) и зарубежные геологи (Harland, Wilson, 1956; Hjelle et al., 1986; Dallmann et al., 2002, 2020, и др.). Большое число публикаций посвящено в том числе Нью Фрисланду (Bayly, 1957; Harland, 1959; Абакумов, 1965; Gayer et al., 1966; Manby, 1990; Harland et al., 1992; Gee et al., 1992; Larionov et al., 1993; Johansson et al., 1995; Tebenkov et al., 1996; Witt-Nilsson et al., 1998; Lyberis, Manby, 1999; Hellman et al., 2001; Гавриленко и др., 2004; Сироткин, Евдокимов, 2011, 2020, и др.). Тем не менее, этот регион по-прежнему остается малоизученной территорией. В частности, крайне неоднородны полученные за многие годы геохронологические данные. Остается открытым вопрос о

возрасте метаморфизма пород кристаллического фундамента. Условия формирования метаморфических комплексов требуют уточнения с использованием современных минеральных термобарометров. Недостаточно работ, посвященных Р-Т траекториям.

**Объект исследования** – породы и минералы метаморфических комплексов полуострова Нью Фрисланд, остров Западный Шпицберген. Каменный материал был предоставлен заведующим сектором Шпицбергена ВНИИОкеангеология д.г.-м.н. А.Н. Сироткиным. В рамках подготовки диссертации была изучена коллекция представительных образцов пород, слагающих серии Атомфьелла и Моссель в северной части Западного Нью Фрисланда.

**Предмет исследования** – минералого-геохимические особенности пород кристаллического фундамента Западного Нью Фрисланда упомянутых серий.

**Целью работы** определение условий минералообразования и оценка возраста минеральных парагенезисов метаморфических пород серий Атомфьелла и Моссель (на примере северной части Западного Нью Фрисланда). Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) изучение взаимоотношений, состава и зональности породообразующих и акцессорных минералов метаморфических пород;
- 2) оценка температур и давлений, при которых были уравновешены минералы в ходе метаморфизма;
- 3) анализ валового химического состава пород и построение изохимических диаграмм;
- 4) построение Р-Т траекторий;
- 5) датирование минералов и горных пород;
- 6) геодинамическая интерпретация полученных данных.

#### **Научная новизна работы**

1. Уточнены условия формирования минеральных парагенезисов, слагающих породы серий Атомфьелла и Моссель, построены Р-Т траектории, характеризующие эволюцию минералообразования в ходе метаморфизма. Показано, что породы обеих серий испытали низкоградиентный метаморфизм кианит-силлиманитовой серии (умеренных давлений).

2. Выявлены основные закономерности кристаллизации акцессорных минералов REE и Ti, выступающих индикаторами последовательности метаморфических процессов в изученных породах.

3. В породах обеих серий с помощью Sm-Nd метода оценен возраст высокотемпературных гранатсодержащих парагенезисов, на основе данных Th-U-Pb датирования монацита – возраст низкотемпературного хлоритсодержащего парагенезиса.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых по пунктам 1, 2, 3, 13, 19, 20.

**Теоретическая и практическая значимость работы**

Работа имеет фундаментальное значение и способствует более глубокому пониманию закономерностей минеральных превращений в ходе метаморфизма. Выводы диссертации могут быть использованы для уточнения возраста и геодинамических обстановок формирования метаморфических комплексов Нью Фрисланда.

Практическая значимость работы определяется возможностью применения результатов минеральной термобарометрии и изотопного датирования метаморфических пород при мелко- и среднемасштабном картировании территории архипелага, а также при подготовке учебных курсов по дисциплинам «Генетическая интерпретация строения минеральных агрегатов», «Минеральная термобарометрия», «Петрология».

Получен акт о внедрении результатов диссертации при написании разделов отчета в виде оценки параметров метаморфизма на территории полуострова Нью Фрисланд, архипелаг Шпицберген в ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (от 03 июня 2024 года).

**Методология и методы исследования.** Методологической основой исследования является комплексное применение минералогическо-петрографических и минералогическо-геохимических методов (генетической интерпретации строения агрегатов и зональности индивидов, минеральной термобарометрии, физико-химического моделирования минеральных парагенезисов, изотопной геохронологии).

Минеральный состав пород изучался в петрографических шлифах (24 образца), для оценки содержаний минералов использовался планиметрический метод. Валовый химический состав пород (6 образцов) определялся рентгеноспектральным флуоресцентным анализом (Институт Карпинского, аналитики Б.А. Цимошенко, В.Н. Кириллов). Состав породообразующих минералов (630 точек наблюдений) анализировался при помощи сканирующего электрон-

ного микроскопа JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) (ИГГД РАН, аналитик О.Л. Галанкина). Исследование акцессорной минерализации (530 точек наблюдений) проводилось с помощью электронного микроскопа JSM-6460LV с системой энергодисперсионного микроанализа Oxford INCA Energy (Санкт-Петербургский горный университет, аналитик И.М. Гембицкая). Состав монацита дополнительно изучался на электронно-зондовом микроанализаторе Jeol JXA-8230 с тремя волнодисперсионными спектрометрами (ИГГД РАН).

Возраст метаморфизма определялся Rb-Sr и Sm-Nd (ID-TIMS) методами. Изотопные отношения в породах (WR) и минералах (Grt, Vt, Ms, Pl) измерялись методом изотопного разбавления на мультиколлекторном масс-спектрометре TRITON (ИГГД РАН, аналитик Е.С. Богомолов). С целью избирательного извлечения включений, содержащихся в мономинеральных фракциях граната и характеризующихся низким Sm/Nd отношением, использовался метод сернокислотного выщелачивания (Anczkiewicz, Thirlwall, 2003). Для обработки полученных данных применялась программа Isoplot, вер. 3.75 (Ludwig, 2012).

Датирование монацита осуществлялось *in-situ* в прозрачно-полированных шлифах Th-U-Pb методом на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8200 с 5-ю волновыми спектрометрами. Исследования проводились в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН (аналитик С.Е. Борисовский). Методика анализа описана в работе (Макеев и др., 2020). Для оценки возраста строились изохронные диаграммы в координатах Th/Pb – U/Pb по методике, изложенной в работе (Cocherie, Albarède, 2001).

Для реконструкции P-T параметров применялись методы минеральной термобарометрии и физико-химического моделирования (метод изохимических диаграмм). Моделирование выполнялось с помощью программы Theriak/Domino (de Capitani, Petrakakis, 2010) вер. 01.08.09 на основе базы внутренне согласованных термодинамических данных tcdb55c2d (Holland, Powell, 1998, с обновлениями) при условии избытка воды в системе. В случае карбонатсодержащих пород дополнительным компонентом флюида выступал CO<sub>2</sub>.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Породы серий Атомфьелла и Моссель, формирующие северную часть антиклинория Западного Нью Фрисланда, образованы вы-

сокотемпературными гранатсодержащими парагенезисами, отвечающими высокотемпературной области верхней и нижней частей амфиболитовой фации соответственно, и низкотемпературным парагенезисом (Ms-Chl-Ep-Kfs-Ab-Cal-Ttn), возникшим в условиях перехода от зеленосланцевой к прениит-пумпеллиитовой фации (260-370 °С). P-T траектории амфиболитового метаморфизма закручены по часовой стрелке и демонстрируют рост температуры и давления до пиковых значений 670-690 °С, 10-11 кбар (серия Атомфьелла) и 590-610 °С, 9-11 кбар (серия Моссель) с последующей изотермической декомпрессией до 7-8 кбар.

2. Индикаторами процессов метаморфизма в породах Нью Фрисланда выступают акцессорные минералы REE и Ti: обрастание алланита клиноцоизитом и его частичное замещение REE-содержащими клиноцоизитом и эпидотом фиксирует начало порфиробластеза, смена ильменита рутилом при переходе от центральных к краевым зонам кристаллов граната характеризует окончание порфиробластеза, замещение ильменита и рутила титанитом соответствует завершающей стадии метаморфической эволюции.

3. Образование высокотемпературных гранатсодержащих и низкотемпературного (хлоритсодержащего) парагенезисов в изученных породах соответствует двум тектонотермальным событиям с возрастом ~430 и ~380 млн лет соответственно.

**Степень достоверности результатов исследования** определена представительной коллекцией каменного материала и корректной обработкой аналитических данных, полученных с помощью современных методов в аккредитованных лабораториях.

