

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Багдасарян Татьяна Эдвардовна

**ТЕКТОНО-ТЕРМАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ В МЕЗОЗОЙ-
КАЙНОЗОЙСКОЕ ВРЕМЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕКОВОГО АНАЛИЗА АПАТИТА**

Специальность 1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2023

Диссертация подготовлена на кафедре динамической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН.

Научный руководитель – **Веселовский Роман Витальевич**
доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН

Официальные оппоненты – **Иванов Алексей Викторович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт земной коры» Сибирского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научной работе

Никишин Анатолий Михайлович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, заведующий кафедрой

Худолей Андрей Константинович – доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Институт наук о Земле, кафедра региональной геологии, профессор

Защита диссертации состоится 26 мая 2023 года в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.016.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, ауд. 415.

Email: nvbadulina@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.7/2513>

Автореферат разослан __ апреля 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.016.7,
кандидат геолого-минералогических наук



Ю.А. Гатовский

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. На рубеже палеозоя и мезозоя на территории Сибирской платформы произошло масштабное магматическое событие, в результате которого сформировалась крупнейшая из сохранившихся на Земле континентальных изверженных провинций – Сибирские траппы. Основная фаза магматической активности в ходе становления Сибирских траппов, согласно результатам U-Pb датирования перовскита, бадделейта и циркона (Ivanov et al., 2021; Burgess et al., 2017; и др.), имела место 252-251 млн лет назад и длилась не более 1 млн лет, а, возможно, существенно меньше (Pavlov et al., 2019; Latyshev et al., 2020, 2021). Однако значительное количество определений $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраста плагиоклаза, флогопита, биотита и амфибола (Ivanov et al., 2013), а также единичные оценки U-Pb возраста по циркону (Kamo et al., 2003; Гусев и др., 2019; Sereda et al., 2020) приходятся на интервал 240-230 млн лет. Очевидно, что геологическая интерпретация более молодых, чем основная фаза магматизма, оценок изотопного возраста магматических тел Сибирской трапповой провинции должна учитывать их постмагматическую термальную историю, сведения о которой крайне фрагментарны из-за отсутствия данных средне- и низкотемпературной термохронологии.

При решении задач разработки моделей тектоно-термальной эволюции крупных блоков земной коры метод трекового датирования (анализа) апатита является одним из наиболее востребованных. С его помощью возможно не только оценить время, прошедшее с момента последнего остывания апатита ниже 120°C (трековый возраст), но также реконструировать динамику процесса охлаждения горных пород – их термальную эволюцию, которая может отражать их вторичный прогрев магматическими событиями и/или вертикальные тектонические движения. Первые и до недавнего времени единственные для Восточной Сибири результаты трекового датирования апатита были получены по породам фундамента северо-восточной части Сибирской платформы (Розен и др., 2009): значения трекового возраста в диапазоне 220-185 млн лет потребовали разработки довольно экзотической модели тектонической интерпретации полученных результатов. Реконструкция тектоно-термальной эволюции пород кристаллического фундамента Сибирской платформы имеет важное прикладное значение, поскольку эти данные могут быть использованы для прогноза перспективности структур осадочного чехла для поисков новых месторождений углеводородов и оценки их зрелости. Всё вышперечисленное определяет актуальность темы настоящего исследования.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время для Сибирской платформы накоплен большой объем изотопно-геохронологических данных, однако термохронологические исследования методом трекового датирования апатита единичны, что является причиной отсутствия надёжно разработанной модели её тектоно-термальной эволюции.

Цель и задачи исследования. Главной целью данного исследования является реконструкция тектоно-термальной эволюции Сибирской платформы в мезозое и кайнозое с использованием низко- и среднетемпературных геотермохронометров. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Освоение метода трекового датирования апатита с использованием масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором (LA-ICP-MS) и его реализация в ИФЗ РАН.

2. Получение новых определений трекового возраста и распределения длин треков в апатите из магматических комплексов пермо-триасовой трапповой провинции и фундамента Сибирской платформы.
3. Выполнение $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и других изотопно-геохронологических исследований, направленных на получение дополнительных низко- и среднетемпературных термохронологических данных.
4. Разработка модели тектоно-термальной эволюции Сибирской платформы за последние 250 млн лет на основе полученных и опубликованных ранее изотопно-геохронологических данных.

Объект и предмет исследования. Объектами исследований являются интрузивные тела Сибирской пермо-триасовой (трапповой) провинции, расположенные в северо-западной (Норильский и Маймеча-Котуйский районы) и юго-западной (Ангаро-Тасеевская впадина) частях Сибирской платформы, а также комплексы её кристаллического фундамента, вскрытые скважинами на глубинах около 2 км в основании Непско-Ботубинской антеклизы. В качестве предмета исследования выступает модель тектоно-термальной эволюции Сибирской платформы за последние 250 млн лет.

Фактический материал и методы исследования. В основу работы положен каменный материал, отобранный в ходе экспедиционных работ А.В. Латышевым (МГУ, ИФЗ РАН), Р.В. Веселовским (МГУ, ИФЗ РАН), В.А. Зайцевым (ГЕОХИ РАН), А.Е. Марфиным (ИЗК СО РАН) из интрузивных тел Сибирской пермо-триасовой изверженной провинции, а также керн скважин, представляющий собой породы кристаллического фундамента Сибирской платформы, предоставленный А.В. Гайдуком (ООО «Энерджи Ресерч»). Трековое датирование было выполнено для 25 проб: 13 проб датированы по классическому методу внешнего детектора в Аризонском университете (США, г.Тусон, аналитик – Стюарт Томсон), а 12 проб – в ИФЗ РАН (г.Москва) по методике с применением LA-ICP-MS (ГИН СО РАН, г.Улан-Удэ). Построено 24 модели термальной истории для исследованных проб. Для двух проб выполнено U-Pb датирование апатита (Аризонский университет); $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование выполнено для двух проб (ИГМ СО РАН) и Rb-Sr датирование (ГЕОХИ РАН) – для трех проб.

Достоверность полученных результатов определяется значительным объемом фактического материала и сходимостью результатов трекового датирования апатита по принципу «образец-в-образец», полученных автором разными методами – внешнего детектора и с использованием LA-ICP-MS. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в WoS и Scopus.

Личный вклад автора. Автор работы принимал непосредственное участие на всех этапах исследования. Им, под руководством заведующего лабораторией Института ядерных исследований Венгерской академии наук (Венгрия, г.Дебрецен) Роберта Арато, был освоен метод трекового датирования апатита, который впоследствии был реализован автором в Институте физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (г.Москва) в 2021 году. Автором работы также лично выполнялась подготовка проб для трекового датирования, травление, подсчет плотности, длин и диаметров треков, электронно-зондовые исследования, моделирование термальной истории образцов. Интерпретация всех полученных трековых и изотопно-геохронологических данных выполнена лично автором.

Научная новизна. Для Сибирской трапповой провинции впервые получено представительное количество новых определений трекового возраста апатита и впервые выполнено моделирование термальной эволюции Сибирской платформы для последних 250

млн лет. Также для Сибирской платформы получены первые определения трекового возраста апатита с применением LA-ICP-MS по последнему протоколу (Cogne et al., 2020), успешно применённому в ходе выполнения работы в ИФЗ РАН (г.Москва) и в Геологическом институте СО РАН (г.Улан-Удэ).

Теоретическая и практическая значимость определяется получением изотопно-геохронологических данных, которые могут быть использованы при составлении государственной геологической карты нового поколения. Термохронологические данные могут быть востребованы при изучении эволюции осадочных бассейнов в пределах чехла Сибирской платформы с целью определения их нефтегазоносности. Значимость проведенного исследования также заключается в развитии метода трекового датирования в Российской Федерации и формировании межлабораторного сотрудничества как внутри нашей страны, так и с ведущими зарубежными лабораториями трекового датирования.

Защищаемые положения:

1. Интрузивные тела Сибирской пермо-триасовой трапповой провинции после своего образования были погребены под лавовой толщей, минимальная мощность которой составляла на севере Сибирской платформы 5-6 км, а на юге – 1-2 км. В позднем триасе – ранней юре (203-173 млн лет назад) вулканический чехол был частично эродирован, а интрузивные комплексы выведены в приповерхностные условия и затем не подвергались нагревам выше 60°C.

2. Значения трекового возраста апатита из пород поверхности фундамента Сибирской платформы в основании Непско-Ботубинской антеклизы формируют три кластера: поздне триасовый-раннеюрский (230-180 млн лет), позднеюрский-раннемеловой (150-120 млн лет) и палеоценовый (62-59 млн лет). Поздне триасовые-раннеюрские трековые определения близки к таковым для интрузивных тел Сибирской трапповой провинции, отражают региональное воздымание Сибирской платформы и синхронны с закрытием Монголо-Охотского океана.

3. Позднеюрские-раннемеловые (150-120 млн лет) и палеоценовые (62-59 млн лет) определения трекового возраста апатита из пород поверхности фундамента Сибирской платформы в основании Непско-Ботубинской антеклизы отражают этап юрско-мелового охлаждения, связанного с растяжением и воздыманием территории в ходе коллапса Монголо-Охотского орогена, а также раннекайнозойскую тектоническую активность, синхронную началу Байкальского рифтогенеза.

Публикации и апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: «Тектоническое совещание: фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики» (Москва, 2022, 2020), «European Geosciences Union General Assembly (EGU)» (Вена, Австрия, 2022, 2021, 2020), XVIII Всероссийское совещание с международным участием «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту» (Иркутск, 2020), «Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН» (Москва, 2022, 2020), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2020), XXIX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика», посвященная 110-летию член-корр. АН СССР Одинцова М.М. (Иркутск, 2021), VIII Российская конференция по изотопной геохронологии «Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов» (Санкт-Петербург, 2022).

По теме диссертации автором лично и в соавторстве подготовлено 15 публикаций: 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, которые индексируются в Web of Science и Scopus, 11 статей в сборниках и тезисах конференций. Кроме этого, 1 публикация принята в печать в журнале «Геодинамика и тектонофизика» (статья выйдет в 2023 году).

Структура и объем диссертации. Работа общим объемом 140 страниц, состоит из введения, шести глав и заключения, включает 48 иллюстраций и список литературы из 236 наименований.

