



## LA-ICP-MS APATITE FISSION-TRACK DATING OF THE SIBERIAN TRAPS INTRUSIONS: METHOD, FIRST RESULTS AND THEIR INTERPRETATION

T.E. Bagdasaryan <sup>1,2</sup>, V.B. Khubanov <sup>3</sup>, R.V. Veselovskiy <sup>1,2</sup>✉, V.A. Zaitsev <sup>4</sup>, S.V. Malyshev <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

<sup>3</sup> Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

<sup>4</sup> Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, 19 Kosygin St, Moscow 119991, Russia

<sup>5</sup> Saint Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb, Saint Petersburg 199034, Russia

**ABSTRACT.** In this paper we present the results on apatite fission-track dating, which was first performed at the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, using the laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS, Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences) for two intrusions of the Siberian Permian-Triassic large igneous province: Magan alkaline-ultramafic pluton (two samples) and Kontay intrusion (one sample). The obtained AFT ages are  $217.6 \pm 18.6$  and  $238.8 \pm 35.8$  Ma (95% confidence) for the Magan intrusion and  $150.0 \pm 23.0$  Ma for the Kontay intrusion and mark the time since they have been cooled below 120 °C. The distributions of track lengths in apatite grains from the studied samples indicate their rapid cooling to near-surface temperatures. We provide a detailed description of the method used, and also demonstrate that the results of fission-track analysis performed on the "sample-to-sample" principle by the classical external detector method (EDM) and the LA-ICP-MS method in the modification of the zeta calibration coincide within the age uncertainty.

**KEYWORDS:** apatite fission-track analysis; apatite fission-track dating; apatite; LA-ICP-MS; thermochronology; geochronology; Siberian traps

**FUNDING:** The study was conducted with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant 20-35-90066, and part of the state assignment of the IPE RAS. The work was carried out within the framework of fundamental research at the GIN SB RAS (basic project no. state. reg. AAAA-A21-121011390002-2).



### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Roman V. Veselovskiy, [roman.veselovskiy@ya.ru](mailto:roman.veselovskiy@ya.ru)

Received: February 20, 2023

Revised: April 7, 2023

Accepted: April 11, 2023

**FOR CITATION:** Bagdasaryan T.E., Khubanov V.B., Veselovskiy R.V., Zaitsev V.A., Malyshev S.V., 2023. LA-ICP-MS Apatite Fission-Track Dating of the Siberian Traps Intrusions: Method, First Results and Their Interpretation. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (4), 0711. doi:10.5800/GT-2023-14-4-0711

## LA-ICP-MS ТРЕКОВОЕ ДАТИРОВАНИЕ АПАТИТА ИЗ ИНТРУЗИВНЫХ ТЕЛ СИБИРСКОЙ ТРАППОВОЙ ПРОВИНЦИИ: МЕТОД, ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Т.Э. Багдасарян<sup>1,2</sup>, В.Б. Хубанов<sup>3</sup>, Р.В. Веселовский<sup>1,2</sup>, В.А. Зайцев<sup>4</sup>, С.В. Малышев<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

<sup>4</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, наб. Университетская, 7-9, Россия

**АННОТАЦИЯ.** В статье представлены результаты трекового анализа апатита, впервые выполненного в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН с использованием метода масс-спектропии с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения РАН) для двух интрузивных тел Сибирской пермско-триасовой трапповой провинции: щелочно-ультраосновного плутона Маган (две пробы) и Контайской интрузии (одна проба). Полученный трековый возраст составляет  $217.6 \pm 18.6$  и  $238.8 \pm 35.8$  млн лет – для интрузии Маган и  $150.0 \pm 23.0$  млн лет ( $2\sigma$ ) для Контайской интрузии и маркирует время, прошедшее с момента их остывания ниже  $120^\circ\text{C}$ . Распределение длин треков в зернах апатита из исследованных образцов свидетельствует об их быстром остывании до приповерхностных температур. Приводится подробное описание используемой методики, а также показано, что результаты трекового анализа, выполненного по принципу «образец-в-образец» классическим методом внешнего детектора и методом LA-ICP-MS в модификации зета-калибровки, совпадают в пределах погрешности метода.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трековый анализ; трековое датирование; апатит; LA-ICP-MS; термохронология; геохронология; Сибирские траппы

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант №20-35-90066, а также в рамках государственного задания ИФЗ РАН. Работа выполнена в рамках фундаментальных исследований ИФЗ РАН и ГИН СО РАН (базовый проект № гос. рег. АААА-А21-121011390002-2).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Трековый анализ апатита (apatite fission-track, AFT) и циркона (zircon fission-track, ZFT) 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 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 определенной температуры, значение которой существенно ниже температуры кристаллизации минерала и, в случае методов трекового датирования, варьируется от  $120^\circ\text{C}$  для апатита [Ketcham et al., 1999; Gleadow, Duddy, 1981] до  $\sim 240^\circ\text{C}$  – 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 датирования по трекам осколков деления данный температурный интервал называется зоной частичного отжига (partial annealing zone, PAZ): для апатита он соответствует  $60\text{--}120^\circ\text{C}$  [Gleadow, Duddy, 1981], а для циркона –  $170\text{--}320^\circ\text{C}$  [Yamada et al., 1995]. Результаты трекового анализа апатита в общем случае используются для реконструкции термальной истории геологических объектов в интервале времени не древнее фанерозоя. Трековое датирование циркона позволяет реконструировать тепловую историю на более широком интервале геологического времени, однако его применимость сильно зависит от концентрации урана, при высоких содержаниях которого большое число треков на единицу площади не позволяет уверенно выполнять подсчет их количества [Wagner, 1978].

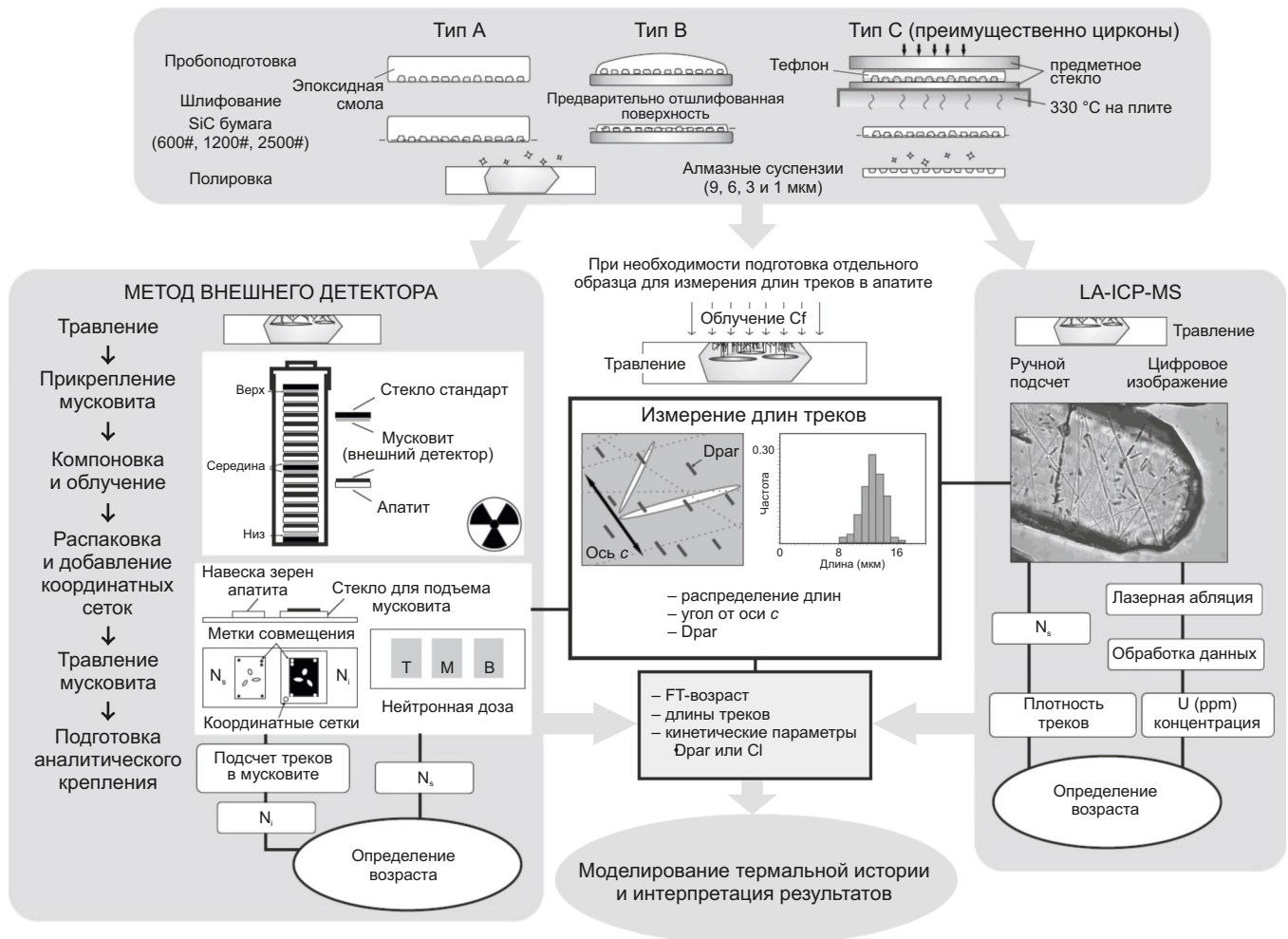
Ключевыми этапами трекового анализа апатита являются подсчет плотности, длины и диаметров треков

спонтанного деления изотопа  $^{238}\text{U}$ , а также определение его концентрации. Подсчет предварительно протравленных в кислоте (апатит) или щелочи (циркон) треков выполняется с использованием оптического микроскопа и представляет собой хорошо отлаженную рутинную процедуру [Malusà, Fitzgerald, 2019]. 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].

В мировой практике трекового датирования применение метода LA-ICP-MS для измерения концентрации  $^{238}\text{U}$  все чаще рассматривается как альтернатива традиционному методу EDM, поскольку избавляет исследователя от целого ряда трудоемких операций, в

том числе облучения образца тепловыми нейтронами в ядерном реакторе (рис. 1). Локальность такого подхода обеспечивается использованием для ионизации вещества образца приставки лазерной абляции с диаметром лазерного пучка 20–30 мкм. Впервые измерение концентрации изотопов урана по методике LA-ICP-MS для трекового датирования апатита описано в работе [Hasebe et al., 2004], а несколько позже применимость этой методики была убедительно показана в работах [Donelick et al., 2005; Hasebe et al., 2009, 2013; Chew, Donelick, 2012]. В настоящее время число исследований с использованием трекового датирования апатита по методике LA-ICP-MS неуклонно растет, чему способствует все большая доступность магнитных секторных и, особенно, квадрупольных масс-спектрометров с индуктивно связанной плазмой и приставкой лазерной абляции.

Основными преимуществами использования LA-ICP-MS в трековом анализе являются скорость измерения



**Рис. 1.** Блок-диаграмма, иллюстрирующая два альтернативных метода трекового анализа с использованием EDM и протокола LA-ICP-MS [Malusà, Fitzgerald, 2019].  $N_s$  – треки спонтанного деления, подсчитанные в зернах;  $N_i$  – треки индуцированного деления, подсчитанные на детекторе слюды.

**Fig. 1.** Block diagram illustrating two alternative approaches of AFT dating: external detector method (EDM) and LA-ICP-MS protocol [Malusà, Fitzgerald, 2019].  $N_s$  – tracks of spontaneous fission calculated in grains;  $N_i$  – induced fission tracks counted on a mica detector.

