

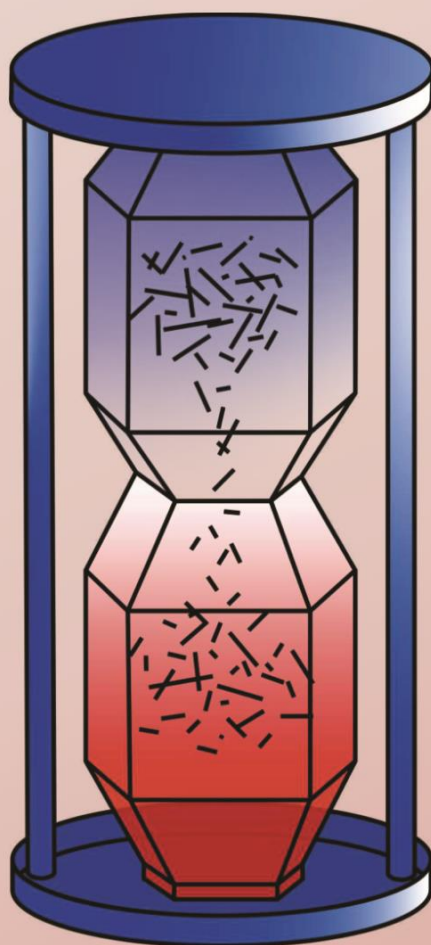


Казанский  
федеральный  
университет

Институт  
геологии и нефтегазовых  
технологий

# ГЕОТЕРМОХРОНОЛОГИЯ: МЕТОДЫ, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## СБОРНИК ТЕЗИСОВ



# #ГТХ2024

15-18 мая 2024, Казань

**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**ГЕОТЕРМОХРОНОЛОГИЯ: МЕТОДЫ,  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Материалы всероссийской конференции с международным участием

Выпуск 1

*15-18 мая 2024*

*Казань*

**УДК 550.93**

**Геотермохронология: методы, фундаментальные и прикладные исследования-2024.**  
Материалы Первой всероссийской конференции с международным участием (15–18 мая 2024 г. Казань, Россия) / ИГиНГТ КФУ, Казань, 2024. – 137 с.

В сборнике представлены труды Первой Всероссийской конференции с международным участием «Геотермохронология: методы, фундаментальные и прикладные исследования»

Издается в авторской редакции

Ответственный редактор:  
Нургалиев Д.К.

Технические редакторы:  
Зиятдинова Д.И.  
Куликова А.В.

Материалы опубликованы при поддержке государственной программы создания и развития научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты» на 2020-2025 годы

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Багдасарян Т.Э., Веселовский Р.В., Чистякова А.В.</i> Трековый анализ апатита (АФТ) как инструмент для реконструкции тектоно-термальной эволюции древних платформ.....	6
<i>Балтыбаев Ш.К., Саватенков В.М., Петракова М.Е.</i> Термохронология раннепротерозойских пород северного приладожья на основе U-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd систем в минералах.....	9
<i>Буслов М.М., Куликова А.В., Травин А.В.</i> Геодинамика формирования Западно-Сибирского бассейна в мезозое: геотермохронология окружающих орогенов и поднятий, U-Pb датирование детритовых цирконов осадочного выполнения .....	13
<i>Васильева Н.А., Якубович О.В., Васильева К.Ю., Карамов Т.И., Хайруллина А.И., Аносова М.О., Котов А.Б., Подольская М.М., Гороховский Б.М.</i> Определение возраста постседиментационных процессов в нефтегазовых бассейнах (U,Th)-He методом по пириту на примере бажендовской свиты, Западная Сибирь .....	17
<i>Веселовский Р.В., Багдасарян Т.Э., Чистякова А.В., Кревсун Д.А.</i> Изученность территории Российской Федерации методами трековой геотермохронологии: база данных трековых определений RUFT и направления дальнейших исследований .....	21
<i>Ветров Е.В.</i> Геологическая интерпретация данных трековой термохронологии апатита на примере Тувинского сегмента Центрально-Азиатского орогенного пояса.....	24
<i>Докукина К.А., Шешуков В.С., Кудряшов Н.М., Дубенский А.С.</i> U-Pb-Th датирование апатита из щелочных массивов Кольской щелочной провинции: Ковдор (фоскорит) и Хибины (апатит-нефелиновая руда).....	27
<i>Докукина К.А., Шешуков В.С., Окина О.И., Дубенский А.С., Каулина Т.В.</i> Возраст и состав титанита северо-западного Беломорья .....	30
<i>Ершова В.Б., Прокопьев А.В., Курапов М.Ю.</i> (U-Th)/He датирование цирконов и реконструкция позднемезозойских тектонических событий Западной Арктики .....	34
<i>Ефремова У.С., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Иванов А.В., Брянский Н.В.</i> U-Pb (LA-ICP-MS) анализ детритового циркона для разделения раннепротерозойских метаморфических толщ: на примере сарминской серии Аkitканского орогенного пояса (юг Сибирского кратона).....	37
<i>Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Резницкий Л.З., Брянский Н.В., Каримов А.А., Мальцев А.С., Ерофеева К.Г., Дубенский А.С., Малышев С.В., Семенова Л.П.</i> Термальная история Слюдянского кристаллического комплекса (Южное Прибайкалье).....	42
<i>Каримов А.А., Чубаров В.М., Мальцев А.С., Брянский Н.В., Скузоватов С.Ю., Жиличева А.Н., Иванов А.В.</i> Анализ прессованных порошковых таблеток (пеллеты) методом LA-ICP-MS – первый опыт .....	43