Благодарности. Хочется выразить огромную благодарность моему научному руководителю – профессору Роману Витальевичу Веселовскому за возможность заниматься интересными научными проблемами и неоценимую поддержку во время выполнения этой работы. Успешному выполнению этой работы способствовала прекрасная научная и творческая обстановка, которая сложилась в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН, за что выражаю благодарность всем ее сотрудникам. Также выражаю благодарность коллективу кафедры динамической геологии МГУ им. М.В. Ломоносова. Отдельную благодарность автор выражает А.М. Фетисовой за ценные советы.

Не могу не сказать слова благодарности моим первым учителям М.В. Шитову и Н.В. Лубниной, которые познакомили меня с миром геологии и геохронологии и вдохновили двигаться в этом направлении.

За совместную плодотворную работу и обсуждение результатов я благодарна своим соавторам: Р.В. Веселовскому, А.В. Латышеву, Р. Арато, С. Томсону, В.Б. Хубанову, М.С. Мышенковой, В.А. Зайцеву, В.С. Захарову, А.Е. Марфину, С.В. Малышеву, Д.С. Юдину, А.В. Гайдуку и всем анонимным рецензентам наших публикаций, позволившим сделать их значительно лучше.

Отдельную благодарность выражаю В.Б. Хубанову за плодотворную совместную работу, в результате которой был реализован метод LA-ICP-MS трекового датирования в ИФЗ РАН (г. Москва) и в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ).

Особую благодарность хочется выразить Р. Арато за знакомство с методом трекового датирования, обучение и консультации на всех этапах работы; М.М. Буслову и А.В. Куликовой за огромную помощь в начале выполнения работы и С.В. Малышеву за возможность познакомиться с системой Autoscan.

Проведенные исследования были бы невозможны без каменного материала, предоставленного А.В. Латышевым, Р.В. Веселовским, В.А. Зайцевым, А.Е. Марфиным и А.В. Гайдуком.

Большое спасибо моей семье за поддержку и создание условий для написания работы. Исследования были выполнены при финансовой поддержке РФФИ № 20-35-90066.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формирование пермо-триасовой трапповой провинции на Сибирской платформе рассматривается как причина крупнейшего за всю историю Земли позднепермского массового вымирания, наиболее вероятно произошедшего вследствие выделения огромного объема парниковых газов в атмосферу и соответствующего повышения средней температуры как на суше, так и в океане как минимум на 10°C (Burgess et al., 2014). Для оценки степени воздействия траппового магматизма на биосферу Земли около 252 млн лет назад, а также для тестирования геодинамических моделей формирования крупнейшей на Земле континентальной магматической провинции одним из ключевых параметров является продолжительность эндогенной активизации в пределах Сибирской платформы и её последующая термальная история (Иванов, 2011; Розен и др., 2009). Большинство исследователей склонны полагать, что формирование всей Сибирской трапповой провинции произошло в ходе единого, мощного и кратковременного (менее 1 млн лет) этапа магматической активности в пределах всей платформы. Однако новые результаты изотопно-геохронологических исследований могут рассматриваться как свидетельства наличия более поздних фаз магматической активности в ходе становления Сибирских траппов. К таким данным относятся определения U-Pb изотопного возраста (а) по бадделеиту и циркону из магматических комплексов Турумакитского района 244-245 млн лет (Sereda et al., 2020), (б) из массива Переломная Тунгусской синеклизы 230 ± 3 млн лет по циркону (Гусев и др., 2019) и (в) из Болгохтохского гранитного массива в Норильском районе 220 млн лет по циркону (Kato et al., 2003). Кроме того, для интрузивного комплекса Сибирских траппов также имеется значительное количество оценок Ar/Ar изотопного возраста, которые образуют бимодальное распределение: первый пик составляют значения ~250 млн лет, второй – более молодые определения со значениями изотопного возраста ~240-245 млн лет (Иванов, 2011; Ivanov et al., 2005; 2013; Reichow et al., 2002; Reichow et al., 2009). Эти данные могут рассматриваться как указание на то, что продолжительность эндогенной активности на Сибирской платформе могла составлять 20-30 млн лет.

Термохронологические исследования, направленные на восстановление тектоно-термальной эволюции геологических объектов самых разных масштабов – от магматических тел до осадочных бассейнов и континентальных платформ, имеют широкое распространение в мире, и наиболее используемым методом подобного рода исследований является трековый анализ апатита и циркона. Так, по результатам трекового анализа циркона из базальтов позднепермской крупной магматической провинции Эмейшань (Китай) удалось оценить термальное воздействие траппов на верхнюю кору: по увеличивающимся вглубь коры значениям трекового возраста авторы установили степень её прогрева вышележащими базальтами и оценили их первичную мощность (Hu et al., 2020). Исследования с использованием трекового анализа апатита в пределах позднеархейско-раннепротерозойского кратона Дарвар (Индия) позволили восстановить термальную историю коры в непосредственной близости с траппами плато Декан: авторам удалось выделить три стадии охлаждения, выполнить их корреляцию с активностью мантийного плюма и связать стадии охлаждения с этапами денудации, что было использовано для реконструкции эволюции ландшафта (Sahu et al., 2013) и оценки площади распространения платобазальтов (Colleps et al., 2021). В работе (Nixon et al., 2022) трековый анализ апатита использован для

моделирования термального воздействия крупной магматической провинции Калкаринджи (Австралия) на нефтематеринские докембрийские породы бассейна МакАртур: разработана модель термальной постседиментационной эволюции осадочного бассейна и получены оценки времени созревания углеводородов под экранирующим тепловым воздействием лавовой толщи.

Для Сибирской платформы, несмотря на относительно большое количество определений изотопного возраста различных объектов в ее пределах, характерен острый дефицит термохронологических данных, в частности результатов трекового анализа. Буквально первые трековые данные по апатиту из кровли фундамента северо-восточной части Сибирской платформы дали возможность предполагать, что её пост-трапповая термальная история не так проста и должна быть надёжно реконструирована: авторами работы (Розен и др., 2009) было показано, что остывание пород фундамента ниже 120°C происходило в диапазоне от 222.6 ± 18.9 до 185.9 ± 12.0 млн лет назад. В этой же статье приводятся первые результаты численного моделирования процесса остывания верхней коры, сделаны количественные оценки её прогрева в ходе формирования пермо-триасовых траппов и показано, что полученные значения трекового возраста апатита отражают тепловую пост-трапповую историю фундамента платформы. Близкие по значениям трековые возрасты апатита получены недавно в ходе всесторонних термохронологических исследований на Таймыре (Khudoley et al., 2018). Таким образом, имеющиеся на данный момент единичные трековые данные, вместе с описанными выше результатами U-Pb и Ar/Ar исследований в пределах Сибирской платформы, могут указывать на сложную тектоно-термальную эволюцию Сибирской трапповой провинции и Сибирской платформы в целом в мезозойское время. Именно поэтому главной задачей данного исследования было получение новых надежных термохронологических данных для построения детальной модели тектоно-термальной эволюции Сибирской платформы.

ГЛАВА 2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе приводятся необходимые общие сведения о геологии Сибирской платформы, а также описание объектов исследования (рис. 1). Первую группу исследованных объектов образуют *интрузивные тела Сибирской пермо-триасовой трапповой провинции*, расположенные, преимущественно, на северо-западе Сибирской платформы в Норильском и Маймеча-Котуйском районах: интрузия Норильск-1, Гулинский плутон, щелочно-ультраосновные массивы Одихинча, Маган и Ессей, а также расслоенная субщелочная Контайская интрузия и Котуйская дайка. Обособленно от перечисленных объектов находится крупный Падунский силл, опробованный неподалеку от г.Вихоревка Иркутской области на юге платформы. Отбор образцов для геохронологических исследований производился как из естественных и искусственных обнажений, так и из керн скважин. В качестве второго объекта исследований выступают *породы кристаллического фундамента Сибирской платформы в основании Непско-Ботубинской антеклизы*, вскрытые семью скважинами на глубине ~2 км. Всего в рамках настоящего исследования получены результаты по 16 пробам из интрузивных тел и 9 пробам из кристаллического фундамента.