и, соответственно, получения результатов, а также непосредственное определение концентрации урана, а также измерение концентрации редких и рассеянных элементов. Кроме этого, применение LA-ICP-MS позволяет исключить работу с облученными материалами. В то же время данная методика обладает и определенными недостатками. Например, измерение концентрации урана необходимо производить в пределах той же области, в которой происходит подсчет треков спонтанного деления, что, учитывая локальность лазерного пробоотбора, требует применения методики картирования [Ansberque et al., 2021]. Кроме того, большие погрешности определения при низких концентрациях урана также накладывают некоторые ограничения на использование данной методики. Также метод LA-ICP-MS является разрушающим: тепловое воздействие лазера на анализируемую область зерна делает невозможным выполнение повторного подсчета треков непосредственно в этой же области.

Трековый анализ апатита и в меньшей степени циркона приобретает все большую популярность среди отечественных исследователей, и, несмотря на стабильно увеличивающееся количество лабораторий трекового анализа за рубежом, в России до недавнего времени существовало всего три лаборатории, в которых проводился или проводится трековый анализ: в ГИН РАН (г. Москва), в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и в СПбГУ (г. Санкт-Петербург). Большая загруженность перечисленных лабораторий заставляет многих отечественных исследователей выполнять трековый анализ в лабораториях Европы и/или США, поэтому очевидно, что развитие этого метода является весьма актуальным научным направлением в нашей стране.

В 2021 г. в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН была освоена современная методика трекового датирования апатита с определением концентрации урана в образцах при помощи LA-ICP-MS. В этой работе представлены первые результаты использования этой методики для трекового датирования апатита из интрузивных тел Сибирской трапповой провинции, а также выполнено их сравнение с ранее опубликованными результатами по этим же интрузивным телам, которые получены путем определения концентрации урана методом внешнего детектора.

## 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение трекового возраста апатита методом LA-ICP-MS выполнялось для трех проб из двух интрузивных тел, расположенных в северной части пермско-триасовой трапповой провинции Сибирской платформы, – массива Маган и Контайской интрузии, для которых ранее [Bagdasaryan et al., 2022] был получен трековый возраст апатита методом внешнего детектора.

Массив Маган (70°14' с.ш., 104°28' в.д.) расположен в пределах Маймеча-Котуйской провинции на северо-западе Сибирской платформы. Массив представлен

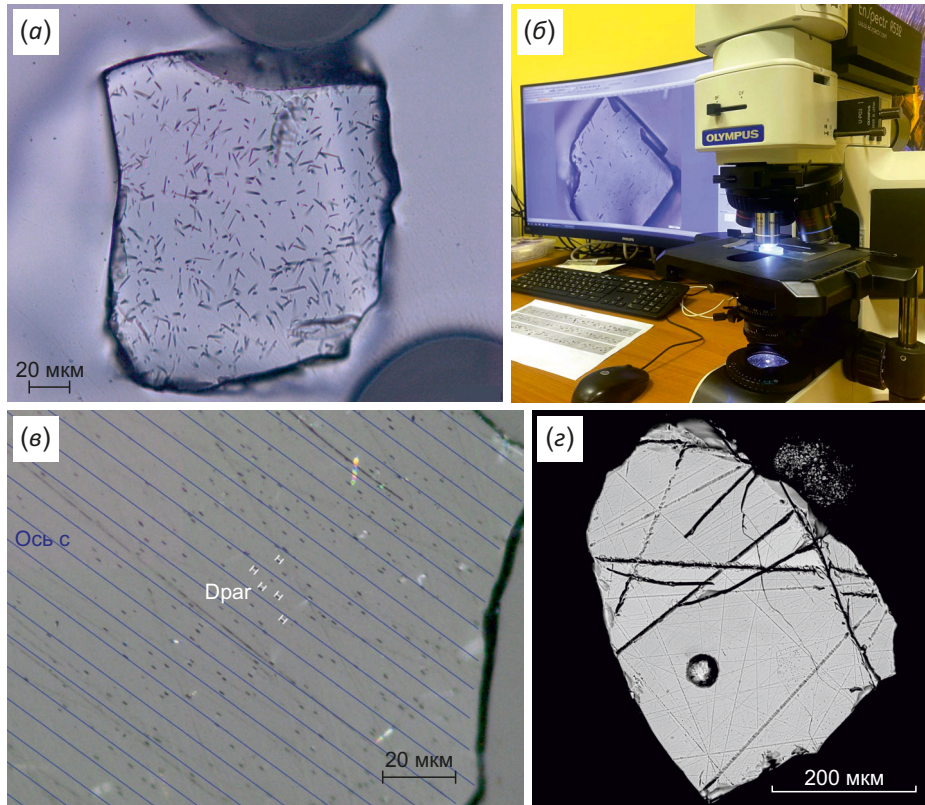
разновидностями щелочно-ультраосновных пород, доломит-кальцитовыми и доломитовыми карбонатами [Egorov, 1991] и является плутоном центрального типа, обнажающимся в ядре куполовидной антиклинальной складки, на контакте с которым на поверхность выходят красноцветные терригенные породы рифея [State Geological Map..., 2015].  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возраст массива (по флогопиту) составляет  $254.7 \pm 3.1$ , а Rb-Sr –  $242.8 \pm 6.8$  млн лет [Bagdasaryan et al., 2022]. Апатит для трекового датирования (пробы M037-1440 и M0931-3918) был выделен из апатит-пироксеновой породы и кальцитового карбоната с пироксеном соответственно.

Дифференцированная Контайская интрузия (70°49' с.ш., 100°09' в.д.), вскрытая между Маймеча-Котуйским и Норильским районами в скважине на глубине 214.5–1252.8 м, сложена породами от умеренно щелочных долеритов, габбро-норитов и монцогаббро в нижней части до диоритов и монцодиоритов – в кровле. Она прорывает нижнетриасовую вулканогенную толщу и перекрыта терригенными породами сиговской свиты позднеюрского возраста. Оценки U-Pb возраста интрузии по циркону (SHRIMP-II) составляют  $248.5 \pm 2.6$ ,  $246.5 \pm 2.6$  и  $249.9 \pm 5.2$  млн лет [State Geological Map..., 2018]. Апатит для трекового датирования (проба G32-1095) был выделен из биотитового габбро с глубины 1095 м, что соответствует средней зоне интрузии [Zaitsev et al., 2018].

## 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выделение апатита из исследуемых пород проводилось в ГЕОХИ РАН (г. Москва). Работы по изготовлению оксидных шайб, их шлифовке и полировке выполнялись в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск). Подсчет плотности, диаметров треков и длины скрытых треков выполнялся в Центре коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ЦКП ИФЗ) РАН (г. Москва) [Veselovskiy et al., 2022] вручную на микроскопе Olympus BX53M, оборудованном цифровой камерой высокого разрешения и прецизионным ручным XY-столиком, под объективом 100x и при общем увеличении 1000x (рис. 2), а также в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследований» СПбГУ (г. Санкт-Петербург) на автоматизированном комплексе для трекового анализа Autoscan Systems (Австралия). Концентрации F и Cl в апатите, определяющие кинетические параметры отжига треков [Carlson et al., 1999], оценивались в ЦКП ИФЗ РАН с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA LMS с ЭДС-детектором. Измерение концентрации урана выполнялось в ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ) на масс-спектрометре высокого разрешения ICP-MS Element XR с установкой лазерной абляции UP-213 New Wave по протоколу [Cogné et al., 2020].

Методика подсчета концентрации урана в апатите методом внешнего детектора (EDM) описана в ряде



**Рис. 2.** Иллюстрация метода трекового анализа апатита.

(а) – треки в кристалле апатита в оптическом микроскопе в проходящем свете; (б) – микроскоп Olympus BX53M, используемый для трекового датирования; (в) – диаметры треков (Dpar) в оптическом микроскопе в отраженном свете, расположенные параллельно оси с; (г) – изображение кратера от LA-ICP-MS в апатите в обратно рассеянных электронах (BSE).

**Fig. 2.** Illustration of the AFT analysis method.

(а) – tracks in apatite crystal in optical microscope in transmitted light; (б) – Olympus BX53M microscope used for AFT dating; (в) – track diameters (Dpar) in an optical microscope in reflected light, located parallel to the c-axis; (г) – backscattered electrons (BSE) image of LA-ICP-MS crater in analyzed apatite grain.

работ (например [Solovyov, 2008]), а сравнение алгоритмов трекового анализа апатита методом внешнего детектора и с использованием лазерной абляции (LA-ICP-MS) приведено в работе [Malusà, Fitzgerald, 2019] и представлено на рис. 1.

**Подготовка к анализу и настройка оборудования для трекового датирования апатита по протоколу LA-ICP-MS.** Подготовка проб при обеих процедурах совпадает: зерна апатита выкладываются на стекло (если зерна идиоморфны, то желательно выкладывать их по удлинению параллельно оси с), заливаются в эпоксидную смолу, а затем шлифуются на шлифовальной бумаге с абразивностью 2500 с последующей полировкой алмазными суспензиями с размерностью 9, 6, 3 и 1 мкм. Следующим этапом является травление зерен апатита в азотной кислоте (5.5M HNO<sub>3</sub>) в течение 20 с при температуре 20 °С для проявления треков спонтанного деления. Согласно современным требованиям, для получения надежного результата трекового датирования по методу EDM необходимо выполнить подсчет треков в 20 зернах [Malusà, Fitzgerald, 2019], а при использовании метода LA-ICP-MS – 80–100 анализов стандарта апатита Durango для

зета-калибровки и повторный анализ стандарта через каждые 20 неизвестных зерен [Cogné et al., 2020]. Для построения гистограммы распределения длины треков, с указанием среднего значения и стандартного отклонения от среднего, обычно измеряется не более 100 длин треков [Gallagher et al., 1998]. Важно отметить, что наличие измерений 40 длин треков считается необходимым минимумом и дальнейшее увеличение выборки влияет незначительно на распределение длины треков [Rahn, Seward, 2000].

При оценке концентрации <sup>238</sup>U методом LA-ICP-MS подсчет треков ведется строго в пределах той области, в которой будет измерена концентрация урана. Чаще всего для лазерной абляции диаметр пучка устанавливается равным 20–30 мкм [Malusà, Fitzgerald, 2019], однако этот параметр может меняться в зависимости от состояния приставки лазерной абляции и особенностей образца. Размер пучка излучения лазера был выбран авторами равным 40 мкм для получения достаточной интенсивности сигнала <sup>238</sup>U и <sup>43</sup>Ca.

Используемые в настоящем исследовании параметры настроек масс-спектрометра и лазерной приставки приведены в табл. 1, а алгоритм настройки магнитного

секторного масс-спектрометра для трекового датирования апатита с использованием LA-ICP-MS приведен в Прил. 1. Настройка проводилась перед каждым сеансом с помощью измерения масс  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в стекле NIST-610 в режиме Tune. Основными критериями при настройке параметров анализа являлись отношения  $\text{Th}/\text{U}$  и  $\text{ThO}/\text{Th}$ , согласно протоколу [Cogné et al., 2020]. Для того, чтобы свести к минимуму фракционирование, параметры считались оптимальными, если отношение  $\text{Th}/\text{U}$  в стекле было близко к единице ( $\text{Th}/\text{U} \approx 1$ ), что близко к атомным соотношениям. Низкие скорости образования оксида регулировались отношением  $\text{ThO}/\text{Th} < 0.15\%$  [Cogné et al., 2020]. При этом диапазон

беспрерывного E-scan сканирования масс был настроен на 30 % от значения наименьшей атомной массы, на которой стабилизировалась позиция магнита.

Внешним стандартом служило эталонное стекло NIST-610, в качестве внутреннего стандарта использовалось содержание кальция ( $\text{CaO}$  11.45 мас. % в NIST-610 и 54 мас. % в апатите). Первичная обработка данных масс-спектрометрического анализа проводилась с помощью программы Glitter [Griffin et al., 2008], которая производит фильтрацию и выделение оптимального сигнала, вычитание фона, коррекцию на инструментальный дрейф, дискриминацию и фракционирование изотопов (масс).