**Апробация результатов.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на ряде научных конференций. В их числе: ежегодная научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (Санкт-Петербург, 2019, 2020); международная конференция «Freiberg-St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler» (Фрайберг, 2019); X Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия» (Черноголовка, 2019); международная научная конференция «XIII Съезд Российского минералогического общества и Фёдоровская сессия» (Санкт-Петербург, 2021); VIII Российская конференция по изотопной геохронологии (Санкт-Петербург, 2022), международная научная конференция «Годичное собрание РМО и

Фёдоровская сессия – 2023» (Санкт-Петербург, 2023); Годичное собрание Российского минералогического общества «Минералогические исследования в интересах развития минерально-сырьевого комплекса России и создания современных технологий» (Апатиты, 2024).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной литературы по теме исследования, в микроскопическом изучении образцов горных пород и их подготовке для проведения аналитических исследований, в обработке полученных аналитических данных и их интерпретации, в формулировке выводов.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 1-й статье – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – перечень ВАК), в 2-х статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Зарегистрированы 2 базы данных.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 6-ти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 244 наименования и 13 приложений. Диссертация изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка и 5 таблиц.

**Благодарности.** Автор глубоко признательна своему научному руководителю заведующему кафедрой МКП д.г.-м.н. Ю.Л. Гульбину. Автор благодарит проф. А.Н. Сироткина за предоставленный каменный материал и проф. С.Г. Скублова за помощь в организации аналитических исследований. Автор выражает благодарность за помощь в проведении аналитических исследований О.Л. Галанкиной (ИГГД РАН), Б.А. Цимошенко и В.Н. Кириллову (Институт Карпинского), И.М. Гембицкой (Санкт-Петербургский горный университет), С.Е. Борисовскому (ИГЕМ РАН), Е.С. Богомолу (ИГГД РАН).

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность, определены цель, задачи и научная новизна диссертационной работы, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы

основные положения, выносимые на защиту. **В первой главе** охарактеризовано состояние проблемы, рассмотрено геологическое строение полуострова Нью Фрисланд, суммированы данные предшественников по вопросам условий метаморфизма и возраста пород кристаллических комплексов. **Вторая глава** посвящена описанию методов исследования. **В третьей главе** рассмотрены особенности химического и минерального состава метаморфических пород, дана их структурно-текстурная характеристика, приведены данные о составе породообразующих минералов. **В четвертой главе** главное внимание уделено результатам минеральной термобарометрии и физико-химического моделирования минеральных парагенезисов, рассмотрены построенные Р-Т траектории. **В пятой главе** дана характеристика акцессорных минералов, проанализированы условия и последовательность их кристаллизации, выделены основные закономерности фазовых превращений. **В шестой главе** приведены результаты геохронологических исследований и дана геодинамическая интерпретация полученных данных. **В заключении** сформулированы главные выводы работы.

#### **Краткая геологическая характеристика**

Полуостров Нью Фрисланд расположен на северо-востоке острова Западный Шпицберген. В пределах полуострова прослеживаются две крупные геологические структуры – антиклинорий Западного Нью Фрисланда и Хинлопенский синклинорий. Западной границей антиклинория выступает зона глубинных разломов Биллефьорд, отделяющая его от Девонского грабена. Центральное место в строении антиклинория занимает протяженная (около 150 км) антиклиналь Атомфьелла, сложенная породами одноименной серии. Серия Атомфьелла (PR<sub>1</sub>) является вулканогенно-осадочной, в ее составе наряду с парапородами (гранат-слюдистыми сланцами с кианитом, ставролитом и более редким силлиманитом, мраморами, кварцитами и др.) важную роль играют ортопороды (гранито-гнейсы, амфиболиты и др.). Общая мощность толщи составляет примерно 8000 м. В восточной части антиклинория серия Атомфьелла со структурным несогласием перекрывается серией Моссель (PR<sub>2</sub>). Последняя сложена метапелитовыми сланцами с гранатом, ставролитом и кианитом, слюдяными гнейсами, кварцитами, при этом в разрезе отсутствуют тела амфиболитов. Суммарная мощность отложений составляет около 3800 м.

Породы обеих серий смяты в изоклинальные складки. Породы серии Атомфьелла были метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации и подвержены мигматизации. Пиковая температура метаморфизма, рассчитанная с помощью гранат-биотитового и гранат-амфиболового геотермометров (Lyberis, Manby, 1999; Сироткин, Евдокимов, 2011), составляла около 700 °С. Давление, оцененное с учетом присутствия в парагенезисах кианита (Lyberis, Manby, 1999) и рассчитанное на основе амфибол-плагиоклазового геобарометра (Сироткин, Евдокимов, 2011) могло достигать 5-6 и более кбар. С учетом находок андалузита и кордиерита в парагенезисах, метаморфизм пород серии Атомфьелла отнесен к андалузит-силлиманитовому типу (Сироткин, 1996). При этом выделены два этапа метаморфизма: (1) прогрессивный низкобарический (460-700 °С, 3-4.5 кбар) и (2) «диафорический» (365-600 °С, 5.5-6.5 и более кбар) (Сироткин, Евдокимов, 2011). Породы серии Моссель испытали низкоградиентный метаморфизм кианит-силлиманитового типа (~650 °С, ~5.5-7), характеризующийся зональностью (сменой с запада на восток пород амфиболитовой фации породами эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций) (Сироткин, Евдокимов, 2011). Вдоль разлома Биллефьорд развиты зоны рассланцевания, милонитизации и ретроградных изменений кристаллических пород.

Отложения серии Моссель перекрываются отложениями серии Лумфьорд (RF<sub>3</sub>). Последняя сложена осадочными породами, степень метаморфизма которых быстро убывает с удалением от контакта. На юге полуострова отложения серии Лумфьорд прорваны каледонскими гранитоидами массива Ньютентоппен.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Породы серий Атомфьелла и Моссель, формирующие северную часть антиклинория Западного Нью Фрисланда, образованы высокотемпературными гранатсодержащими парагенезисами, отвечающими высокобарической области верхней и нижней частей амфиболитовой фации соответственно, и низкотемпературным парагенезисом (Ms-Chl-Ep-Kfs-Ab-Cal-Ttn), возникшим в условиях перехода от зеленосланцевой к пренит-пумпеллитовой фации (260-370 °С). P-T траектории амфиболитового метаморфизма закручены по часовой стрелке и демонстрируют рост температуры и давления до пиковых значений 670-690 °С, 10-11 кбар (серия Атомфьелла) и 590-610 °С, 9-11**

**кбар (серия Моссель) с последующей изотермической декомпрессией до 7-8 кбар.**

Для характеристики условий метаморфизма были детально исследованы представительные образцы пород, залегающих в северной части антиклинория (рисунок 1). Они представляют собой метапелитовые сланцы, известковые сланцы и биотит-амфиболовые плагиогнейсы, сложенные парагенезисами  $Ms-Bt-Grt-Pl \pm Ky \pm St$ ,  $Bt-Grt-Pl-Kfs-Cal \pm Scp$  и  $Bt-Hbl-Ep-Grt-Pl$  соответственно, типичными для метаморфических комплексов Нью Фрисланда<sup>1</sup>. Во всех породах наблюдаются порфиробласты граната, облекаемые слюдистым агрегатом и содержащие S-образные цепочки включений минералов матрикса. Порфиробласты обладают прямой (ростовой) зональностью: от центров к краям кристаллов в них уменьшается содержание Mn, Fe и увеличивается – Mg. Еще одна отличительная особенность состава граната – обогащенность кальцием (рисунок 2, а, б).

Для оценки пиковых условий метаморфизма метапелитовых и известковых сланцев использовались гранат-биотитовый, «Ti-в-биотите» и «Ti-в-мусковите» геотермометры, GBPQ, GASP, GRISP и фенгитовый геобарометры. Для амфибол-биотитового гнейса применялись минеральные термобарометры, учитывающие вариации состава кальциевого амфибола (амфибол-плагиоклазовый, гранат-амфиболовый и «Ti-в-амфиболе» геотермометры, амфибол-плагиоклазовый и GHPQ геобарометры). Рассчитанные значения температуры и давления для серии Атомфьелла попадают в интервалы: 670-690 °C, 9.5-11.5 кбар (метапелитовые сланцы), 675-690 °C, 8-12 кбар (известковые сланцы), 690-710 °C, 8.5-11 кбар (амфибол-биотитовые гнейсы); для серии Моссель: 580-610 °C, 9-11 кбар (метапелитовые сланцы) (Гульбин и др., 2023).

Для пород обеих серий характерно присутствие более позднего прожилково-вкрапленного минерального парагенезиса, представленного линзовидными агрегатами хлорита и серицитизированного плагиоклаза в матриксе, микропрожилками мелкочешуйчатого биотита, серицита, хлорита, эпидота, пренита, позднего калиевого полевого шпата, альбита, кальцита, которые пересекают гранат (рисунок 2, в, г).

