



Новые данные о проявлении байкальской (тиманской) тектоно-магматической активизации на острове Западный Шпицберген

А.Н.Сироткин¹, А.Н.Евдокимов²✉, М.Ю.Бурнаева¹, Н.А.Румянцева¹

¹ ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Сироткин А.Н., Евдокимов А.Н., Бурнаева М.Ю., Румянцева Н.А. Новые данные о проявлении байкальской (тиманской) тектоно-магматической активизации на острове Западный Шпицберген // Записки Горного института. 2026. Т. 279. С. 51-69. [EDN KRNOGA](#)

Аннотация

Архипелаг Шпицберген располагается на сочленении северного фрагмента Норвежско-Гренландского бассейна и западной части Северного Ледовитого океана, что делает его ключевым объектом для расшифровки истории формирования и геологического строения региона. Здесь выходят на поверхность породы кристаллического фундамента и осадочного чехла. В том числе те, которые слагают нефтегазоносные комплексы шельфа. Очевидна актуальность обоснования существования в пределах земной коры архипелага Шпицберген свидетельств байкальской (тиманской) тектоно-магматической активизации и условий ее проявления. Для решения поставленной задачи на основе авторских материалов впервые дана комплексная характеристика вулканогенной свиты Тролляхеймен, породы которой известны в пределах Земли Оскара II. Рассмотрены структурно-геологические особенности, вещественный состав, возраст и геодинамические интерпретации обстановок формирования. Установлено, что осадочно-вулканогенный комплекс, описанный в горно-ледниковой части Земли Оскара II, был сформирован в вендское время (574-558 млн лет) как результат тектоно-магматической активизации эпигренвильской параплатформы. Даны петрографическая и петро-геохимическая характеристики выявленных метабазальтов, метаандезитов и метатиффов. Результаты изучения петрохимических особенностей вулканогенной свиты Тролляхеймен свидетельствуют о зарождении магмы на больших глубинах; определена рифтогенная природа этих образований. Проведена корреляция с выделенным авторами ранее осадочно-вулканогенным комплексом серии Чемберлендален в северной части Земли Веделя Ярлсберга. Представленные данные подтверждают высказанные ранее аргументы о вендской-байкальской, тиманской внутримитной активизации на архипелаге, а также широком развитии этих комплексов в составе чехла эпигренвильской параплатформы Шпицбергена.

Ключевые слова

архипелаг Шпицберген; Земля Оскара II; осадочно-вулканогенный комплекс; свита Тролляхеймен; основной вулканизм; метавулканисты; венд; циркон; абсолютный возраст; тектоно-магматическая активизация

Финансирование

Отсутствует.

Поступила: 30.05.2025

Принята: 04.03.2026

Онлайн: 15.05.2026

Опубликована: 20.07.2026

Введение

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью обоснования существования свидетельств байкальской (тиманской) тектоно-магматической активизации [1-3] в пределах земной коры архипелага Шпицберген и условий ее проявления [4, 5]. Сравнительно недавно на Земле Веделя Ярлсберга (ЗВЯ) выявлен осадочно-вулканогенный комплекс вендского возраста, описанный как серия Чемберлендален [6]. Анализ состава пород и их абсолютного возраста, а также других характеристик этого комплекса указывают на рифтогенную природу его формирования на пике тектоно-магматической активизации древней, эпигренвильской параплатформы. Однако возникает вопрос о масштабах данного события и его проявлении в других районах архипелага. Настоящая работа представляет уникальные данные о другом осадочно-вулканогенном комплексе вендского возраста, выявленном авторами в пределах Земли Оскара II на западном



побережье Шпицбергена. Это открытие не только дополняет существующие знания о тектоно-магматических процессах региона, но и может существенно расширить понимание геодинамических процессов, происходивших на данной территории в прошлом. Таким образом, работа имеет важное значение для дальнейшего изучения геологической истории архипелага и его тектонической эволюции.

Геологическая характеристика района исследований

По современным представлениям в основании Баренцевской плиты в районе Шпицбергеновской антеклизы выделяются два главных структурных этажа, разделенных структурным несогласием: нижнепротерозойский – среднерифейский кристаллический фундамент и верхнерифейский – нижнепалеозойский древний платформенный чехол (параплатформа), подвергнувшихся более поздним дислокациям, магматизму и частичному метаморфизму в байкальское – тиманское время, а также при девонском континентальном рифтогенезе [7, 8].

Кристаллический фундамент архипелага сложен породами трех структурно-вещественных комплексов [5]. Нижний (PR_1) представлен осадочно-вулканогенным разрезом, региональный метаморфизм которого имеет возраст 1750 млн лет. Разрез среднего (RF_1) отличается амагматичностью и сформирован в условиях пассивной континентальной окраины. Зональный метаморфизм, достигавший условий амфиболитовой фации, датируется средним рифеем. Верхний комплекс (RF_2), рифтогенный по природе, имеет осадочно-вулканогенный характер, низкотемпературные преобразования связаны с метаморфизмом погружения, повторный прогрессивный метаморфизм некоторых блоков – с процессами байкальской и каледонской тектоно-магматических активизаций.

Древний платформенный чехол (RF_3 - PZ_1) выражен фаунистически охарактеризованными толщами, сформированными в «платформеноидных» условиях [1, 3] и фактически являющимися чехлом эпигренвильской параплатформы. Минимальный метаморфизм характерен для нижних частей комплекса. В районе ЗВЯ в составе этого чехла выделены осадочно-вулканогенные образования серии Чемберлендален (V_2), являющиеся результатом байкальской (тиманской) тектоно-магматической активизации [6]. Мощный комплекс девонского грабена (D_{1-2}), известный в центре архипелага, обязан своим появлением процессам каледонского рифтогенеза [9].

Район работ (южная часть Земли Оскара II) расположен в пределах западного побережья Шпицбергена (ЗПШ), которое характеризуется наиболее сложным строением (рис.1) ввиду сильного воздействия процессов альпийского тектоногенеза. Среднерифейский вулканогенный комплекс представлен здесь мощной (более 3000 м) вулканогенно-осадочной серией Вереншельдбреен [10]. В разрезе стратотипа, который описан на ЗВЯ, серия сложена актинолитовыми и хлорит-сланцевыми сланцами с прослоями кварцитов; кварцито-песчаниками с прослоями хлоритовых и слюдистых сланцев; кислыми вулканитами. В разрезах на других участках ЗПШ зафиксированы хорошо сохранившиеся горизонты метабазальтов и мусковит-плагиоклаз-кварцевых пород с реликтами порфировых структур, представляющие кислые метаэффузивы [11]. Нижний контакт серии – тектонический, верхняя граница описана как структурное несогласие с вышележащими породами верхнерифейской серии Софиебоген [12]. Интрузивные образования на ЗВЯ представлены телами габбро-гранитового и перидотит-габбрового состава. Для интрузивных пород получен возраст (U-Pb, Rb-Sr) 1278-1072 млн лет; для вулканитов серии Вереншельдбреен – возраст (U-Pb) 1201-919 млн лет [13]. Новые данные для северной части ЗВЯ дают U-Pb возраст основных и кислых интрузивных пород в интервале 1152-936 млн лет [6]. Идентичные петрологическая характеристика и геологическая позиция описаны для осадочно-вулканогенного комплекса среднего рифея на востоке архипелага [14]. Поэтому можно утверждать, что на Шпицбергене структурное несогласие между комплексами среднего и верхнего рифея является региональным и маркирует контакт между кровлей древнего кристаллического фундамента и подошвой эпигренвильской параплатформы.

В рамках недавно выделенной осадочно-вулканогенной толщи серии Чемберлендален (V_2) на ЗВЯ (рис.1) широко представлены горизонты слабометаморфизованных базальтов, андезит-базальтов, андезитов и их туфов с прослоями филлитов, кварцитов и известняков. Контакты



с соседними комплексами тектонические. Эти вулканы характеризуются U-Pb возрастными по циркону 593-559 млн лет [6]. Характер вулканических и преимущественно пелитовый состав метасадочных пород указывают, что осадочно-вулканогенная толща формировалась в течение единого тектономагматического цикла, в ходе которого умереннощелочной основной вулканизм сочетался с высокой степенью химического выветривания пород в источниках сноса материала вендского времени. Это позволяет утверждать, что обстановки формирования осадочно-вулканогенного разреза были близки по природе континентальному рифтогенезу.

Таким образом, на Шпицбергене для позднепротерозойского времени фиксируются два этапа внутриплитного вулканизма: среднерифейский – гренвилльский и вендский – байкальский, тиманский. Первый завершал процессы становления древнего кристаллического фундамента; второй произошел в обстановке внутриплитной тектономагматической активизации, процессы которой были наложены на структуры древней парaplatformы.

В 2021-2023 гг. в ходе проведения геологической съемки в южной части Земли Оскара II авторами были описаны выходы осадочно-вулканогенной толщи в верховьях ледников Эйдембреен и Эсмаркбреен. Предшественниками эти породы выделялись как самостоятельные стратиграфические подразделения, возраст которых не был определен и обозначался разными авторами по аналогии со схожими комплексами архипелага от раннего до позднего рифея [15, 16]. Работами 1960-1970-х годов здесь была выявлена осадочно-вулканогенная толща, датированная как средне-позднерифейская. Толща подразделялась на две части: нижняя карбонатно-терригенно-вулканогенная и верхняя – терригенная [17-19], объединенные в группу Сент-Джонсфьорден. Позже В.Б.Харланд [20] пересмотрел точку зрения на возраст пород группы Сент-Джонсфьорден и высказал идею об их вендском возрасте, объединив с вендской группой Комфортлессбреен в единый вендский стратон.

В 2003 г. норвежскими геологами при составлении геолкарты-100 для данного района породы комплекса выделены как свиты Трольхеймен и Лёвлибреен [21] и объединены в единую группу Сент-Джонсфьорден с карбонатно-терригенной толщей – свитами Даудманс и Альххорн. При этом норвежцы возраст этого комплекса определяют как мезопротерозойский.

Таким образом, основной задачей настоящей работы является определение состава и возраста осадочно-вулканогенного комплекса свиты Трольхеймен, который представлен на нунатаках в южной части Земли Оскара II и имеет тектонические контакты с рифейско-вендскими отложениями. Породы свиты сложены слабометаморфизованными вулканиками основного состава. Геологические контакты с подстилающими и перекрывающими породами не наблюдаются, что приводит к неоднозначной оценке их структурной позиции. Новая авторская схема представлена на рис.2.