**Таблица 1.** Параметры настроек оборудования LA-ICP-MS для трекового датирования апатита

**Table 1.** LA-ICP-MS configuration for AFT dating

Лазерная абляция	
Тип лазера	Nd-YAG
Производитель / модель	New Wave Research / UP-213
Длина волны излучения	213 нм
Размер пучка излучения	40 мкм
Частота импульсов	10 Гц
Время прогрева лазера	20 с
Время лазерного испарения	30 с
Время продувки лазерной камеры	30 с
Масс-спектрометр	
Тип масс-спектрометра	Магнитный сектор
Производитель / модель	Thermo Scientific / Element XR
Энергия ионизации	1175 Вт
Газовые потоки	
Охлаждающий (Ar)	16 л/мин
Вспомогательный (Ar)	1.2 л/мин
Транспортный (He)	1.2 л/мин
Пробоподающий (Ar)	0.9 л/мин
Разрешение	Низкое
Режим сканирования	E-scan
Мертвое время детектора (Dead Time)	22 нс
Метод измерения	
Измеряемые массы (изотопы)	$^{34}\text{S}$ , $^{35}\text{Cl}$ , $^{43}\text{Ca}$ , $^{55}\text{Mn}$ , $^{137}\text{Ba}$ , $^{139}\text{La}$ , $^{140}\text{Ce}$ , $^{141}\text{Pr}$ , $^{146}\text{Nd}$ , $^{147}\text{Sm}$ , $^{153}\text{Eu}$ , $^{157}\text{Gd}$ , $^{159}\text{Tb}$ , $^{163}\text{Dy}$ , $^{165}\text{Ho}$ , $^{166}\text{Er}$ , $^{169}\text{Tm}$ , $^{172}\text{Yb}$ , $^{175}\text{Lu}$ , $^{206}\text{Pb}$ , $^{208}\text{Pb}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{238}\text{U}$
Режим регистрации сигналов	Тройной (triple) режим – для масс 34 и 43, режим счета (Counting) – для других масс
Окно сканирования массы (Mass Windows)	4 % – для $^{43}\text{Ca}$ и $^{238}\text{U}$ ; 2 % – для остальных масс
Время задержки магнита (Settling Time)	0.1 с – для $^{34}\text{S}$ ; 0.01 с – для $^{55}\text{Mn}$ , $^{137}\text{Ba}$ , $^{206}\text{Pb}$ ; 0.001 с – для других масс
Время измерения (Sample Time)	0.001 с для всех масс
Количество сигналов в пике (Samples Per Peak)	100 – для каждой массы
Способ интегрирования сигнала (Integration Type)	Среднеарифметический
Количество сканирований при одном измерении (Runs)	400
Общее время сканирования	1 мин 20 с

**LA-ICP-MS трековое датирование с использованием зета-калибровки.** При определении концентрации урана методом LA-ICP-MS существует два подхода. Первый подход подразумевает прямое определение  $^{238}\text{U}$ , для которого используется константа распада  $^{238}\text{U}$ , коэффициент регистрации треков спонтанного деления и поправочный коэффициент для травления и подсчета треков [Hasebe et al., 2004; Gleadow et al., 2019]. Второй подход, по аналогии с методом внешнего детектора, основан на использовании зета-калибровки [Hurford, Green 1983; Donelick et al., 2005]. Авторы использовали второй подход согласно протоколу, опубликованному в работе [Cogné et al., 2020], который основан на предположении, что интенсивность сигнала  $^{43}\text{Ca}$  во время сеанса LA-ICP-MS позволяет оценить объем выжженного апатита, и, таким образом, отношение  $^{238}\text{U}/^{43}\text{Ca}$  дает возможность измерить концентрацию урана. В ходе данного исследования была выполнена первичная длинная сессия LA-ICP-MS на кристаллах апатита Durango с возрастом  $31.44 \pm 0.18$  млн лет ( $2\sigma$ ) [McDowell et al., 2005], на которых предварительно были подсчитаны треки спонтанного деления для оценки первичного зета-фактора LA-ICP-MS.

Перед расчетом значения зета-фактора и его ошибки выполняется коррекция дрейфа соотношения U/Ca (рис. 3): это необходимо, чтобы сгладить остаточный дрейф, который не корректируется нормализацией к NIST-610 в специальном программном обеспечении Glitter [Van Achterbergh et al., 2001; Griffin et al., 2008],

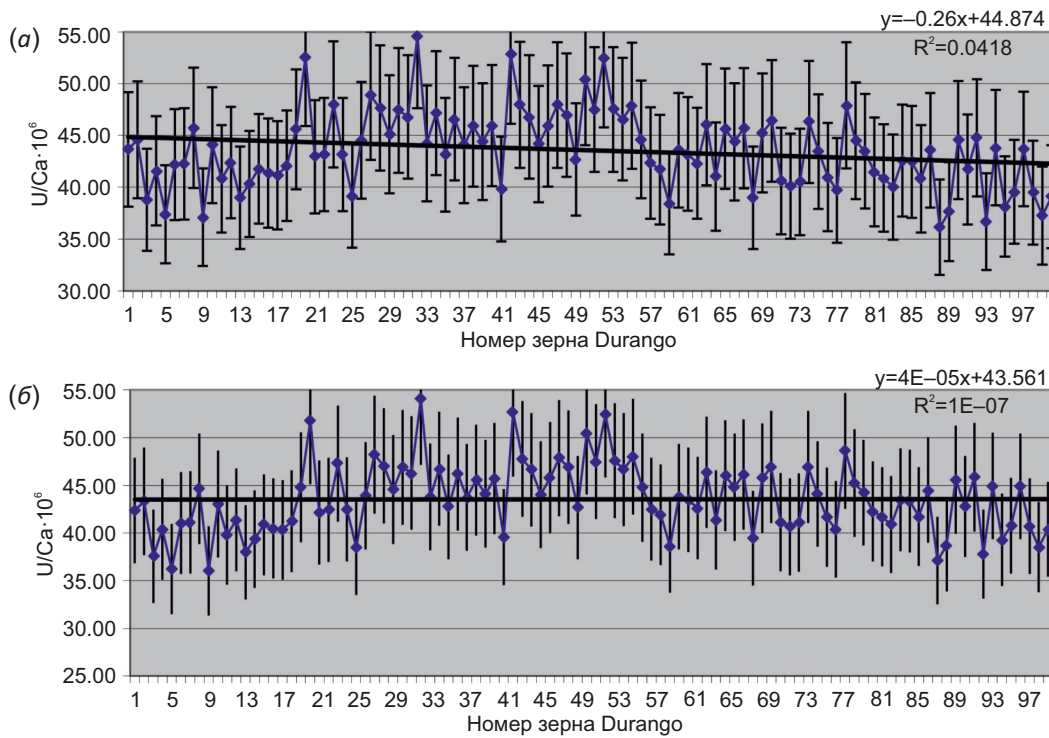
Iolite [Paton et al., 2011] или LADR [Norris et al., 2021]. Пример такой коррекции приведен на рис. 3. После коррекции дрейфа рассчитывается зета-фактор согласно формуле (1):

$$\zeta_{ICP} = \frac{e^{\lambda_d t_{std}} - 1}{\lambda_d \sum N_{S,i} / \sum P_i \Omega_i}, \quad (1)$$

где  $\zeta_{ICP}$  – зета-фактор;  $\lambda_d$  – константа распада  $^{238}\text{U}$ ;  $t_{std}$  – возраст минерала стандарта;  $N_{S,i}$  – количество треков спонтанного деления для  $i$  зерна;  $P_i$  – площадь, на которой были подсчитаны треки для  $i$  зерна;  $\Omega_i$  –  $^{238}\text{U}/^{43}\text{Ca}$  для  $i$  зерна.

Во время последующих сессий с образцами неизвестного возраста зета-сессия повторно не выполняется, поскольку за каждую сессию анализируется большое количество тех же зерен стандарта апатита Durango для оценки изменений в работе масс-спектрометра от сессии к сессии, на которую в первую очередь влияет настройка плазмы. Для коррекции межсессионного дрейфа оценивается отношение  $^{238}\text{U}/^{43}\text{Ca}$  стандартного стекла NIST-612. Согласно протоколу, в ходе одной сессии измерения проводились в следующем порядке: (а) три стандарта NIST-610; (б) четыре стандарта Durango; (в) 20 зерен с неизвестным возрастом; (г) три стандарта NIST-610; (д) четыре стандарта Durango.

Пересчет данных выполнялся согласно протоколу [Cogné et al., 2020] и с помощью таблиц для MS Excel из дополнительных материалов к упомянутой работе (Прил. 2, табл. 2.1, 2.2). В каждой сессии с образцами



**Рис. 3.** Примеры графиков коррекции дрейфа U/Ca в апатите Durango при выполнении первой сессии для вычисления зета-фактора. (а) – график без коррекции дрейфа; (б) – график с коррекцией.

**Fig. 3.** Examples of U/Ca drift correction plots in Durango apatite during the first session to calculate the zeta factor. (а) – plot is without drift correction; (б) – plot with drift correction.

неизвестного возраста вычисляется коэффициент пересчета  $X_s$ , который определяется на основе различий отношения  $U/Ca$  в апатите Durango в первой сессии для расчета зета-фактора и в каждой последующей сессии согласно формуле (2). Коэффициент пересчета корректирует систематические колебания отношений  $^{238}U/^{43}Ca$ , поскольку он может отличаться до 10 % между сессиями, что в первую очередь связано с различиями настроек прибора ICP-MS между сессиями [Cogné et al., 2020; Chew et al., 2016].

$$X_s = \frac{\overline{P_p}}{\overline{P_s}}, \quad (2)$$

где  $\overline{P_p}$  – среднее арифметическое  $P_{pi}$  (средневзвешенное значение  $^{238}U/^{43}Ca$  каждого проанализированного зерна Durango во время первой зета-сессии) и  $\overline{P_s}$  – среднее арифметическое  $^{238}U/^{43}Ca$  каждого проанализированного зерна Durango во время последующих сессий с зернами неизвестного возраста.

После вычисления зета-фактора ( $\zeta_{ICP}$ ) и коэффициента пересчета ( $X_s$ ) трековый возраст вычисляется методом LA-ICP-MS по результатам подсчета количества треков и отношения  $^{238}U/^{43}Ca$ , измеренного путем масс-спектрометрии согласно формуле (3) для каждого проанализированного зерна.

$$t_i = \frac{1}{\lambda_d} \ln \left( 1 + \lambda_d \zeta_{ICP} \frac{N_{s,i}}{P_i \Omega_i} \right), \quad (3)$$

где  $t_i$  – возраст для  $i$  зерна;  $\lambda_d$  – константа распада  $^{238}U$ ;  $\zeta_{ICP}$  – зета-фактор;  $N_{s,i}$  – количество треков спонтанного деления для  $i$  зерна;  $P_i$  – площадь, на которой были подсчитаны треки для  $i$  зерна;  $\Omega_i$  –  $^{238}U/^{43}Ca$  для  $i$  зерна.

Используемый протокол подготовлен для данных, их первичная обработка проводится с помощью программы Iolite, на основе которой и приведены таблицы в работе [Cogné et al., 2020]. В статье обработка выполнялась в программе Glitter, не вычисляющей погрешность отношения  $^{238}U/^{43}Ca$ : она вычислялась разложением в ряд Тейлора.