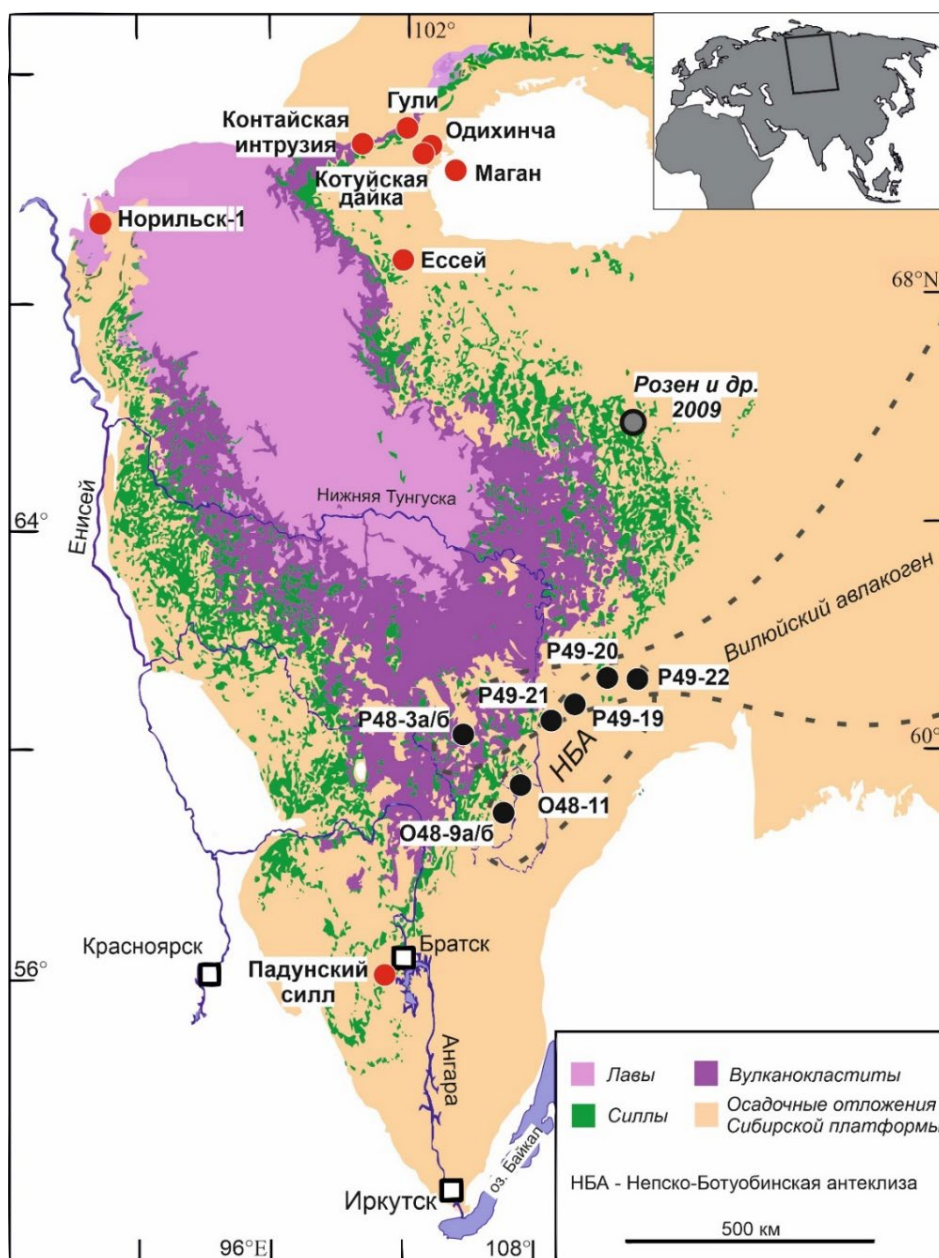


Рис. 1. Геологическая схема Сибирской платформы (Svensen et al., 2009; с изменениями). Кружки обозначают места отбора проб для трекового анализа и названия объектов или номера проб: красные – интрузивные тела Сибирской траптовой провинции, черные – породы кровли кристаллического фундамента Сибирской платформы в районе Непско-Ботуобинской антеклизы, серые – местоположение проб из пород кровли кристаллического фундамента из работы (Розен и др., 2009).

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Трековое датирование апатита

Трековый анализ апатита (Apatite Fission-Track, AFT) является методом низкотемпературной термохронологии и активно используется исследователями в области наук о Земле для решения задач геотектоники и геодинамики, в частности – реконструкции термальной истории осадочных бассейнов, отдельных магматических тел и крупных блоков земной коры, а также для оценки геотермального градиента в прошлом. В отличие от классических методов геохронологии, когда измеренный изотопный возраст чаще всего

отвечает времени прошедшему с момента кристаллизации минерала, методы низкотемпературной термохронологии позволяют оценить, когда исследуемый минерал остыл ниже определённой температуры, значение которой существенно ниже температуры кристаллизации минерала и, в случае методов трекового датирования, варьирует от 120°C для апатита (Ketcham et al., 1999; Gleadow et al., 1981) до 240°C для циркона (Yamada et al., 1995).

Кроме собственно датирования, в низкотемпературной термохронологии широко используется явление частичного отжига треков в минералах, которое лежит в основе моделирования динамики охлаждения исследуемых объектов, т.е. реконструкции их тепловой (термальной) эволюции. Этот подход реализуется благодаря существованию температурного интервала, при нахождении в котором треки укорачиваются – «отжигаются». В методе трекового датирования данный температурный интервал называется зоной частичного отжига (Partial Annealing Zone, PAZ): для апатита он соответствует 60-120°C (Gleadow and Duddy, 1981). Результаты трекового анализа апатита, в общем случае, используются для реконструкции термальной истории геологических объектов в интервале времени не древнее фанерозоя.

Ключевыми этапами трекового анализа как апатита, так и циркона, являются подсчет плотности, длин и диаметров треков спонтанного деления изотопа ^{238}U , а также определение его концентрации. Подсчёт предварительно протравленных в азотной кислоте треков в апатите выполняется с использованием оптического микроскопа и представляет собой хорошо отлаженную рутинную процедуру (Malusa and Fitzgerald, 2019). Однако для измерения концентрации урана в минерале могут быть использованы два подхода: метод внешнего детектора (External Detector Method, EDM), считающийся традиционным, и метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS), применение которого для целей трекового датирования началось около 20 лет назад (Hasebe et al., 2004).

Трековое датирование по классической методике внешнего детектора выполнялось в университете Аризоны (США, Тусон) для 13 проб. Также в ходе выполнения работы была поставлена методика трекового датирования с применением LA-ICP-MS: пробоподготовка, травление, подсчет плотностей треков и их диаметров, а также длин скрытых треков выполнялись в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, а измерение концентрации урана на масс-спектрометре ICP-MS Element XR с установкой лазерной абляции UP-213 в Геологическом институте СО РАН (г.Улан-Удэ). Для построения моделей термальной эволюции по результатам трекового анализа апатита, а также другим геохронологическим определениям, использовалась программа HeFTy версии 1.8.3 (Ketcham, 2005).

3.2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Rb-Sr и U-Pb изотопное датирование

С целью получения дополнительных ограничений при построении моделей тепловой истории исследуемых объектов, кроме результатов трекового анализа также принимались во внимание геохронологические определения по изотопным системам с более высокими температурами закрытия в соответствующих минералах: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование слюды, Rb-Sr (минеральная изохрона) и U-Pb датирование апатита (LA-MC-ICP-MS).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронологические исследования флогопита методом ступенчатого нагрева проводились по стандартной методике (Травин и др., 2009) для интрузивных тел Маган и Одихинча. Rb-Sr возраст был определен для образцов из массивов Одихинча, Ессей и Маган

во ВСЕГЕИ (г.Санкт-Петербург). U-Pb возраст апатита был определен для массива Одихинча и Падунского силла в Аризонском центре LaserChron (Gehrels et al., 2008; Thomson et al., 2012).

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Трековое датирование апатита методом внешнего детектора

Трековое датирование апатита классическим методом внешнего детектора выполнялось для 8 интрузивных тел (13 проб, рис. 2) пермо-триасовой трапповой провинции: щелочно-ультраосновных плутонов Гули, Одихинча, Ессей и Маган, дифференцированных интрузий Норильск-1 и Контайской, а также Падунского силла и Котуйской дайки. 9 наиболее надёжных из 13 полученных оценок трекового возраста апатита находятся в диапазоне от 207 ± 34 до 173 ± 26 млн лет со средним значением 193 ± 38 млн лет (2σ). Определения трекового возраста Гулинского массива и Ессей показали самые большие ошибки определения (от 28 до 51 млн лет, 2σ) из-за низкого содержания урана в апатите (<1 ppm) и малого количества проанализированных зерен соответственно, поэтому эти оценки трекового возраста рассматриваются сугубо предварительные и не используются при дальнейших построениях.

4.2. Трековое датирование апатита с использованием LA-ICP-MS

4.2.1. Интрузивные тела Сибирской трапповой провинции

Определение трекового возраста с использованием метода LA-ICP-MS выполнялось для двух интрузивных тел (рис. 2), расположенных в северной части пермо-триасовой трапповой провинции Сибирской платформы – массива Маган и Контайской интрузии, для которых также был получен трековый возраст методом внешнего детектора. Полученные значения трекового возраста находятся в диапазоне от 150 ± 23 до 239 ± 36 млн лет (2σ). Оценка трекового возраста апатита из образца M037-1440 массива Маган (218 ± 19 млн лет) имеет наименьшую величину погрешности на уровне 2σ , поскольку это единственный образец, для которого трековый возраст был определен по измерениям плотностей треков и концентрации урана для 100 зерен; этот результат рассматривается как наиболее надежный. Погрешность определения трекового возраста для двух других проб достаточно высока в связи с небольшим количеством проанализированных зерен (проба G32-1095) или низким содержанием урана (проба M0931-3918).

Новые трековые возрасты апатита, полученные с применением LA-ICP-MS для массива Маган (218 ± 19 и 239 ± 36 млн лет), с учетом ошибки определения согласуются с результатами трекового датирования методом внешнего детектора (201 ± 19 млн лет) (рис. 2). Важно отметить, что для апатита из пробы M037-1440 (массив Маган) трековое датирование методами EDM и LA-ICP-MS выполнено по принципу «образец-в-образец». Для Контайской интрузии трековый возраст, полученный с использованием метода LA-ICP-MS, с учетом ошибки определения (150 ± 23 млн лет) также находится в генеральном согласии с результатами, полученными методом внешнего детектора (181 ± 14 и 173 ± 13 млн лет).

4.2.2. Породы кровли кристаллического фундамента Сибирской платформы в районе Непско-Ботубинской антеклизы

Монофракция апатита для трекового датирования была выделена из керна пород кристаллического фундамента Сибирской платформы, отобранного с глубин 1800-2600 метров в поисково-разведочных скважинах, пробуренных на углеводородное сырье и

характеризующих северную, западную и центральную части Непско-Ботуобинской антеклизы. Полученные трековые возрасты образуют три кластера: (1) поздний триас – ранняя юра (231-179 млн лет); (2) конец поздней юры – ранний мел (150-121 млн лет); (3) палеоцен (62-59 млн лет) (рис. 2).