<i>Коробкин В.В., Чакликов А.Е., Тулемисова Ж.С., Саматов И.Б.</i> Способ количественного определения вторичного кальцита в карбонатных образованиях по данным термического анализа.....	46
<i>Красильников П.А., Куликова А.В., Нургалиев Д.К.</i> Термотектоническая эволюция центральной части волго-уральской антеклизы по результатам трекового анализа апатита .....	50
<i>Кудряшов Н.М., Калинин А.А., Удоратина О.В., Кунаккузин Е.Л.</i> Оценка температуры кристаллизации редкометалльных (Li, Cs) пегматитов месторождения Васин-Мыльк на основе насыщения расплава цирконием и термометрии циркона (Кольский регион) .....	53
<i>Куликова К.В., Куликова А.В., Удоратина О.В.</i> Флогопитовый эклогит Марун-Кеу Полярного Урала: состав и возраст .....	57
<i>Курапов М.Ю., Ершова В.Б., Прокопьев А.В., Стокли Д.</i> Реконструкция мезозойской тектонической истории Таймыро-Североземельской складчатой области на основании (U-Th)/He датирования цирконов.....	61
<i>Латышев А.В., Хотылев А.О., Хубанов В.Б., Панченко И.В., Куликов П.Ю., Смирнова М.Е.</i> Новые данные о возрасте образований доюрского комплекса Западно-Сибирской плиты по результатам U-Pb датирования детритовых цирконов .....	63
<i>Малышев С. В., Красова М. А., Савельев А. Д., Худолей А. К., Брянский Н. В., Каримов А. А., Иванов А. В.</i> Низкотемпературная термохронология гранитов среднего течения р. Индигирка по результатам трекового датирования апатита (АФТ) .....	66
<i>Мальцев А.С., Иванов А.В., Жиличева А.Н., Каримов А.А.</i> Апатит Слюдянки как потенциальный стандарт для калибровки LA-ICP-MS .....	69
<i>Миннебаев К.Р., Куликова А.В., Нургалиев Д.К., Семенова Д.В., Котлер П.Д.</i> Данные по U-Pb датированию детритовых цирконов из терригенных отложений Южно-Татарского свода.....	71
<i>Мотова З.Л., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Брянский Н.В., Хубанов В.Б.</i> Эволюция юга сибиря по результатам U-Pb LA-ICP-MS исследований детритовых цирконов из пород мотской серии позднего венда – раннего кембрия .....	77
<i>Пазухина А.А., Малышев С.В., Худолей А.К., Брянский Н.В., Каримов А.А., Ефремова У.С.</i> Низкотемпературная термохронология по апатиту из форланда Южного Верхоянья .....	81
<i>Петракова М.Е., Балтыбаев Ш.К.</i> Термохронология гранулитового комплекса Северного Приладожья и стадийность образования пегматитов .....	85
<i>Ползуненков Г.О., Акинин В.В.</i> Термохронология монцонитоидов Велиткенайского комплекса (Арктическая Чукотка).....	90
<i>Прокопьев А.В., Ершова В.Б., Васильев Д.А., Тимофеев В.Ф., Стокли Д.</i> (U-Th)/He геотермохронология центральной части Верхояно-Колымской складчатой области .....	92

<i>Семенова Л. П., Малышев С. В., Каримов А. А., Брянский Н. В., Ефремова У. С., Аленичева А.А., Юрченко Ю.Ю.</i> Первые трековые данные по апатиту мезозойских магматических комплексов Северного Приохотья.....	96
<i>Скузоватов С.Ю., Скобленко А.В., Везине А.</i> IN-SITU LA-ICP-MS/MS Rb-Sr исследования высокобарических пород: роль метасоматоза, деформаций и ограничения термохронологических построений.....	100
<i>Соболев И.Д., Викентьев И.В., Свечеревский А.Дж., Травин А.В.</i> Первые результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования серицита из березитизированных вулканитов рудопроявления Полярная надежда, Полярный Урал.....	104
<i>Соколова Л.А., Лейбгам П.Н., Якубович О.В., Черных А.И., Наумов Е.А., Аносова М.О.</i> Возраст эпитеpmальной минерализации каларского рудного поля (Горная шория) по результатам (U-Th)-He датирования пирита.....	106
<i>Соловьев А.В.</i> Применение методов геотермохронологии для количественных оценок скоростей тектонических процессов.....	110
<i>Травин А.В., Мурзинцев Н.Г., Буслов М.М.</i> Термохронология гранитоидных батолитов .....	114
<i>Хромых С.В., Семенова Д.В., Ильичева И.А.</i> Этапы интрузивного магматизма Рудного Алтая	119
<i>Хубанов В.Б., Хубанова А.М., Щербаков Ю.Д.</i> Петрохронология детритных цирконов: к оценке мощности позднепалеозойской коры центральной части Баргузинской гранитоидной провинции.....	123
<i>Чистякова А.В., Веселовский Р.В.</i> Опыт применения рамановского «датирования» для обломочного циркона из пермо-триасового осадочного комплекса Русской плиты .....	126
<i>Юдин Д.Е., Филимонов А.В., Хубанов В.Б., Сизов А.В., Санжиев Г.Д., Хубанова А.М., Назихина Н.С.</i> Детритовая хронология угленосных и «динозавровых» горизонтов гусиноозерской серии (Западное Забайкалье) .....	128
<i>Юдин Д.С., Алифирова Т.А., Шарыгин И.С., Васькова И.Ю.</i> $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование джерфишерита .....	131
<i>Якубович О.В.</i> Геохронология и термохронология по радиогенному гелию: методические аспекты.....	133
<i>Jepson G., Carrapa B., Jones S., Kohn B. P., Gleadow A. J. W., George S. W. M., Howlett C. J., Gallagher K., Frickenstein A., Hunt L. E., Gehrels G., Triantafyllou A.</i> Monazite fission-track thermochronology as a possible proxy for low magnitude erosion.....	136

## ТРЕКОВЫЙ АНАЛИЗ АПАТИТА (АФТ) КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕКТОНО-ТЕРМАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДРЕВНИХ ПЛАТФОРМ

Т.Э. Багдасарян<sup>1,2</sup>, Р.В. Веселовский<sup>1,2</sup>, А.В. Чистякова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Трековый анализ апатита (Apatite Fission-Track, AFT) – метод низкотемпературной термохронологии, который активно используется для решения множества геологических задач: от реконструкции термальной истории отдельных магматических тел до реконструкции термальной истории осадочных бассейнов и крупных блоков земной коры.

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 [3, 9] до ~330-350°C для циркона [8, 10]. Отличительной особенностью метода трекового анализа является явление частичного отжига треков (температурный интервал в пределах которого треки укорачиваются – «отжигаются»), что позволяет оценить скорость охлаждения в температурном интервале зоны частичного отжига треков (Partial Annealing Zone, PAZ), которая для апатита составляет 60-120°C [9]. Таким образом трековый анализ апатита позволяет оценить не только время с момента остывания апатита ниже 120°C, но и реконструировать скорость и в некоторых случаях количество событий остывания.

Термохронологические исследования, направленные на восстановление термальной истории крупных блоков земной коры, и, в частности, древних платформ, имеют широкое распространение в мире и в первую очередь основаны на использовании трекового анализа апатита и циркона. Низкотемпературные термохронологические исследования могут существенно дополнить представления о тектоно-термальной эволюции древних платформ и их щитов, в пределах которых расположено немало месторождений полезных ископаемых.