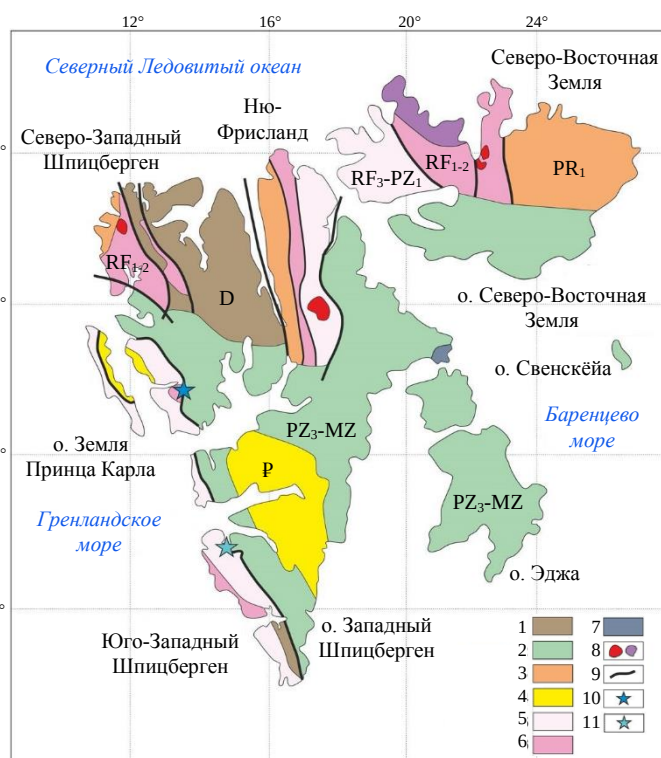


Рис.1. Схема геологического строения архипелага Шпицберген по [5]

- 1 – девонский терригенный комплекс; 2 – комплекс осадочного чехла (PZ₃-MZ); 3 – метаморфические комплексы фундамента (PR₁); 4 – комплекс осадочного чехла (P); 5 – терригенно-карбонатные комплексы парaplatformы (RF₃-PZ₁); 6 – метатерригенные и осадочно-вулканогенные комплексы фундамента (RF₁₋₂) с гренвилльскими гранитоидами; 7 – мезозойские долериты; 8 – каледонские гранитные интрузии; 9 – разломы; 10 – район работ в южной части Земли Оскара II и площадь выходов вендских метавулкаников; 11 – площадь выходов вендских метавулкаников на севере Земли Ведела Ярлсберга по [6]

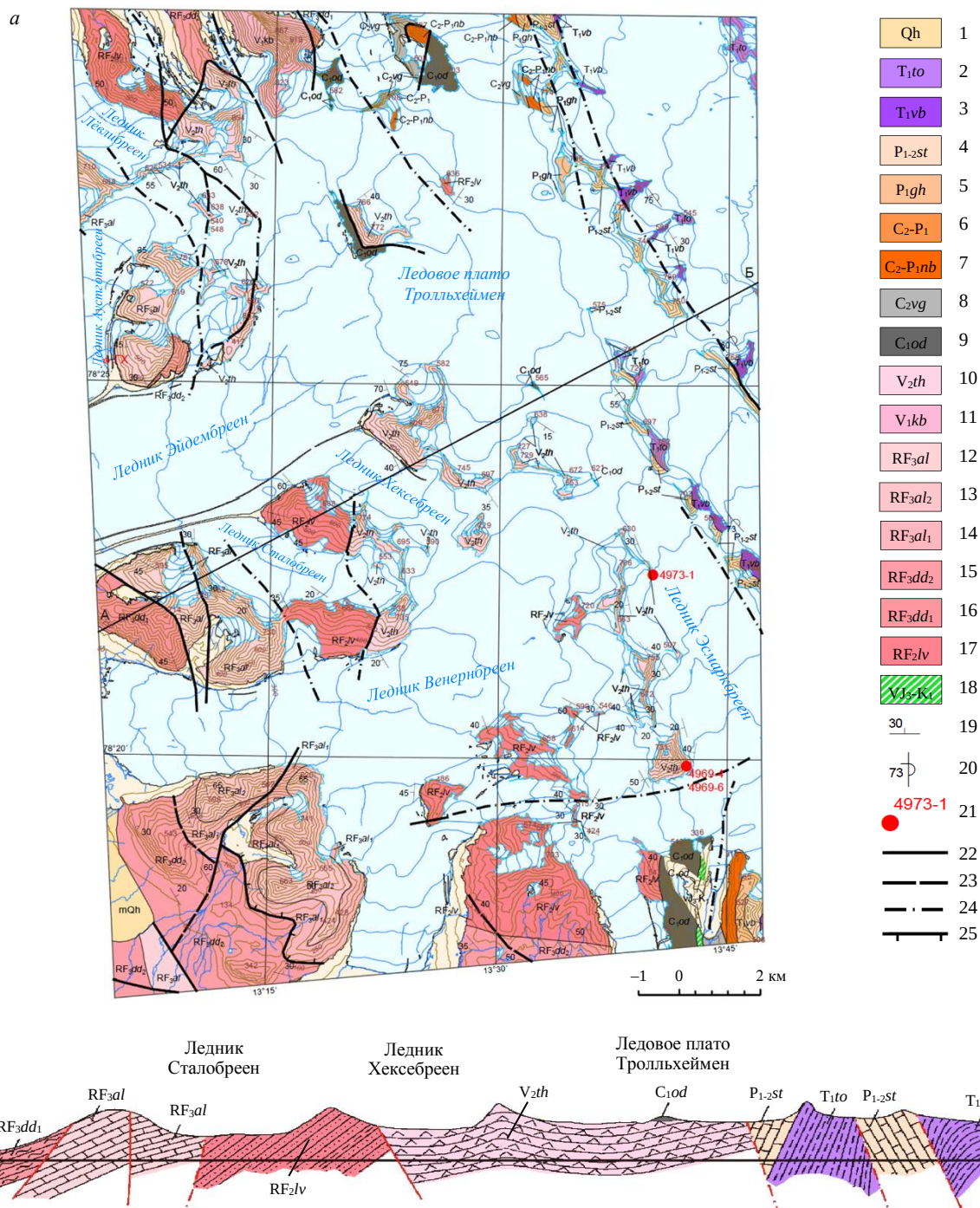


Рис.2. Геологическая карта (а) и разрез (б) участка южной части Земли Оскара II, масштаб 1:100000, составлена А.Н.Сироткиным

1 – моренные отложения: валунные суглинки, галечники, пески и отложения современного пляжа; 2 – свита Твиллингодден: алевролиты, аргиллиты; прослои известняков, доломитов; известковые и известково-доломитовые конкреции; 3 – свита Вардебухта: песчаники, алевролиты, аргиллиты, прослои известняков; фосфоритовые, известковые, доломитовые и пиритовые конкреции; 4 – серия Темпель-фьорд, свита Кап-Старостин: силициты темно-серые, доломиты и алевролиты кремнистые, в основании органогенно-обломочные известняки; 5 – свита Гипсхукен: доломиты, гипсы, ангидриты; 6 – нерасчлененные отложения свиты Вегард и Норденшельдбреен: доломиты массивные с прослоями органогенно-обломочных пород, пестроцветные известковые песчаники, кварцевые конгломераты; 7 – свита Норденшельдбреен: известняки органогенно-детритовые с желваками кремней и линзами гипсов; 8 – свита Вегард: песчаники, алевролиты пестроцветные; прослои гравелитов, конгломератов, песчаных известняков; 9 – свита Орустадален: песчаники массивные сероцветные с линзами кварцитов конгломератов, углистых аргиллитов; 10 – свита Тролльхеймен: метавулканы основного и среднего состава, зеленокаменные породы, прослои кварцитов и серицит-хлоритовых сланцев; 11 – нерасчлененные сланцы свит Хаакен и Аннабреен: сланцы с «плавающей» галькой, кварциты, линзы гравелитов; 12-14 – свита Альххорн: 12 – нерасчлененная: известняки, доломиты, сланцы глинисто-карбонатные и карбонатные, 13 – верхняя подсвита: известняки, доломиты, мраморы, сланцы глинисто-карбонатные, 14 – нижняя подсвита: известняки, доломиты, сланцы глинисто-карбонатные и кварц-сланцевые; 15, 16 – свита Даудманс: 15 – верхняя подсвита: кварцито-песчаники, сланцы кварц-сланцевые, 16 – нижняя подсвита: известняки, доломиты, сланцы кварц-сланцевые, кварциты; 17 – свита Лёвлибреен: метapelиты, кварциты, метавулканы; 18 – комплекс мезозойских долеритов; 19, 20 – элементы залегания и угол падения: 19 – наклонное, 20 – опрокинутое; 21 – точка наблюдения и ее номер; 22-25 – тектонические нарушения: 22 – разломы достоверные, 23 – разломы предполагаемые, 24 – разломы, предполагаемые под ледниками, 25 – надвиги



Рис.3. Нунатак Спирет в западном борту ледника Эсмаркбреен, сложенный метавулканитами свиты Тролльхеймен. Абсолютная отметка 731 м

Свита Тролльхеймен

Впервые выделена на карте южной части Земли Оскара II [21] как самая нижняя часть рифейского разреза. На разных картах предшественников она отмечена как средне-верхнерифейская. Породы свиты формируют скальные нунатаки в районе ледового поля Тролльхеймен и обнажаются в бортах ледников Эйдембреен, Эсмаркбреен (рис.3).

Доминирующими породами свиты Тролльхеймен являются метавулканиты, представленные, как правило, породами с порфировой структурой. Среди них можно выделить метабазалты, метаандезиты, а также разнообразные метатифы и метатифобрекчии. Породы обладают структурно-текстурным разнообразием и широкой цветовой гаммой: от темно-серых и серых до серо-зеленых и бурых. Породы в разрезе свиты формируют отдельные слои, которые чередуются и переслаиваются друг с другом. Мощности отдельных слоев меняются от 1-2 м до десятков метров. Порфировые структуры встречаются чаще всего, реже – брекчиевые и афировые. Порфировые вкрапленники представлены светлым карбонатом, нередко бывают зелеными (выполнены актинолитом или хлоритом) и черными пироксенами. Размер вкрапленников достигает 1-2 см, чаще – 2-3 мм. Породы метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации, поэтому основная масса пород имеет кварц-карбонат-актинолит-хлоритовый состав. Текстура пород сланцеватая, редко встречаются породы с почти массивной текстурой. Пористая текстура, которая встречается в выходах метавулканитов, расценивается как первичная миндалекаменная, возникшая при раскристаллизации древних лав.

Среди метавулканитов встречаются прослои терригенных пород, представленных метапесчаниками, метаалевролитами и метатиффитами. Обычно это породы темно-серого и серого цветов, но наблюдаются и буроватые разности. Контакты с метавулканитами согласные, но резкие. Мощности отдельных слоев не превышают 4-5 м. Видимые мощности пород свиты в нунатаках составляют сотни метров, но так как основание свиты неизвестно, можно считать ее мощность более 1000 м.

Свита Лёвлибреен

Выделена В.Б.Харландом [19] на южном побережье Сент-Джонс-фьорда. Контакты с породами свиты Тролльхеймен не наблюдалось. Свита Лёвлибреен представлена алевролитами, кварцитами, гравелитами, но могут присутствовать и отдельные слои метавулканитов. Мощность свиты достигнет 500-600 м. Выходы пород свиты фиксируются в западной и восточной частях ледового поля Тролльхеймен. От окружающих комплексов толщи свит Тролльхеймен и Лёвлибреен отделены крупными разломами: на западе – разломами в среднем течении ледника Эйдембреен, а на востоке – разломом вдоль ледника Эсмаркбреен.

Породы серии Сент-Джонс-фьорд выходят к западу от описанной структуры и представлены двумя свитами. Нижняя свита Даудманс впервые выделена С.И.Турченко [22] на Земле Оскара II; стратотип описан в районе одноименной равнины. Здесь свита расчленяется на две толщи: нижнюю



карбонатно-сланцевую и верхнюю кварцито-сланцевую общей мощностью 3,0-3,5 км. Нижний контакт свиты неизвестен. Верхняя свита Алькхорн выделена В.Б.Харландом [19] и согласно перекрывает отложения свиты Даудманс. По составу свита делится на две подсвиты: нижнюю сланцево-карбонатную и верхнюю карбонатную. Мощность свиты в стратотипе составляет 550 м. Вышележащие породы венда перекрывают свиту со стратиграфическим несогласием. В породах свит Даудманс и Алькхорн присутствуют комплексы онколитов позднерифейского-вендского возраста, которые коррелируются с онколитами в породах верхнерифейской серии Лумффорд полуострова Нью-Фрисланд [23], что указывает на их позднерифейский возраст.