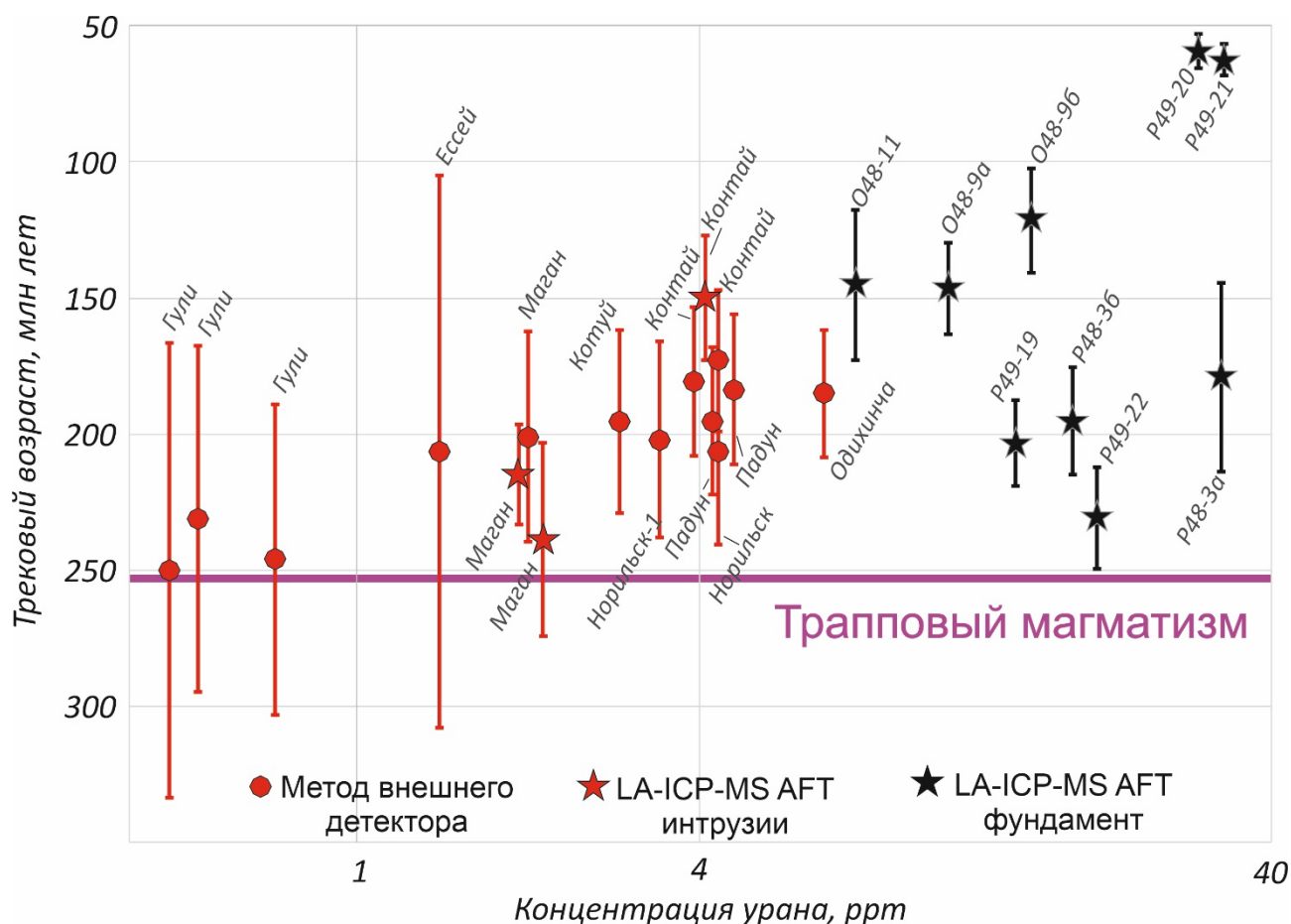


Рис. 2. Распределение трекового возраста апатита из исследованных объектов в зависимости от концентрации урана (концентрация урана дана в логарифмическом масштабе). Красным цветом показаны значения трекового возраста апатита для интрузивных тел Сибирской трапповой провинции, черным цветом – для пород кровли кристаллического фундамента Сибирской платформы в районе Непско-Ботуобинской антеклизы. Кругами показаны трековые возрасты ($\pm 2\sigma$), полученные по методу внешнего детектора, звездой – трековые возрасты ($\pm 2\sigma$), полученные с применением метода LA-ICP-MS.

4.3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Rb-Sr и U-Pb изотопное датирование

U-Pb изотопный возраст интрузивного массива Одихинча и Падунского силла был оценен с помощью LA-MS-ICP-MS метода датирования апатита как 266 ± 29 и 241 ± 12 млн лет (2σ) соответственно. U-Pb возраст апатита для массива Одихинча в пределах ошибки совпадает с опубликованными U-Pb возрастами перовскита 266.0 ± 3.0 и 259.0 ± 6.5 млн лет (Липенков и др., 2015), с возрастом андрадита из щелочных пегматоидов 250 ± 1 млн лет (Сальникова и др., 2019), а также с Rb-Sr определениями, полученными в рамках данной работы и представленными ниже. U-Pb возраст апатита, полученный для Падунского силла (241 ± 12 млн лет), в пределах ошибки согласуется с опубликованными U-Pb возрастами циркона 254.2 ± 2.3 , 251.46 ± 0.05 , 251.68 ± 0.06 млн лет (Paton et al., 2010; Burgess and Bowring, 2015), а также с $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ данными по плагиоклазу – $241.6 \pm 1.3/2.6$ и $239.1 \pm 1.1/2.5$ млн лет

(Ivanov et al., 2009, 2013). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраста по флогопиту для массивов Маган и Одихинча были получены методом ступенчатого нагрева и показали возраст плато 254.7 ± 3.1 и 264.3 ± 3.0 млн лет соответственно.

Массивы Одихинча, Маган и Ессей были также датированы Rb-Sr методом (минеральная изохрона). Минеральные фракции апатита, пироксена и флогопита из апатитового эгиринита массива Маган образуют изохрону 242.8 ± 6.8 млн лет. Изохрона для массива Ессей, полученная по фракциям флогопита, кальцита, апатита и по породе в целом, соответствует возрасту 243.1 ± 2.7 млн лет. Изохрона, построенная для фракций кальцита, флогопита и тяжелых минералов (в основном апатита) из карбонатита массива Одихинча, соответствует возрасту 258.04 ± 0.64 млн лет.

Важно отметить, что полученные в этой работе результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Rb-Sr и U-Pb LA-ICP-MS датирования пород массива Одихинча подтверждают ранее опубликованные значения U-Pb возраста перовскита (Липенков и др., 2015). Интрузии Маган и Ессей датированы впервые, и полученные значения изотопного возраста подтверждают косвенные геологические свидетельства того, что время их внедрения было близко к основной фазе пермо-триасового магматизма на Сибирской платформе.

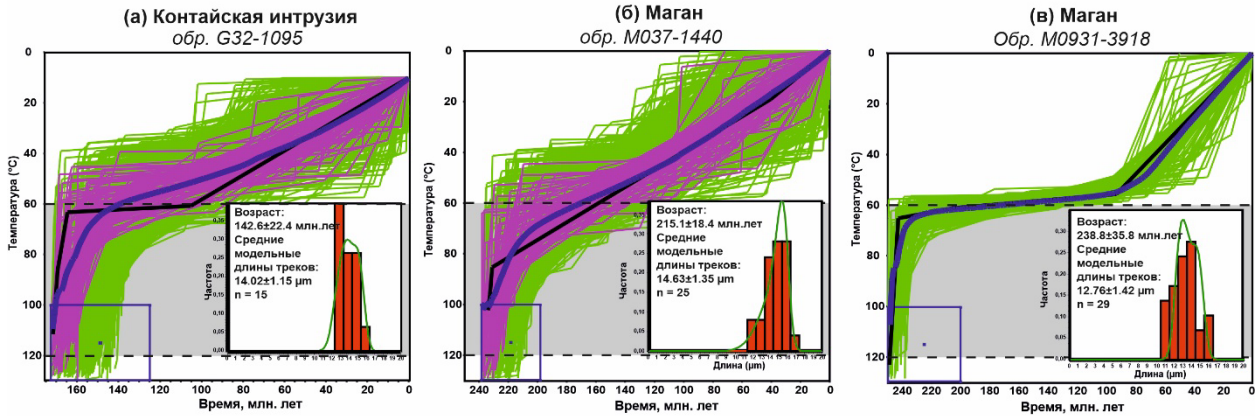
4.4. Моделирование термальной эволюции

4.4.1. Термальные истории интрузивных тел Сибирской трапповой провинции

Температурно-временные (t-T) модели построены для 15 проб из интрузивных тел Сибирской трапповой провинции (рис. 3). Чтобы дополнительно ограничить t-T моделирование, где это возможно, использованы результаты U-Pb датирования апатита и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и Rb-Sr изотопные возрасты изученных интрузивных тел. Распределения длин треков для всех проб из интрузивных тел Сибирской трапповой провинции являются унимодальными и в основном узкими, со средним значением длины треков в диапазоне от 13.6 до 14.5 мкм. Это предполагает относительно быстрое монотонное охлаждение пород без длительного пребывания в пределах зоны частичного отжига треков ($120-60^\circ\text{C}$).

Термальные модели, полученные в результате t-T моделирования, демонстрируют этап быстрого охлаждения в зоне частичного отжига треков до приповерхностных температур в интервале 220-160 млн лет. Сходство t-T моделей для 7 изученных интрузивных тел (Норильск-1, Контайской интрузии, Котуйской дайки, Падунского силла, массивов Одихинча, Маган и Гули) позволяет сделать вывод, что они отражают общую тенденцию региональной термальной истории и не являются результатом локальных термальных событий или геохимических особенностей изученных пород.