**Моделирование термальной истории.** Наиболее распространенными программными продуктами для моделирования термальной истории с использованием, в том числе, результатов трекового анализа апатита и циркона, являются HeFTy [Ketcham, 2005] и QTQt [Gallagher, 2012]. HeFTy – это программное обеспечение, в котором статистические тесты гипотез оценивают соответствие между входными данными и прогнозируемыми тепловыми моделями из многих тысяч траекторий времени ( $t$ ) и температуры ( $T$ ) в соответствии с моделью отжига треков в апатите [Ketcham et al., 2007]. Программа QTQt использует метод Монте-Карло с марковскими цепями, в котором случайное блуждание по пространству модели приводит к набору наиболее вероятных тепловых историй [Vermeesch, Tian, 2014]. Как показано в работе [Vermeesch, Tian, 2014], посвященной детальному анализу двух перечисленных выше программ, использование HeFTy предпочтительнее при небольшом наборе данных, а достоверность

термальных моделей, получаемых с использованием программы QTQt, улучшается с увеличением объема выборки.

В данном исследовании термальные истории изученных образцов были получены путем обратного моделирования данных о трековом возрасте апатита и длине треков с использованием программного обеспечения HeFTy, версия 1.8.3 [Ketcham, 2005]. Выходные данные моделирования представляют две t-T огибающие: более широкая огибающая представляет собой диапазон, в пределах которого любая тепловая история не может быть исключена из рассмотрения измеренными данными (приемлемое соответствие); более узкая огибающая представляет собой диапазон, поддерживаемый измеренными данными (хорошее соответствие). HeFTy сравнивает модельные и наблюдаемые термохронологические данные и характеризует их соответствие параметром «goodness-of-fit» (GOF). Результирующие «приемлемые» пути имеют  $GOF > 0.05$ , а «хорошие» пути имеют  $GOF > 0.5$ . Моделирование проводилось до тех пор, пока не было найдено 100 «хороших» путей (фиолетовые кривые). Если они не были найдены, то модели строились до 100 «приемлемых» путей (зеленые кривые). Подробные параметры модели и использованные при моделировании ограничения приведены в Прил. 2, табл. 2.1.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты трекового датирования с применением LA-ICP-MS приведены в табл. 2, на рис. 4, в Прил. 2, рис. 2.1 и в Прил. 3, : полученные значения трекового возраста находятся в диапазоне от  $150.0 \pm 23.0$  до  $238 \pm 35.8$  млн лет ( $2\sigma$ ). Значение трекового возраста апатита из образца M037-1440 массива Маган ( $217.6 \pm 18.6$  млн лет) имеет наименьшую величину погрешности на уровне  $2\sigma$ , поскольку это единственный образец, для которого трековый возраст был определен по измерениям плотностей треков и концентрации урана для 100 зерен; этот результат авторы рассматривают 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 M0931-391.8).

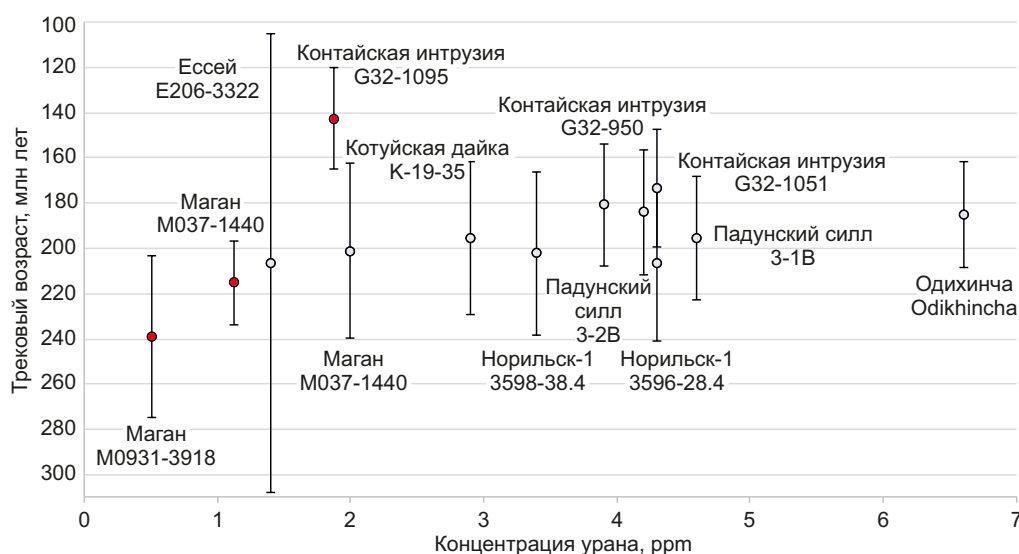
Новые трековые возрасты, полученные с применением LA-ICP-MS для массива Маган ( $217.6 \pm 18.6$  и  $238.8 \pm 35.8$  млн лет), с учетом ошибки определения согласуются с результатами трекового датирования методом внешнего детектора ( $201.0 \pm 19.4$  млн лет) [Bagdasaryan et al., 2022]. Важно отметить, что для апатита из пробы M037-1440 трековый анализ методами EDM и LA-ICP-MS выполнен по принципу «образец-в-образец». Для Контайской интрузии возраст, полученный с применением LA-ICP-MS, с учетом ошибки определения ( $150.0 \pm 23.0$  млн лет) также находится в генеральном согласии с результатами, полученными методом внешнего детектора ( $180.7 \pm 13.6$  и  $173.1 \pm 13.0$  млн лет) [Bagdasaryan et al., 2022].



**Таблица 2.** Результаты трекового датирования апатита с применением LA-ICP-MS**Table 2.** Results of LA-ICP-MS AFT dating

Метод		LA-ICP-MS				EDM		
Интрузия	Номер образца	Число зерен	Плотность треков ( $\times 10^6$ треков $\text{см}^{-2}$ ) (Число треков)	Содержание урана (ppm)	$\zeta_{\text{ICP}} \pm 2\sigma$	Возраст (млн лет) ( $\pm 2\sigma$ ) (объединенный возраст)	Содержание урана (ppm)	Возраст (млн лет) ( $\pm 2\sigma$ ) (объединенный возраст)
Маган	M037-1440	100	0.1398 (870)	1.13		217.6 $\pm$ 18.6	2.0	201.0 $\pm$ 19.4
Маган	M0931-3918	32	0.0873 (214)	0.51	0.66 $\pm$ 0.03	238.8 $\pm$ 35.8	-	-
Контайская интрузия	G32-1095	19	0.1577 (192)	1.88		150.0 $\pm$ 23.0	3.9–4.3	180.7 $\pm$ 13.6, 173.1 $\pm$ 13.0

Примечание.  $\zeta_{\text{ICP}}$  – зета фактор. Объединенный возраст вычислен путем сложения содержаний U для нескольких измерений.  
Note.  $\zeta_{\text{ICP}}$  – zeta factor; Pooled age – the combined age calculated by adding together the U-content measurements.



**Рис. 4.** Зависимость среднего содержания урана в апатите от трекового возраста. Вертикальные линии – неопределенность  $2\sigma$ . Серые точки – образцы, для которых трековый возраст получен по методу внешнего детектора. Красные точки – образцы, для которых трековый возраст получен с применением LA-ICP-MS.

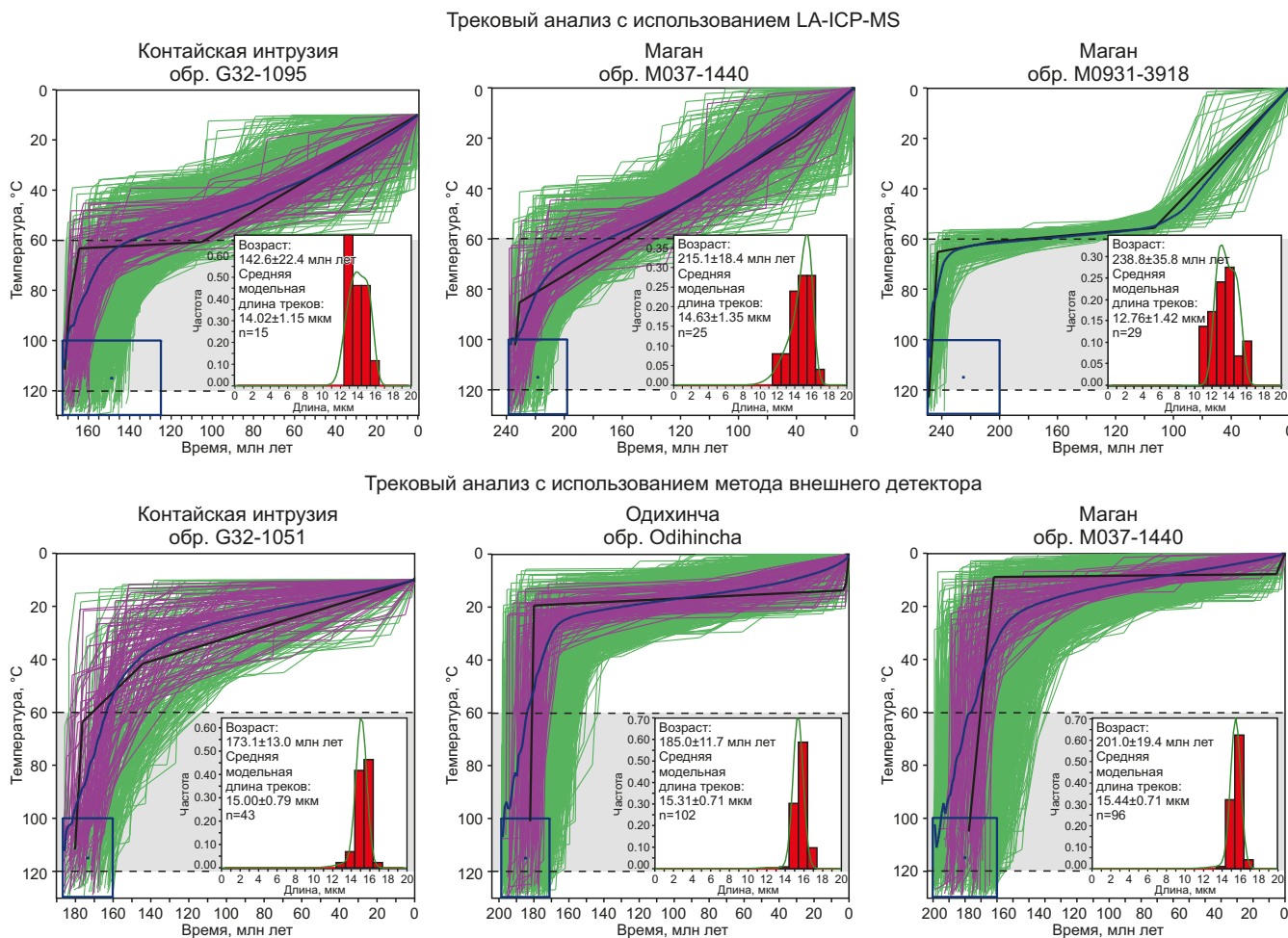
**Fig. 4.** Relationship between the average uranium content of apatites and the track age. Vertical lines – uncertainty  $2\sigma$ . Gray dots are the samples for which the AFT age was obtained using the external detector method (EDM). Red dots are samples for which the AFT age was obtained using LA-ICP-MS method.

Для оценки эффекта радиационно-усиленного отжига треков [Fernie et al., 2018; Carlson et al., 1999; Glorie et al., 2017] была рассмотрена зависимость трекового возраста от концентрации урана (рис. 4): отсутствие явной зависимости не дает оснований полагать, что в исследованных образцах концентрация урана сколько-нибудь значительно влияет на отжиг треков в апатите.