---

<sup>1</sup> Обозначения минералов даны по: Whitney, Evans, 2010.

По данным хлоритовой и «Тi-в-мусковите» геотермометрии, температура формирования этого парагенезиса составляет 260-370 °С (рисунок 3).

Данные минеральной термобарометрии учитывались при построении P-T траекторий (рисунок 4). Входными данными для моделирования минеральных парагенезисов служили валовые химические анализы изученных пород.

**Серия Атомфьелла.** *Образец 3912-3а, метапелитовый сланец, свита Риттерватнет.* P-T траектория, построенная с учетом изоплет содержаний Ру, Sps и Grs миналов в гранате, An минала в плагиоклазе и Si (к.ф.) в светлой слюде, закручена по часовой стрелке и берет начало в поле устойчивости Grt-Bt-Chl-Ms-Pl-Ilm парагенезиса (520 °С, 5 кбар). При этих условиях появились первые зародыши граната. В ходе метаморфизма температура и давление возрастают до пиковых значений 670-690 °С, 11 кбар (благодаря чему в состав парагенезиса вместо ильменита входит рутил), затем давление уменьшается на 2-3 кбар в изотермическом режиме (при этих условиях стабилизируется кианит, присутствующий в образце) и начинается ретроградное охлаждение.

*Образец 3912-3б, известковый сланец, свита Риттерватнет.* P-T траектория берет начало в поле Grt-Bt-Chl-Ms-Pl-Czo-Cal-Ilm-Rt парагенезиса (530 °С, 6.5 кбар) и демонстрирует рост температуры и давления до пиковых значений 660 °С, 10 кбар (поле Grt-Bt-Ms-Pl-Cal-Rt парагенезиса). Пост-пиковые изменения реконструируются предположительно: возможность изотермической декомпрессии здесь ограничена исчезновением кальцита из модельного парагенезиса при уменьшении давления.

*Образец 4072-2, известковый сланец, свита Риттерватнет.* P-T траектория фиксирует появление первых порфиробластов граната в поле Grt-Bt-Ms-Pl-Cal-Ilm парагенезиса (560 °С, 5 кбар). В ходе порфиробластеза температура и давление возрастают до пиковых значений 670-690 °С, 9 кбар. При этих условиях стабилизируется Grt-Bt-Ms-Cal-Rt парагенезис и происходит частичное плавление породы. Затем давление падает и начинается охлаждение. Продуктами застывания расплава, как показывают наблюдения в шлифах, выступают ксеноморфные выделения калиевого полевого шпата, образующие «залиты» и пленки между зёрнами кварца.

*Образец 4143-1, амфибол-биотитовый гнейс, свита Риттерватнет.* P-T траектория берет начало в поле Grt-Bt-Amph-Chl-Pl-Czo-

Plm парагенезиса (530-540 °С, 7 кбар). Пиковые условия метаморфизма достигаются в области устойчивости рутила, образующего включения в гранате (680-700 °С, 9-10 кбар). На завершающих стадиях происходит декомпрессия (приводящая к росту основности плагиоклаза), протекающая в условиях изотермического режима или на фоне ретроградного охлаждения.

**Серия Моссель.** Образец 3885-1, метапелитовый сланец, свита Флоен. P-T траектория берет начало поле устойчивости Grt-Bt-Chl-Ms-Pl-Plm парагенезиса (530 °С, 6 кбар) и демонстрирует рост температуры и давления до пиковых значений 610-620 °С, 10-11 кбар (поле устойчивости Grt-Bt-Ms-Pl-Rt парагенезиса). Последующая изотермическая декомпрессия приводит к уменьшению давления до 6 кбар. В новых условиях стабилизируется ставролит, присутствующий в образце, после чего начинается ретроградное охлаждение.

*Образец 4032-1, метапелитовый сланец, свита Моссельдален.* Порода претерпела метаморфизм, который описывается P-T траекторией, берущей начало в поле Grt-Bt-Chl-Ms-Pl-Plm парагенезиса (540 °С, 6-7 кбар), демонстрирующей рост температуры и давления до пиковых значений 600 °С, 10 кбар (поле Grt-Bt-Ms-Pl-Rt парагенезиса) и последующее падение давления до 6-7 кбар.

В рамках тектоно-термальной модели Ингланда-Томпсона (England, Thompson, 1984), построенные P-T траектории интерпретируются как результат нагрева пород, вызванного утолщением земной коры в ходе коллизии, и последующего уменьшения давления вследствие аплифта, обусловленного уменьшением мощности вышележащих толщ под воздействием эрозии и тектонических процессов. И в случае серии Атомфьелла, и в случае серии Моссель, они описывают низкоградиентный метаморфизм кианит-силлиманитовой серии, характерный для областей коллизии континентальных литосферных плит, где геотермический градиент не сильно отличается от средних значений 20-40 °С/км (Spear et al., 2016; Природа и модели метаморфизма, 2017) (рисунок 5).

**2. Индикаторами процессов метаморфизма в породах Нью Фрисланда выступают акцессорные минералы REE и Ti: обрас- тание алланита клиноцоизитом и его частичное замещение REE- содержащими клиноцоизитом и эпидотом фиксирует начало пор- фиروبластеза, смена ильменита рутилом при переходе от цен- тральных к краевым зонам кристаллов граната характеризует**

**окончание порфиروبластеза, замещение ильменита и рутила титанитом соответствует завершающей стадии метаморфической эволюции.**

Акцессорная минерализация метаморфических пород Нью-Фрисланда детально изучалась на примере двух представительных образцов метапелитовых (образец 3912-3а) и известковых (образец 3912-3б) сланцев свиты Риттерватнет, серия Атомфьелла.

В метапелитовых сланцах алланит-(Ce) образует тонкие пластинчатые кристаллы, тесно срастающиеся с более крупными выделениями редкоземельного эпидота; агрегаты двух минералов размером до 150-200 мкм обладают неправильными извилистыми границами и образуют включения в гранате (рисунок 6, а-в).

В известковых сланцах алланит-(Ce), клиноцоизит и эпидот характеризуются двумя формами выделения. В матриксе пород наблюдаются многочисленные эпидот-клиноцоизит-алланитовые агрегаты удлиненно-овальной формы размером до 700-800 мкм, вытянутые вдоль сланцеватости (рисунок 7). В центральной части каждого такого агрегата находится сросток алланита-(Ce) и редкоземельного клиноцоизита, обладающий сложным внутренним строением с резкими извилистыми границами между двумя фазами. С двух сторон, в направлении сланцеватости, этот сросток окаймляется рассеянными скоплениями мелких (10-30 мкм) зерен эпидота, клиноцоизита и REE-содержащего клиноцоизита.

Второй формой выделения выступают кристаллы клиноцоизита с алланитовыми ядрами, образующие включения в порфиробластах граната (рисунок 8). Вокруг алланитовых ядер развиваются каемки, сложенные неидентифицированными минералами Th.

Ильменит и рутил в метапелитах образуют рассеянную вкрапленность мелких (100-200 мкм) зерен в матриксе и включения в порфиробластах граната. В распределении включений отмечается зональность, обусловленная приуроченностью ильменита к центральным, а рутила – к краевым зонам порфиробластов (рисунок 6, а). В переходной зоне два минерала находятся в сростании (рисунок 6, б). Ильменит-рутиловые сростки наблюдаются и в матриксе.

В известковых сланцах два минерала образуют взаимные сростания, приуроченные к краевым зонам порфиробластов граната. С этими минералами тесно ассоциирует титанит. Он встречается в виде вкрапленности мелких (0.1-0.2 мм) зональных зерен, образует сростания с алланитом, в виде каемок окружает выделения ильменита. На

относительно позднее время кристаллизации этого минерала указывает и его тесная ассоциация с хлоритом, по трещинам спайности в котором развиваются многочисленные пластинчатые кристаллы титанита.

Зональные кристаллы эпидота и клиноцоизита с алланитовыми ядрами в метапелитовых сланцах и гнейсах многократно описаны в литературе. По данным геологических наблюдений и результатам экспериментов, алланит присутствует в метаосадочных породах и как детритовый, и как новообразованный минерал. В условиях нижней амфиболитовой фации он замещается монацитом и минералами надгруппы эпидота (Wing et al., 2003; Janots et al., 2007, 2008, и др.). Эти закономерности хорошо согласуются условиями кристаллизации аналогичных минералов в метапелитовых сланцах серии Атомфьелла. Согласно термодинамическим расчетам, первые зародыши граната появились в изученных породах при температурах и давлениях, не превышавших 530-540 °С и 5.5-7.5 кбар. В этих условиях алланит терял устойчивость и частично замещался REE-содержащим клиноцоизитом с образованием габитусных псевдоморфоз по классификации А.Э. Гликина (2004). Одним из продуктов реакций замещения выступала минеральная фаза, обогащенная торием.