Трековый анализ с использованием LA-ICP-MS



Трековый анализ методом внешнего детектора

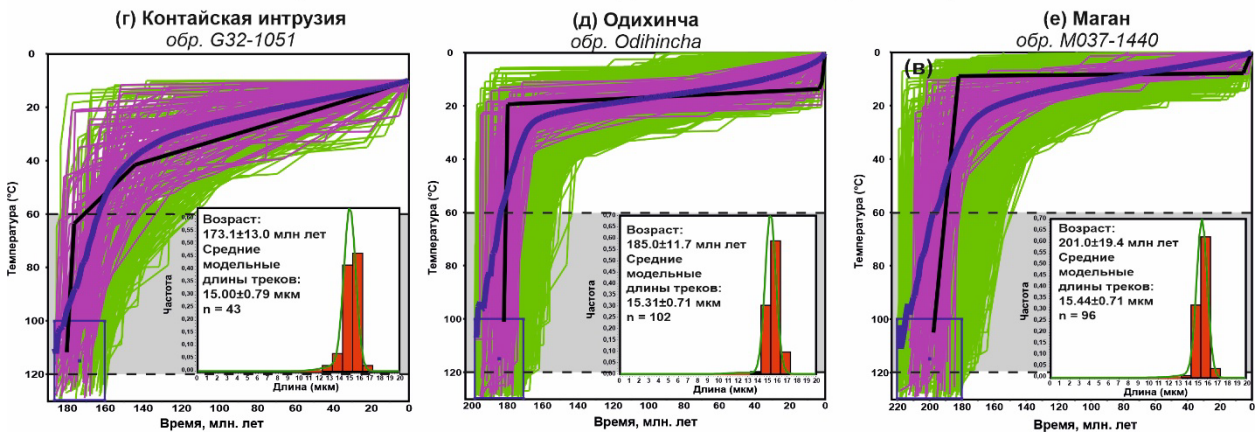


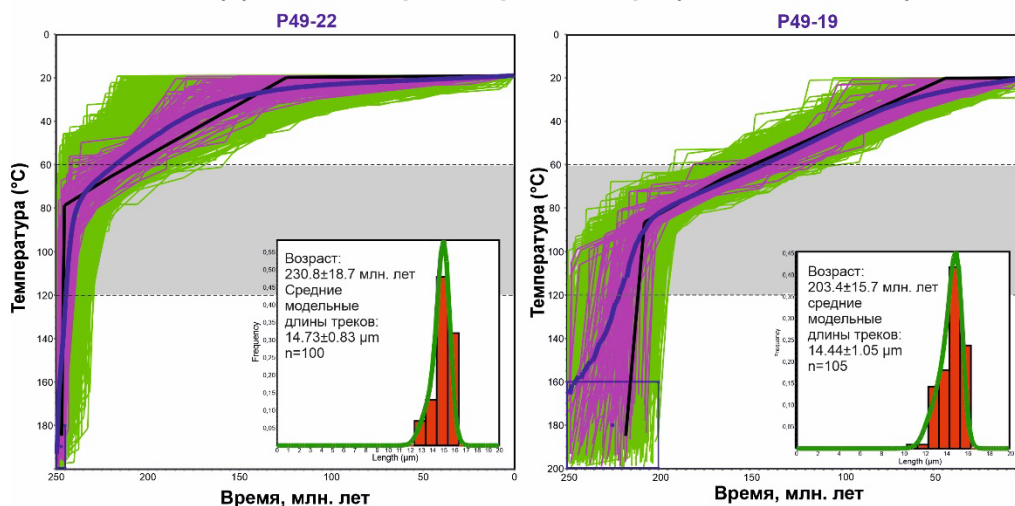
Рис. 3. Типичные результаты моделирования термальной истории апатита по данным трекового анализа проб из массивов Одихинча, Маган и Контайской интрузии. Термальная модель: фиолетовый и зеленый цвет отвечает 95% и 50%-ному доверительному интервалу относительно наилучшей модели соответственно; синяя пунктирная линия – положение термальной модели, наилучшим образом соответствующей распределению длин треков. Серым цветом показана зона частичного отжига треков в апатите (60-120°C).

4.4.2. Термальные истории пород кровли кристаллического фундамента Сибирской платформы в основании Непско-Ботуобинской антеклизы

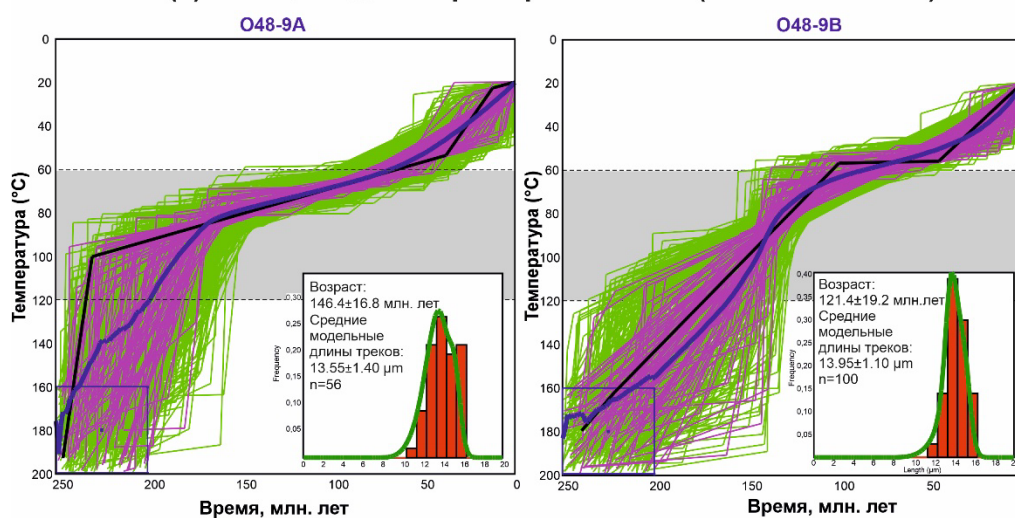
Температурно-временные модели построены для 9 проб кровли кристаллического фундамента Сибирской платформы в районе Непско-Ботуобинской антеклизы. Дополнительные температурно-временные ограничения, например, результаты U-Pb датирования апатита, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и Rb-Sr для пород кровли кристаллического фундамента отсутствуют, поэтому все модели начинаются от нижнего ограничения в 200°C и 250 млн лет.

Распределения длин треков для пород кровли фундамента Сибирской платформы унимодальные со средними значениями длин от 13.2 до 14.6 мкм. Для большинства образцов (пробы O48-9A, O48-9B, O48-11, P49-19, P49-21, P48-3A) это распределение широкое, что предполагает длительное (десятки млн лет) пребывание в зоне частичного отжига треков; для остальных образцов (пробы P49-20, P49-22, P48-3B) распределение длин треков узкое, что означает быстрое охлаждение в пределах зоны частичного отжига треков (рис. 4).

(1) Поздний триас – ранняя юра (231-179 млн лет)



(2) Конец поздней юры – ранний мел (150-121 млн лет)



(3) Палеоцен (62-59 млн лет)

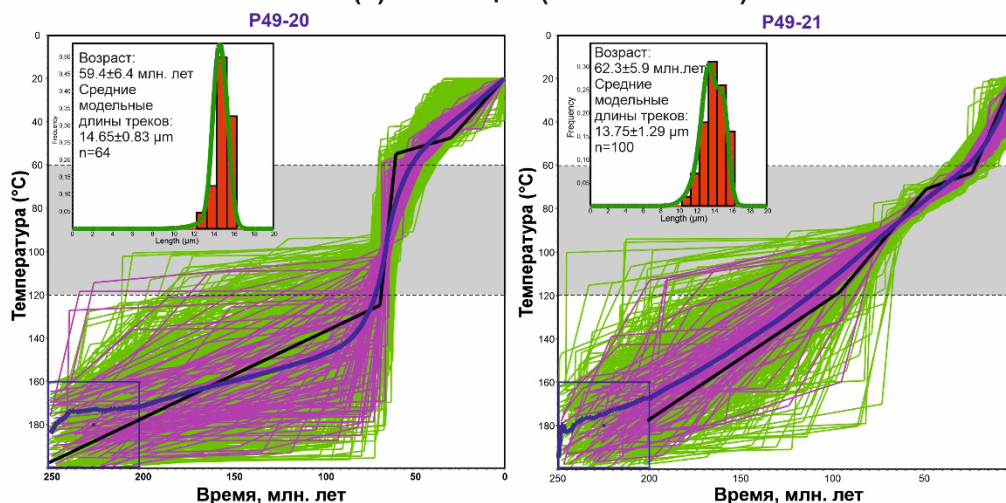


Рис. 4. Типичные результаты моделирования термальной истории апатита по данным трекового анализа для трех кластеров трековых определений: (1) поздний триас – ранняя юра (231-179 млн лет); (2) конец поздней юры – ранний мел (150-121 млн лет); (3) палеоцен (62-59 млн лет) из кровли кристаллического фундамента. Обозначения см. рис. 3.

Термальные модели для кластера поздне триасовых-раннеюрских трековых определений (231-179 млн лет) имеют смешанный характер (рис. 4): здесь присутствуют

модели, отражающие как длительное пребывание в зоне частичного отжига треков (пробы Р48-3А, Р49-19), так и более кратковременное (пробы Р49-22, Р48-3В). Для трековых определений позднеюрского-раннемелового возрастного кластера (150-121 млн лет) все модели (пробы О48-9А, О48-9В, О48-11) показывают длительное пребывание в зоне частичного отжига треков. Термальные модели для кластера палеоценовых трековых возрастов (62-59 млн лет) показывают, как и для первого кластера, смешанный характер (пробы Р49-20, Р49-21).

ГЛАВА 5. ТЕКТОНО-ТЕРМАЛЬНАЯ ИСТОРИЯ ИНТРУЗИВНЫХ ТЕЛ СИБИРСКОЙ ТРАППОВОЙ ПРОВИНЦИИ В МЕЗОЗОЕ И КАЙНОЗОЕ

Полученные в рамках данного исследования определения трекового возраста апатита интрузивных тел Сибирской трапповой провинции согласуются с оценками трекового возраста для пород кровли кристаллического фундамента северо-восточной части платформы, находящимися в интервале 222-185 млн лет (Розен и др., 2009). Для объяснения значимого различия между результатами U-Pb, Rb-Sr, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования и трековыми возрастными апатита изученных интрузивных тел в работе рассматриваются три сценария, предусматривающие:

- (1) длительное постмагматическое остывание интрузивных тел или всей верхней коры после основной фазы пермо-триасового траппового магматизма;
- (2) вторичный прогрев интрузивных тел в результате гипотетического более молодого магматического события;
- (3) вторичный прогрев в результате захоронения изученных интрузивных тел под мощной эффузивной толщей, игравшей теплоизоляционную роль, с последующим охлаждением в результате воздымания в позднем триасе – ранней юре.

5.1. Длительное постмагматическое остывание интрузивных тел или верхней коры Сибирской платформы после основной фазы траппового магматизма

Значительная разница между U-Pb и трековыми возрастными апатита изученных интрузивных тел, составляющая около нескольких десятков миллионов лет, может рассматриваться как результат длительного постмагматического охлаждения за счет термической релаксации интрузивных тел в верхней коре. Процесс постмагматического охлаждения крупной интрузии был рассмотрен на примере Гулинского плутона с использованием компьютерного моделирования. Показано, что охлаждение столь крупного щелочно-ультрамафитового комплекса до температуры вмещающих пород произошло в течение 1-2 млн лет. Продолжительность постмагматического остывания крупного силла, подобного Падунскому силлу, также была оценена в (Veselovskiy et al., 2019), где было показано, что охлаждение таких интрузивных тел до температур вмещающих пород занимает около 10 000 лет. Отсутствие пост-траппового регионального перемагничивания магматических (Veselovskiy et al., 2009) и осадочных (Pavlov et al., 2019) пород в рассматриваемых регионах Сибирской платформы также противоречит гипотезе о длительном и медленном охлаждении.

5.2. Вторичный прогрев в результате более молодого магматического события

Вторичный прогрев изученных интрузивных тел эндогенным событием представляется маловероятным, поскольку никаких следов такого значительного события, достаточного для прогрева всей Сибирской платформы, не известно. Кимберлитовый магматизм, проявившийся в северо-восточной части Сибирской платформы 231-215 и 171-156 млн лет назад (Sun et al., 2014), мог иметь только локальный тепловой эффект. Также в пределах Сибирской платформы известно несколько магматических тел (например, Болгохтохская интрузия), U-Pb возраст которых близок к полученным трековым возрастам, однако масштаб таких магматических событий является локальным и не может быть причиной регионального прогрева верхней коры в позднем триасе и ранней юре.