Венчает докембрийский разрез вендская серия Комфортлессбреен. Породы серии представлены в основном слюдисто-карбонатными сланцами, главной особенностью которых является наличие «плавающей» гальки – единичных или немногочисленных включений ксеногенного материала в виде уплощенных или удлиненных галек размером от 2-3 мм до 25-30 см. Гальки имеют карбонатный, реже кварц-карбонатно-сланцевый составы. В слюдисто-карбонатных сланцах присутствуют микрофоссилии, позволяющие датировать эти образования как вендские [22]. В литературе породы серии интерпретируются как метатиллиты (вендские ледниковые отложения). Кроме этого, в толще отмечаются прослои кварцитов. Мощность серии – до 600 м.

Методы

Изучены метамагматические и метаосадочные породы свиты Тролльхеймен. По этим породам отобраны геохронологические пробы массой около 3-4 кг каждая. После дробления и расситовки проб тяжелые немагнитные фракции, в которых находился циркон, выделены с помощью электромагнитной сепарации и тяжелых жидкостей. Отбор монофракций циркона проводился в ЦАЛ ВСЕГЕИ и лаборатории Казанского университета (КФУ), а анализы их изотопного состава выполнялись в ЦИИ ВСЕГЕИ. Возраст циркона определялся локальным U-Pb методом на ионном микрозонде SHRIMP II по стандартной методике [24]. Для выбора точек датирования в зернах циркона использовались оптические (в проходящем и отраженном свете) и катодолюминесцентные (КЛ) изображения циркона. Пороодообразующие элементы определены в лаборатории ВНИИОкеангеология методом «мокрой» химии, а микроэлементы были получены в ЦАЛ ВСЕГЕИ по результатам ICP-MS-анализов (табл.1). При построении спектров распределения РЗЭ их количество нормировалось к содержаниям: в хондрите CI, в примитивной мантии и в базальтах N-MORB [25]. В работе использованы символы породообразующих минералов по [26].

Таблица 1

Составы метавулканитов свиты Тролльхеймен, вес. %

Компоненты	4765-1	4765-2	4765-3	4765-4	4766-1	4815-1	4815-2
	Chl-Act сланец	Порфиновый щелочной метапикрит	Chl-Act сланец	Qz-Carb-Chl метапикрит	Chl-Act сланец	Метатупф	Метадолерит
SiO ₂	45,51	31,72	45,03	36,80	45,59	42,33	46,81
TiO ₂	3,49	3,82	3,33	2,64	3,43	4,17	2,93
Al ₂ O ₃	12,68	10,11	12,38	10,31	12,58	13,06	14,21
Fe ₂ O ₃	4,08	9,61	4,29	6,99	4,34	11,63	3,98
FeO	8,96	2,73	8,46	2,08	8,82	3,31	7,28
MnO	0,19	0,13	0,20	0,15	0,20	0,15	0,15
MgO	7,93	4,05	8,46	2,25	8,61	4,07	6,86
CaO	7,17	16,53	7,41	17,52	7,33	7,77	9,02
Na ₂ O	3,22	0,53	3,11	3,45	3,29	5,25	4,36
K ₂ O	0,63	4,45	0,66	2,51	0,61	1,34	0,34
P ₂ O ₅	0,93	0,33	0,87	0,75	0,73	0,84	0,69
ППП	4,78	15,90	5,34	14,11	4,52	6,15	3,37
Сумма	99,56	99,92	99,54	99,57	100,00	100,10	100,00
CO ₂	1,40	12,58	1,84	11,88	1,02	н.о.	н.о.
Sc	20,3	14,5	20,7	13,5	19,7	17,6	26,1
Co	43,6	42	41,8	27,8	43,5	27,3	28,2
Ni	121	181	113	65	118	113	98,8



Продолжение табл. 1

Компоненты	4765-1	4765-2	4765-3	4765-4	4766-1	4815-1	4815-2
	Chl-Act сланец	Порфировый щелочной метапикрит	Chl-Act сланец	Qz-Carb-Chl метапикрит	Chl-Act сланец	Метатупф	Метадолерит
Cu	45,7	2,89	49,5	31,9	47,7	98,9	17,8
V	218	112	229	184	223	226	236
Cr	229	423	217	130	232	174	160
Ga	20,3	19,4	20	14,2	20,5	23,1	21,2
Rb	7,02	79,1	6,94	29,5	6,37	12,3	2,54
Sr	441	604	480	636	471	449	2500
Y	26,6	19,7	27,8	21,4	28	42,6	26,7
Zr	245	289	243	225	256	405	208
Nb	45,7	52	42,8	41,2	48,7	71,7	38,4
Ba	160	600	126	745	147	306	329
La	44,7	39,5	43,7	42,1	46,7	69,7	34,7
Ce	98,6	90,4	97,3	86,6	104	145	73,7
Pr	13,8	13,2	13,2	11,7	14	20,1	9,5
Nd	57,7	55,4	57,9	45,3	60,6	91,5	42,3
Sm	11,9	10,2	11,7	8,15	12	18,8	10
Eu	3,48	2,83	3,42	2,81	3,93	5,82	2,84
Gd	9,42	7,97	9,29	7,04	9,41	15,3	8,31
Tb	1,22	1,03	1,3	0,97	1,22	2,01	1,14
Dy	6,16	4,77	6,22	4,93	6,67	9,63	5,8
Ho	1,05	0,88	1,13	0,87	1,24	1,71	1,02
Er	2,51	2	2,68	2,13	2,92	4,13	2,47
Tm	0,36	0,29	0,41	0,23	0,35	0,48	0,32
Yb	2,1	1,73	2,11	1,6	2,05	2,96	1,84
Lu	0,24	0,17	0,29	0,21	0,24	0,42	0,24
Hf	6,62	7,23	6,55	5,98	6,83	10,8	5,36
Th	2,42	2,73	2,45	2,84	2,68	5,33	2,88
Компоненты	4818-1	4818-2	4818-3	4818-4	4863-1	4864-1	4864-2
	Carb-Chl сланец	Qz-Ms-Chl сланец	Метапикрит	Метатупф	Ms-Chl метапикро- базальт	Порфировый Chl-Act метабазаальт	Метаандезит
SiO ₂	31,97	42,24	32,34	49,90	41,16	43,99	49,28
TiO ₂	2,73	8,07	5,46	2,85	4,39	3,96	2,70
Al ₂ O ₃	10,43	12,04	14,23	10,30	13,31	10,72	12,93
Fe ₂ O ₃	8,61	10,43	0,61	11,75	9,24	5,93	4,37
FeO	2,85	3,64	16,23	2,72	3,18	5,48	6,79
MnO	0,19	0,11	0,13	0,07	0,13	0,13	0,15
MgO	4,33	9,21	14,56	9,21	6,48	6,66	7,59
CaO	17,54	3,07	4,27	3,05	6,95	10,54	7,80
Na ₂ O	4,78	0,14	0,15	1,56	3,75	3,66	3,20
K ₂ O	0,52	3,51	0,10	1,09	2,01	1,28	0,90
P ₂ O ₅	0,89	0,90	1,15	0,38	1,21	0,54	0,29
ППП	14,96	6,98	10,90	6,88	7,93	6,91	3,67
Сумма	99,79	100,00	100,10	99,75	99,73	99,80	99,66
CO ₂	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Sc	16,9	39,2	22,5	17,9	24,4	30,3	39,5
Co	32,8	90,6	46,7	42,4	28,9	34,1	37
Ni	109	199	295	227	95,1	213	148
Cu	8,08	20,1	121	57,2	38,8	54,3	32,5
V	235	389	371	219	214	248	200
Cr	171	424	315	286	173	367	303
Ga	17,3	24,2	22,9	14,7	17,6	16,5	18,1
Rb	8,19	60,4	2	10,6	14,9	10,3	13,1
Sr	512	167	154	110	267	232	874
Y	24,9	24,2	28,6	17	25,6	26	26,2
Zr	216	328	323	176	285	235	152



Продолжение табл. 1

Компоненты	4818-1	4818-2	4818-3	4818-4	4863-1	4864-1	4864-2
	Carb-Chl сланец	Qz-Ms-Chl сланец	Метапикрит	Метатугф	Ms-Chl метапикро- базальт	Порфиновый Chl-Act метабазальт	Метаандезит
Nb	36,3	47,9	55,5	30,4	39	18,7	13,1
Ba	135	383	54,3	189	296	317	288
La	32,9	27,4	46,1	22,3	33,4	19,9	13,7
Ce	75,5	72,9	112	48,8	80,2	51,9	29,5
Pr	10,2	10,3	15,4	6,39	11,6	7,99	4,02
Nd	46,1	47,9	68,5	28	50,7	38,5	18,9
Sm	10	10,3	14,3	6,09	10,3	8,97	4,85
Eu	2,9	3,01	3,66	1,82	3,06	2,85	1,77
Gd	8,22	8,74	11,1	4,85	9,52	7,95	5,89
Tb	1,04	1,13	1,29	0,67	1,19	1,07	0,92
Dy	5,47	5,63	6,68	3,64	6,16	5,65	5,27
Ho	1,02	1,01	1,19	0,72	1,1	1,02	1,09
Er	2,55	2,5	2,76	1,86	2,46	2,43	2,55
Tm	0,31	0,3	0,43	0,16	0,33	0,29	0,35
Yb	1,98	1,64	2,2	1,3	1,87	1,95	1,93
Lu	0,25	0,21	0,33	0,17	0,25	0,24	0,28
Hf	5,83	10,7	9	4,88	7,42	6,22	4,08
Th	2,1	1,36	3,97	1,89	2,44	1,09	1,95
Компоненты	4865-1	4865-2	4914-1	4914-2	4914-3	4914-5	4969-1
	Метапикро- базальт	Миндале- каменный пикробазальт	Carb-Chl сланец	Carb-Chl сланец	Карбонати- зированный метапикрит	Миндале- каменный метапикрит	Карбонати- зированный метапикрит
SiO ₂	44,59	41,22	37,91	38,18	34,71	32,72	32,35
TiO ₂	4,26	2,48	4,44	4,26	2,95	3,31	2,37
Al ₂ O ₃	13,80	10,93	12,71	9,86	4,37	8,23	5,38
Fe ₂ O ₃	3,59	1,63	4,76	9,35	2,42	4,65	3,13
FeO	7,94	6,94	6,52	3,68	2,02	7,10	5,02
MnO	0,09	0,24	0,16	0,15	0,22	0,29	0,21
MgO	9,29	7,36	9,58	8,55	4,60	7,00	2,63
CaO	3,75	11,08	7,58	9,79	25,53	15,54	24,98
Na ₂ O	3,26	2,52	2,15	2,08	0,25	1,19	0,13
K ₂ O	0,84	0,61	0,30	0,99	0,61	0,65	0,99
P ₂ O ₅	1,42	0,99	0,87	0,52	0,87	0,67	0,85
ППП	6,78	13,75	12,94	12,33	21,34	18,46	21,92
Сумма	99,60	99,78	99,93	99,74	99,89	99,78	99,97
CO ₂	н.о.	н.о.	8,11	9,30	20,08	15,58	19,27
Sc	14	11,5	18,3	30,6	23,7	28,9	21,6
Co	29	21,7	32,4	60,0	30,6	47,7	48,0
Ni	38,8	92,4	99,3	233,9	151,2	159	105,6
Cu	33,8	24,9	42,5	40,1	336,6	54,3	68,8
V	239	150	124	182	97,2	222	66,3
Cr	44,8	197	218	475,7	489	354,7	191
Ga	25,1	17	15,9	25,2	15,1	25,2	24,6
Rb	10,5	6,35	11,0	17,3	16,3	15,9	22,0
Sr	293	711	1153	291,9	795	643	836
Y	37,5	26,3	20,1	22,4	17,3	24,3	36,5
Zr	478	471	99,1	190,1	133,6	154,6	218,9
Nb	93,1	34,7	22,4	49,2	34,0	39,7	47,7
Ba	189	186	267	338,7	1375	315,5	287,5
La	70,4	43,4	24,3	29,1	21,5	33,7	53,9
Ce	158	107	57,8	70,2	51,2	82,6	103,6
Pr	21,2	15,7	7,90	9,4	7,0	10,6	13,4
Nd	86,9	69,5	40,8	45,2	33,8	51,0	64,0
Sm	17,7	12,1	8,53	8,52	6,7	10,2	12,0
Eu	4,53	3,38	2,73	2,44	2,1	2,8	3,31
Gd	14,7	10,1	6,66	7,08	5,3	8,0	9,66