Данные химического состава зерен апатита из исследованных образцов свидетельствуют, что содержание Cl в апатите из Контайской интрузии находится в интервале 0.31–0.45 вес. % (Прил. 2, табл. 2.2), а в апатите из интрузива Маган оно ниже предела обнаружения. Наличие Cl в апатите повышает устойчивость треков к термическому отжигу (кинетический параметр) и может являться причиной увеличения (удревнения) трековых возрастов [Malusà, Fitzgerald, 2019],

однако в данном случае, ввиду малого количества образцов, сделать какие-либо выводы о влиянии концентрации Cl на трековый возраст не представляется возможным.

Температурно-временные (time-Temperature, t-T) модели для трех изученных образцов, датированных с использованием LA-ICP-MS, и трех образцов из тех же интрузивных тел, трековый возраст апатита в которых определен по методу внешнего детектора (полные данные для этих моделей приведены в работе [Bagdasaryan et al., 2022]), а также распределения длин треков показаны на рис. 5. Для ограничения t-T моделирования использовались дополнительные геохронологические определения, опубликованные в работе [Bagdasaryan et al., 2022] и представляющие собой определение изотопного возраста U-Pb методом по циркону,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом по флогопиту и Rb-Sr методом



**Рис. 5.** Результаты моделирования термальной истории апатита по данным трекового анализа образцов. Термальная модель: фиолетовый и зеленый цвет отвечает 95 и 50%-ному доверительным интервалам относительно наилучшей модели соответственно; синяя пунктирная линия – положение термальной модели, наилучшим образом соответствующей распределению длин треков; сплошная синяя линия – средневзвешенная термальная модель.

**Fig. 5.** Results of the thermal history modeling of apatite based on the results of AFT dating. Thermal model: purple and green lines correspond to 95 and 50 % confidence intervals relative to the best model, respectively; a blue dotted line is the position of the thermal model that best fits the distribution of track lengths; a solid blue line is the weighted mean thermal model.

(минеральная изохрона). В связи с этим многие t-T модели начинаются с ограничительной рамки, определяемой возрастом  $250 \pm 10$  млн лет и температурным диапазоном  $400\text{--}300$  °C, соответствующим температурам закрытия  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопной системы в плагиоклазе и слюде [Schaen et al., 2021]. Все модели заканчиваются на отметке 0 млн лет при современной температуре, зависящей от глубины отбора образцов с учетом современного значения геотермального градиента  $\sim 20$  °C/км [Duchkov et al., 2013].

Распределения длин треков для изучаемых образцов являются унимодальными со средним значением длины треков в диапазоне от 12.76 до 14.63 мкм. Это предполагает относительно быстрое монотонное охлаждение пород без периодов длительного пребывания в пределах зоны частичного отжига треков ( $120\text{--}60$  °C) (рис. 5). Кроме того, как видно на рис. 5, модели, построенные по данным, полученным с использованием

LA-ICP-MS, соотносятся с результатами, полученными EDM.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИФЗ РАН реализована методика трекового анализа апатита и получены первые определения трекового возраста апатита с применением LA-ICP-MS по протоколу [Cogné et al., 2020]. Основные результаты проведенного исследования следующие.

1. Получены новые определения трекового возраста апатита из Контайской интрузии ( $150.0 \pm 23.0$  млн лет) и интрузива Маган ( $217.6 \pm 18.6$  и  $238.8 \pm 35.8$  млн лет).
2. С учетом ошибки определения полученные результаты согласуются с ранее опубликованными в работе [Bagdasaryan et al., 2022] определениями трекового возраста апатита по этим же объектам с использованием классического метода внешнего детектора.

3. Моделирование термальной истории пород массива Маган и Контайской интрузии, выполненное с использованием полученных распределений длин треков в апатите, а также имеющих определений изотопного и трекового возраста, указывает на быстрое остывание пород и их кратковременное нахождение в зоне частичного отжига треков.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят М.М. Буслова (ИГМ СО РАН), А.В. Куликову (ИГМ СО РАН) и Ю.А. Бишаева (ИГМ СО РАН) за помощь в пробоподготовке, а также рецензентов, чьи замечания значительно улучшили качество статьи. Лабораторные исследования проводились на оборудовании ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН.

## 7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Ansberque C., Chew D., Drost K., 2021. Apatite Fission-Track Dating by LA-Q-ICP-MS Imaging. *Chemical Geology* 560, 119977. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119977>.

Bagdasaryan T.E., Thomson S.N., Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Zaitsev V.A., Marfin A.E., Zakharov V.S., Yudin D.S., 2022. Thermal History of the Siberian Traps Large Igneous Province Revealed by New Thermochronology Data from Intrusions. *Tectonophysics* 836, 229385. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229385>.

Carlson W.D., Donelick R.A., Ketcham R.A., 1999. Variability of Apatite Fission-Track Annealing Kinetics: I. Experimental Results. *American Mineralogist* 84, 1213–1223. <https://doi.org/10.2138/am-1999-0901>.

Chew D.M., Babechuk M.G., Cogné N., Mark C., O'Sullivan G.J., Henrichs I.A., Doepke D., McKenna C.A., 2016. (LA,Q)-ICPMS Trace-Element Analyses of Durango and McClure Mountain Apatite and Implications for Making Natural LA-ICPMS Mineral Standards. *Chemical Geology* 435, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.03.028>.

Chew D.M., Donelick R.A., 2012. Combined Apatite Fission Track and U-Pb Dating by LA-ICP-MS and Its Application in Apatite Provenance Analysis. *Mineralogical Association of Canada Short Course* 42, 219–247.

Cogné N., Chew D.M., Donelick R.A., Ansberque C., 2020. LA-ICP-MS Apatite Fission Track Dating: A Practical Zeta-Based

Approach. *Chemical Geology* 531, 119302. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119302>.

Donelick R.A., O'Sullivan P., Ketcham R.A., 2005. Apatite Fission-Track Analysis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 58 (1), 49–94. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.3>.

Duchkov A.D., Sokolova L.S., Ayunov D.E., 2013. Electronic Geothermal Atlas of Siberia and the Far East. In: *Interexpo GEO Siberia. Subsoil Use. Mining. Trends and Technologies for Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits. Economics. Geoecology. Proceedings of the International Scientific Conference. Vol. 3. Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk*, p. 153–157 (in Russian) [Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е. Электронный геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Материалы международной научной конференции. Новосибирск: СГУГиТ, 2013. Т. 3. С. 153–157].

Egorov L.S., 1991. Ijolite-Carbonate Plutonism. *Nedra, Leningrad*, 260 p. (in Russian) [Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм. Л.: Недра, 1991. 260 с.].

Fernie N., Glorie S., Jessell M.W., Collins A.S., 2018. Thermochronological Insights into Reactivation of a Continental Shear Zone in Response to Equatorial Atlantic Rifting (Northern Ghana). *Scientific Reports* 8, 16619. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34769-x>.

Gallagher K., 2012. Transdimensional Inverse Thermal History Modeling for Quantitative Thermochronology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (B2). <https://doi.org/10.1029/2011JB008825>.

Gallagher K., Brown R., Johnson C., 1998. Fission Track Analysis and Its Application to Geological Problems. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 26, 519–572. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.519>.

Gleadow A.J.W., Duddy I.R., 1981. A Natural Long-Term Track Annealing Experiment for Apatite. *Nuclear Tracks* 5 (1–2), 169–174. [https://doi.org/10.1016/0191-278X\(81\)90039-1](https://doi.org/10.1016/0191-278X(81)90039-1).

Gleadow A., Kohn B., Seiler C., 2019. The Future of Fission-Track Thermochronology. In: M. Malusà, P. Fitzgerald (Eds), *Fission-Track Thermochronology and Its Application to Geology*. Springer, Cham, p. 77–92. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89421-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89421-8_4).

Glorie S., Alexandrov I., Nixon A., Jepson G., Gillespie J., Jahn B.M., 2017. Thermal and Exhumation History of Sakhalin Island (Russia) Constrained by Apatite U-Pb and Fission Track Thermochronology. *Journal of Asian Earth Sciences* 143, 326–342. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.05.011>.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICP-MS. In: P.J. Sylvester (Ed.), *Laser Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues*. Mineralogical Association of Canada Short Course Series. Vol. 40. Vancouver, p. 308–311.

Hasebe N., Barbarand J., Jarvis K., Carter A., Hurford A.J., 2004. Apatite Fission-Track Chronometry Using Laser Ablation ICP-MS. *Chemical Geology* 207 (3–4), 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.007>.

Hasebe N., Carter A., Hurford A., Arai S., 2009. The Effect of Chemical Etching on LA-ICP-MS Analysis in Determining Uranium Concentration for Fission-Track Chronometry. *Geological Society of London, Special Publications* 324, 37–46. <https://doi.org/10.1144/SP324.3>.

Hasebe N., Tamura A., Arai S., 2013. Zeta Equivalent Fission-Track Dating Using LA-ICP-MS and Examples with Simultaneous U-Pb Dating. *Island Arc* 22 (3), 280–291. <https://doi.org/10.1111/iar.12040>.

Hurford A.J., Green P.F., 1983. The Zeta Age Calibration of Fission-Track Dating. *Chemical Geology* 41, 285–317. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(83\)80026-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(83)80026-6).

Ketcham R.A., 2005. Forward and Inverse Modeling of Low-Temperature Thermochronometry Data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 58 (1), 275–314. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.11>.

Ketcham R.A., Carter A., Donelick R.A., Barbarand J., Hurford A.J., 2007. Improved Modeling of Fission-Track Annealing in Apatite. *American Mineralogist* 92 (5–6), 799–810. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2281>.

Ketcham R.A., Donelick R.A., Carlson W.D., 1999. Variability of Apatite Fission-Track Annealing Kinetics: III. Extrapolation to Geological Time Scales. *American Mineralogist* 84 (9), 1235–1255. <https://doi.org/10.2138/am-1999-0903>.

Malusà M.G., Fitzgerald P.G. (Eds), 2019. *Fission-Track Thermochronology and Its Application to Geology*. Springer, Cham, 393 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-89421-8>.

McDowell F.W., McIntosh W.C., Farley K.A., 2005. A Precise  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Reference Age for the Durango Apatite (U-Th)/He and Fission-Track Dating Standard. *Chemical Geology* 214 (3–4), 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.10.002>.

Norris C.A., Danyushevsky L., Olin P., West N.R., 2021. Elimination of Aliasing in LA-ICP-MS by Alignment of Laser and Mass Spectrometer. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 36, 733–739.

Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J., Hergt J., 2011. Iolite: Freeware for the Visualisation and Processing of Mass Spectrometric Data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26, 2508–2518. <https://doi.org/10.1039/C1JA10172B>.

Rahn M., Seward D., 2000. How Many Track Lengths Do We Need? *OnTrack* (The Newsletter of the International Fission-Track Community) 10 (20), 12–15.

Schaen A.J., Jicha B.R., Hodges K.V., Vermeesch P., Stelten M.E., Mercer C.M., Phillips D., Rivera T.A. et al., 2021. Interpreting and Reporting  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronologic Data. *GSA Bulletin* 133 (3–4), 461–487. <https://doi.org/10.1130/B35560.1>.

Solovyov A.V., 2008. *Study of Tectonic Processes in the Areas of Lithospheric Plate Convergence: Track-Structure Interaction Analysis Methods*. Nauka, Moscow, 319 p. (in

Russian) [Соловьев А.В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового и структурного анализа. М.: Наука, 2008. 319 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2015. Anabar-Vilyuyskaya Series. Scale 1:100000. Sheet R-48 (Khatanga). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 398 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Анабаро-Виллюйская. Масштаб 1:1000000. Лист R-48 (Хатанга): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. 398 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2018. Norilsk Series. Scale 1:100000. Sheet R-47 (Kheta). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 464 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Норильская. Масштаб 1:1000000. Лист R-47 (Хета): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2018. 464 с.].

Van Achterbergh E., Ryan C.G., Jackson S.E., Griffin W.L., 2001. Data Reduction Software for LA-ICP-MS. In: P.J. Sylvester (Ed.), *Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences – Principles and Applications*. Vol. 29. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, p. 239–243.