В известковых сланцах, где, благодаря повышенному содержанию кальция в породах, в состав парагенезисов входил клиноцоизит, вокруг выделений алланита формировались клиноцоизитовые оторочки. Будучи армированы гранатом, они сохранялись как реликты ранних парагенезисов в ходе последующих изменений. Находясь в матриксе – подвергались частичному псевдоморфному замещению REE-содержащим клиноцоизитом в виде рассеянных скоплений мелких зерен новообразованного минерала на ранних стадиях порфириобластеза (локализованных автоморфоз по А.Э. Гликину).

Реакции смещенного равновесия с участием ильменит и рутила изучены экспериментально и положены в основу GRAIL (Bohlen et al., 1984) и GRIPS (Bohlen, Liotta, 1986; Wu, Zhao, 2006) геобарометров. Фактором, определяющим кристаллизацию рутила в метапелитах и метабазитах при повышенных температурах, выступает рост давления. Величина давления, при которой стабилизируется рутил, зависит от валового состава пород. По данным моделирования, в случае изученных метапелитовых сланцев она составляет 7.5–8.5 кбар, в случае известковых сланцев – уменьшается до 5-6 кбар. На заключи-

тельных стадиях порфиробластеза рутил является стабильным, а ильменит – метастабильным минералом. Подобные взаимоотношения между Fe-Ti оксидами описаны в литературе и, видимо, являются характерными для метаморфических пород амфиболитовой фации (Valley et al., 2003; Swapp et al., 2018; Li et al., 2019).

На регрессивной стадии рутил и ильменит в известковых сланцах замещаются титанитом. Как показывают расчеты, реакции замещения протекают в условиях пониженных температур (<450 °C) при участии водно-углекислотного флюида с низкой активностью CO<sub>2</sub>, что служит дополнительным фактором стабилизации титанита (Grapes, Watanabe, 1992).

**3. Образование высокотемпературных гранатосодержащих и низкотемпературного (хлоритсодержащего) парагенезисов в изученных породах соответствует двум тектонотермальным событиям с возрастом ~430 и ~380 млн лет соответственно.**

Для определения возраста метаморфизма были продатированы породы и минералы в представительных образцах метапелитовых сланцев свиты Риттерватнет, серия Атомфьелла (обр. 3912-3а) и свиты Флоен, серия Моссель (обр. 3885-1).

*Rb-Sr и Sm-Nd методы.* Изучались породы в целом (WR) и отдельные минералы (Pl, Bt, Ms, Grt). Во всех случаях линии регрессии оказались эрохронами с высокими значениями СКВО, поэтому для оценки возраста использовались двухточечные изохроны. Значения Sm-Nd возраста для обоих образцов с учетом погрешностей близки (433±3; 422±7 млн лет), с ними совпадает оценка Rb-Sr возраста, полученная для обр. 3885-1 (429±2 млн лет). Таким образом, можно ограничить время проявления пика метаморфизма амфиболитовой фации для изученных пород серий Атомфьелла и Моссель возрастом около 430 млн лет. Так как температура закрытия Rb-Sr системы ниже, чем Sm-Nd, более молодые Rb-Sr изотопные возрасты, полученные для образца 3912-3а (406±2; 408±2 млн лет) можно соотнести со стадией ретроградного охлаждения.

*Th-U-Pb метод.* В изученных породах присутствует монацит (Ce), который образует многочисленные хорошо ограненные призматические кристаллы размером до 50 и более мкм по удлинению, обладающие зонально-секториальным строением и расположенные в интерстициях биотит-мусковитового агрегата (рисунок 9, а, б). Обратная корреляция между суммами содержаний (REE + P) и (Th + Si) (рисунок 9, в) указывает на вхождение тория в структуру минерала

преимущественно по схеме монацит-чералитового замещения:  $\text{Th}^{4+} + \text{Ca}^{2+} = 2\text{REE}^{3+}$  (Uher et al., 2014; Al-Ani et al., 2019). Полученные оценки возраста монацита изученных пород равны  $373 \pm 6$  млн лет (обр. 3912-3а),  $383 \pm 6$  млн лет (обр. 3885-1) и перекрываются с учетом погрешностей (рисунок 10).

В литературе многократно описывалось «омоложение» (на 10-25 млн и более лет) возраста монацита по сравнению с изотопными возрастами сосуществующих минералов (циркона, граната). Возможной причиной такого расхождения исследователи считают процесс «растворения и отложения» или псевдоморфного замещения исходного монацита новообразованным, обедненным Th и Pb; показания «изотопных часов» при этом сбрасываются. С учетом сказанного, было высказано предположение о двух стадиях образования и эволюции монацита в изученных породах. На первой стадии этот минерал кристаллизовался в условиях амфиболитовой фации в составе Ms–Vt–Grt–Pl±Ky±St парагенезиса. На второй стадии он подвергся воздействию низкотемпературного (260-370 °C) водного флюида, под влиянием которого в метапелитах образовалась поздняя Ms–Chl–Kfs–Ab ассоциация. В результате такого воздействия ранний монацит, обогащенный примесями, псевдоморфно заместился более поздним «чистым» монацитом.

История геологического развития кристаллического фундамента Шпицбергена является сложной и многоэтапной. Сказанное относится в том числе и к породам складчатого основания Нью Фрисланда. Исследователи выделяют здесь 4 этапа тектоно-метаморфической активности: (1) до-карельский (неоархейский), (2) карельский (палеопротерозойский), (3) готско-гренвильский (ранне-среднерифейский), (4) байкальско-каледонский (раннепалеозойский) (Сироткин, Евдокимов, 2011). С карельским этапом в пределах Нью Фрисланда связаны многочисленные, согласно залегающие тела гранитоидов с возрастом 1780-1720 млн лет (Gee et al., 1992; Larionov et al., 1995; Johansson et al., 1995, и др.). Карельский тектогенез предположительно стал причиной складчатых деформаций (F1) и высокотемпературного метаморфизма пород вулканогенно-осадочной серии Атомфелла, протекавшего в условиях активной континентальной окраины (Сироткин, Евдокимов, 2011). Готско-гренвильский этап истории Нью Фрисланда по геологическим данным является временем формирования осадочной толщи серии Моссель. Предполагается, что в среднерифейское время осадочная толща подверглась складчатым

деформациям (F2) и метаморфизму в связи с активизацией древней платформы, т.е. рифтогенными процессами (Сироткин, 2013) и заложением субмеридиональных глубинных разломов (Сироткин, Евдокимов, 2011). На байкальско-каледонском этапе был сформирован платформенный комплекс, сложенный слабометаморфизованными осадочными породами. Вдоль зон глубинных разломов, «омоложенных» в каледонское время, сформировались зоны «низкотемпературного диафтореза», наиболее отчетливо проявленные в прибрежной зоне Биллефьорда (Сироткин, Евдокимов, 2011). С рифтогенными процессами могли быть связаны интрузии субщелочных гранитоидов (Сироткин, Евдокимов, 2011).

Представления о слабо проявленных процессах регионального метаморфизма в каледонское время (Сироткин, Евдокимов, 2011) не объясняют большого числа силурийских и девонских изотопных возрастов, полученных в разные годы для магматических и метаморфических пород Нью Фрисланда (435-420 млн лет, сланцы и парагнейсы, серия Атомфьелла, K-Ar метод, Gaye et al., 1966;  $404 \pm 8$ ,  $385 \pm 51$ ,  $374 \pm 62$  млн лет, гранито-гнейсы, комплекса Эсколабреен, U-Pb метод датирования циркона, Larionov et al., 1995; Johansson, Gee, 1999; Johansson, 2001;  $408 \pm 9$  млн лет, свита Бангенхук, U-Pb метод датирования титанита, Johansson et al., 1995; 425-412 млн лет, амфибол и мусковит, серия Атомфьелла,  $415 \pm 4$  млн лет, мусковит, серия Моссель,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  метод, Gee, Page, 1994;  $430 \pm 7$  млн лет, результаты датирования «метаморфогенно-метасоматического» циркона из ультрамафитов, залегающих на контакте пород серий Атомфьелла и Моссель, Сироткин, Евдокимов, 2020; 420, 410-400 млн лет, сланцы серий Атомфьелла и Моссель, Th-U-Pb метод датирования монацита, Bazarnik et al., 2014, 2016).