5.3. Вторичный прогрев в результате захоронения интрузивных тел под вулканическим чехлом в условиях повышенного теплового потока и его последующая эксгумация в поздне триасовое-раннеюрское время

Наиболее вероятный сценарий тектоно-термальной эволюции изученных интрузивных тел предполагает следующее. После своего формирования в приповерхностных условиях около 251 млн лет назад, интрузии были погребены под мощным чехлом эффузивных образований Сибирских траппов, что, в условиях повышенного теплового потока, привело к их вторичному прогреву выше температуры полного отжига треков в апатите (120°C для типичных составов апатита (Reiners et al., 2006)). В течение временного интервала около 203-173 млн лет, соответствующего диапазону полученных трековых возрастов, породы быстро и монотонно охлаждались в интервале температур 120-60°C (зона частичного отжига треков), о чем свидетельствует узкое унимодальное распределение длин треков. Наиболее вероятной тектонической интерпретацией этого этапа охлаждения является эксгумация интрузивных тел в результате регионального поднятия Сибирской платформы в позднем триасе (Никишин и др., 2010; Зинчук, 2013).

Предлагаемые модели тектоно-термальной эволюции изученных интрузивных тел несколько отличаются для Норильского района на севере Сибирской платформы и Ангаро-Тасеевской впадины на юге (рис. 5) и детально рассмотрены ниже.

Норильский район

(а) Формирование интрузии Норильск-1 произошло около 251 млн лет назад в моронговско-мокулаевское время (Latyshev et al., 2020) на глубине не более 2.5 км, что возможно соответствует половине максимальной мощности лавовой толщи Норильского района.

(б) Общая мощность эффузивных траппов после завершения пермо-триасового вулканизма дискуссионна, поскольку значения геотермального градиента для того времени отсутствуют и могут быть косвенно оценены лишь исходя из принципа актуализма. Например, в районе современного внутриплитного магматизма – Восточно-Африканской рифтовой системе, геотермальный градиент достигает 90°C/км (Jones, 2017), а в самой молодой трапповой провинции – Колумбия Ривер, где основная фаза базальтового вулканизма была проявлена 17 млн лет назад (Reidel, 2015; Kasbohn and Schoene, 2018), геотермальный градиент оценивается как 50-60°C/км (Blackwell et al., 1990). При таких значениях геотермального градиента для нагрева пород выше 120°C изученные интрузии должны были погрузиться на глубину порядка 2 км. Заметим, что перекрывающие интрузивные тела вулканические и осадочные породы могут действовать как тепловой экран и приводить к повышенным значениям геотермального градиента (Luszczak et al., 2017; Veselovskiy et al., 2019). Отметим также, что величина

геотермального градиента в пределах Сибирской платформы для временного интервала 245-135 млн лет была оценена с помощью компьютерного моделирования в работе (Розен и др., 2009) как $\sim 18^{\circ}\text{C}/\text{км}$. В этом случае, чтобы нагреться выше температуры полного отжига треков, изученные интрузивные тела должны были быть погребены на глубину порядка 7 км. Учитывая современную мощность пермо-триасовых лав на севере Сибирской платформы (3.5 км), мощность эродированного вулканического чехла может быть оценена в 3 км. Тем не менее, очевидно, что мощность эродированного вулканического чехла сильно зависит от величины геотермального градиента и может быть оценена в интервале от 3 до 1 км. На рис. 5(б) показана максимально возможная мощность лав в районе Норильска в момент завершения траппового магматизма ~ 5 -6 км.

(в) Треки спонтанного деления начали накапливаться в апатите изученных интрузивных тел на севере Сибирской платформы 225-180 млн лет назад, что свидетельствует об охлаждении этих пород до температуры ниже 120°C из-за воздымания и, возможно, уменьшения геотермального градиента. Согласно полученным t-T моделям, породы находились в зоне частичного отжига треков на протяжении около 20 млн лет (средняя скорость охлаждения оценивается в $3^{\circ}\text{C}/\text{млн лет}$), что соответствует довольно большой скорости воздымания 160 м/млн лет (в случае геотермального градиента $18^{\circ}\text{C}/\text{км}$), или более умеренной скорости 50 м/млн лет (при значении геотермального градиента $60^{\circ}\text{C}/\text{км}$).

Ангаро-Тасеевская впадина

Тектоно-термальная история Падунского силла на юге Сибирской платформы несколько отличается от истории интрузивных тел её северных районов. Во-первых, для Ангаро-Тасеевской впадины нет существенных оснований предполагать наличие 250 млн лет назад мощного пермо-триасового вулканического чехла в виду отсутствия его реликтов и малого числа даек, которые могли бы представлять собой питающие каналы к вулканам. Еще одной отличительной особенностью геологического строения Ангаро-Тасеевской впадины по сравнению с северными территориями Сибирских траппов является наличие мощных (до 200-300 м) силлов, которые внедрялись на глубинах ~ 1 -2 км и распространены на большой площади. Согласно результатам палеомагнитных исследований (Latyshev et al., 2018), эти силлы образовались во время масштабных и интенсивных магматических событий. Учитывая эти наблюдения, для Падунского силла предлагается следующая тектоно-термальная модель (рис. 5, е-и): (е) силл внедрился ~ 251 млн лет назад и (ж) был погребен под вулканическим чехлом мощностью не менее 1-2 км. Затем (з) породы силла прошли через зону частичного отжига треков в интервале 210-170 млн лет назад, во время общего воздымания Сибирской платформы вблизи границы триаса и юры. 170 млн лет назад силл остыл ниже 60°C и расшифровка его дальнейшей тектоно-термальной эволюции полностью зависит от значения палеогеотермального градиента, величина которого на данном этапе исследований может быть оценена лишь условно.

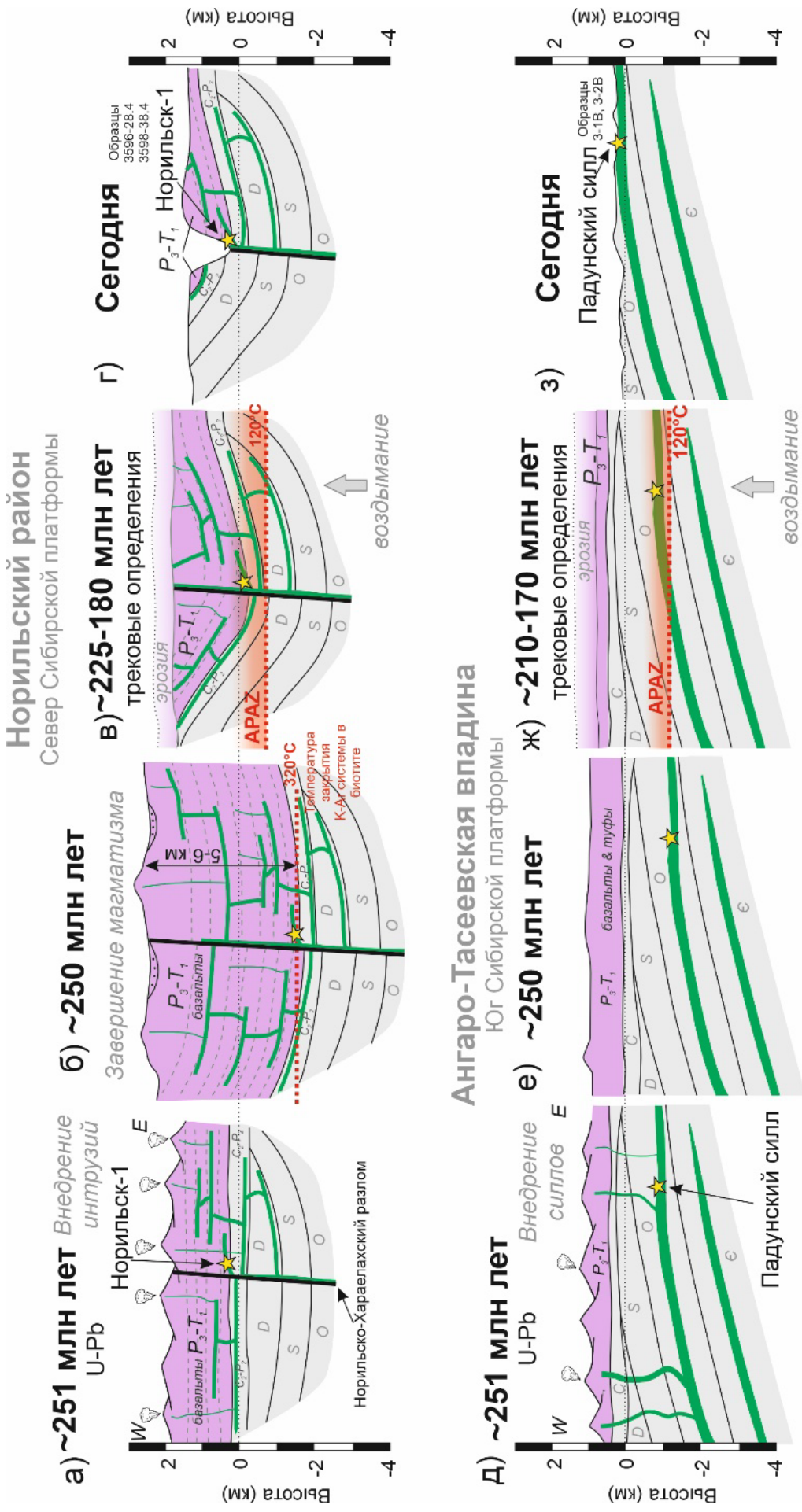


Рис. 5. Модель тектоно-термальной эволюции интрузии Норильск-1 (вверху) и Падунского силла (внизу) за последние 250 млн лет. Желтые звезды – места отбора проб для трекового анализа и изотопного датирования. APAZ – зона частичного отжига треков в апатите.