Vermeesch P., 2018. IsoplotR: A Free and Open Toolbox for Geochronology. *Geoscience Frontiers* 9 (5), 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>.

Vermeesch P., Tian Y., 2014. Thermal History Modelling: HeFTy vs. QTQt. *Earth-Science Reviews* 139, 279–290. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.010>.

Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud'ko D.V., Chistyakova A.V., 2022. Shared Research Facilities "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0579 (in Russian) [Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарёв А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>.

Wagner G., 1978. Archaeological Applications of Fission Track Dating. *Nuclear Track Detection* 2(1), 51–63. [https://doi.org/10.1016/0145-224X\(78\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0145-224X(78)90005-4).

Yamada R., Tagami T., Nishimura S., Ito H., 1995. Annealing Kinetics of Fission Tracks in Zircon: an Experimental Study. *Chemical Geology* 122 (1–4), 249–258. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00006-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00006-8).

Zaitsev V.A., Elizarov D.V., Bychkova Ya.V., Senin V.G., Bayanova T.B., 2018. First Data on the Geochemistry and Age of the Kontay Intrusion in Polar Siberia. *Geochemistry International*, 56, 211–225. <https://doi.org/10.1134/S0016702918030102>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

**АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ МАГНИТНОГО СЕКТОРНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА  
ДЛЯ ТРЕКОВОГО ДАТИРОВАНИЯ АПАТИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ LA-ICP-MS**

1. Настройка параметров масс-спектрометрического исследования проводится на стекле NIST-610 или NIST-612. Выбор стекла-стандарта определяется качеством испарения вещества при выбранных параметрах. Если во время настроек прибора выбор стекла меняется, то процедура настройки масс-спектрометра производится с начала.

2. Настройки выполняются при условии  $\text{Th}/\text{U} \approx 1$ ,  $\text{ThO}/\text{Th} < 0.15\%$ , для этого необходимо выполнить шаги 2.1 и 2.2, что может занять продолжительное время. Важно помнить, что указанные параметры могут меняться между сессиями, поэтому проверка и настройка сигнала должны проводиться перед каждой сессией.

2.1. Подбирается мощность лазера для оптимального испарения стекла и апатита. На данном этапе необходимо добиться в первую очередь достаточного уровня сигнала  $^{238}\text{U}$ ,  $^{43}\text{Ca}$  (или  $^{44}\text{Ca}$ ),  $^{232}\text{Th}$ , а также других

анализируемых изотопов. При этом важно следить, чтобы небольшие зерна апатита не вылетали из оксидной шашки и испарялись равномерно.

2.2. Настраиваются газовые потоки – «транспортный» и «пробоподающий» (Additional 1 и Gas Flows соответственно) таким образом, чтобы не было перегрузки на детекторе (электронный умножитель), а сигнал был бы достаточен.

3. В случае наличия примеси криптона в газе и интерференционном наложении этого элемента на изотоп  $^{43}\text{Ca}$  в качестве внутреннего стандарта можно выбрать  $^{44}\text{Ca}$ .

4. Наибольшее время анализа выбирается для  $^{43}\text{Ca}$  и  $^{238}\text{U}$ .

5. При анализе стекла-стандарта и апатита на изотопы Ca, U и Th время задержки магнита (Settling Time) должно быть минимальным, особенно в случае малых концентраций этих изотопов.

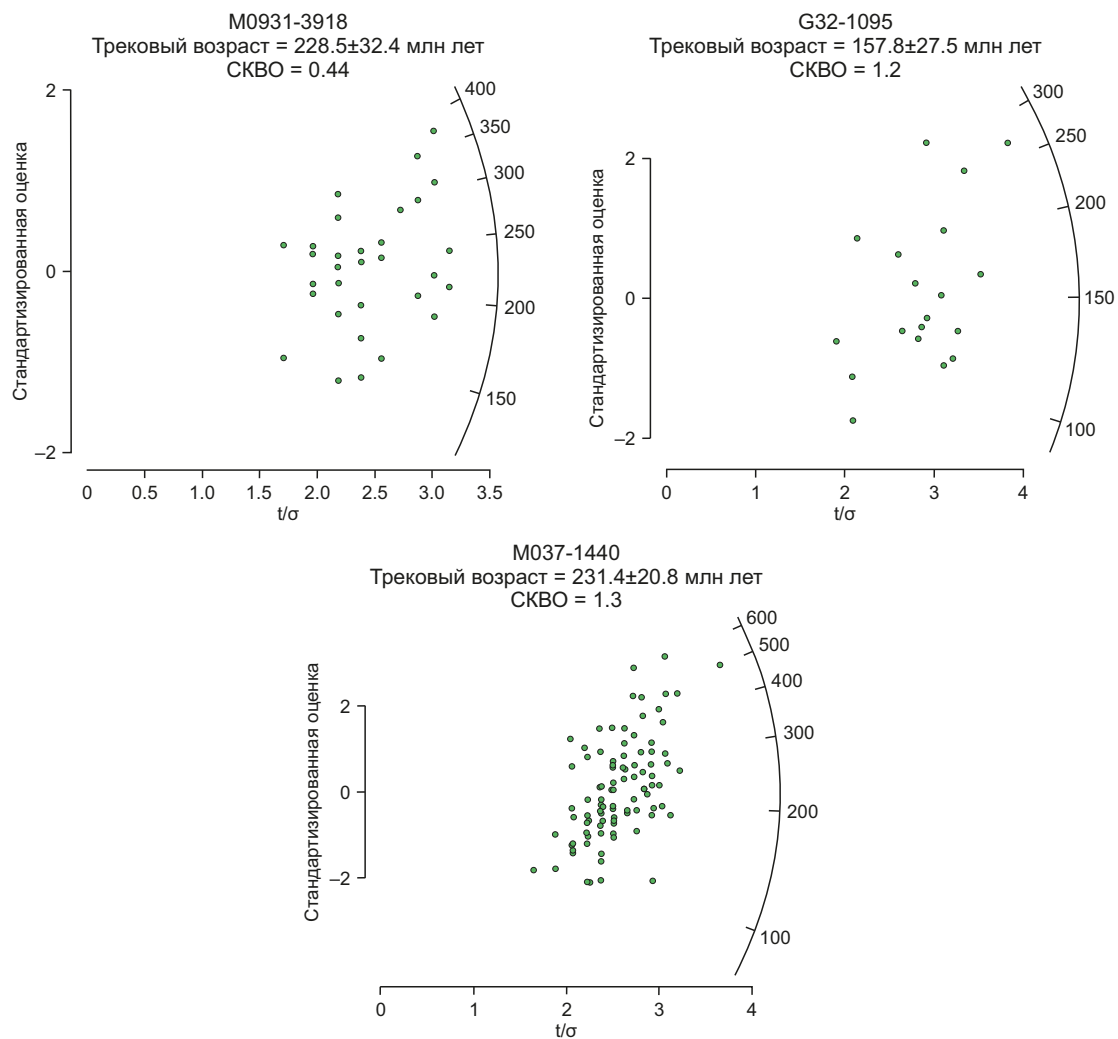
## ПРИЛОЖЕНИЕ 2 / APPENDIX 2

**Таблица 2.1.** Параметры моделирования термальной истории в программе HeFTy  
**Table 2.1.** Thermal modeling parameters for HeFTy software

Термохронологические данные	
AFT, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ; U-Pb, Rb-Sr – термохронометры, используемые для моделирования	
Обработка данных, неопределенности и другие относительные ограничения	
AFT Data	
Кинетический параметр	Диаметр трека (Drag, мкм)
Начальная длина треков	16.3
Стандарт уменьшения длины трека	0.893
Травление	5.5 М
Дополнительная геологическая информация	
Допущение	Объяснение
Современная температура задается от 0 до 15 °C	Температура 0–15 °C на основе современного геотермального атласа Сибири [Duchkov et al., 2013], <a href="http://sibgeotherm.ipgg.sbras.ru">http://sibgeotherm.ipgg.sbras.ru</a>
Смоделированные высоты, заданные в соответствии с высотой/глубиной образца	
Моделирование начинается при температуре 300 °C	Используется $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст плагиоклаза и слюды [Bagdasaryan et al., 2022] и соответствующая температура закрытия (390–300 °C [Schaen et al., 2021]) для определения ограничений
Особые параметры моделирования	
Модель отжига треков	[Ketcham et al., 2007]
Версия программного обеспечения	HeFTy v 1.8.3
Критерии согласия	Критерий согласия Кэйпера
Используется ли облучение Cf	Нет
Смоделированы проецированные длины треков	Да

**Таблица 2.2.** Средний химический состав апатита из изученных интрузивных тел (вес. %)  
**Table 2.2.** Mean chemical composition of apatite grains from the studied intrusive bodies (weight %)

Образец	Контайская интрузия	Маган	
	G32-1095	M037-1440	M0931-3918
Количество измерений	17	32	27
Элемент			
O	40.30 39.15–41.11	35.95 34.54–37.77	36.19 34.86–37.41
F	2.63 2.42–2.90	1.38 1.07–1.53	2.27 2.07–2.39
Na	–	0.15 0.11–0.19	0.01 0.11–0.12
Mg	0.01 0.11–0.19	–	–
Si	0.01 0.16–0.19	0.06 0.00–0.12	0.01 0.00–0.23
P	15.97 15.61–16.48	16.67 16.35–16.89	16.43 15.72–16.86
Cl	0.38 0.30–0.45	–	–
Ca	35.60 34.27–36.86	38.01 37.46–38.43	36.96 34.36–38.16
Fe	0.20 0.14–0.26	–	–
Rb	0.22 0.00–0.34	0.12 0.00–0.25	0.01 0.00–0.21
Sr	0.14 0.00–0.30	0.47 0.27–0.58	0.78 0.64–0.90
Всего	95.57	92.71	92.72



**Рис. 2.1.** Радиальные графики, иллюстрирующие зависимость трекового возраста апатита (радиальная ось) от относительной погрешности (горизонтальная ось). Все погрешности приведены на уровне  $2\sigma$ . Графики построены с использованием IsoplotR [Vermeesch, 2018].

**Fig. 2.1.** Radial plots illustrating the relationship between the AFT age (radial axis) and the relative error (horizontal axis). All errors are given at the  $2\sigma$  level. Graphs are plotted using IsoplotR [Vermeesch, 2018].