Оценки изотопных возрастов высокотемпературных (гранатсодержащих) парагенезисов и низкотемпературного (хлоритсодержащего) парагенезиса, полученные в настоящей работе, в целом согласуются с приведенными данными. Эти значения интерпретируются как: (1) время проявления кульминационной стадии каледонского метаморфизма амфиболитовой фации для обеих серий (~430 млн лет), связанного с коллизией континентальных плит в позднесилурийском – раннедевонском периодах (Harland, 1971, 1992; Manby, 1990; Gee, Page, 1994; Witt-Nilsson, 1998; Gee, Tebenkov, 2004, и др.) и (2) возраст завершающей стадии метаморфических изменений, связанных с активизацией разломов Биллефьорд и Соргфьорд (~380 млн лет).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Работа представляет собой законченное исследование, в рамках которого на основе комплексного минералого-геохимического изучения пород серий Атомфьелла и Моссель уточнены условия метаморфизма кристаллического основания северной части Западного Нью Фрисланда, построены Р-Т траектории, выявлены главные закономерности поведения породообразующих и акцессорных минералов в ходе фазовых превращений, определен возраст минеральных парагенезисов.

На основе петрографического описания, данных минеральной термобарометрии и физико-химического моделирования показано, что изученные породы обеих серий испытали низкоградиентный метаморфизм кианит-силлиманитовой серии (умеренных давлений), характерный для областей коллизии континентальных литосферных плит. В результате микроструктурных исследований выделены ассоциации индикаторных акцессорных минералов, устойчивых на ранних (монацит-(Ce), алланит-(Ce), REE-содержащие клиноцоизит и эпидот, ильменит) и поздних (рутил) стадиях порфиروبластеза, а также при ретроградных изменениях (титанит). По данным изотопного датирования, сделан вывод о том, что высокотемпературные (гранатсодержащие) парагенезисы, возникшие в ходе метаморфизма амфиболитовой фации в изученных породах, имеют силурийский возраст. Последнее обстоятельство может служить указанием на связь высокотемпературного метаморфизма с каледонским орогенезом. Низкотемпературный (хлоритсодержащий) парагенезис сформировался в позднем девоне в связи с активизацией субмеридиональных разломов Биллефьорд и Соргфьорд. Зафиксированные тектоно-термальные события являются завершающими в сложной многоэтапной истории формирования полуострова Нью Фрисланд.

Перспективным направлением для дальнейшего изучения автор считает датирование минералов и пород с помощью современных методов и корреляцию полученных данных с результатами исследований метаморфических пород других районов архипелага Шпицберген.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. **Акбарпуран Хайяти С.А.** Возраст монацита из метапелитовых сланцев серий Атомфьелла и Моссель (полуостров Нью

Фрисланд, о. Западный Шпицберген) по данным Th-U-Pb (SHIME)-датирования / **С.А. Акбарпуран Хайяти**, Ю.Л. Гульбин, С.Е. Борисовский // Вестник геонаук – 2021. – № 10. – С. 16–24.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:*

2. **Акбарпуран Хайяти С.А.** Эволюция состава акцессорных минералов REE и Ti в метаморфических сланцах серии Атомфьелла, Западный Нью Фрисланд, Шпицберген и ее петрогенетическое значение / **С.А. Акбарпуран Хайяти**, Ю.Л. Гульбин, А.Н. Сироткин, И.М. Гембицкая // Записки Российского минералогического общества. – 2020. – Том 149. – № 5. – С.1–28.

3. Гульбин, Ю.Л. Минеральный состав и термобарометрия метаморфических пород Западного Нью-Фрисланда, Шпицберген / Ю.Л. Гульбин, **С.А. Акбарпуран Хайяти**, А.Н. Сироткин // Записки Горного института. – 2023. – Т. 263. – С. 657-673.

*Свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «База данных химического состава породообразующих и акцессорных минералов метаморфических пород докембрийских комплексов архипелага Шпицберген». №2021620933. Дата регистрации 11.05.2021. Номер заявки: 2021620774: заявл. 26.04.2021. Авторы: **Акбарпуран Хайяти С.А.**, Иванов П.В. Правообладатель: «Санкт-Петербургский горный университет». 161 кб.

5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «База данных минеральной термобарометрии пород метаморфических комплексов полуострова Нью Фрисланд, архипелаг Шпицберген». №2024623135. Дата регистрации: 16.07.2024. Номер заявки: 2024622934: заявл. 11.07.2024. Авторы: **Акбарпуран Хайяти С.А.**, Грохотов Е.И., Григорьев Е.В. Правообладатель «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». 136 кб.

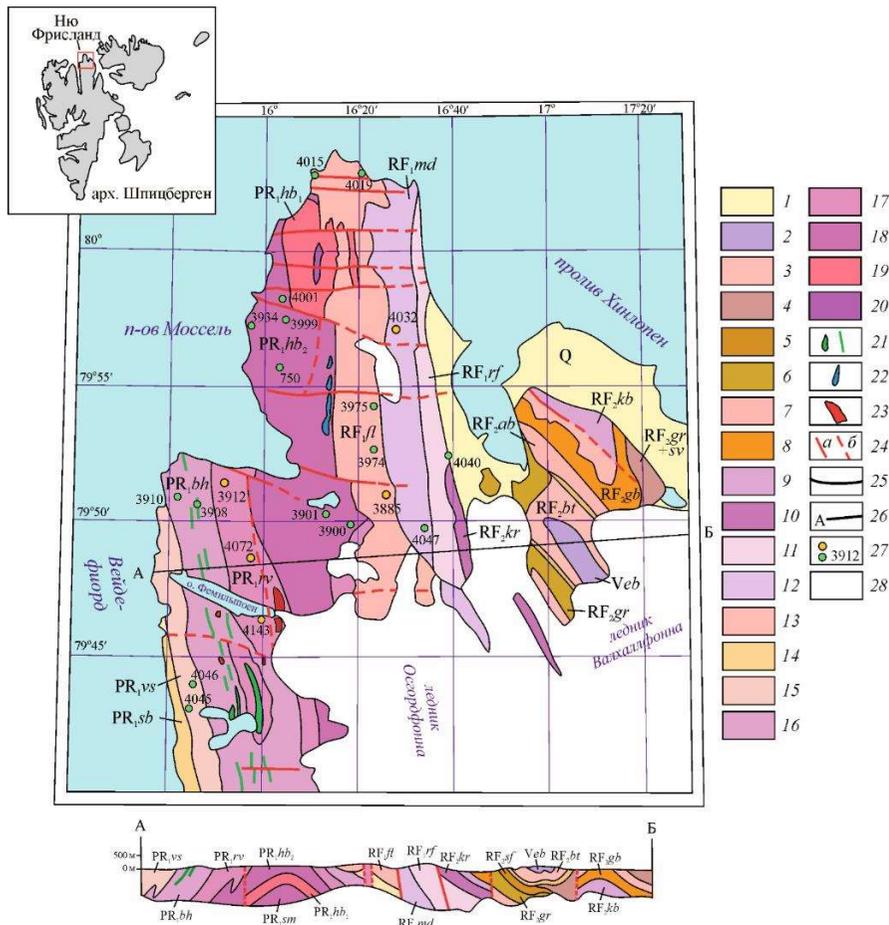


Рисунок 1 – Геологическая карта-схема полуострова Нью Фрисланд, северная часть (ГДП-100, 2016, с упрощениями) с точками отбора образцов изученных пород. 1 – четвертичные отложения (Q); 2–10 – осадочные отложения среднего рифея – венда; 11–13 – серия Моссель: 11 – свита Розенфельла, 12 – свита Моссельдален, 13 – свита Флоен; 14–20 – серия Атомфельла: 14 – свита Сёрбреен, 15 – свита Вассфарет, 16 – свита Бангенхук, 17 – свита Риттерватнет, 18 – свита Харкербреен, верхняя подсвита, 19 – свита Харкербреен, нижняя подсвита, 20 – свита Смутсбреен; магматические образования: 21 – метагабброиды, 22 – ультрабазиты, 23 – анатектические граниты; 24 – тектонические нарушения: достоверные (а), предполагаемые (б); 25 – геологические границы; 26 – линия геологического разреза; 27 – точки отбора образцов: желтые – отобранные для построения Р-Т траекторий, зеленые – изучены в шлифах; 28 – ледниковый покров