5.4. Геологические подтверждения предлагаемой тектоно-термальной модели эволюции интрузивных тел Сибирских траппов

Предложенная выше модель постпалеозойской тектоно-термальной эволюции интрузивных тел Сибирской трапповой провинции, базирующаяся на новых трековых данных и определениях изотопного возраста, предполагает, что значительный объем вулканического покрова мог быть эродирован в течение позднего триаса и ранней юры во время интенсивного общего воздымания Сибирской платформы (Никишин и др., 2010; Зинчук, 2013). Именно это послужило причиной эксгумации и охлаждения изученных интрузивных тел. Время упомянутого воздымания платформы коррелирует с результатами t-T моделирования, которые свидетельствуют о быстром охлаждении пород разных интрузивных тел в один и тот же интервал геологического времени. Полученные трековые возрасты апатита также близки к возрасту метаморфизма пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций в районе Норильска 232 млн лет назад (Спиридонов и др., 2000, 2010) и перекрываются с возрастом приповерхностных минеральных преобразований, имевших место 215 млн лет назад в Чадобецком щелочно-ультраосновном комплексе (Прокопьев и др., 2021). Трековые возрасты интрузивных тел Маймеча-Котуйской провинции (Одихинча, Ессей, Маган, Контайская интрузия и Котуйская дайка) совпадают с основной фазой мезозойского горообразования на Таймыре (Afanasenkov et al., 2016; Khudoley et al., 2018).

Термальная модель Падунского силла позволяет предполагать, что последний этап его остывания был связан с региональным поднятием и денудацией около 180-190 млн лет назад, синхронно с закрытием Монголо-Охотского океана (Arzhannikova et al., 2022) и формированием юрских бассейнов на юге Сибирской платформы, таких как Иркутско-Черемховский и Рыбинско-Долгомостовский (Кириченко и др., 2012; Mikheeva et al., 2017).

В ходе размыва лавовой толщи в позднем триасе и ранней юре, обломочный материал с Сибирской платформы мог поступать в Енисей-Хатангский, Лено-Анабарский, Южно-Карский и Западно-Сибирский осадочные бассейны, а также в Иркутский бассейн, где первоначальная мощность юрских отложений должна была составлять около 2 км для формирования углей Иркутского угленосного бассейна (Demonterova et al., 2017). Также возможно, что эрозия вулканического чехла происходила на протяжении всего триаса, что следует из наличия триасовых Sm-Nd изотопных определений осадочных пород в Лено-Анабарском прогибе (Malyshev et al., 2016). В пределах Западно-Сибирского бассейна мощность верхнетриасовых и нижнеюрских отложений очень изменчива. В северной части бассейна средне-верхнетриасовые терригенные комплексы тампейской серии достигают 1 км (Казаков и др., 2002), максимальная мощность нижнетриасовой терригенной толщи составляет 0.8-1.0 км, а среднеюрские отложения тюменской свиты в некоторых районах достигают 0.5 км. В Енисей-Хатангском бассейне ниже- и среднеюрские терригенные отложения достигают мощности 1.5-2.0 км (Решение 6-го Межведомственного стратиграфического совещания..., 2004).

Основной объем эродированного на рубеже триаса и юры чехла Сибирской платформы, вероятно, был представлен вулканическими породами основного состава. Об этом свидетельствуют: (1) многочисленные дайки далдыканского комплекса в Норильском районе, прорывающие весь сохранившийся вулканический разрез; (2) многочисленные щелочно-ультрамафитовые субвулканические дайки, широко распространенные в бассейне р. Котуй; (3) крупный Гулинский плутон, прорывающий близкий ему по возрасту вулканический разрез (Kato et al., 2003) на глубине около 1.5-2.0 км.

ГЛАВА 6. ТЕКТОНО-ТЕРМАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЮЖНОЙ ЧАСТИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (НЕПСКО-БОТУОБИНСКАЯ АНТЕКЛИЗА) В МЕЗОЗОЕ И КАЙНОЗОЕ

Трековые возрасты апатита для пород кровли кристаллического фундамента Сибирской платформы в районе Непско-Ботуобинской антеклизы образуют три кластера: (1) поздний триас – ранняя юра (231-179 млн лет); (2) конец поздней юры – ранний мел (150-121 млн лет); (3) палеоцен (62-59 млн лет), которые могут быть соотнесены во времени со следующими тектоническими событиями на Сибирской платформе и в ее складчатом обрамлении.

Позднетриасово–раннеюрский кластер совпадает с большей частью трековых возрастов апатита, полученных по Сибирской платформе (Розен и др., 2009; эта работа), маркирующих этап воздымания и денудации на всей платформе, который проявился синхронно с деформациями на Таймыре (Khudoley et al., 2018). Примерно в то же время на южной активной окраине Сибирской платформы происходило закрытие Монголо-Охотского океана (Demonterova et al., 2017; Sorokin et al., 2020), причем, судя по отсутствию в соответствующих осадочных комплексах Монголо-Охотского океанического бассейна обломочных цирконов моложе 171 млн лет, закрытие этого бассейна произошло на границе ранней и средней юры (Sorokin et al., 2020). Такое крупное тектоническое событие могло повлиять на термальную эволюцию пород южной окраины Сибирской платформы и отразиться на тепловой истории апатита. Кроме этого, результаты геохронологических исследований цирконов из песчаников Иркутского бассейна показали, что к ааленскому веку средней юры (~175 млн лет) вклад обломочного материала, поступавшего в Иркутский бассейн с Сибирской платформы, уменьшился, а из Забайкалья – увеличился, что является отражением роста горно-складчатого сооружения в Забайкалье (Demonterova et al., 2017).

После закрытия Монголо-Охотского океана эволюция рельефа в Забайкалье определялась стадиями развития Монголо-Охотского орогена. В результате коллапса орогена, в диапазоне 138-111 млн лет назад (Ivanov et al., 2015), на территории Забайкалья формируются комплексы метаморфических ядер (Donskaya et al., 2008) и закладываются разновозрастные им рифтовые бассейны, что маркирует этап раннемелового растяжения (Arzhannikova et al., 2022), охватившего Центральную и Восточную Азию (Wang et al., 2012). В Удинском секторе Западно-Забайкальской рифтовой области выделяется до семи этапов позднемезозойско-кайнозойского (174-51 млн лет) магматизма, один из которых – раннемеловой – характеризуется значительным объемом излившихся лав (Воронцов и др., 2016). Таким образом позднеюрско-раннемеловые трековые возрасты апатита могут являться отражением остывания пород фундамента южной части Сибирской платформы на этапе тектонической активизации, синхронной с коллапсом Монголо-Охотского орогена и масштабным растяжением литосферы, а также внутриплитной магматической активизацией в Забайкалье.

Интерпретация палеоценовых значений трекового возраста апатита на настоящий момент представляется наиболее дискуссионной. Эти определения разновозрастны с таковыми для пород Приморского (Van der Beek et al., 1996) и Баргузинского (Jolivet et al., 2009) хребтов Байкальской рифтовой системы, которые связывают с охлаждением в результате воздымания территории в позднем мелу и палеоцене, соответствующему инициальному этапу Байкальского рифтогенеза (Ivanov et al., 2015). Однако на сегодняшний день время начала

Байкальского рифтогенеза дискуSSIONно (Ivanov et al., 2015; Матц, 2015), поскольку бурением нижняя часть осадочных толщ Байкала не вскрыта. Существует несколько представлений о времени начала формирования Байкальского рифта: (1) *поздне меловой-палеоценовый возраст* (Logachev, 1974, 2003; Mats, 2015; Mats et al., 2001; Jolivet et al., 2009; Mats, Perepelova, 2011); (2) наиболее общепринятый *олигоцен-миоценовый возраст* (Bazarov, 1986; Zonenshain et al., 1995; Kaz'min et al., 1995; Petit et al., 2006; Rasskazov et al., 2014; Mashchuk, Akulov, 2012; и мн. др.); (3) *плиоцен-четвертичный возраст* (Artyushkov, 1993; Nikolaev et al., 1985; Buslov, 2012; и др.). Имеющиеся на сегодняшний день данные глубоководного бурения свидетельствуют о том, что древнейшие бассейны Байкальской рифтовой зоны (Южный Байкал и Тункинский) могут быть заполнены поздне меловыми отложениями (Krivonogov et al., 2017). При этом, формирование бассейна Северного Байкала относится к олигоцену, а периферийных бассейнов – к миоцену. Также имеются определения Ar/Ar и K-Ar возрастов вулканитов бассейна Еравна (Забайкалье), находящиеся в диапазоне 76-50 млн лет (Ivanov et al., 2015; Bagdasaryan et al., 1983), которые могут фиксировать начало рифтогенеза и связанного с ним вулканизма в данном регионе, который также мог вызвать переустановку трековой системы в апатите.

Интерпретация триас-юрских (например, пробы P49-19 и P49-22) и палеоценовых (пробы P49-20 и P49-21) трековых возрастов в образцах керна из соседних близко расположенных скважин представляет отдельную задачу. Такой сценарий может рассматриваться как следствие (а) блокового строения фундамента, что представляется наименее вероятным, (б) высоких концентраций урана в пробах с молодыми возрастaми, (в) низкотемпературных (гидротермальных?) событий на периферии платформы. Решение этого вопроса требует проведения дополнительных термохронологических исследований на юге Сибирской платформы, однако отметим, что подобный контраст значений трекового возраста апатита в пространственно совмещенных пробах известен в практике трековой термохронологии платформенных областей (Veselovskiy et al., 2020; Malusa, Fitzgerald, 2019), где также неоднозначен в плане тектонической интерпретации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН реализована методика трекового датирования апатита с использованием LA-ICP-MS.
2. Получены новые определения трекового возраста апатита из интрузивных тел Сибирской трапповой провинции (щелочно-ультраосновных массивов Гули, Одихинча, Ессей и Маган, дифференцированных интрузий Норильск-1 и Контайской, Падунского силла и Котуйской дайки) и кровли кристаллического фундамента Сибирской платформы в районе Непско-Ботубинской антеклизы.
3. Определения трекового возраста апатита подтверждают относительно сложную термальную эволюцию Сибирской платформы в мезозое (после становления Сибирской трапповой провинции) и свидетельствуют о наличии региональных тектоно-термальных событий в интервале ~250-130 млн лет.
4. Интрузивные тела Сибирской трапповой провинции, после своего образования около 250 млн лет назад, были погребены под вулканическим чехлом, минимальная мощность которого составляла на севере Сибирской платформы 5-6 км, а на юге – 1-2 км. В конце триаса-ранней юре (203-173 млн лет назад) вулканический чехол был эродирован, а

интрузивные комплексы выведены в приповерхностные условия и затем не подвергались нагревам выше 60°C.