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 / APPENDIX 3

**Таблица 3.1.** Результаты трекового датирования апатита Контайской интрузии (образец G32-1095)  
**Table 3.1.** Results of Apatite Fission-Track dating of the Kontay intrusion (sample G32-1095)

Образец	Количество зерен	$\Sigma N_s$	$\Sigma P_i \Omega_i$	$2\sigma \Sigma P_i \Omega_i$	$\zeta_{ICP}$	$2s\zeta_{ICP}$	Трековый возраст (объединенный возраст), млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
G32-1095	19	202	8.83E-07	3.32E-08	0.66	0.03	150.0	23.0
Зерно	Ns	Площадь (см <sup>2</sup> )	Взвешенное <sup>238</sup> U/ <sup>43</sup> Ca	2 $\sigma$	$P_i \Omega_i$	1 $\sigma$	Трековый возраст, млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
1	10	8.18E-05	5.92E-04	7.73E-05	4.84E-08	6.32E-09	135.6	87.83
2	9	4.65E-05	7.84E-04	1.03E-04	3.65E-08	4.79E-09	161.8	110.20
3	8	5.47E-05	7.66E-04	1.02E-04	4.19E-08	5.6E-09	125.5	90.55
4	14	6.41E-05	5.50E-04	7.46E-05	3.53E-08	4.78E-09	258.2	142.95
5	5	2.70E-05	5.41E-04	7.43E-05	1.46E-08	2E-09	223.4	202.45
6	10	3.43E-05	5.88E-04	7.86E-05	2.02E-08	2.7E-09	320.5	207.76
7	12	7.96E-05	4.82E-04	6.81E-05	3.83E-08	5.42E-09	204.4	121.92
8	21	7.93E-05	6.45E-04	9.23E-05	5.12E-08	7.32E-09	266.8	123.24
9	12	1.21E-04	5.96E-04	8.46E-05	7.20E-08	1.02E-08	109.6	65.40
10	10	6.62E-05	7.67E-04	1.14E-04	5.08E-08	7.55E-09	129.4	84.29
11	14	7.37E-05	9.65E-04	1.44E-04	7.11E-08	1.06E-08	129.4	72.08
12	12	7.21E-05	7.20E-04	1.06E-04	5.19E-08	7.67E-09	151.6	90.62
13	8	4.96E-05	5.54E-04	8.31E-05	2.75E-08	4.12E-09	190.1	137.73
14	4	5.16E-05	4.71E-04	7.45E-05	2.43E-08	3.84E-09	108.4	109.83
15	14	1.16E-04	6.97E-04	1.12E-04	8.08E-08	1.29E-08	114.0	63.86
16	10	8.91E-05	6.07E-04	9.66E-05	5.41E-08	8.61E-09	121.6	79.51
17	19	9.00E-05	8.40E-04	1.40E-04	7.56E-08	1.26E-08	164.8	80.85
18	5	1.10E-04	4.64E-04	8.01E-05	5.12E-08	8.84E-09	64.5	58.82
19	5	5.69E-05	6.66E-04	1.17E-04	3.79E-08	6.63E-09	87.1	79.46

Примечание.  $N_s$  – количество треков;  $P_i$  – площадь, на которой были подсчитаны треки;  $\Omega_i$  – <sup>238</sup>U/<sup>43</sup>Ca для i зерна;  $\zeta_{ICP}$  – зета фактор; 1 $\sigma$  и 2 $\sigma$  – неопределенности. Объединенный возраст вычислен путем сложения содержания U в нескольких измерениях.

Note.  $N_s$  – number of tracks;  $P_i$  – the area where the tracks were counted;  $\Omega_i$  – <sup>238</sup>U/<sup>43</sup>Ca for i grain;  $\zeta_{ICP}$  – zeta factor; 1 $\sigma$  and 2 $\sigma$  – uncertainties. Pooled age are calculated by adding together U-content measurements.

**Таблица 3.2.** Результаты трекового датирования апатита массива Маган (образец M037-1440)  
**Table 3.2.** Results of Apatite Fission-Track dating of the Magan pluton (sample M037-1440)

Образец	Количество зерен	$\Sigma N_s$	$\Sigma P_i \Omega_i$	$2\sigma \Sigma P_i \Omega_i$	$\zeta_{ICP}$	$2s\zeta_{ICP}$	Трековый возраст (объединенный возраст), млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
M037-1440	100	880	2.64E-06	5.19E-08	0.66	0.03	217.6	18.6
Зерно	Ns	Площадь (см <sup>2</sup> )	Взвешенное <sup>238</sup> U/ <sup>43</sup> Ca	2 $\sigma$	$P_i \Omega_i$	1 $\sigma$	Трековый возраст, млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
1	10	1.04E-04	3.98E-04	7.04E-05	4.14E-08	7.33E-09	158.4	104.29
2	8	8.26E-05	3.68E-04	6.78E-05	3.04E-08	5.59E-09	172.2	126.12
3	13	5.61E-05	3.98E-04	7.05E-05	2.23E-08	3.96E-09	375.1	219.16
4	7	7.55E-05	2.61E-04	4.99E-05	1.97E-08	3.77E-09	231.2	180.63
5	12	8.95E-05	3.75E-04	6.88E-05	3.36E-08	6.15E-09	232.8	141.47
6	10	5.77E-05	3.15E-04	5.78E-05	1.82E-08	3.33E-09	355.4	234.70
7	7	1.10E-04	3.76E-04	6.95E-05	4.12E-08	7.62E-09	111.8	87.18
8	14	9.47E-05	3.52E-04	6.45E-05	3.33E-08	6.11E-09	273.0	154.82
9	8	8.27E-05	3.67E-04	6.69E-05	3.03E-08	5.53E-09	172.8	126.47
10	12	8.40E-05	3.71E-04	6.83E-05	3.12E-08	5.74E-09	250.6	152.35



Таблица 3.2 (продолжение)

Table 3.2 (continued)

Образец	Количество зерен	$\Sigma N_s$	$\Sigma P_i \Omega_i$	$2\sigma \Sigma P_i \Omega_i$	$\zeta_{ICP}$	$2s\zeta_{ICP}$	Трековый возраст (объединенный возраст), млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
M037-1440	100	880	2.64E-06	5.19E-08	0.66	0.03	217.6	18.6
Зерно	Ns	Площадь (см <sup>2</sup> )	Взвешенное <sup>238</sup> U/ <sup>43</sup> Ca	2 $\sigma$	$P_i \Omega_i$	1 $\sigma$	Трековый возраст, млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
11	16	1.08E-04	3.77E-04	6.91E-05	4.08E-08	7.48E-09	255.2	136.49
12	12	7.22E-05	3.31E-04	6.11E-05	2.39E-08	4.41E-09	325.2	197.73
13	7	6.86E-05	3.28E-04	6.04E-05	2.25E-08	4.14E-09	203.5	158.62
14	11	9.60E-05	3.31E-04	6.06E-05	3.18E-08	5.82E-09	225.5	142.52
15	10	1.02E-04	2.55E-04	4.73E-05	2.59E-08	4.81E-09	251.0	165.85
16	13	8.21E-05	5.24E-04	9.34E-05	4.30E-08	7.67E-09	197.6	115.53
17	8	1.10E-04	3.20E-04	5.92E-05	3.52E-08	6.5E-09	149.2	109.27
18	7	6.91E-05	2.83E-04	5.26E-05	1.96E-08	3.64E-09	233.0	181.75
19	8	6.90E-05	2.71E-04	5.05E-05	1.87E-08	3.48E-09	277.6	203.44
20	8	8.55E-05	3.24E-04	6.01E-05	2.77E-08	5.14E-09	188.7	138.24
21	9	7.10E-05	4.50E-04	7.92E-05	3.19E-08	5.62E-09	184.3	127.39
22	8	7.47E-05	3.67E-04	6.76E-05	2.74E-08	5.05E-09	190.8	139.76
23	7	6.89E-05	4.02E-04	7.18E-05	2.77E-08	4.95E-09	165.3	128.66
24	12	8.39E-05	4.82E-04	8.65E-05	4.04E-08	7.25E-09	194.2	117.76
25	8	5.13E-05	3.62E-04	6.64E-05	1.85E-08	3.4E-09	280.4	205.28
26	4	6.31E-05	4.93E-04	8.69E-05	3.11E-08	5.48E-09	84.8	86.16
27	14	8.01E-05	6.17E-04	1.09E-04	4.94E-08	8.73E-09	185.3	104.69
28	7	4.61E-05	5.45E-04	1.01E-04	2.52E-08	4.66E-09	182.1	142.01
29	6	1.02E-04	4.49E-04	7.96E-05	4.60E-08	8.15E-09	86.0	71.95
30	13	6.07E-05	3.29E-04	6.08E-05	2.00E-08	3.69E-09	418.5	245.57
31	6	1.37E-04	3.35E-04	6.23E-05	4.60E-08	8.54E-09	86.1	72.19
32	13	1.10E-04	3.33E-04	6.17E-05	3.65E-08	6.76E-09	232.0	136.15
33	14	5.83E-05	3.32E-04	6.17E-05	1.93E-08	3.6E-09	463.2	263.12
34	10	6.26E-05	3.77E-04	6.92E-05	2.36E-08	4.33E-09	275.3	181.78
35	8	9.46E-05	3.37E-04	6.20E-05	3.19E-08	5.86E-09	164.3	120.31
36	23	6.02E-05	4.93E-04	8.74E-05	2.97E-08	5.26E-09	495.0	225.57
37	7	7.51E-05	5.11E-04	9.43E-05	3.83E-08	7.08E-09	120.0	93.58
38	8	5.76E-05	3.09E-04	5.70E-05	1.78E-08	3.28E-09	291.8	213.68
39	11	5.29E-05	6.28E-04	1.10E-04	3.32E-08	5.82E-09	216.0	136.02
40	5	7.89E-05	3.46E-04	6.50E-05	2.73E-08	5.13E-09	120.5	110.28
41	7	7.03E-05	4.16E-04	7.95E-05	2.92E-08	5.59E-09	156.9	122.59
42	7	2.66E-05	4.13E-04	7.95E-05	1.10E-08	2.11E-09	410.3	320.67
43	8	4.35E-05	4.30E-04	8.00E-05	1.87E-08	3.48E-09	277.2	203.13
44	4	5.84E-05	3.50E-04	6.47E-05	2.04E-08	3.78E-09	128.6	130.90
45	10	8.39E-05	4.14E-04	7.33E-05	3.48E-08	6.15E-09	188.2	123.94
46	7	3.94E-05	3.53E-04	6.62E-05	1.39E-08	2.61E-09	325.8	254.25
47	8	9.38E-05	3.87E-04	7.15E-05	3.63E-08	6.71E-09	144.5	105.83
48	9	3.89E-05	3.84E-04	7.02E-05	1.49E-08	2.73E-09	388.3	269.06
49	9	5.35E-05	5.87E-04	1.03E-04	3.14E-08	5.52E-09	187.3	129.48
50	7	7.35E-05	3.51E-04	6.51E-05	2.58E-08	4.78E-09	177.9	138.73

Таблица 3.2 (продолжение)

Table 3.2 (continued)