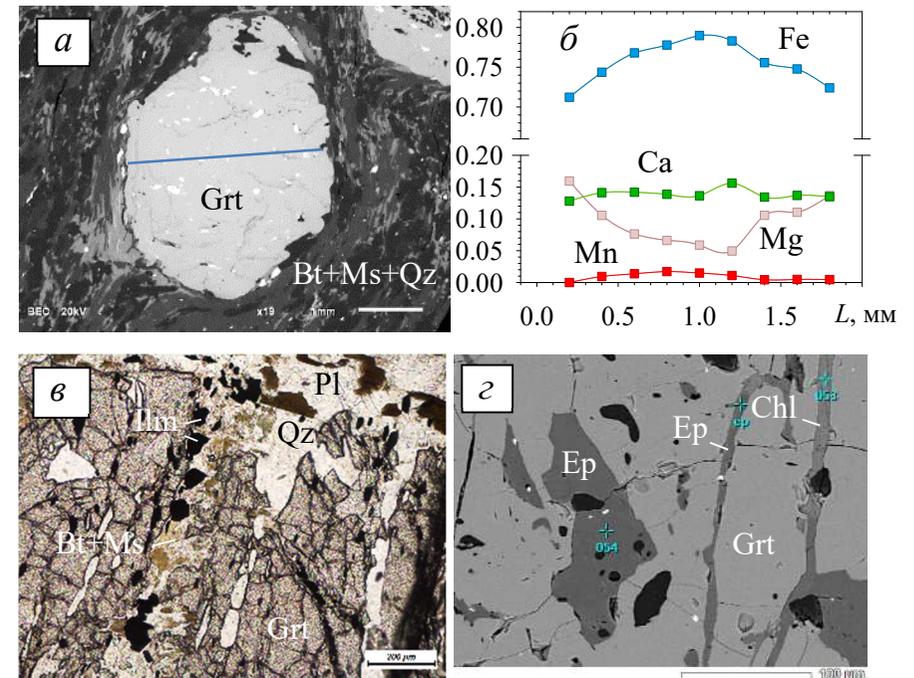


Рисунок 2 – График зональности граната из метапелитового сланца, обр. 3912-За, серия Атомфельла (а, б) и секущие прожилки в порфиروблестах граната, обр. 3912-б, 4143-1, серия Атомфельла (в, г). По оси ординат графика зональности отложены мольные доли алмандинового, пирропового, спессартинового и гроссулярового миналов

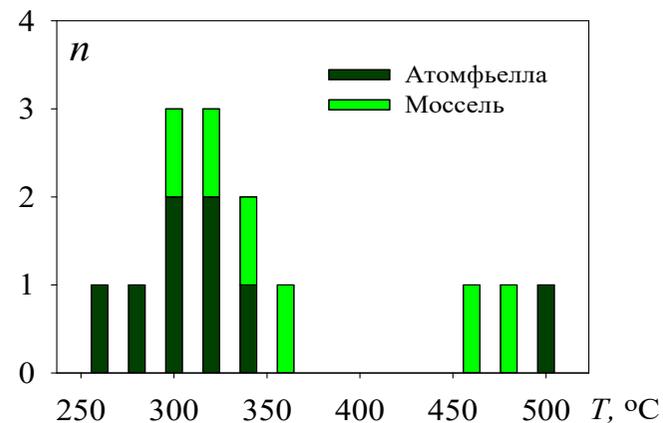


Рисунок 3 – Гистограмма температурных оценок, полученных с помощью хлоритового геотермометра (Lanari et al., 2014)

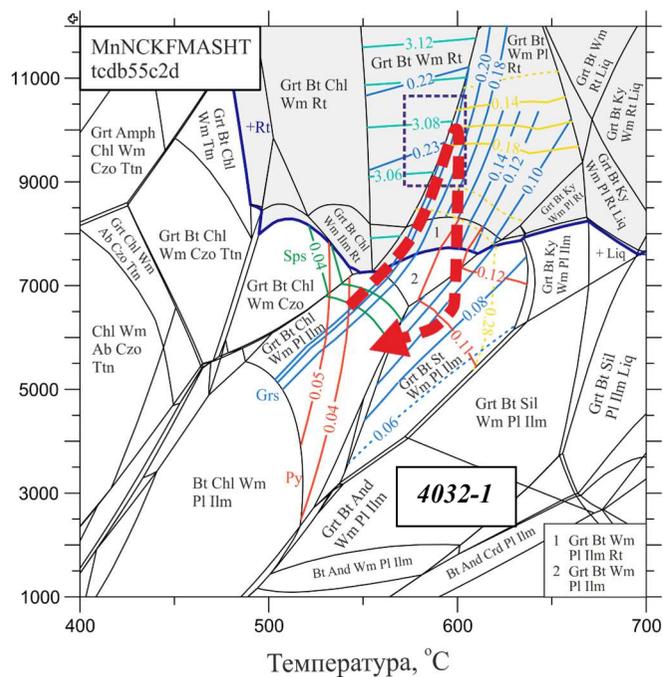
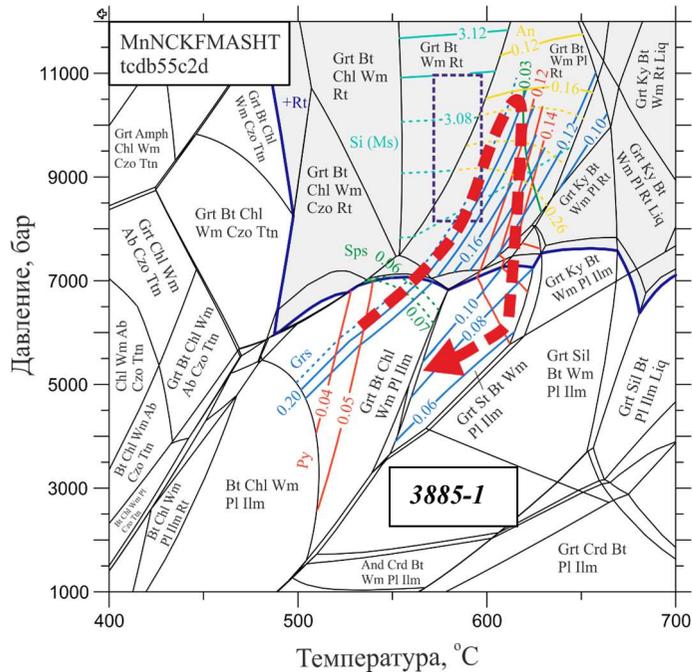
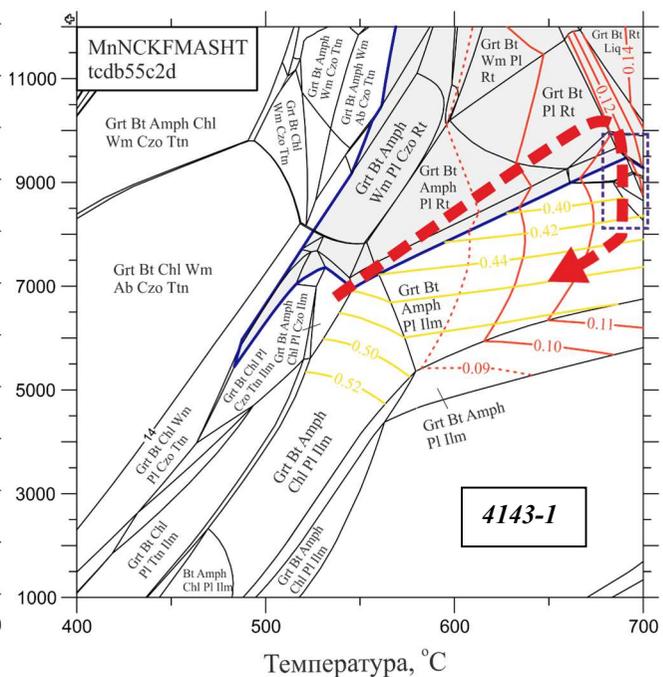
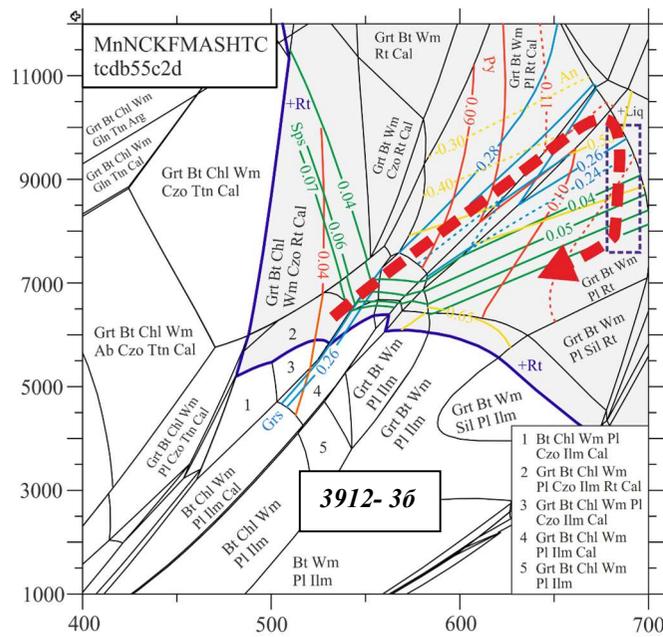
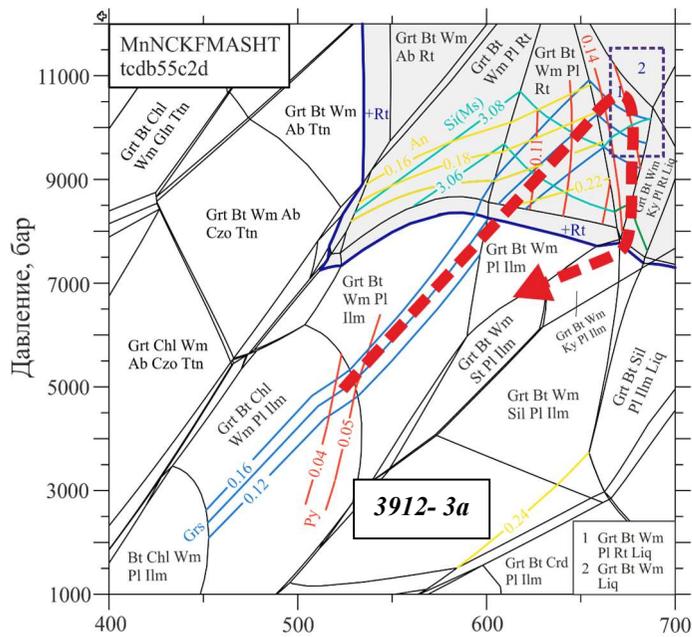