Пространственное распределение результатов трековых исследований по континентам крайне неравномерно. Так, для Австралии, которая имеет право претендовать на звание наиболее детально изученного трековым методом континента, имеется более трех тысяч

трековых определений, которые позволили оценить скорости охлаждения древних кратонов Пилбара и Йилгарн и выделить относительно молодые этапы тектоно-термальной эволюции её восточных регионов [4]. Для Северо-Американской платформы, в пределах США, на сегодняшний день имеется около 2000 трековых определений и многочисленные исследования реконструкции термальной истории, позволяющие выделить этапы погружения и последующего воздымания древней платформы в фанерозое [7]. Многочисленные термохронологические исследования с использованием трекового анализа апатита проведены для Фенноскандии в пределах Норвегии, Швеции и Финляндии [5, 6]. За последние годы нами, в Центре коллективного пользования Института физики Земли РАН, был проведен трековый анализ апатита разновозрастных магматических и метаморфических пород в пределах кольской части Фенноскандинавского щита Восточно-Европейской платформы [11], а также из интрузивных комплексов Сибирской трапповой провинции и пород кровли кристаллического фундамента Сибирской платформы в районе Непско-Ботуобинской антеклизы [1, 2]. В нашем докладе мы представим и обсудим имеющиеся низкотемпературные термохронологические данные по Сибирской и Восточно-Европейской древним платформам, а также сформулируем перспективы исследований в этом направлении.

#### Литература

1. Багдасарян Т.Э., А. В. Гайдук, В. Б. Хубанов, А. В. Латышев, Р. В. Веселовский. Первые результаты трекового датирования апатита с применением LA-ICP-MS из кровли фундамента Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская антеклиза) // Доклады российской академии наук. Наука о Земле. 2023. Т. 510. № 2. С. 161–165.
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.
3. Gleadow A.J.W. Fission-track dating methods: what are the real alternatives? // Nuclear Tracks. 1981. V. 5. N. 1-2. P. 3–14.
4. Gleadow A.J.W., Kohn B.P., Brown R.W., O'Sullivan P.B., Raza A. Fission track thermotectonic imaging of the Australian continent // Tectonophysics. V. 349. Issues 1–4. 2002. P. 5-21. ISSN 0040-1951.



5. Green, P.F.; Japsen, P.; Bonow, J.M.; Chalmers, J.A.; Duddy, I.R.; Kukkonen, I.T. The Post-Caledonian Thermo-Tectonic Evolution of Fennoscandia. *Gondwana Research* 2022, 107, 201–234, doi:10.1016/j.gr.2022.03.007
6. Hendrik, B.W.H., Andriessen P.A.M., Huigen Y.D., Leighton C., Redfield T.F., Murrell G.R., Gallagher K., Nielsen S.B. A fission track data compilation for Fennoscandia // *Nor. Geol. Tidsskr.* 2007. 87. P. 143–155.
7. Hillenbrand, I.W., Thomson, K.D., Morgan, L.E., Gilmer, A.K., Engle, Z.T., Dombrowski, A., Warrell, K.F., Malone, J., Souders, A.K., Hudson, A.M., Cosca, M.A., Paces, J.B., Thompson, R.A., and Park, A.J., 2023, USGS Geochron: A Database of Geochronological and Thermochronological Dates and Data (ver. 2.0, September 2023): U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/P9RZNPIF>.
8. Karl M., Glasmacher U. A., Kollenz S., Franco-Magalhaes A. O., Stockli D. F., Hackspacher P. C. Evolution of the South Atlantic passive continental margin in southern Brazil derived from zircon and apatite (U–Th–Sm)/He and fission-track data // *Tectonophysics*. 2013. 604. P 224-244.
9. Ketcham R.A., Donelick R.A., Carlson W.D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geologic time scales // *American Mineralogist*. 1999. V. 84. P. 1235-1255.
10. Kohn B.P., Ketcham R.A., Vermeesch P., Boone S.C., Hasebe N., Chew D., Sobel E.R. Interpreting and reporting fission-track chronological data // *Geological Society of America Bulletin*. 2024.
11. 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. – P. 1095.

## ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ ПОРОД СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ НА ОСНОВЕ U-Pb, Rb-Sr И Sm-Nd СИСТЕМ В МИНЕРАЛАХ

Ш.К. Балтыбаев<sup>1,2</sup>, В.М. Саватенков<sup>1,2</sup>, М.Е. Петракова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет – Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

На территории Северного Приладожья сочленяются породы юго-восточного фрагмента раннепротерозойского Свекофеннского подвижного пояса и южного борта эпиархейского Карельского кратона. Они рассматриваются в составе двух доменов – Северного и Южного, которые разделены Мейерским надвигом [1, 2, 5]. По U-Pb изотопным данным в Северном домене активные тектоно-термальные события происходили в интервале 1.80–1.79 млрд лет назад, а в Южном домене пик эндогенной плутоно-метаморфической активности был 1.88–1.86 млрд лет назад [4].

В данном сообщении мы концентрируемся на оценке термальной истории пород Северного домена, изотопные системы минералов которого позволяют судить о режиме остывания метаморфических комплексов юго-западной окраины эпиархейского Карельского кратона.

На пике метаморфизма пород Северного домена температура достигала 650–700 °C в зоне амфиболитовой фации и 400–550 °C в зоне низкотемпературного метаморфизма при низком и умеренно низком режиме давления [2]. Наиболее древние значения Sm-Nd возраста титанитов и амфиболов (1.83–1.78 млрд лет) из пород Северного домена совпадают с U-Pb возрастом монацита (1.80–1.79 млрд лет), что является свидетельством быстрого остывания пород Северного домена при скорости около 10 °C/млн лет в начале регрессивного тренда (рис. 1).

Для оценки температурной истории пород на основе изучения изотопных методов в минералах крайне важны достоверные сведения о температуре закрытия изотопных систем [3]. Но на сегодняшний день отсутствует полное решение этого вопроса. Поэтому, например, температуры закрытия ( $T_{\text{зак}}$ ) K-Ar, Sm-Nd и Rb-Sr изотопных систем в амфиболах мы принимаем в достаточно широком интервале: от 500 °C до 700 °C (в среднем, около 600 °C). Отметим, что в этом диапазоне лежат оценки температур метаморфизма изученных пород.

Значения реального или кажущегося возраста амфиболов находятся в диапазоне 1.83–1.67 млрд лет (рис. 1).

Rb-Sr возраст биотита указывает на закрытие его изотопной системы 1.78–1.57 млрд лет назад. Принимая температуру закрытия Rb-Sr системы в биотите, превышающей 300–400 °C [6 и ссылки в ней], можно определить место полученным результатам на кривой остывания пород на диаграмме температура против возраста (рис. 1). Заметный разброс этих возрастов может быть обусловлен неодинаковой скоростью остывания при вертикальных перемещениях блоков в разных зонах метаморфизма пород Северного домена. Альтернативой этому предположению может быть модель повторного прогрева пород до температур, превышающих температуру устойчивости Rb-Sr системы в биотите. Однако последнее, хотя и не исключается, но пока не подтверждено минералого-петрографическими наблюдениями.

С учетом вышесказанного, T-t тренд остывания пород характеризует температурный диапазон от пиковых значений температур 650–700 °C на момент времени ~ 1.80 млрд лет назад (U-Pb возраст монацитов, Sm-Nd возраст титанитов и амфиболов) до 300–400 °C на рубеже 1.74–1.57 млрд лет назад (Rb-Sr возраст биотитов).