5. Значения трекового возраста апатита из пород поверхности фундамента Сибирской платформы в основании Непско-Ботубинской антеклизы формируют три кластера: поздне триасовый-раннеюрский (230-180 млн лет), позднеюрский-раннемеловой (150-120 млн лет) и палеоценовый (62-59 млн лет). Поздне триасовые-раннеюрские трековые определения одновозрастны определениям трекового возраста для интрузивных тел Сибирской трапповой провинции, отражающим региональное воздымание Сибирской платформы, и синхронны с закрытием Монголо-Охотского океана.
6. Позднеюрские-раннемеловые (150-120 млн лет) и палеоценовые (62-59 млн лет) определения трекового возраста апатита из пород поверхности фундамента Сибирской платформы в основании Непско-Ботубинской антеклизы отражают этап юрско-мелового охлаждения, связанного с растяжением и воздыманием территории в ходе коллапса Монголо-Охотского орогена, и раннекайнозойскую тектоническую активность, синхронную началу Байкальского рифтогенеза.

Таблица 1. Результаты трекового датирования апатита и изотопно-геохронологических исследований, полученные, а также использованные в данной работе.

##	Объект	Возраст (млн лет)	Метод, минерал	Ссылка
1	Норильск-1	251.64±0.10	U-Pb, Zrn	Burgess and Bowring, 2015
2		251.907±0.067	U-Pb, Zrn	Burgess and Bowring, 2015
3		251.813±0.065	U-Pb, Zrn	Burgess and Bowring, 2015
4		251.2±0.3	U-Pb, Zrn, Bdy	Kamo et al., 1996
5		257.3±4.5	U-Pb, Ap	Marfin et al., 2020
6		248.9±5.1	U-Pb, Ap	Marfin et al., 2020
7		249.9±1.2	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar, Bt	Renne, 1995
8		249.6±1.0	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar, Bt	Renne, 1995
9		249.2±1.6	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar, Amp	Renne, 1995
10		206.7±17.0	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
11		202.1±18.0	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
12	Ессей	243.1±2.7	Rb-Sr	Bagdasaryan et al., 2022
13		206.5±50.7*	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
14	Маган	242.8±6.8	Rb-Sr	Bagdasaryan et al., 2022
15		254.7±3.1	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar, слюда	Bagdasaryan et al., 2022
16		201.0±19.4	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
17	Котуйская дайка	195.4±16.8	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
18	Одихинча	266.0±3.0	U-Pb, Prv	Липенков и др., 2015
19		259.0±6.5	U-Pb, Prv	Липенков и др., 2015
20		266.1±4.7/28.6	U-Pb, Ap	Bagdasaryan et al., 2022
21		258.04±0.64	Rb-Sr	Bagdasaryan et al., 2022
22		249.8±0.3	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar, Phl	Basu et al., 1995
23		264.3±3.0	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar, слюда	Bagdasaryan et al., 2022
24		185.0±11.7	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
25	Контайская интрузия	248.5±2.6	U-Pb, Zrn	Липенков и др., 2015
26		246.5±2.6	U-Pb, Zrn	Липенков и др., 2015
27		249.9±5.2	U-Pb, Zrn	Липенков и др., 2015
28		180.7±13.6	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
29		173.1±13.0	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
30	Падунский силл	254.2±2.3	U-Pb, Zrn	Paton et al., 2010
31		251.5-251.7	U-Pb, Zrn	Burgess and Bowring, 2015
32		240.9±3.7/11.5	U-Pb, Ap	Bagdasaryan et al., 2022
33		241.6 ±1.3/2.6	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar, Pl	Ivanov et al., 2009
34		239.1 ±1.1/2.5	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar, Pl	Ivanov et al., 2013
35		195.2±13.6	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
36		183.8±13.8	AFT	Bagdasaryan et al., 2022
37	Фундамент СВ Сибирской платформы	218.4±16.8	AFT	Розен и др., 2009
38		185.9±11.7	AFT	Розен и др., 2009
39		221.0±15.7	AFT	Розен и др., 2009
40		222.6±16.6	AFT	Розен и др., 2009
41	Фундамент южной части Сибирской платформы в основании Непско-Ботуобинской антеклизы	179.3±34.8	AFT	Багдасарян и др., 2023
42		195.2±19.6	AFT	Багдасарян и др., 2023
43		203.4±15.7	AFT	Багдасарян и др., 2023
44		59.4±6.4	AFT	Багдасарян и др., 2023
45		62.3±5.9	AFT	Багдасарян и др., 2023
46		230.8±18.7	AFT	Багдасарян и др., 2023
47		146.4±16.8	AFT	Багдасарян и др., 2023
48		121.4±19.2	AFT	Багдасарян и др., 2023
49		145.2±27.6	AFT	Багдасарян и др., 2023
50	Гулинский плутон	250.1±41.8	AFT	Myshenkova et al., 2020
51		231.2±31.8	AFT	Myshenkova et al., 2020
52		246.1±28.5	AFT	Myshenkova et al., 2020

*AFT – трековый возраст апатита

III. СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.1 -
Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика

1. **Багдасарян Т.Э., Гайдук А.В., Хубанов В.Б., Латышев А.В., Веселовский Р.В.** Первые результаты трекового датирования апатита с применением LA-ICP-MS из кровли фундамента Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская антеклиза) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 2. С. 39–43. RSCI (0.2 п.л., личный вклад – 80%, импакт-фактор РИНЦ 0,884)
2. **Bagdasaryan T.E., Thomson S.N., Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Zaitsev V.A., Marfin A.E., Zakharov V.S., Yudin D.S.** Thermal history of the Siberian Traps Large Igneous Province revealed by new thermochronology data from intrusions // Tectonophysics. 2022. V. 836. 229385. Scopus (1 п.л., личный вклад – 75%, импакт-фактор SJR 1,545)
3. **Veselovskiy R.V., Arató R., Bagdasaryan T.E., Samsonov A.V., Stepanova A.V., Arzamastsev A.A. Myshenkova M.S.** New Apatite Fission-Track Data from the Murmansk Craton, NE Fennoscandia: An Echo of Hidden Thermotectonic Events // Minerals. 2020. V. 10: 1095. Scopus (0.8 п.л., личный вклад – 50%, импакт-фактор SJR 0,522)
4. **Мышенкова М.С., Зайцев В.А., Томсон С., Латышев А.В., Захаров В.С., Багдасарян Т.Э., Веселовский Р.В.** Термальная история Гулинского плутона (север Сибирской платформы) по результатам трекового датирования апатита и компьютерного моделирования // Геодинамика и тектонофизика. 2020. 11(1):75-87. Scopus (0.6 п.л., личный вклад – 50%, импакт-фактор SJR 0,359)

Тезисы и материалы конференций

1. **Багдасарян Т.Э., Хубанов В.Б., Веселовский Р.В.** Результаты LA-ICP-MS трекового датирования апатита из интрузивных тел Сибирской трапповой провинции // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов. Москва, ИФЗ РАН, 9-11 ноября 2022, С.13
2. **Багдасарян Т.Э., Веселовский Р.В., Латышев А.В., Томсон С., Зайцев В.А., Марфин А.Е.** Термальная эволюция Сибирской трапповой провинции по новым результатам трекового анализа апатита из интрузивных комплексов // Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов. Материалы VIII Российской конференции по изотопной геохронологии (Санкт-Петербург, 7–10 июня 2022 г), Картфабрика ВСЕГЕИ СПб, 2022, С.22-23
3. **Багдасарян Т.Э., Веселовский Р.В., Латышев А.В., Томсон С., Зайцев В.А., Марфин А.Е.** Термальная эволюция Сибирской трапповой провинции по результатам трекового анализа апатита из интрузивных комплексов // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022. Материалы LIII Тектонического совещания, Москва, 2022, С.33-36
4. **Багдасарян Т.Э., Веселовский Р.В., Латышев А.В., Зайцев В.А., Томсон С.** Результаты термохронологических исследований интрузивных комплексов Сибирской пермо-

- триасовой трапповой провинции // Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции Иркутск, 11–16 мая 2021 г, ИЗК СО РАН Иркутск, 2021, С. 15-16
5. **Багдасарян Т.Э.**, Веселовский Р.В., Зайцев В.А., Томсон С., Латышев А.В. Результаты трекового анализа пермо-триасовых интрузий Сибирской трапповой провинции // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 28-29 октября 2020 г. Тезисы докладов и программа конференции, Москва, 2020, С.13
 6. **Багдасарян Т.Э.**, Веселовский Р.В., Зайцев В.А., Томсон С., Латышев А.В. Термохронология пермско-триасовых интрузий Сибирской платформы по результатам трекового анализа апатита // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания, Иркутск, 2020, С. 28-29
 7. **Багдасарян Т.Э.**, Веселовский Р.В., Мышенкова М.С., Зайцев В.А., Томсон С., Латышев А.В., Захаров В.С. Модели термальной эволюция Гулинского интрузивного массива (север Сибирской платформы) по результатам трекового датирования апатита и компьютерного моделирования // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Том I. Материалы LII Тектонического совещания, Москва, 2020, С.53-55
 8. **Bagdasaryan T.E.**, Latyshev A.V., Thomson S.N., Veselovskiy R.V. New insights from low-temperature thermochronology into the tectonic-thermal evolution of the Siberian Traps Large Igneous Province // EGU General Assembly 2022, Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union, Germany, 2022, P.10416
 9. **Bagdasaryan T.E.**, Veselovskiy R.V., Latyshev A.V., Thomson S.N., Zaitsev V.A., Marfin A.E. Thermal evolution of the Siberian Traps Large Igneous Province based on results of apatite fission-track analysis and other geochronological data from intrusive complexes // X International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference (13-17 June 2022, Novosibirsk, Russia), Novosibirsk, 2022, P. 99-100
 10. **Bagdasaryan T.E.**, Veselovskiy R.V., Zaitsev V.A., Latyshev A.V. Thermal history of the Siberian platform: Apatite Fission-Track data from the Permian-Triassic magmatic complexes // EGU General Assembly 2021, Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union, Germany, 2021, P.9702
 11. **Bagdasaryan T.E.**, Veselovskiy R.V., Myshenkova M.S., Zaitsev V.A., Thomson S., Latyshev A.V., Zakharov V.S. New apatite fission track thermochronology data from the Siberian Permian-Triassic Traps // EGU General Assembly 2020, Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union, Germany, 2020