Продолжение табл. 1

Компоненты	4865-1	4865-2	4914-1	4914-2	4914-3	4914-5	4969-1
	Метапикро- базальт	Миндале- каменный пикробазальт	Carb-Chl сланец	Carb-Chl сланец	Карбонати- зированный метапикрит	Миндале- каменный метапикрит	Карбонати- зированный метапикрит
Tb	1,72	1,29	0,80	0,94	0,64	0,99	1,17
Dy	8,85	5,94	3,72	4,61	3,18	4,83	6,04
Ho	1,48	1,11	0,62	0,79	0,56	0,82	1,06
Er	3,63	2,36	1,42	1,87	1,39	2,01	2,67
Tm	0,50	0,30	0,18	0,23	0,17	0,24	0,33
Yb	2,83	1,84	1,01	1,27	1,02	1,44	2,02
Lu	0,38	0,24	0,14	0,16	0,13	0,18	0,28
Hf	11,7	11,5	2,10	4,48	3,02	3,33	4,08
Th	5,22	2,11	1,12	1,88	1,48	1,69	2,46
Компоненты	4969-2	4969-3	4969-4	4969-6	4970-1	4970-3	4971-2
	Chl-Carb пикрит	Carb-Chl сланец	Порфиновый метапикрит	Порфиновый метапикрит	Carb-Chl сланец	Qz-Carb-Chl метапикрит	Метапикро- базальт
SiO ₂	20,01	39,35	31,54	36,35	31,65	40,45	41,85
TiO ₂	2,45	3,52	4,19	2,77	3,20	3,64	6,45
Al ₂ O ₃	5,48	10,55	10,38	10,55	9,61	11,16	11,16
Fe ₂ O ₃	2,43	8,50	2,26	2,53	7,69	3,45	7,44
FeO	6,54	2,56	8,25	8,70	4,30	9,82	8,16
MnO	0,12	0,18	0,15	0,22	0,14	0,10	0,14
MgO	2,70	4,61	6,61	7,18	7,29	9,40	12,18
CaO	31,53	13,47	16,18	14,81	17,72	8,08	2,17
Na ₂ O	0,19	3,56	0,25	0,63	0,13	0,08	0,21
K ₂ O	0,44	1,60	1,86	0,23	0,23	0,76	1,72
P ₂ O ₅	0,54	0,90	1,96	1,20	0,32	0,51	0,75
ППП	27,24	10,88	16,27	14,56	17,49	12,59	7,50
Сумма	99,68	99,69	99,92	99,75	99,77	100,00	99,74
CO ₂	25,05	9,05	11,51	10,00	13,60	6,27	1,34
Sc	18,5	26,3	26,2	22,6	29,1	34,8	44,3
Co	29,9	42,3	35,0	48,9	55,8	70,5	71,8
Ni	92,5	227,2	50,6	84,3	222	284	116
Cu	7,74	6,52	8,69	0,11	10,1	13,3	0,11
V	131,2	213,9	249	199	231	157	465
Cr	190,8	522	126,9	156,6	475	525	333
Ga	22,3	29,3	39,0	35,2	25,6	30,6	35,1
Rb	9,14	13,0	27,0	18,7	35,0	9,68	35,6
Sr	890	752	749	531	553	181	173
Y	21,7	26,0	37,0	29,7	20,4	25,3	25,1
Zr	216	392	495	410	254	322	405
Nb	48,4	73,2	88,8	68,5	59,2	65,9	66,4
Ba	128,2	627	622	426	640	189	514
La	34,8	47,3	64,9	56,7	30,1	41,2	34,2
Ce	78,3	103,9	145,1	127,7	70,1	92,8	82,4
Pr	10,0	13,1	19,7	15,5	8,88	11,5	10,9
Nd	47,8	59,0	91,8	69,5	38,8	52,2	53,2
Sm	9,19	10,7	16,4	11,7	7,33	9,52	10,5
Eu	2,30	3,05	4,4	3,14	2,11	2,90	2,96
Gd	6,80	7,94	12,1	8,43	5,80	7,24	7,99
Tb	0,85	1,01	1,42	1,05	0,78	1,0	0,99
Dy	4,23	4,98	7,05	5,39	4,15	5,17	4,94
Ho	0,73	0,88	1,21	0,93	0,72	0,92	0,84
Er	1,79	2,14	2,94	2,32	1,76	2,24	2,09
Tm	0,22	0,26	0,35	0,29	0,21	0,27	0,25
Yb	1,24	1,59	2,1	1,75	1,30	1,61	1,48
Lu	0,15	0,20	0,27	0,21	0,16	0,21	0,20
Hf	4,0	7,47	8,75	7,21	4,99	6,44	8,75
Th	2,33	3,12	3,29	2,92	2,48	2,90	1,90



Окончание табл.1

Компоненты	4972-2	4973-1	4975-3
	Акт-Chl метапикро- базальт	Метаандезит	Chl-Акт метабазальт
SiO ₂	43,22	57,43	44,83
TiO ₂	3,55	1,93	3,59
Al ₂ O ₃	8,72	10,91	10,23
Fe ₂ O ₃	1,29	2,46	4,74
FeO	8,67	6,43	5,73
MnO	0,14	0,10	0,14
MgO	8,18	4,54	7,28
CaO	10,89	4,79	12,33
Na ₂ O	0,47	0,28	1,63
K ₂ O	1,42	2,56	0,97
P ₂ O ₅	0,60	1,96	0,52
ППП	12,95	6,61	7,82
Сумма	100,10	100,00	99,80
CO ₂	7,85	2,64	5,69
Sc	28,8	27,7	38,1
Co	48,9	37,3	50,6
Ni	195	222	298
Cu	0,13	36,0	34,1
V	186	248	272
Cr	386	498	750
Ga	26,6	32,9	21,6
Rb	22,7	48,3	8,28
Sr	558	206	336
Y	25,5	39,4	25,1
Zr	332	169	251
Nb	49,1	30,6	19,7
Ba	708	481	444
La	28,5	68,5	16,6
Ce	70,2	137	43,6
Pr	9,62	16,4	6,40
Nd	47,6	75,8	33,3
Sm	9,34	14,1	7,61
Eu	2,64	4,69	2,43
Gd	7,42	12,0	6,68
Tb	0,92	1,41	0,85
Dy	4,74	6,61	4,50
Ho	0,86	1,12	0,81
Er	2,06	2,65	2,00
Tm	0,25	0,33	0,25
Yb	1,49	2,02	1,43
Lu	0,18	0,27	0,18
Hf	6,45	3,06	5,19
Th	1,89	1,79	0,65

Петрография пород

Метавулканиты микроскопически представлены ассоциацией новообразованных метаморфогенных минералов. Из реликтовых минералов встречается моноклинный пироксен, представленный Aug (Ti-Aug). Этот минерал встречается как в виде порфировых вкрапленников, подчеркивающих первичную магматическую структуру пород, так и в их основной массе. Также вкрапленники бывают сложены Act, Ab, а чаще кальцитом. Вкрапленники кальцита наблюдаются либо в виде единичного зерна, либо агрегата крупных зерен этого минерала. Основная масса пород сложена Chl, Act, Carb, Ms, Ab, Ep, Qz, Spn, Crx и Kfs (рис.4). Акцессорные минералы представлены Zrn, Rt, Brt и Ap. В породах много рудного минерала, иногда его содержание оставляет до 50-60 %, который представлен Py, Ilm, Ti-Mag, редко Csr. Cal во вкрапленниках, как правило, магнезиальный, а Cal основной массы, напротив, обогащен Sr и Mn. Ab по составу отвечает номеру плагиоклаза 0-1. Иногда Ab основной массы пород бывает слабо обогащен K или Fe. Светлая слюда может быть представлена как Ms, так и Pg (редко). Соотношение минералов в породах меняется в зависимости от их петрохимического состава, но в целом метаморфогенный парагенезис представлен Act + Chl + Ms + Ep + Ab + Carb + Orp, что отвечает метаморфизму в условиях фации зеленых сланцев. Наличие таких первично-магматических минералов, как Ti-Aug и Kfs указывает на повышенную щелочность этих вулканических пород*. Для метаосадочных (алевролиты, песчаники) пород свиты Тролльхеймен характерен парагенезис Q + Chl + Ms + Carb + Orp, что также отвечает зеленосланцевой фации.

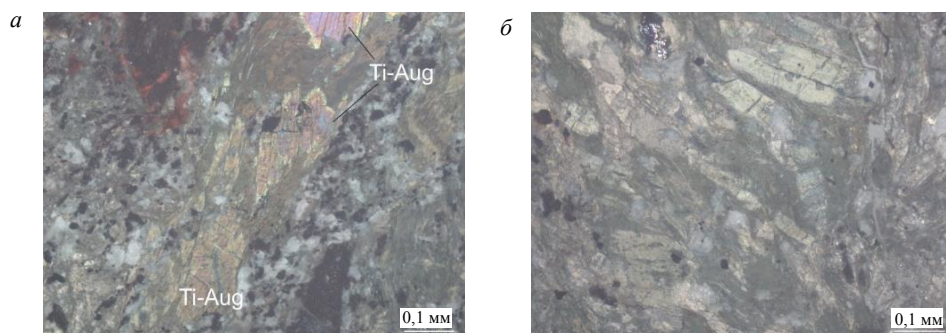


Рис.4. Шлиф 4864-1 (+): реликты порфирового вкрапленника Ti-Aug в метавулканите (слева) (а); шлиф 4975-3 (+): Carb – Act – Chl матрикс метавулканитов (б)

* Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб: ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.