Таким образом, полученный T-t тренд для пород Северного домена показывает, что снижение температуры пород до этапа формирования гранитов-рапакиви (1.53 млрд лет назад) во внутриплитных условиях было неодинаковым в отдельных блоках Северного домена. Скорость остывания пород была 10–4 °C/млн лет в начале эксгумации и снижалась до 2–1 °C/млн лет в конце. Температурные вариации могут быть обусловлены вертикальными тектоническими перемещениями [7] и сопряженной флюидно-термальной активностью в локальных ослабленных тектонических зонах. Одной из причин разной скорости остывания пород могло быть внедрение магматических тел или наложенные флюидно-термальные процессы в прикратонной зоне, вызвавшие переуравновешивание изотопных систем. Ведущую роль при формировании структурного облика метаморфических и магматических комплексов региона играла покровно-надвиговая тектоника, сменившаяся дифференциальными вертикально-блоковыми перемещениями, которые были вызваны посторогенным растяжением во время коллапса Свекофеннского подвижного пояса и позднейшим рифтогенезом.

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00106).

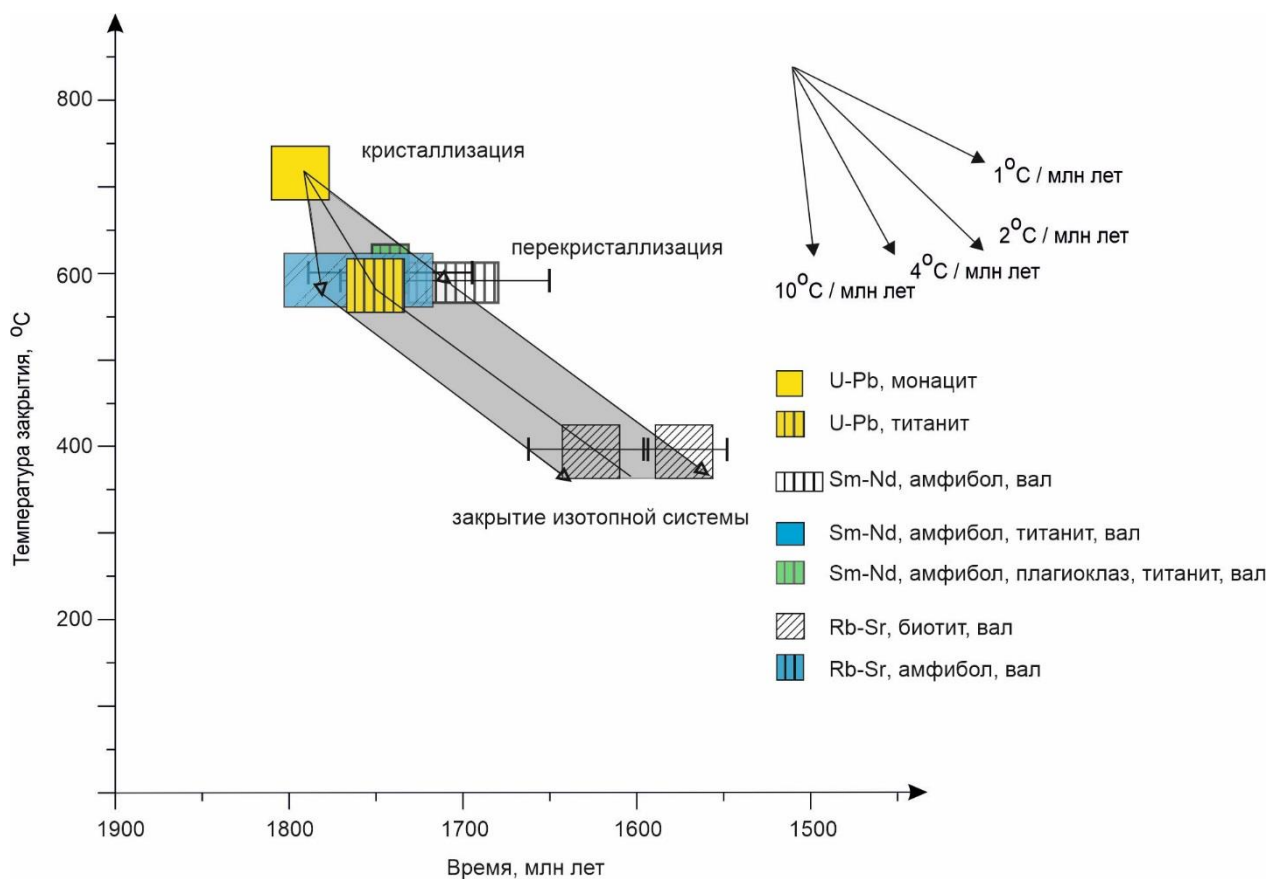


Рис. 1. Температурная кривая остывания пород Северного домена Приладожья. Справа показаны линии термических градиентов, рассчитанные для разных скоростей остывания.

### Литература

1. Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В., Шульдинер В. И. Мейерский надвиг – главный элемент строения сутуры на границе Карельского кратона и Свектофеннского пояса в Приладожье, Балтийский щит // Доклады АН. Науки о Земле, 1996. Т. 348. № 3. С. 353–356.
2. Балтыбаев Ш.К., Левченков О.А., Левский Л.К. Свектофеннский пояс Фенноскандии: пространственно-временная корреляция раннепротерозойских эндогенных процессов. СПб.: Наука, 2009. 328 с.
3. Саватенков В.М., Морозова И.М., Левский Л.К. Поведение изотопных систем (Sm-Nd, Rb-Sr, K-Ar, U-Pb) при щелочном метасоматозе // Геохимия, 2004. № 10. С. 1027–1049.
4. Baltybaev Sh. K., Levchenkov O.A., Berezhnaya N.G., Levskij L. K., Makeev A. F., Jakovleva S. Z. Time and duration of Svecofennian plutono-metamorphic activity in the southeast of the Baltic shield (Ladoga region) // Petrology, 2004. 12(4). P. 374–393.

5. Baltybaev, S.K., Vivdich, E.S. Evolution of the Meyeri Thrust Zone of the Northern Ladoga Region (Republic of Karelia, Northwest Russia): PT Conditions for the Formation of Mineral Parageneses and Geodynamic Reconstructions // *Geotectonics*, 2021. V. 55. P. 502–515.

6. Jenkin G., Ellam R., Rogers G., Stuart F. An investigation of closure temperature of the biotite Rb-Sr system: The important of cation exchange // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001. V. 65 (7). P. 1141–1160.

7. Morozov Yu. A., Yudin D. S., Travin A. V., Matveev M. A., Kulakovskiy A. L., Smulskaya A. I. The First Discovery of Pseudotachylytes in the Paleoproterozoic Ladoga Zonal Metamorphosed Complex of Fennoscandia and Their  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating // *Doklady Earth Sciences*, 2020. V. 493 (1). P. 485–489.

## ГЕОДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО БАСЕЙНА В МЕЗОЗОЕ: ГЕОТЕРМОХРОНОЛОГИЯ ОКРУЖАЮЩИХ ОРОГЕНОВ И ПОДНЯТИЙ, U-Pb ДАТИРОВАНИЕ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ ОСАДОЧНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

М.М.Буслов<sup>1</sup>, А.В.Куликова<sup>1,2</sup>, А.В.Травин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Изотопные системы в различных минералах характеризуются разными значениями температуры закрытия, которые отображаются в датировках и указывают на глубину положения породы в различные периоды вывода к поверхности [1]. Температуры закрытия U-Pb изотопной системы в цирконе около 850°C, K/Ar изотопной системы в амфиболе находится около 550°C, в биотите и мусковите около 330 °C, полевоом шпате/плагиоклазе - 250°C, трековой системы в апатите около 110° C. Таким образом, U-Pb датирование определяет возраст формирования породы, Ar/Ar датировки по амфиболам, слюдам и полевым шпатам будут фиксировать положение породы (с учетом изменения градиента температур с глубиной 25-30°/км) на глубинах от 20 до 8 км, начиная с 4-3 км до вывода к поверхности термальная эволюция породы характеризуется методом трекового датирования апатита (AFT). Термическая история пород просчитывается специализированной программой с построением графиков, отображающих тренд изменения температурного режима породы во времени (t-T). Принимая за основу градиент изменения температур с глубиной (25-30°/км), по полученному t-T-тренду можно оценить мощность и скорость денудации.

Для решения вопросов палеогеографической, тектонической и седиментационной эволюции бассейнов в мировой практике используется анализ U-Pb возрастных спектров детритовых цирконов из дельтовых и шельфовых отложений. Путем корреляции геохронологических и стратиграфических данных по осадочным бассейнам в корреляции с данными трекового датирования пород окружающих горных систем возможно уверенно выявить пути рассеивания осадочного материала, определить области их сноса, а также оценить объемы осадочного материала (коллекторов), поступающего в бассейн седиментации в различные промежутки времени.

В настоящее время горные системы и поднятия, окружающие Западно-Сибирский бассейн достаточно хорошо изучены методом AFT. Моделирование термальной истории пород показало [2-8 и др.], что на Тянь-Шане пики горообразования проявились в периоды ~ 200-130 млн лет и в последние 20 млн лет; на Урале ~ 300-250 млн лет и последние 15 млн

лет; в Алтае-Саянах, Туве, Забайкалье ~ 165-80 млн лет и в последние 7-5 млн лет; Сибирский кратон испытала поднятие в периоды 230-180, 150–120 и 65-60 млн лет. Субвертикальные мезозойские t-T-тренды охлаждения (150-60°C) пород свидетельствуют по меньшей мере до 2-3 км денудации пород на территории Северной Евразии в юре (Тянь-Шань, Сибирский кратон) и поздней юре- мелу (Алтае-Саяны, Тува, Северная Монголия, Западное Забайкалье).

В среднем триасе-юре океаническая плита Палео-Тетис, включающая докембрийские тектонические блоки, погружалась с юга под Евразию, что привело к формированию коллизионного орогена [9 и др.]. Считается, что столкновение континентального блока Квингтанг (Qiangtang) с Евразией вызвало реактивацию разломов и поднятие Тянь-Шаня, расположенного вблизи зоны столкновения. В мезозое Евразия претерпела интенсивную тектоническую реактивацию (начавшуюся около 160 млн. лет назад), связанную с закрытием Монголо-Охотского океанического бассейна и последующей коллизией с Северо-Китайским континентом. В результате был сформирован мезозойский коллизионный Монголо-Охотский пояс, который протягивается на расстояние свыше 3000 км от Центральной Монголии до Охотского моря. Денудация мезозойского орогена привела к образованию обломочного материала, который речными системами [10-12] выносился через транзитные зоны (современные Кузнецкий, Канско-Ачинский и Иркутский бассейны), в шельфовую область в том числе крупнейшего в мире Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. U-Pb датирование детритовых цирконов указанных бассейнов хорошо коррелируется с возрастными позднепалеозойских магматических пород, слагающих огромные по размерам гранитоидные массивы Западного Забайкалья и Северной Монголии (Байкало-Витимский, Хангайский и Хэнтэйский), суммарной площадью выходов свыше 300 000 км<sup>2</sup>.

Для Западно-Сибирского бассейна были изучены детритовые цирконы из керна скважинного материала Северо-Контилорского, Тевлинско-Руссинского, Мишаевского, Северо-Егурьяхского и Нонг-Еганского месторождений Западной Сибири. Были исследованы песчаники из верхнеюрских отложений, подстилающих нефтегазоносную баженовскую свиту, собственно породы баженовской свиты, породы «аномальных разрезов» баженовской свиты или подачимовской толщи, и породы нижней части ачимовского комплекса. Они имеют ярко выраженный возрастной пик на 300 и 259 млн лет и менее проявленный на 250 млн лет, что характерно для возрастов гранитоидных массивов Западного Забайкалья и Северной Монголии. В породах подачимовской толщи и ачимовского комплекса появляется ярко выраженный пик на 468-482 млн лет, что может свидетельствовать о сносе материала в

результате разрушения раннепалеозойских гранитоидов Алтае-Саянской складчатой области. Древние пики возрастов цирконов в 1800 и 2300-2600 млн лет указывают, что снос в бассейн происходил также с Сибирского кратона. Близкие пики, с увеличением доли докембрийский возрастов детритовых цирконов, характерны для меловых осадков Хатангского прогиба и Карского моря, что свидетельствует о мощном и преобладающем поступлении обломочного материала с Алтае-Саяна, Северной Монголии и Забайкалья, из регионов Монголо-Охотского орогена.

Таким образом, геологические данные и тектоно-термический анализ пород показывают, что Северная Евразия перенесла значительную мезозойскую активизацию, связанную с формированием коллизионных орогенов на южной окраине, как результат коллизии крупных докембрийских континентальных блоков в результате закрытия океана Палео-Тетис и Монголо-Охотского океана. В течение юры-раннего мела (200 – 130 млн. лет) основным источником сноса в Западно-Сибирский бассейн был Тянь-Шаньский ороген, а в верхней юре-мелу интенсивно размывался Монголо-Охотский ороген. Вероятно, что коллизия Северо-Китайского и Сибирского континентов, не только сформировала Монголо-Охотский ороген, но повлияла на его подъем и разрушение в раннем мелу (150-120 млн. лет). В меньшей мере размывался Урал, для центральной части которого в мезозое зафиксирован период тектонического спокойствия. Разрушение орогенов и поднятий в мезозое привело к заполнению крупнейшего в мире Западно-Сибирского бассейна с постепенным смещением береговой линии на север-северо-запад.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ (геохронологические исследования, грант 22-17-00038)

#### Литература

1. Травин А.В. Термохронология раннепалеозойских коллизионных, субдукционно-коллизионных структур Центральной Азии // Геология и геофизик. 2016. № 57 (3). С.553-574.
2. De Grave, J., De Pelsmaeker, E., Zhimulev, F.I., Glorie, S., Buslov, M.M., Van den haute, P. Meso-Cenozoic building of the northern Central Asian Orogenic Belt: thermotectonic history of the Tuva region // Tectonophysics. 2014. V. 621. P. 445-9.
3. Glorie, S., De Grave, J. Exhuming the Meso–Cenozoic Kyrgyz Tianshan and Siberian Altai-Sayan: a review based on low-temperature thermochronology // Geoscience Frontiers. 2016. V. 7. P.155-170.