Рисунок 4 – Изохимические диаграммы с P-T траекториями для пород серий Атомфелла и Моссель. Вода в избытке. Все парагенезисы содержат кварц. Wm – светлая слюда, Liq – расплав. Поля рутилсодержащих ассоциаций выделены серым. Красными и синими линиями показаны наблюдаемые изоплеты содержаний Ru и Grs миналов в гранате, желтыми линиями – изоплеты содержаний An минала в плагиоклазе, зелеными линиями – содержание Si (к.ф.) в мусковите (сплошными линиями – рассчитанные и наблюдаемые изоплеты, точечными линиями – рассчитанные, но не наблюдаемые изоплеты). Пунктиром оконтурены области пиковых значений температуры и давления, рассчитанных с помощью минеральных термобарометров (Гульбин и др., 2023)

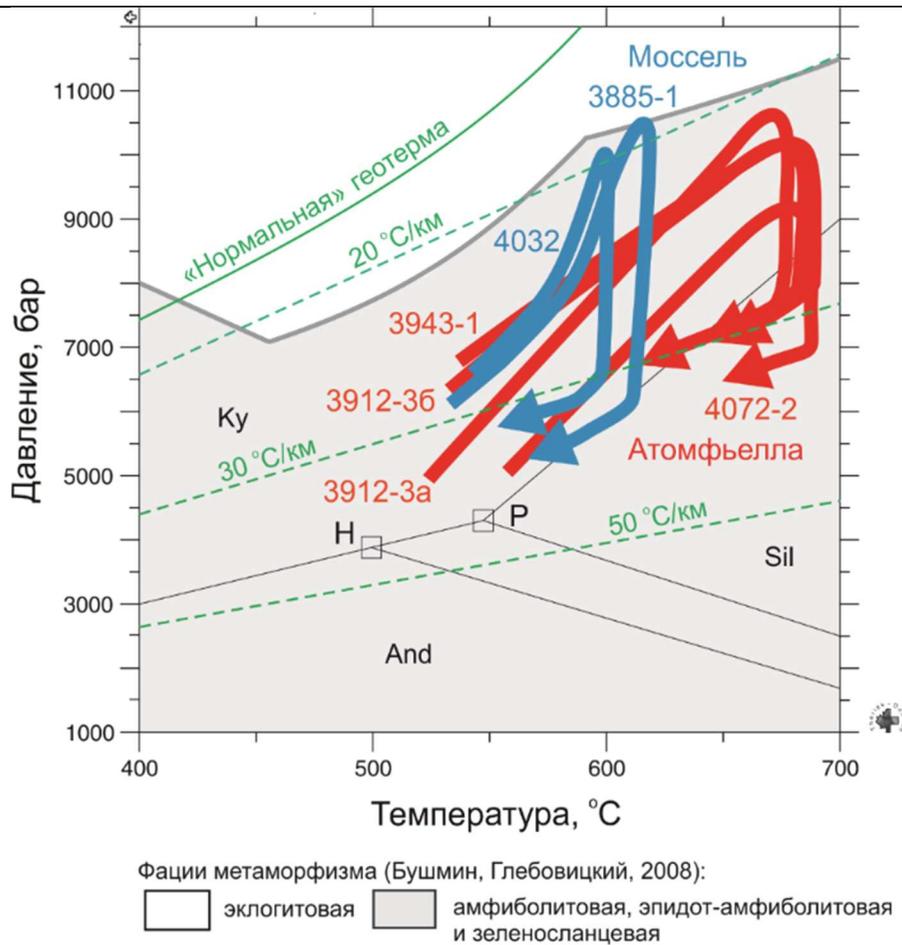


Рисунок 5 – P-T траектории метаморфизма пород серий Атомфьелла и Моссель. H, P – точки равновесия андалузит = силлиманит = кианит по (Holdaway, 1971; Pattison, 1992). Пунктиром показаны линии геотермического градиента. Зеленая кривая – усредненная («нормальная») геотерма по (Stüwe, 2007)

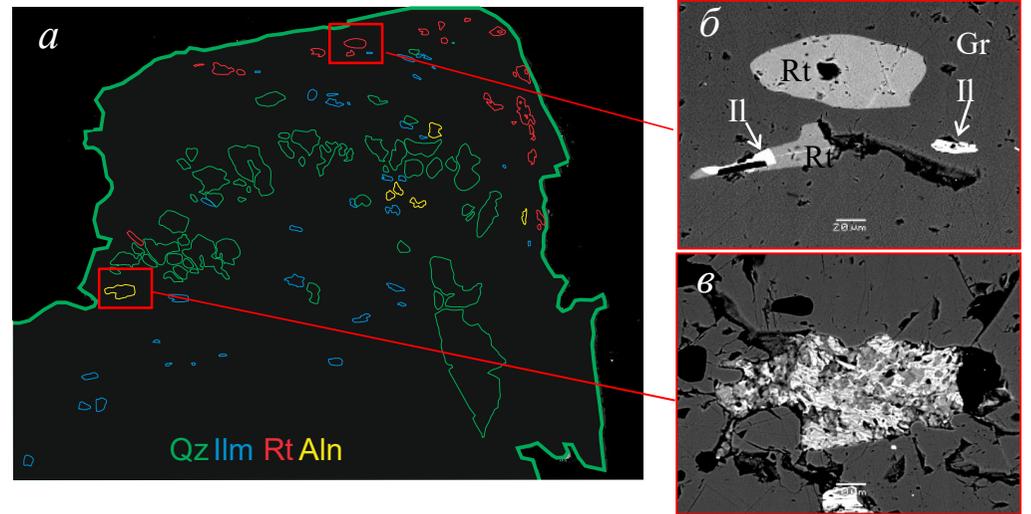


Рисунок 6 – Минеральные включения в порфиробласте граната из метапелитового сланца, обр. 3912-3а, серия Атомфьелла: *a* – зональное распределение включений в порфиробласте; *б* – сrostки ильменита и рутила, *в* – агрегат алланита и редкоземельного эпидота