Петрохимия

Химический состав метавулканитов представлен в табл.1. По содержанию макроэлементов изученные породы относятся к основным и ультраосновным породам, редко к средним. Они характеризуются следующими вариациями петрогенных элементов, мас. %: SiO_2 31,54-57,43; TiO_2 1,93-8,07; Al_2O_3 4,37-14,23; MgO 2,25-14,56; CaO 2,17-31,53; Na_2O 0,08-5,25; K_2O 0,10-4,45. Отмечены широкие вариации потерь при прокаливании (ППП) – до 27,24 %, что связано с низкотемпературным метаморфизмом пород. На диаграмме TAS фигуративные точки пород попадают в основном в поля умереннощелочных и щелочных пород (трахибазальты, трахипикробазальты, щелочные базальты и пикриты), в меньшей мере – в поля пород нормальной щелочности (базальты, пикриты). Одна проба отделилась от остальных и попала в поле андезитов (рис.5, а). Использование нормативных минеральных составов метавулканитов (по CIPW) позволило дополнить представления о видах этих базальтоидов (рис.5, в). На диаграмме фигуративные точки, отвечающие составам пород, разбиты на три группы: щелочные с нормативным нефелином (и лейцитом); оливин-пироксеновые, отвечающие нормальным базальтам; с нормативным кварцем. Среди последних могут быть как метаандезиты, так и метатифы (метатифиты).

По типу щелочности эти породы делятся на две группы: высококалиевые, известково-щелочные. На диаграмме $\text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}$ (рис.5, б) видна четкая дифференциация пород по типу щелочности, что может указывать на разные глубины зарождения материнской магмы. По показателю глиноземистости породы относятся к низкоглиноземистым и только отдельные пробы – к умеренноглиноземистым. По характеру магнезиальности это низко- и среднемгнезиальные породы (Mg 0,29-0,53). Коэффициент титанистости находится в пределах 19,7-66,7 и характеризует породы как высокотитанистые.

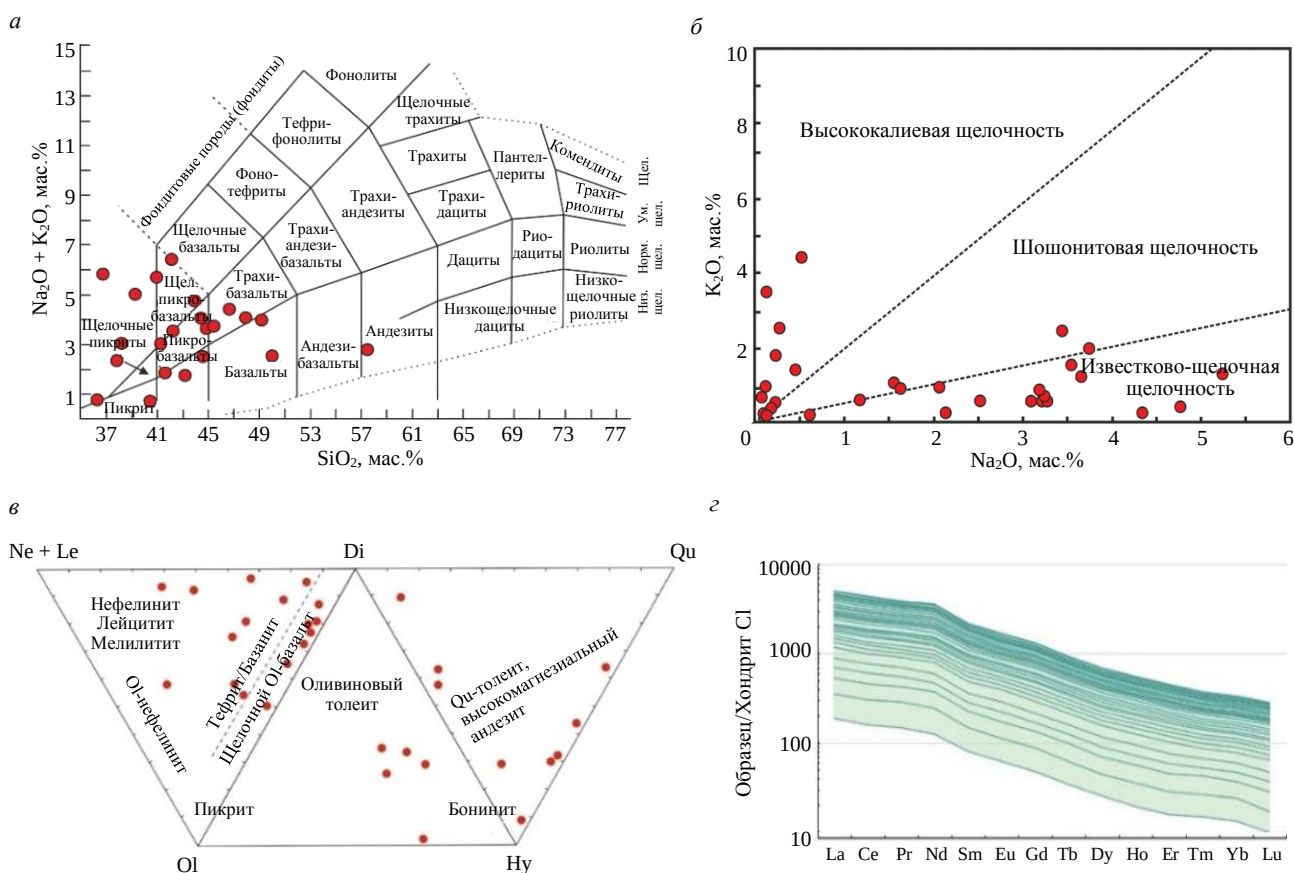


Рис.5. Характеристика составов метавулканитов свиты Тролльхеймен: а – диаграмма TAS по Петрографическому кодексу России; б – диаграмма $\text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}$ по [27]; в – диаграмма Qu – Hy – Di – Ol – Ne + Le; з – спектры распределения РЗЭ, нормированные на хондрит CI по [25]



На вариационных диаграммах SiO_2 – петрогенные элементы фигуративные точки пород формируют единое облако без признаков дифференциации; исключение составляет диаграмма SiO_2 – CaO , где проявлена сильная обратная зависимость, указывающая, видимо, на дифференциацию пород по основности. Вариационные диаграммы MgO – петрогенные элементы показали прямую зависимость с TiO_2 , Al_2O_3 и ΣFe ; обратная зависимость фиксируется для CaO . Корреляция петрогенных элементов с суммой РЗЭ отсутствует.

Спектры распределения РЗЭ (рис.5, з) характеризуются небольшим плавным наклоном от легких РЗЭ к тяжелым и отсутствием выраженного Eu -минимума (Eu/Eu^* 0,856-1,131). Суммарное содержание РЗЭ меняется в значительных пределах от 91,02 до 392,82 г/т; при этом сумма легких РЗЭ меняется от 72,74 до 358,73 г/т, а тяжелых РЗЭ – от 16,7 до 34,09 г/т. Отношения отдельных элементов La/Yb 11,6-33,9 и Lu/Gd 0,021-0,031 указывают на значительную степень фракционирования материала, отношение $\text{Nb}/\text{La} > 1$ – на минимальную контаминацию материнской магмы коровым материалом.

На спайдер-диаграмме микроэлементов, рассчитанной относительно их содержаний к примитивной мантии, в рассматриваемых породах неравномерно увеличивается содержание крупноионных литофильных и высокозарядных элементов относительно тяжелых редкоземельных. Это может свидетельствовать об эволюции магматического расплава в условиях взаимодействия с материалом коры повышенной щелочности [27]. Низкое и пониженное содержание таких совместимых элементов, как Cr , Ni , Co и др., может указывать на анатектический характер плавления мантии в магматическом источнике и на его относительную глубину.

Для реконструкции геодинамических обстановок основного вулканизма использовались дискриминационные диаграммы разных авторов (рис.6). Фигуративные точки, отвечающие составам метавулканитов свиты Тролльхеймен, попадают в поля щелочных внутриплитных базальтов и базальтов океанических островов. На этом основании их можно рассматривать как внутриплитные магматиты, проявленные в ходе континентального рифтогенеза.

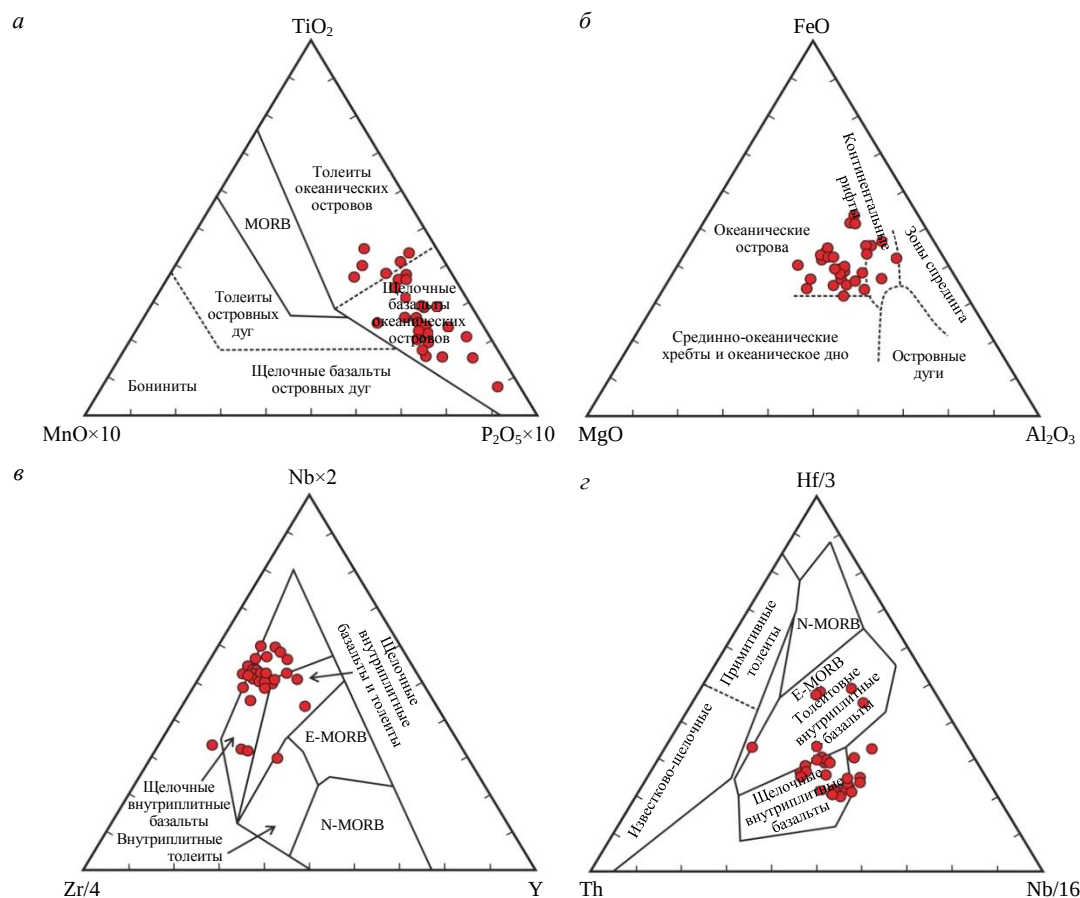


Рис.6. Дискриминационные диаграммы для базальтоидов: а – TiO_2 – $\text{MnO} \times 10$ – $\text{P}_2\text{O}_5 \times 10$ по [28]; б – FeO – MgO – Al_2O_3 по [29]; в – $\text{Nb} \times 2$ – $\text{Zr}/4$ – Y по [30]; з – $\text{Hf}/3$ – Th – $\text{Nb}/16$ по [31]



Определение абсолютного возраста

Выполнено по цирконам из пород свиты Тролльхеймен. Метавулканиды опробованы в районе горы Спирет (пр. 4969-4 и 4969-6) и в верхней части западного борта ледника Эсмаркбреен (пр. 4973-1) (см. рис.2, 3).