4. Glorie, S., De Grave, J., Zhimulev, F.I., et al. Structural control on Meso-Cenozoic tectonic reactivation and denudation in the Siberian Altai: insights from multi-method thermochronometry// *Tectonophysics*.2012. V.544-545. P. 75-92.
5. Jolivet, M., Ritz, J.-F, Vassallo, R., Larroque, C, Braucher, R, Todbileg, M., Chauvet, A, Sue, C, Arnaud, N., De Vicente, R, Arzhanikova, A.,Arzhanikov, S. Mongolian summits: an uplifted, flat, old but still preserved erosion surface// *Geology*. 2007.V. 35. P. 871-874.
6. Bagdasaryan T.E., Thomson S.N., Latyshev A.V ,et al. Thermal history of the Siberian Traps Large Igneous Province revealed by new thermochronology data from intrusions // *Tectonophysics*. 2022. V. 836. P.229-385.
7. 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.
8. Травин А.В., Буслов М.М., Бишаев Ю.А., Цыганков А.А., Михеев Е.И. Тектонотермическая эволюция Забайкалья в позднем палеозое-кайнозое: термохронология Ангаро-Витимского гранитойдного батолита//*Геология и геофизика*, 2023. Т.64 (9). С.1303-1317.
9. Golonka, J. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Meso- zoic and Cenozoic// *Tectonophysics*. 2004. V.381. P.235–273.
10. Davies C., Allen M., Buslov M., Safonova I. Deposition in the Kuznetsk Basin, Siberia: insights into the Permian-Triassic transition and the Mesozoic evolution of Central Asia // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2010. V. 295. P. 307–322.
11. Le Heron D.P., Buslov M.M., Davies C., Richards K., Safonova I.Yu. Evolution of Mesozoic fluvial systems along the SE flank of the West Siberian Basin, Russia // *Sedimentary Geology*. 2008. V. 208. P. 45–60.
12. Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Михеева Е.А., и др. Источник сноса и палеогеографические условия формирования юрских континентальных отложений на юге Сибирской платформы (по SM-ND- и U-Pb данным) // Доклады Академии наук. 2018. Т. 480. № 6. С. 688-692.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА ПОСТСЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЕГАЗОВЫХ БАССЕЙНАХ (U,Th)-He МЕТОДОМ ПО ПИРИТУ НА ПРИМЕРЕ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ

Н.А. Васильева<sup>1,2</sup>, О.В. Якубович<sup>1,2</sup>, К.Ю. Васильева<sup>1</sup>, Т.И. Карамов<sup>3</sup>, А.И. Хайруллина<sup>3</sup>, М.О. Аносова<sup>4</sup>, А.Б. Котов<sup>2</sup>, М.М. Подольская<sup>4</sup>, Б.М. Гороховский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ИГГД РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Сколковский институт науки и техники, Москва, Россия

<sup>4</sup> ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

В настоящее время бассейновое моделирование основывается, главным образом, на геологических наблюдениях о мощности перекрывающих отложений, наличии перерывов в осадконакоплении и предположениях о палеогеотермическом градиенте [3]. Определение возраста постседиментационных процессов в осадочных бассейнах является сложной изотопно-геохимической задачей ввиду отсутствия надежных минералов-геохронометров. Прямое датирование по углеводородам или связанным с ними аутигенным минералам является важной научно-практической задачей для анализа нефтегазовых систем и разведки углеводородов.

Пирит – повсеместно распространенный минерал в нефтегазоносных бассейнах, который обычно генетически связан с образованием, миграцией, накоплением или разрушением углеводородов [6].

Исследования, направленные на понимание поведения радиогенного гелия в пирите, показали высокую сохранность гелия, что может способствовать его использованию в качестве (U,Th)-He минерала-геохронометра [12]. Первые результаты датирования пирита (U,Th)-He методом из колчеданного месторождения Узельга и метасоматитов месторождения Новогоднее Монто были успешными [8-10]. Это подтверждает перспективность определения He-возраста различных процессов по пириту.

В данном исследовании мы применили (U,Th)-He метод для прямого датирования аутигенного пирита из пород баженовской свиты, Западно-Сибирский нефтегазоносный мегабассейн, Россия.

Баженовский горизонт Западной Сибири является основной и наиболее перспективной формацией для разработки нетрадиционных запасов нефти [5, 16]. Его возраст был

определен как большая часть титона (волжского) и нижнего берриаса [1] ~150–143 млн лет [11].

Седиментация исследуемых отложений длилась более 8 млн лет при переходе от юрского периода до мела и соответствовала трансгрессии морского бассейна площадью более 2 миллионов км<sup>2</sup>. Породы баженовской свиты представлены богатыми органикой кремнистыми, карбонатными и глинистыми аргиллитами, которые соответствуют верхнеюрско-нижнемеловым отложениям [4]. Пирит встречается повсеместно и присутствует в виде маломощных прослоев, конкреций, стяжений. Его концентрация, как правило, коррелируется с содержанием в породах органического вещества [5]. Отложения баженовской формации разбросаны по всей территории Западной Сибири мощностью от 10 до 60 м, в среднем 30 м; глубины залегания кровли свиты увеличиваются на север и составляют минимум 600 м и максимум 3800 м [4].

Область исследования расположена на севере Западно-Сибирского бассейна, в районе полуострова Гыдан и на востоке, во Фроловской мегавпадине. Пирит из Фроловской мегавпадины был выделен из фрагментов керна скважин Тун-28-15 (глубина отбора 2705 м) и Г-2034-22 (глубина отбора 2868 м); глубина отбора пирита из района Гыдан составляет около 3500 м.

Состав минеральных включений в пирите был изучен методом сканирующей электронной микроскопии. Эти исследования были направлены на выявление формы нахождения в них урана и тория. Исследование проводилось на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, оснащенный детектором AzTec Energy 350, работающем в режиме энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, в ресурсном центре «Геомодель» Научного парка СПбГУ.