Образец	Количество зерен	$\Sigma N_s$	$\Sigma P_i \Omega_i$	$2\sigma \Sigma P_i \Omega_i$	$\zeta_{ICP}$	$2s\zeta_{ICP}$	Трековый возраст (объединенный возраст), млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
Зерно	Ns	Площадь (см <sup>2</sup> )	Взвешенное <sup>238</sup> U/ <sup>43</sup> Ca	2 $\sigma$	$P_i \Omega_i$	1 $\sigma$	Трековый возраст, млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
М037-1440	100	880	2.64E-06	5.19E-08	0.66	0.03	217.6	18.6
51	12	7.84E-05	3.28E-04	6.08E-05	2.57E-08	4.77E-09	302.5	183.99
52	9	5.38E-05	4.03E-04	7.35E-05	2.17E-08	3.95E-09	269.9	186.97
53	7	6.10E-05	3.85E-04	7.12E-05	2.35E-08	4.34E-09	194.7	151.83
54	7	5.73E-05	4.17E-04	7.39E-05	2.39E-08	4.23E-09	191.4	148.91
55	5	3.76E-05	2.94E-04	5.51E-05	1.10E-08	2.07E-09	293.6	268.67
56	5	4.38E-05	4.52E-04	8.12E-05	1.98E-08	3.56E-09	165.4	151.15
57	12	8.61E-05	8.48E-04	1.55E-04	7.30E-08	1.33E-08	108.1	65.67
58	12	9.76E-05	4.43E-04	8.12E-05	4.32E-08	7.92E-09	181.6	110.37
59	8	5.44E-05	4.26E-04	8.09E-05	2.32E-08	4.4E-09	225.2	165.21
60	7	5.96E-05	4.23E-04	8.09E-05	2.52E-08	4.82E-09	181.6	141.84
61	6	6.53E-05	4.37E-04	8.12E-05	2.86E-08	5.31E-09	137.9	115.69
62	6	5.28E-05	4.55E-04	8.17E-05	2.40E-08	4.31E-09	163.9	137.21
63	8	7.51E-05	3.64E-04	6.81E-05	2.73E-08	5.12E-09	191.6	140.47
64	8	4.52E-05	4.80E-04	8.88E-05	2.17E-08	4.02E-09	240.3	176.04
65	6	6.12E-05	3.16E-04	5.88E-05	1.93E-08	3.6E-09	203.0	170.30
66	6	7.81E-05	1.42E-04	2.87E-05	1.11E-08	2.24E-09	350.4	295.29
67	14	6.02E-05	5.12E-04	9.61E-05	3.08E-08	5.78E-09	295.0	167.78
68	11	8.30E-05	2.80E-04	5.31E-05	2.33E-08	4.41E-09	306.4	194.20
69	6	6.59E-05	4.19E-04	8.14E-05	2.76E-08	5.36E-09	142.5	119.79
70	8	4.91E-05	2.63E-04	4.96E-05	1.29E-08	2.43E-09	399.1	292.75
71	9	6.76E-05	3.16E-04	5.92E-05	2.13E-08	4E-09	274.1	190.25
72	8	5.04E-05	3.66E-04	6.81E-05	1.85E-08	3.43E-09	281.3	206.13
73	10	2.98E-05	3.33E-04	6.22E-05	9.90E-09	1.85E-09	637.9	421.84
74	6	3.50E-05	3.51E-04	6.60E-05	1.23E-08	2.31E-09	316.8	265.89
75	7	9.61E-05	5.18E-04	9.68E-05	4.98E-08	9.3E-09	92.7	72.30
76	16	7.09E-05	3.20E-04	6.02E-05	2.27E-08	4.27E-09	451.3	242.09
77	6	3.23E-05	3.79E-04	7.06E-05	1.23E-08	2.28E-09	316.8	265.79
78	6	7.10E-05	4.33E-04	8.22E-05	3.07E-08	5.84E-09	128.3	107.69
79	5	4.93E-05	3.64E-04	6.85E-05	1.79E-08	3.37E-09	182.6	167.10
80	9	5.05E-05	3.80E-04	7.08E-05	1.92E-08	3.58E-09	303.8	210.82
81	9	4.36E-05	3.94E-04	7.31E-05	1.72E-08	3.18E-09	339.1	235.27
82	3	8.41E-05	3.22E-04	6.00E-05	2.71E-08	5.04E-09	73.1	85.54
83	5	7.21E-05	4.14E-04	7.56E-05	2.99E-08	5.45E-09	110.1	100.66
84	11	5.20E-05	3.31E-04	6.16E-05	1.72E-08	3.2E-09	410.8	260.02
85	5	4.42E-05	1.81E-04	3.59E-05	8.00E-09	1.59E-09	401.8	368.59
86	5	7.36E-05	3.63E-04	6.76E-05	2.67E-08	4.98E-09	123.1	112.64
87	9	6.86E-05	3.46E-04	6.40E-05	2.38E-08	4.39E-09	246.5	170.98
88	11	5.04E-05	2.89E-04	5.45E-05	1.46E-08	2.75E-09	482.8	305.99
89	10	4.92E-05	3.67E-04	6.85E-05	1.81E-08	3.37E-09	357.3	236.20
90	8	5.77E-05	4.03E-04	7.45E-05	2.32E-08	4.29E-09	224.6	164.54

**Таблица 3.2** (продолжение)  
**Table 3.2** (continued)

Образец	Количество зерен	$\Sigma N_s$	$\Sigma P_i \Omega_i$	$2\sigma \Sigma P_i \Omega_i$	$\zeta_{ICP}$	$2s \zeta_{ICP}$	Трековый возраст (объединенный возраст), млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
M037-1440	100	880	2.64E-06	5.19E-08	0.66	0.03	217.6	18.6
Зерно	Ns	Площадь (см <sup>2</sup> )	Взвешенное <sup>238</sup> U/ <sup>43</sup> Ca	2 $\sigma$	$P_i \Omega_i$	1 $\sigma$	Трековый возраст, млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
91	5	6.98E-05	4.14E-04	7.61E-05	2.89E-08	5.31E-09	113.9	104.12
92	6	6.11E-05	4.04E-04	7.60E-05	2.47E-08	4.64E-09	159.3	133.71
93	11	7.35E-05	3.76E-04	6.96E-05	2.76E-08	5.11E-09	259.0	163.85
94	10	6.49E-05	4.87E-04	9.08E-05	3.16E-08	5.9E-09	206.4	136.46
95	8	5.01E-05	6.18E-04	1.13E-04	3.10E-08	5.67E-09	169.1	123.75
96	12	7.70E-05	3.70E-04	6.90E-05	2.85E-08	5.31E-09	273.4	166.41
97	10	3.71E-05	3.44E-04	6.46E-05	1.28E-08	2.4E-09	500.0	330.74
98	7	9.05E-05	3.49E-04	6.48E-05	3.16E-08	5.86E-09	145.5	113.47
99	6	8.21E-05	2.78E-04	5.23E-05	2.28E-08	4.3E-09	172.1	144.45
100	14	4.10E-05	3.51E-04	6.56E-05	1.44E-08	2.69E-09	616.4	350.33

Примечание.  $N_s$  – количество треков;  $P_i$  – площадь, на которой были подсчитаны треки;  $\Omega_i$  – <sup>238</sup>U/<sup>43</sup>Ca для i зерна;  $\zeta_{ICP}$  – зета фактор; 1 $\sigma$  и 2 $\sigma$  – неопределенности. Объединенный возраст вычислен путем сложения содержания U в нескольких измерениях.  
Note.  $N_s$  – number of tracks;  $P_i$  – the area where the tracks were counted;  $\Omega_i$  – <sup>238</sup>U/<sup>43</sup>Ca for i grain;  $\zeta_{ICP}$  – zeta factor; 1 $\sigma$  and 2 $\sigma$  – uncertainties. Pooled age are calculated by adding together U-content measurements.

**Таблица 3.3.** Результаты трекового датирования апатита массива Маган (образец M0931-3918)  
**Table 3.3.** Results of Apatite Fission-Track dating of Magan pluton (sample M0931-3918)

Образец	Количество зерен	$\Sigma N_s$	$\Sigma P_i \Omega_i$	$2\sigma \Sigma P_i \Omega_i$	$\zeta_{ICP}$	$2s \zeta_{ICP}$	Трековый возраст (объединенный возраст), млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
M0931-3918	32	214	5.83749E-07	2.2E-08	0.66	0.03	238.8	35.8
Зерно	Ns	Площадь (см <sup>2</sup> )	Взвешенное <sup>238</sup> U/ <sup>43</sup> Ca	2 $\sigma$	$P_i \Omega_i$	1 $\sigma$	Трековый возраст, млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
1	5	0.0000869	1.65E-04	3.33E-05	1.44E-08	2.89E-09	226.8	208.2
2	9	0.0001209	2.22E-04	4.4E-05	2.69E-08	5.32E-09	218.5	152.4
3	3	0.0000573	2.50E-04	4.97E-05	1.43E-08	2.85E-09	137.6	161.4
4	3	0.00003687	1.85E-04	3.73E-05	6.83E-09	1.37E-09	285.1	334.4
5	5	0.00005935	2.10E-04	4.22E-05	1.25E-08	2.5E-09	260.4	239.0
6	5	0.00003572	2.55E-04	5.07E-05	9.09E-09	1.81E-09	354.9	325.7
7	5	0.00007443	1.78E-04	3.6E-05	1.32E-08	2.68E-09	245.7	225.6
8	5	0.00009193	2.58E-04	5.12E-05	2.37E-08	4.7E-09	138.6	127.2
9	4	0.0000547	1.79E-04	3.56E-05	9.8E-09	1.95E-09	265.4	270.9
10	7	0.00008775	3.16E-04	6.29E-05	2.78E-08	5.52E-09	165.2	129.3
11	4	0.00005819	2.12E-04	4.24E-05	1.23E-08	2.47E-09	212.0	216.5
12	7	0.00007107	2.35E-04	4.67E-05	1.67E-08	3.32E-09	272.2	213.1
13	11	0.0001248	2.22E-04	4.45E-05	2.77E-08	5.55E-09	258.4	164.7
14	10	0.00009509	1.68E-04	3.39E-05	1.6E-08	3.23E-09	401.6	267.3
15	6	0.0001155	1.93E-04	3.85E-05	2.23E-08	4.45E-09	176.4	148.5
16	5	0.00007974	2.11E-04	4.21E-05	1.69E-08	3.35E-09	193.8	177.9
17	10	0.00007964	2.44E-04	4.85E-05	1.94E-08	3.86E-09	333.0	221.3
18	6	0.0000738	2.11E-04	4.24E-05	1.56E-08	3.13E-09	250.8	211.2
19	4	0.00006551	1.43E-04	2.92E-05	9.39E-09	1.91E-09	276.7	282.7

Таблица 3.3 (продолжение)

Table 3.3 (continued)

Образец	Количество зерен	$\Sigma N_s$	$\Sigma P_i \Omega_i$	$2\sigma \Sigma P_i \Omega_i$	$\zeta_{ICP}$	$2s \zeta_{ICP}$	Трековый возраст (объединенный возраст), млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
M0931-3918	32	214	5.83749E-07	2.2E-08	0.66	0.03	238.8	35.8
Зерно	Ns	Площадь (см <sup>2</sup> )	Взвешенное <sup>238</sup> U/ <sup>43</sup> Ca	2 $\sigma$	$P_i \Omega_i$	1 $\sigma$	Трековый возраст, млн лет	2 $\sigma$ , млн лет
20	11	0.0001427	2.21E-04	4.42E-05	3.15E-08	6.31E-09	227.6	145.0
21	9	0.00008094	1.92E-04	3.88E-05	1.55E-08	3.14E-09	373.7	261.0
22	10	0.0001281	2.50E-04	4.97E-05	3.2E-08	6.37E-09	204.0	135.6
23	6	0.00006736	2.19E-04	4.36E-05	1.48E-08	2.94E-09	264.2	222.4
24	8	0.00008153	2.06E-04	4.12E-05	1.68E-08	3.36E-09	308.2	227.0
25	6	0.0001047	2.56E-04	5.12E-05	2.68E-08	5.36E-09	147.1	123.9
26	9	0.00007865	2.34E-04	4.68E-05	1.84E-08	3.68E-09	316.3	220.6
27	7	0.00007032	2.54E-04	5.08E-05	1.79E-08	3.58E-09	254.9	199.7
28	6	0.00009363	2.04E-04	4.06E-05	1.91E-08	3.8E-09	205.6	173.1
29	5	0.00006677	1.54E-04	3.1E-05	1.03E-08	2.07E-09	315.3	289.5
30	10	0.00005166	5.33E-04	0.000106	2.75E-08	5.48E-09	236.8	157.4
31	9	0.0000552	4.86E-04	9.75E-05	2.68E-08	5.38E-09	218.9	152.8
32	4	0.00006151	1.89E-04	3.78E-05	1.17E-08	2.32E-09	223.9	228.6

Примечание.  $N_s$  – количество треков;  $P_i$  – площадь, на которой были подсчитаны треки;  $\Omega_i$  – <sup>238</sup>U/<sup>43</sup>Ca для i зерна;  $\zeta_{ICP}$  – зета фактор; 1 $\sigma$  и 2 $\sigma$  – неопределенности. Объединенный возраст вычислен путем сложения содержания U в нескольких измерениях.

Note.  $N_s$  – number of tracks;  $P_i$  – the area where the tracks were counted;  $\Omega_i$  – <sup>238</sup>U/<sup>43</sup>Ca for i grain;  $\zeta_{ICP}$  – zeta factor; 1 $\sigma$  and 2 $\sigma$  – uncertainties. Pooled age are calculated by adding together U-content measurements.