Из пробы 4969-4 зеленокаменной породы получена выборка циркона в размере 30 зерен. Циркон представлен бесцветными, светло-розовыми, розовыми, прозрачными и полупрозрачными угловатыми и окатанными обломками, обломками субидiomорфных кристаллов, некоторые с включениями и/или трещинками. Длина циркона от 50 до 122 мкм. В режиме КЛ большинство зерен циркона обладает неоднородным внутренним строением, выраженным тонкополосчатой осцилляционной зональностью (например, зерна 1-7, 11-13 на рис.7, а), характеризующей магматическое происхождение циркона.

По тринадцати проанализированным цирконам зафиксировано конкордантное значение U-Pb возраста $563,2 \pm 3,6$ млн лет (MSWD = 0,17, рис.7, б, табл.2). Содержание U в проанализированных точках колеблется в широком интервале от 56 до 447 г/т (ан.т. 11 и 6 на рис.7, а). Содержание Th варьируется в диапазоне от 26 до 442 г/т (ан.т. 1 и 4 на рис.7, а). Наименьшие содержания данных элементов отмечаются в самых светлых участках зональности в зернах на изображениях в режиме КЛ. Th/U отношение в продатированном цирконе изменяется от 0,36 до 1,04, составляя в среднем 0,69.

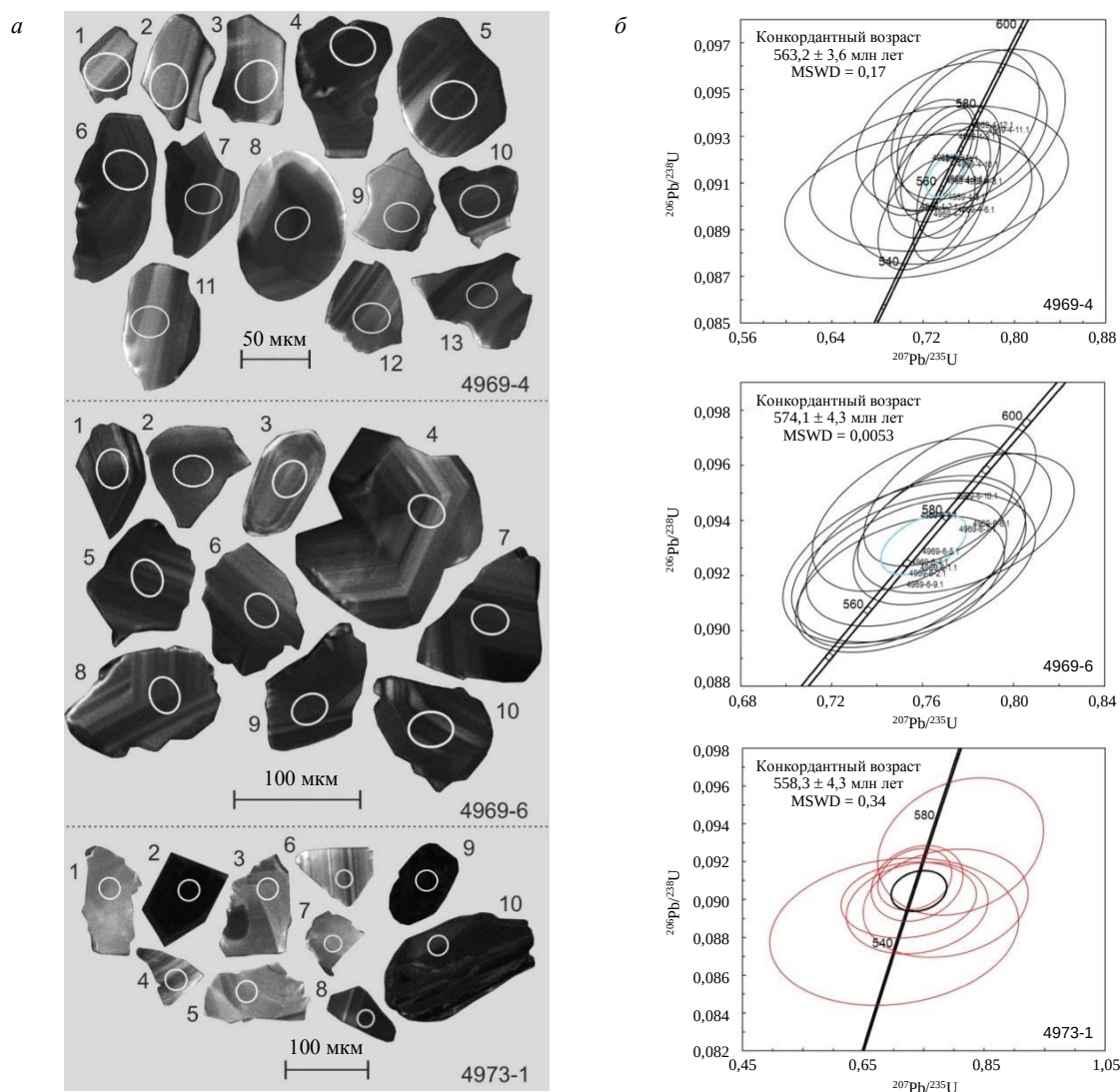


Рис.7. Результаты изотопного датирования циркона из метавулканидов свиты Тролльхеймен: а – изображения зерен в режиме КЛ, кружками показано положение аналитических кратеров (U-Pb датирование); б – диаграммы с конкордией



Таблица 2

Результаты U-Pb локального анализа цирконов из метавулкаников свиты Тролльхеймен (Земля Оскара II, архипелаг Шпицберген)

Точка анализа	$^{206}\text{Pb}/\text{U}$, %	U, ppm	Th, ppm	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$, ppm	$^{(1)}_{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age	$^{(1)}_{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age	D, %	Total $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	Total $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{(1)}_{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{(1)}_{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{(1)}_{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{(1)}_{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	Rho
Проба 4969-4																					
1	0,63	74	26	0,36	5,84	562,7 $\pm 7,8$	544 ± 130	-3	10,89	1,4	0,0636	3	10,96	1,4	0,0584	6,1	0,734	6,3	0,0912	1,4	0,230
2	0,65	74	35	0,49	5,74	555,7 $\pm 7,7$	504 ± 140	-9	11,04	1,4	0,0626	3	11,11	1,4	0,0573	6,3	0,712	6,5	0,09	1,4	0,224
3	0,47	116	75	0,67	9,05	557,8 $\pm 6,8$	571 ± 91	2	11,01	1,3	0,0629	2,4	11,06	1,3	0,0591	4,2	0,736	4,4	0,0904	1,3	0,293
4	0,12	441	442	1,04	34,9	567,6 $\pm 5,6$	511 ± 34	-10	10,85	1	0,0585	1,3	10,87	1	0,05751	1,6	0,73	1,9	0,09204	1	0,551
5	0,22	244	175	0,74	19,3	567,8 ± 6	485 ± 53	-15	10,84	1,1	0,0587	1,7	10,86	1,1	0,0568	2,4	0,722	2,6	0,0921	1,1	0,417
6	0,11	447	434	1,00	34,6	554,7 $\pm 5,5$	605 ± 33	9	11,12	1	0,06093	1,3	11,13	1	0,06004	1,5	0,744	1,8	0,08987	1	0,558
7	0,17	291	259	0,92	22,4	554 ± 6	545 ± 46	-2	11,12	1,1	0,05977	1,6	11,14	1,1	0,0584	2,1	0,723	2,4	0,0897	1,1	0,471
8	0,07	311	248	0,82	24,4	562 $\pm 5,8$	597 ± 36	6	10,97	1,1	0,06039	1,5	10,98	1,1	0,05981	1,7	0,751	2	0,09109	1,1	0,541
9	0,31	71	34	0,49	5,66	573,4 $\pm 7,8$	534 ± 95	-7	10,72	1,4	0,0606	3,2	10,75	1,4	0,0581	4,4	0,745	4,6	0,093	1,4	0,311
10	0,10	217	171	0,81	17,1	565,9 $\pm 6,1$	559 ± 45	-1	10,89	1,1	0,0596	1,8	10,9	1,1	0,0588	2,1	0,744	2,4	0,0918	1,1	0,476
11	0,00	56	29	0,53	4,49	575,2 $\pm 8,4$	600 ± 79	4	10,71	1,5	0,0599	3,6	10,71	1,5	0,0599	3,6	0,771	3,9	0,0933	1,5	0,388
12	0,21	107	37	0,36	8,61	576,1 $\pm 7,6$	556 ± 71	-4	10,67	1,4	0,0604	2,6	10,7	1,4	0,0587	3,3	0,757	3,5	0,0935	1,4	0,391
13	0,11	208	155	0,77	16,3	562,1 $\pm 6,1$	547 ± 48	-3	10,96	1,1	0,0593	1,9	10,98	1,1	0,0585	2,2	0,734	2,5	0,0911	1,1	0,462
Проба 4969-6																					
9	0,12	199	126	0,66	15,7	565,6 $\pm 6,2$	580 ± 48	3	10,89	1,1	0,0603	1,9	10,91	1,1	0,0594	2,2	0,75	2,5	0,0917	1,1	0,458
2	0,00	164	97	0,61	13	567,9 $\pm 6,8$	573 ± 46	1	10,86	1,2	0,0592	2,1	10,86	1,2	0,0592	2,1	0,751	2,5	0,0921	1,2	0,504
1	0,15	151	66	0,46	12	569,3 $\pm 6,6$	582 ± 58	2	10,81	1,2	0,0606	2,3	10,83	1,2	0,0594	2,7	0,756	2,9	0,0923	1,2	0,412
4	0,00	113	65	0,60	8,98	570,6 $\pm 6,9$	564 ± 57	-1	10,8	1,3	0,0589	2,6	10,8	1,3	0,0589	2,6	0,752	2,9	0,0925	1,3	0,437
5	0,12	189	76	0,42	15,1	572,9 $\pm 6,3$	571 ± 50	0	10,75	1,1	0,0601	2	10,76	1,2	0,0591	2,3	0,757	2,6	0,0929	1,2	0,451
7	0,00	187	119	0,66	15	577,4 $\pm 6,4$	596 ± 43	3	10,67	1,2	0,0598	2	10,67	1,2	0,0598	2	0,773	2,3	0,0937	1,2	0,498
6	0,11	200	127	0,66	16,1	578,8 $\pm 6,3$	609 ± 47	5	10,63	1,1	0,0611	1,9	10,65	1,1	0,0602	2,2	0,779	2,5	0,0939	1,1	0,463
8	0,00	173	81	0,49	14	580,2 $\pm 6,5$	538 ± 46	-7	10,62	1,2	0,0582	2,1	10,62	1,2	0,0582	2,1	0,756	2,4	0,0942	1,2	0,484
10	0,00	272	155	0,59	22,2	584,7 $\pm 6,4$	567 ± 37	-3	10,53	1,1	0,059	1,7	10,53	1,1	0,059	1,7	0,772	2	0,0949	1,1	0,559
3	0,00	119	100	0,87	30,4	1675 ± 18	1647 ± 21	-2	3,371	1,2	0,1012	1,1	3,371	1,2	0,1012	1,1	4,14	1,7	0,2966	1,2	0,738