Концентрация радиогенного гелия определялась на магнито-секторном масс-спектрометрическом комплексе МСУ-Г-01-М в ИГД РАН. Содержание U и Th измерялось методом изотопного разбавления с использованием комбинированного трассера <sup>230</sup>Th–<sup>235</sup>U. Соотношения изотопов <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U и <sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th измерялись в ГЕОХИ РАН на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ELEMENT XR [9].

Анализ зерен пирита из Фроловской мегавпадины с помощью сканирующего электронного микроскопа показал наличие в нем включений кварца, альбита, кальцита, доломита, сфалерита, рутила и апатита микронного размера.

Для датирования (U,Th)-Не методом выбирались зерна пирита и их фрагмент размером 400–1000 мкм.

Пирит из карбонатов Фроловской мегавпадины имеет значения возрастов в примерном промежутке от 81 до 99 млн лет (n=6) [13]. Значение возраста одного зерна пирита из аргиллитов этой же территории составляет  $99 \pm 4$  млн лет. По результатам датирования пирита из Гыдана, устанавливаются два разновозрастных эпизода его образования в диапазонах от порядка 91 до 106 млн лет (n=4), и около 117–124 млн лет (n=2).

Геологическая интерпретация результатов (U,Th)-Не-датирования затруднена в связи с тем, что данных о связи образования этого пирита с каким-либо из этапов созревания и/или миграции углеводородов недостаточно. Можно лишь ограничиться общими соображениями о стадии преобразования осадков по мощности перекрывающих отложений – МК1 и сузить временной диапазон событий в нефтегазоносной системе по полученным данным прямого датирования. Альтернативно образование пирита можно связать с тектонической активизацией на территории осадочного бассейна.

На примере эпигенетического пирита баженовской свиты показана принципиальная возможность (U,Th)-Не датирования аутигенного пирита. Результаты (U,Th)-Не датирования эпигенетического пирита (n=6) из карбонатов баженовской свиты в пределах Фроловской мегавпадины указывают на его формирование в сантон-сеноманское время ( $90 \pm 8$  млн лет). Значение возраста одного зерна пирита из аргиллитов составляет  $99 \pm 4$  млн лет (сеноман-альб). По результатам датирования пирита из Гыдана устанавливаются два разновозрастных эпизода его образования в диапазонах от порядка 91 до 106 млн лет (n=4) (турон-альб), и около 117–124 млн лет (n=2) (апт-баррем). При этом для образцов из Гыдана наблюдается корреляции значений возраста с изотопным составом серы в пирите: более древние соответствуют пириту с легким изотопным составом серы (-15 – -20 ‰), в то время, как для молодого пирита характерен тяжелый изотопный состав серы (~ 20 ‰).

Работы выполнены при финансовой поддержке проекта РФФ 22-77-10088

#### Литература

1. Baturin Yu.E., Bochkarev, V.S., Braduchan, Yu.V., et al. Conclusions of the Sixth Interdepartmental Stratigraphic Symposium on the Examination and the Acceptance of the Adjusted Stratigraphic Schemes on Mesozoic Deposits of the West Siberia. Novosibirsk (Russia), 2004, 113.

2. EIA World Shale Resource Assessments. Eia  
[<http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>]. 2015 - 1.
3. Hantschel T. Kauerauf A.I. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. 2009.
4. Kontorovich A.E. и др. Classification of Rocks of the Bazhenov Formation // Russ. Geol. Geophys. 2016. 57, 1606–1612.
5. Lazar OR Bohacs KM, Macquaker JHS, Schieber J, Demko TM. Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: Nomenclature and description guidelines // J Sediment Res. 2015. 85, 230–46.
6. Li S Wang X-C, Li C-F, Liu K, Wilde SA, Hu S-Y, Gui L, Liu J, Wu L. First Direct Dating of Alteration of Paleo-Oil Pools Using Rubidium-Strontium Pyrite Geochronology // Minerals. 2020 10(7), 606.
7. Ulmishek G.F. Petroleum Geology and Resources of the West Siberian Basin, Russia. 2003.
8. Yakubovich O. Podolskaya M., Vikentyev I., Fokina E., Kotov A. U-Th-He Geochronology of Pyrite from the Uzelga VMS Deposit ( South Urals )— New Perspectives for Direct Dating of the Ore-Forming Processes // Minerals. 2020. 10(629), 1-20.
9. Yakubovich O. Vikentyev I., Ivanova E., Podolskaya M., Sobolev I., Tyukova E., Kotov A. U-Th-He Geochronology of Pyrite from Alteration of the Au-Fe-Skarn Novogodnee-Monto Deposit (Polar Urals, Russia) — The Next Step in the Development of a New Approach for Direct Dating of Ore-Forming Processes // Geosciences. 2021. 11(10), 408.
10. Yakubovich O.V. Vikentyev I.V., Zarubina O.V., Bryanskiy N.V., Gorokhovskii B.M., Kotov A.B., Dril S.I., Bortnikov N.S. U–Th–He Dating of Pyrite from the Uzelga Copper-Zinc Massive Sulfide Deposit (South Urals, Russia): First Application of a New Geochronometer // Dokl. Earth Sci. 2019. 485, 368–371.
11. Zanin Y.N. Eder V.G., Zamirailova A.G. Composition and Formation Environments of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Black Shale Bazhenov Formation (the Central Part of the West Siberian Basin) // Mar. Pet. Geol. 2008. 25(3), 289–306.
12. Якубович О. В. Гедз, А. М., Викентьев, И. В., Котов, А. Б., & Гороховский, Б. М. Миграция радиогенного гелия в кристаллической решетке сульфидов и возможности их изотопного датирования // Петрология. 2019. 27(1), 1-22.
13. Якубович О.В. Васильева Н.А., Васильева К.Ю., Аносова М.О., Котов А.Б., Подольская М.М., Гороховский Б.М. Первые результаты U–Th/He-датирования эпигенетического пирита из пород баженовской свиты, Западная Сибирь // ДАН. 2023. 513(1), 77–82.

# ИЗУЧЕННОСТЬ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ МЕТОДАМИ ТРЕКОВОЙ ГЕОТЕРМОХРОНОЛОГИИ: БАЗА ДАННЫХ ТРЕКОВЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ RUFT И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Р.В. Веселовский<sup>1,2</sup>, Т.Э. Багдасарян<sup>1,2</sup>, А.В. Чистякова<sup>1,2</sup>, Д.А. Кревсун<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, г. Москва, Россия

Методы определения возраста минералов по следам осколков спонтанного деления ядер урана, к которым относятся трековое датирование апатита (Apatite Fission-Track, AFT), циркона (Zircon Fission-Track, ZFT) и титанита (Titanite Fission-Track, TFT), давно вышли за рамки собственно геохронологии и в последние десятилетия активно используются как геотермохронологический инструмент для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач современной геологии. Самые последние сведения о перечисленных методах и их приложениях в науках о Земле можно найти в публикациях [1, 2].