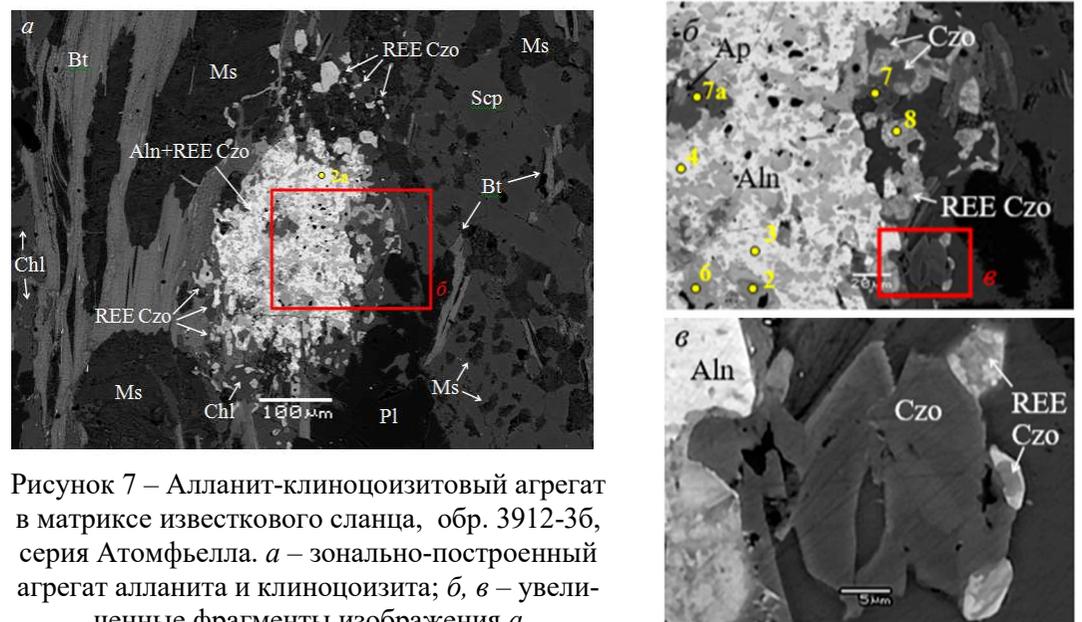


Рисунок 7 – Алланит-клиноцоизитовый агрегат в матрице известкового сланца, обр. 3912-36, серия Атомфьелла. *a* – зонально-построенный агрегат алланита и клиноцоизита; *б*, *в* – увеличенные фрагменты изображения *a*

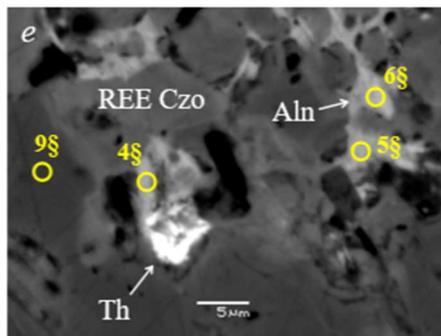
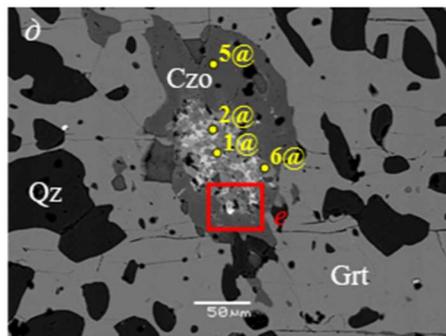
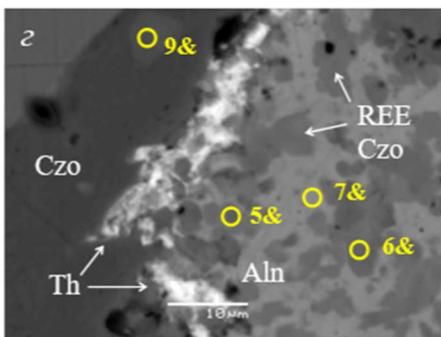
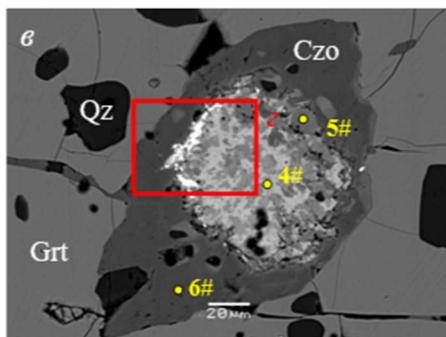
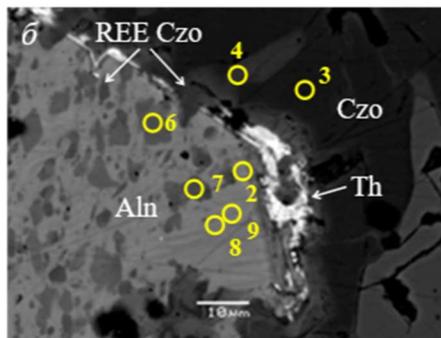
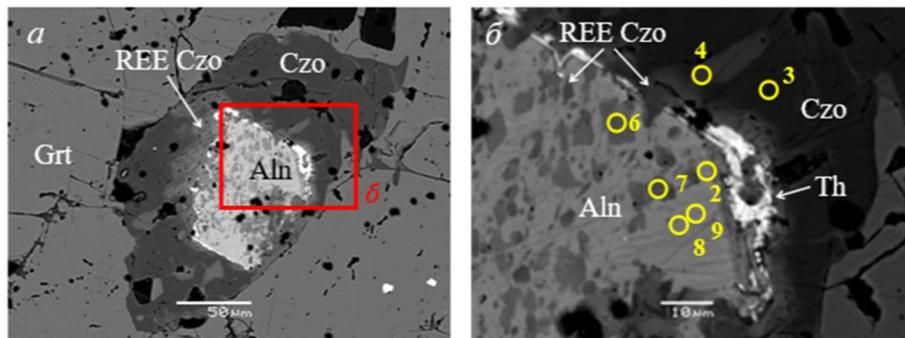


Рисунок 8 – Алланит-клиноцоизитовые включения в гранате из известкового сланца, обр. 3912-3б, серия Атомфьелла. Изображения в обратно-отраженных электронах. *a, в, д* – кристаллы клиноцоизита с алланитовыми ядрами; *б, г, е* – увеличенные фрагменты изображений *a, в, д* соответственно. Th – неидентифицированные минералы Th. Желтым цветом показаны точки анализа

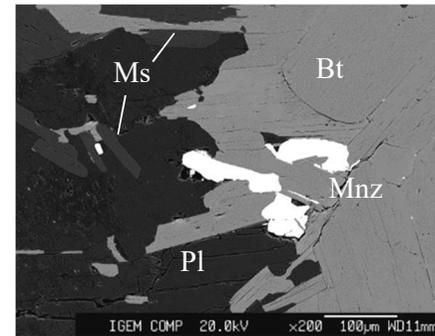


Рисунок 9 – Монацит из метапелитового сланца, обр. 3912-3а серия Атомфьелла. Изображения в обратно-отраженных электронах

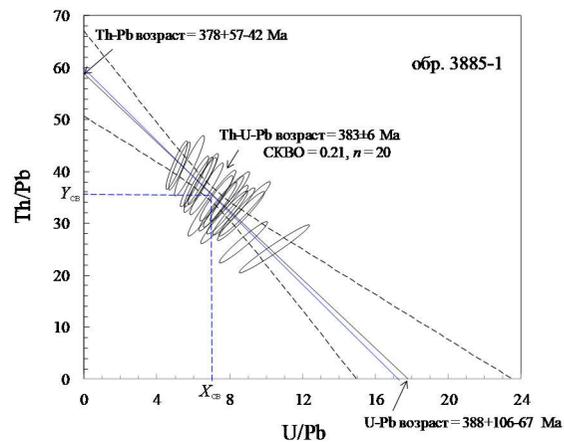
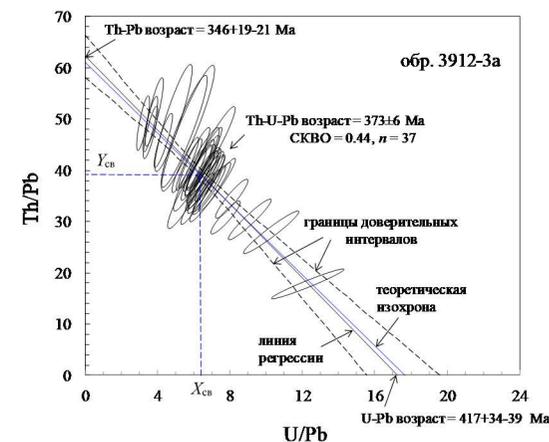


Рисунок 10 – Изохронные диаграммы (Cocherie, Albarade, 2001) с эллипсами погрешностей оценивания ( $2\sigma$ ) для монацита из метапелитовых сланцев серий Атомфьелла и Моссель.  $X_{св}$ ,  $Y_{св}$  – средневзвешенные значения отношений U/Pb и Th/Pb для линии регрессии, использованные при расчете Th-U-Pb возрастов