Окончание табл. 2

Точка анализа	²⁰⁶ Pb/ %,	U, ppm	Th, ppm	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*, ppm	(1) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Age	(1) ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Age	D, %	Total ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±%	Total ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	(1) ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb*	±%	(1) ²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	±%	(1) ²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	±%	(1) ²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	±%	Rho
Проба 4973-1																					
1	1,34	37	18	0,52	2,81	545,4 ±9,4	515 ±270	-6	11,33	1,8	0,0576	12	0,701	12	0,0883	1,8	0,146	12	0,0883	1,8	0,146
7	0,59	73	55	0,78	5,65	552,8 ±5,8	598 ±140	8	11,17	1,1	0,0599	6,4	0,739	6,5	0,0895	1,1	0,168	6,5	0,08954	1,1	0,168
5	0,67	52	23	0,46	4,02	554,5 ±6,7	725 ±150	31	11,13	1,3	0,0635	7	0,786	7,1	0,0898	1,3	0,178	7,1	0,0898	1,3	0,178
4	0,54	112	85	0,78	8,74	555,3 ±4,8	547 ±140	-2	11,12	0,91	0,0585	6,2	0,725	6,3	0,0899	0,91	0,145	6,3	0,08997	0,91	0,145
6	0,25	99	82	0,86	7,75	560,6 ±4,8	566 ±90	1	11,007	0,9	0,059	4,1	0,739	4,2	0,0908	0,9	0,212	4,2	0,09085	0,9	0,212
8	0,31	205	159	0,80	16,1	561,8 ±3,9	551 ±72	-2	10,982	0,73	0,0586	3,3	0,735	3,4	0,0910	0,73	0,217	3,4	0,09106	0,73	0,217
3	0,61	35	17	0,51	2,8	572,3 ±8,9	719 ±140	26	10,77	1,6	0,0633	6,7	0,811	6,9	0,0928	1,6	0,235	6,9	0,0928	1,6	0,235
9	1,08	1890	1741	0,95	767	2471,9 ±5,7	2632,5 ±4,2	6	2,1398	0,28	0,1778	0,25	11,457	0,38	0,4673	0,28	0,741	0,38	0,4673	0,28	0,741
10	0,02	584	23	0,04	256	2655,4 ±8,4	2721,7 ±6	2	1,9619	0,38	0,18765	0,36	13,188	0,53	0,5097	0,38	0,728	0,53	0,5097	0,38	0,728
2	0,01	959	180	0,19	424	2673,6 ±7,3	2708,6 ±3,7	1	1,9456	0,33	0,18617	0,23	13,193	0,4	0,514	0,33	0,827	0,4	0,514	0,33	0,827

Примечание. Погрешность составляет 1σ; погрешность стандартной калибровки 0,31-0,37%; Pbс и Pb* – общий и радиогенный свинец; (1) – изотопные отношения скорректированы по измеренному ^{204}Pb ; D – коэффициент корреляции между определениями изотопных возрастов.



Выборка зерен циркона из зеленокаменной породы пробы 4969-6 составила 100 штук. Циркон представлен бесцветными и светло-розовыми, прозрачными и полупрозрачными угловатыми или неправильной формы обломками, обломками субидiomорфных кристаллов и окатанными зернами, некоторые с включениями и трещинками. По удлинению зерна циркона от 55 до 159 мкм. В КЛ режиме в цирконе выявлено сложное внутреннее строение с четко проявленной осцилляционной зональностью (например, зерна 4-10 на рис.7, а).

По девяти из десяти зерен был получен конкордантный U-Pb возраст $574,1 \pm 4,3$ млн лет (MSWD = 0,0053, рис.7, б, табл.2). Для зерна 3 зафиксирован древний U-Pb возраст 1675 ± 18 млн лет. Это зерно выделяется на фоне остальных продатированных разностей своей окатанной формой и целостностью, в то время как остальные зерна представлены угловатыми обломками (рис.7, а), наличием светлой (почти белой) окантовкой краевой части. Содержание U в цирконе изменяется в диапазоне от 113 (ан.т. 4 на рис.7, а) до 272 г/т (ан.т. 10 на рис.7, а). Содержание Th более переменное, оно колеблется в интервале от 65 (ан.т. 4 на рис.7, а) до 155 г/т (ан.т. 10 на рис.7, а). Как и в вышеописанных зернах, наименьшие значения содержания U и Th фиксируются в светлых зонах, а высокие – в темных на изображениях в режиме КЛ. Th/U отношение формирует диапазон от 0,42 до 0,87 (в среднем – 0,60), где максимальное значение характеризует зерно 3.

Выборка циркона из пробы метаандезита 4973-1 – 85 зерен. Циркон представлен светло-розово-коричневыми, прозрачными и призматическими обломками кристаллов, некоторые с включениями и/или трещинками. Длина циркона от 57 до 223 мкм, коэффициент удлинения 2,6-2,7. Весь циркон представлен обломками кристаллов, в некоторых можно наблюдать осцилляционную зональность (например, зерна 4, 6, 8 на рис.7, а).

Для семи из десяти зерен был получен U-Pb возраст $558,3 \pm 4,3$ млн лет (MSWD = 0,34, рис.7, б, табл.2). Для зерен 2, 9 и 10, выделяющихся почти черной окраской на изображениях КЛ (рис.7, а), получен более древний возраст от $2721,7 \pm 6,0$ до $2632,5 \pm 4,2$ млн лет. Содержание U изменяется от 35 до 1890 г/т, Th – от 17 до 1741 г/т, Th/U – от 0,04 до 0,95. Самые высокие содержания U и Th характеризуют древние, самые темные из исследуемых зерен.

Обсуждение результатов

Материалы по изучению осадочно-вулканогенной толщи, описанной во внутренних районах южной части Земли Оскара II и представленной выше, позволяют уверенно выделить на этой площади метавулканиды, связанные с вендской тектоно-магматической активизацией, проявившейся здесь 574-558 млн лет назад.

Комплексы вендского возраста давно известны на Шпицбергене. Впервые они в общем виде были описаны как терригенные, являющиеся частью каледонского фундамента архипелага. Но позднее появилась работа [1], где вендские комплексы Шпицбергена рассматривались как «платформеноидные», а наличие в составе терригенного разреза грубообломочных разностей (тиллитов) предлагалось рассматривать как указание на крупную тектоническую активизацию. В свою очередь, А.А.Красильщиков [10] описывает вендский комплекс архипелага как карбонатно-терригенный, фаунистически охарактеризованный и дающий основание предполагать, что в вендское время на территории Шпицбергена существовала особая тектоническая и физико-географическая обстановка, обусловившая молассоподобный облик вендских формаций и связанная с общим подъемом территории архипелага.

В.Б.Хараланд [20], подводя итог многолетним исследованиям вендских отложений на Шпицбергене, предполагает, что вендские толщи в районе Земли Оскара II (группы Сент-Джонсфьорден и Комфортлессбреен) формировались в рифтогенной структуре в условиях чередования эпох оледенения с эпохами вулканизма. Наибольшая интенсивность вулканических процессов приходится, по мнению автора, на время накопления верхней части разреза группы Сент-Джонсфьорден. Однако авторы геологической карты южной части Земли Оскара II масштаба 1:100000 [21] вулканическую толщу этого района выделяют в ранге свит Тролльхеймен и Лёвлибреен, датируют их как мезопротерозойские и описывают структуру, где эти свиты формируют ядро крупной антиклинали.

Таким образом, вопрос о происхождении и возрасте вулканитов свиты Тролльхеймен, а также их месте в общей структуре района является ключевым. В сходной структурно-фациальной зоне,



к югу от Земли Оскара II в северной части ЗВЯ описана осадочно-вулканогенная серия Чемберлендален вендского возраста [6]. Геолого-петрологические характеристики этой толщи во многом сопоставимы с характеристиками метавулканитов свиты Тролльхеймен. Полученные датировки по цирконам из пород свиты Тролльхеймен позволяют выделить в этом районе архипелага новый вендский стратон, породы которого по возрасту и другим характеристикам хорошо коррелируются с метавулканитами серии Чемберлендален. К этим характеристикам относятся, прежде всего, субщелочной и щелочной состав вендских метабазитов и формирование их в условиях внутриплитной континентальной обстановки.

Ключевым вопросом является проблема соотношения толщи вендских вулканитов свиты Тролльхеймен с ранее выделенными здесь же вендскими терригенными отложениями серии Комфортлессбреен, которые охарактеризованы палеонтологически [22]. В районе северной части ЗВЯ две серии вендского возраста (терригенная Кап-Лайель и осадочно-вулканогенная Чемберлендален) располагаются в разрезе в таком порядке на основании того, что в тиллитах серии Кап-Лайель отсутствует галька основных вулканитов, которыми сложена толща серии Чемберлендален [6]. В рассматриваемом районе наблюдается аналогичная ситуация: при картировании пород серии Комфортлессбреен галек основных вулканитов в метатиллитах описано не было. Данные английских геологов [20], проводивших статистические наблюдения за петрографическим составом галек этих пород в районе Земли Оскара II, подтверждают это: среди галек тиллитов описаны доломиты, известняки, кварциты, гранитоиды, строматолитсодержащие карбонатные породы, но основные вулканиты отсутствуют. В качестве другого маркера надо привести материалы по возрасту обломочных цирконов из вендских тиллитов Земли Норденшельда (ЗН, к югу от Земли Оскара II). В цементе этих терригенных пород выделены цирконы с возрастом 2453-1659, 1503-1383, 1353-1009 и 961-726 млн лет. В этих же конгломератах изучен возраст цирконов из гранитных валунов – 2103-1448, 973 ± 10 и 656 ± 5 млн лет [32]. Важно отметить, что в песчаниках карбона ЗН и нижнего палеозоя ЗВЯ выделены обломочные цирконы с возрастными интервалами 540-510 млн лет [32, 33]. Поэтому можно предположить, что вулканиты свиты Тролльхеймен были сформированы позже, чем тиллиты серии Комфортлессбреен, и должны располагаться выше их в разрезе вендского комплекса.

Для уточнения структуры района авторами настоящей статьи проведен анализ всех имеющихся данных по элементам залегания пород с привлечением материалов предшественников. Полученный результат лучше всего соотносится с представлениями В.Б.Харланда [20] и демонстрирует наличие в этом районе вложенной структуры, которую можно интерпретировать как грабен – на разрезе (см. рис.2) представлено его западное плечо (восточное крыло срезано более поздней структурой – Западно-Шпицбергенским грабенообразным прогибом).

Заключение

Получены датировки абсолютного возраста пород свиты Тролльхеймен. На основании этого толщу, которую В.Б.Харланд [19, 20] рассматривал как единый разновозрастный стратон, следует разделить на два разновозрастных подразделения: среднерифейскую вулканогенно-осадочную свиту Лёвлибреен и вендскую вулканогенную свиту Тролльхеймен.

Присутствие вендских вулканитов в этом районе Шпицбергена выявлено впервые, хотя ранее и предсказывалось [20]. Вендское время на Шпицбергене давно рассматривается как период активизации [1, 3, 10, 34, 35], прежде всего тектонической [4, 36], а также магматической [6, 20]. И если тектоническая активизация маркируется горизонтами вендских тиллитов, известных во всех частях архипелага [10, 20], и ансамблями тиманских мезоструктур в породах рифея [4], то вендские вулканиты известны теперь в двух районах – северная часть ЗВЯ [6] и южная часть Земли Оскара II. Сходство в геологической позиции, петрологических характеристиках и возрастных данных указывает на единый механизм формирования двух комплексов и на обоснованный прогноз по выявлению новых вендских вулканогенных комплексов в других районах архипелага.

Материалы по метавулканитам свиты Тролльхеймен доказывают, что вендский вулканизм на архипелаге связан с внутриплитными процессами, которые ранее были описаны для вулканитов серии Чемберлендален. Результаты изучения петрохимических особенностей вулканогенной



свиты Тролльхеймен – неравномерное увеличение содержаний крупноионных литофильных и высокозарядных элементов относительно тяжелых редкоземельных – свидетельствуют о зарождении магмы на больших глубинах, на уровне плавления в верхней мантии [37, 38]. Различие вулканитов по типу щелочности, низкое и пониженное содержание таких совместимых элементов, как Cr, Ni, Co и др., указывает на анатектический характер плавления мантии в магматическом очаге, его относительную глубину и развитие во времени вплоть до подошвы нижней коры. Плавный характер распределения легких и тяжелых редкоземельных элементов, преобладающее тяготение составов к полю их распространения во внутриплитных континентальных условиях дает основание считать эти породы продуктами вулканической активности в условиях континентального внутриплитного рифтогенеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бархатов Б.П. Основные этапы тектонического развития архипелага Шпицберген // Вестник Ленинградского университета. 1970. № 6. Вып. 1. С. 157-159.
2. Леонов Ю.Г. Тектоническая природа девонского орогенеза. М.: Недра, 1976. 192 с.
3. Турченко С.И. Докаледонский этап тектонического развития складчатого основания архипелага Шпицберген как фундамента древней платформы // Геология и перспективы рудоносности фундамента древних платформ. Л.: Наука, 1987. С. 222-231.
4. Кузнецов Н.Б. Основание Свальбарда: северо-восточное продолжение скандинавских каледонид или северо-западное продолжение протоуралид-тиманид? // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2009. Т. 84. Вып. 3. С. 23-51.
5. Сироткин А.Н., Евдокимов А.Н. Эндогенные режимы и эволюция регионального метаморфизма складчатых комплексов фундамента архипелага Шпицберген (на примере полуострова Нью Фрисланд). СПб: ВНИИОкеангеология им. И.С.Граммберга, 2011. 270 с.
6. Сироткин А.Н., Евдокимов А.Н. Вендский возраст магматических пород района долины Чемберлена (северная часть Земли Ведела Ярлсберга, архипелаг Шпицберген) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 419-434. DOI: [10.31897/PMI.2022.20](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.20)
7. Хаин В.Е., Филатова Н.И. О предистории современного Северного Ледовитого океана // Геология полярных областей: Материалы XLII Тектонического совещания, 3-6 февраля 2009, Москва, Россия: в 2 томах. М.: ГЕОС, 2009. Т. 2. С. 260-266.
8. Акбарпур Хайяти С.А., Гульбин Ю.Л., Сироткин А.Н., Гембицкая И.М. Эволюция состава акцессорных минералов REE и Ti в метаморфических сланцах серии Атомфелла, Западный Нью Фрисланд, Шпицберген и ее петрогенетическое значение // Записки Российского минералогического общества. 2020. Т. 149. № 5. С. 1-28. DOI: [10.31857/S0869605520050020](https://doi.org/10.31857/S0869605520050020)
9. Сироткин А.Н., Никитин Д.В. Особенности геодинамического развития девонского грабена Шпицбергена // Записки Горного института. 2011. Т. 194. С. 104-111.
10. Красильщиков А.А. Стратиграфия и палеотектоника докембрия – раннего палеозоя Шпицбергена. Л.: Недра, 1973. 120 с.
11. Турченко С.И., Тебеньков А.М., Бархатов Д.Б., Барматенков И.И. Геологическое строение и магматизм района долины Чемберлена, Западный Шпицберген // Геология Шпицбергена. Л.: Севморгеология, 1983. С. 38-48.
12. Bjørnerud M. An Upper Proterozoic unconformity in northern Wedel Jarlsberg Land, southwest Spitsbergen: lithostratigraphy and tectonic implications // Polar Research. 1990. Vol. 8. № 2. P. 127-139. DOI: [10.3402/polar.v8i2.6809](https://doi.org/10.3402/polar.v8i2.6809)
13. Balašov Yu.A., Peucat J.J., Tebenkov A.M. et al. Rb-Sr whole rock and U-Pb zircon datings of the granitic-gabbroic rocks from the Skålfjellet Subgroup, southwest Spitsbergen // Polar Research. 1996. Vol. 15. № 2. P. 167-181. DOI: [10.3402/polar.v15i2.6645](https://doi.org/10.3402/polar.v15i2.6645)
14. Gee D.G., Tebenkov A.M. Two major unconformities beneath the Neoproterozoic Murchisonfjorden Supergroup in the Caledonides of central Nordaustlandet, Svalbard // Polar Research. 1996. Vol. 15. № 1. P. 81-91. DOI: [10.3402/polar.v15i1.6638](https://doi.org/10.3402/polar.v15i1.6638)
15. Стратиграфический словарь Шпицбергена. Л.: Недра, 1990. 203 с.
16. Soviet geological research in Svalbard 1962-1992. Extended abstracts of unpublished reports / Ed. by A.A. Krasil'shchikov. Oslo: Norsk Polarinstitutt, 1996. 103 p.
17. Красильщиков А.А., Ковалева Г.А. Докембрийские литолого-стратиграфические комплексы западного побережья Шпицбергена // Геология Свальбарда. Л.: Научно-исследовательский институт геологии Арктики, 1976. С. 63-70.
18. Hjellev A., Ohta Y., Winsnes T. Hecla Hoek rocks of Oscar II Land and Prins Karls Forland, Svalbard // The geological development of Svalbard during the Precambrian, Lower Palaeozoic, and Devonian: Symposium on Svalbard's geology, 2-5 June 1975, Oslo, Norway. Oslo: Norsk Polarinstitutt, 1979. P. 145-169.
19. Harland W.B., Horsfield W.T., Manby G.M., Morris A.P. An outline pre-Carboniferous stratigraphy of central western Spitsbergen // The geological development of Svalbard during the Precambrian, Lower Palaeozoic, and Devonian: Symposium on Svalbard's geology, 2-5 June 1975, Oslo, Norway. Oslo: Norsk Polarinstitutt, 1979. P. 119-144.
20. Harland W.B., Hambrey M.J., Waddams P. Vendian geology of Svalbard. Oslo: Norsk Polarinstitutt, 1993. 150 p.
21. Geological map of Svalbard. Sheet B8G St. Jonsfjorden. 1:100 000. Oslo: Norsk Polarinstitutt, 2003.
22. Михайлова Н.С., Турченко С.И. Микрофоссилии позднего докембрия Шпицбергена и их стратиграфическое значение // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1986. № 3. С. 18-25.



23. Раабен М.Е., Забродин В.Е. Водорослевая проблематика верхнего рифея (строматолиты, онколиты). М.: Наука, 1972. 128 с.
24. Williams I.S. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe // Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Society of Economic Geologists, 1998. P. 1-35. DOI: [10.5382/Rev.07.01](https://doi.org/10.5382/Rev.07.01)
25. McDonough W.F., Sun S.-s. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. Vol. 120. Iss. 3-4. P. 223-253. DOI: [10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
26. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // American Mineralogist. 2010. Vol. 95. № 1. P. 185-187. DOI: [10.2138/am.2010.3371](https://doi.org/10.2138/am.2010.3371)
27. Middlemost E.A.K. The basalt clan // Earth-Science Reviews. 1975. Vol. 11. Iss. 4. P. 337-364. DOI: [10.1016/0012-8252\(75\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(75)90039-2)
28. Mullen E.D. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis // Earth and Planetary Science Letters. 1983. Vol. 62. Iss. 1. P. 53-62. DOI: [10.1016/0012-821X\(83\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90070-5)
29. Pierce A.B., Bell J.M., Owen B.D., Doige C.E. Availability of phytate phosphorus to the growing pig receiving isonitrogenous diets based on wheat or corn // Canadian Journal of Animal Science. 1977. Vol. 57. № 3. P. 573-583. DOI: [10.4141/cjas77-074](https://doi.org/10.4141/cjas77-074)
30. Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-1bZr-1bY diagram // Chemical Geology. 1986. Vol. 56. Iss. 3-4. P. 207-218. DOI: [10.1016/0009-2541\(86\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90004-5)
31. Wood D.A. The application of a Thsingle bondHfsingle bondTa diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province // Earth and Planetary Science Letters. 1980. Vol. 50. Iss. 1. P. 11-30. DOI: [10.1016/0012-821X\(80\)90116-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90116-8)
32. Сироткин А.Н., Марин Ю.Б., Кузнецов Н.Б. и др. О возрасте формирования основания Шпицбергена: U-Pb-датирование детритного циркона из верхнедокембрийских и нижнекаменноугольных обломочных пород северо-западной части Земли Норденшельда // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 3. С. 321-326. DOI: [10.7868/S0869565217330143](https://doi.org/10.7868/S0869565217330143)
33. Костева Н.Н., Кузнецов Н.Б., Тебенёв А.М., Романюк Т.В. Первые результаты изотопного U/Pb-датирования (LA-ICP-MS) детритных цирконов из нижнего палеозоя Шпицбергена // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 3. С. 305-312. DOI: [10.7868/S0869565214090199](https://doi.org/10.7868/S0869565214090199)
34. Сироткин А.Н., Евдокимов А.Н. Новые данные по U-Pb датированию метаморфизованных интрузий основного и ультраосновного составов северной части полуострова Нью-Фрисланд (остров Западный Шпицберген) // Региональная геология и металлогения. 2020. № 81. С. 45-59.
35. Гульбин Ю.Л., Акбарпуран Хайяти С.А., Сироткин А.Н. Минеральный состав и термобарометрия метаморфических пород Западного Нью-Фрисланда, Шпицберген // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 657-673.
36. Кузнецов Н.Б. Позднедокембрийско-раннепалеозойская предыстория Западной Арктики (региональногеологический и палеотектонический аспекты) // Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen, 2010. С. 525-569.
37. Иванов А.В. Внутриконтинентальный базальтовый магматизм (на примере мезозоя и кайнозоя Сибири): Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Иркутск: Институт земной коры Сибирского отделения РАН, 2011. 30 с.
38. Акбарпуран Хайяти С.А., Гульбин Ю.Л., Борисовский С.Е. Возраст монацита из метапелитовых сланцев серий Атомфьелла и Моссель (полуостров Нью-Фрисланд, о. Западный Шпицберген) по данным Th-U-Pb (SHIME)-датирования // Вестник геонаук. 2021. № 10 (322). С. 16-24. DOI: [10.19110/geov.2021.10.2](https://doi.org/10.19110/geov.2021.10.2)

Авторы: Александр Николаевич Сироткин, д-р геол.-минерал. наук, начальник сектора (ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-2433-3953>, Александр Николаевич Евдокимов, д-р геол.-минерал. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Evdokimov_AN@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8121-0426>, Марина Юрьевна Бурнаева, канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник (ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0009-0008-5015-5023>, Наталья Алексеевна Румянцева, канд. геол.-минерал. наук, ведущий инженер (ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-1173-4101>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.