К 2024 году в мире насчитывается порядка десятка тысяч опубликованных трековых определений, однако, как справедливо отмечено в работе [3], активное развитие и внедрение в геологическую практику методов трекового анализа в мировом научном сообществе пришлось на время коренных изменений в России в 1990-ые годы. Это обстоятельство определило крайне низкую распространенность трековых методов в нашей стране: число трековых лабораторий до сих пор можно сосчитать на пальцах одной руки, а до недавнего времени подавляющее большинство относительно немногочисленных исследований геологических объектов в пределах России методами трекового анализа выполнялось за рубежом. Отметим, что некоторая часть результатов исследований наших соотечественников опубликованы в русскоязычных изданиях и недоступна мировой научной общественности.

В последние годы методы трекового анализа в нашей стране стали активно развиваться: открываются лаборатории и создаются коллективы, в которых реализован полный цикл трекового анализа, а молодые ученые изучают новые объекты в самых разных регионах страны. Тем не менее, изученность территорий РФ методами трекового анализа остается крайне неравномерной, а говоря точнее – фрагментарной. В этой связи оперативный доступ к опубликованным результатам играет значимую роль для формулировки актуальных проблем, постановки задач и стратегического планирования трековых

геотермохронологических исследований в России. В докладе мы представим для обсуждения Базу данных результатов исследований методами трекового анализа территории Российской Федерации, которую мы назвали “RUFT” (от слов “RUssia” и “Fission-Track”), главная цель которой заключается в сборе, накоплении и визуализации пространственного распределения имеющихся трековых определений. Подобные базы данных имеются, например, для территорий Австралии [4] и США [5]: они позволяют быстро и наглядно проанализировать имеющиеся трековые данные для определенной территории или объекта, получить ссылки на первоисточники. Аналогичный функционал реализован и в разрабатываемой нами базе данных “RUFT”.

Фактическую основу базы данных RUFT составляет файл формата MS Excel, структура которого предоставляет пользователю исчерпывающую информацию о конкретном результате трекового анализа. Сортировка и фильтрация данных производится встроенными средствами MS Excel. Визуализация табличных данных выполняется посредством приложения Google Maps, поскольку на данный момент мы не видим необходимости в разработке специального приложения, как это, например, сделано авторами проекта AusGeochem [6].

#### Литература

1. Kohn, B.P., Ketcham, R.A., Vermeesch, P., Boone, S.C., Hasebe, N., Chew, D., Bernet, M., Chung, L., Danišik, M., Gleadow, A.J.W., Sobel, E.R. Interpreting and reporting fission-track chronological data // Geological Society of America Bulletin. 2024. <https://doi.org/10.1130/B37245.1>
2. Malusà, M.G., Fitzgerald, P.G. (Eds.) Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology, Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer International Publishing, Cham. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-89421-8>
3. Соловьев А.В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового и структурного анализа / Труды Геологического института. 2008. 319 с.
4. <https://portal.ga.gov.au/persona/geochronology>
5. Hillenbrand, I.W., Thomson, K.D., Morgan, L.E., Gilmer, A.K., Engle, Z.T., Dombrowski, A., Warrell, K.F., Malone, J., Souders, A.K., Hudson, A.M., Cosca, M.A., Paces, J.B., Thompson, R.A., and Park, A.J. // USGS Geochron: A Database of Geochronological and Thermochronological Dates and

Data (ver. 2.0, September 2023): U.S. Geological Survey data release. 2023.  
<https://doi.org/10.5066/P9RZNPIF>

6. Boone, S.C., Kohlmann, F., Noble, W., Theile, M., Beucher, R., Kohn, B., Glorie, S., Danišík, M., Zhou, R., McMillan, M., Nixon, A., Gleadow, A., Qin, X., Müller, D., McInnes, B. A geospatial platform for the tectonic interpretation of low-temperature thermochronology // Big Data. Sci Rep, 2023, 13, 8581. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35776-3>



## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ТРЕКОВОЙ ТЕРМОХРОНОЛОГИИ АПАТИТА НА ПРИМЕРЕ ТУВИНСКОГО СЕГМЕНТА ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА

**Е.В. Ветров**

Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

Трековая термохронология апатита, являясь наиболее чувствительным низкотемпературным методом геохронологии, используется при решении широкого спектра задач в современной геологии [3,5]. В случае орогенных поясов данный метод применяется главным образом для количественной оценки времени и скорости охлаждения горных пород в связи с тектоническими и климатическими процессами.

Основными выходными данными лабораторно-аналитических процедур трекового анализа являются трековые возрасты и значения трековых длин. В большинстве случаев, полученные трековые возрасты апатита являются «смешанными» возрастными, которые не связаны со временем начала работы изотопной системы, а скорее показывают интегрированный результат низкотемпературной термальной истории в условиях верхней коры. Обратное моделирование, основанное на данных о плотности и длинах треков, наряду с кинетическими параметрами, позволяет построить термальные истории, отражающие результат длительной денудации земной поверхности. Анализ термальных историй позволяет выявлять этапы пенеппенизации и тектонической активности с оценкой скорости эрозии и мощности денудированной толщи. Термотектоническое моделирование, основанное на термальных историях для отдельных проб, позволяет визуализировать дифференцированную историю остывания пород фундамента и его денудацию путем построения серии пространственно-временных изображений [1,4].

В данном исследовании проанализирована тектоническая эволюция домезозойского фундамента Южной Тувы в связи с его термальной историей, денудацией и осадконакоплением в смежном кайнозойском Убсунурском бассейне [2]. Выявлена неоднородная динамика остывания пород фундамента Южной Тувы: наиболее контрастное охлаждение территории произошло в позднем мелу (100-75 млн лет) и позднем олигоцене - голоцене (25-0 млн лет) на фоне стабильного положения палеоизотерм в мелу-палеогене (75-50 млн лет). Такой дифференцированный характер охлаждения фундамента Южной Тувы согласуется с неравномерной эксгумацией и денудацией пород фундамента в связи с различными этапами тектонической активизации основных разломных структур. Смена

областей с высокими объемами денудированных толщ маркирует различные этапы активности региональных палеозойских разломных зон, контролирующей эволюцию фундамента Южной Тувы. Несколько повышенная денудация (до 40 м/млн лет) пород фундамента Южной Тувы проявлена в зоне сочленения Южно-Таннуольской и Агардакско-Окинской разломных зон в конце раннего мела (125-100 млн лет). Для остальной территории Южной Тувы сохраняется общий невысокий денудационный фон от 10 до 20 м/млн лет. В позднем мелу (100-75 млн лет) денудация пород фундамента усиливается (до 70 м/млн лет) за счет активизации Агардакско-Окинской разломной зоны. Поздний мел – ранний палеоген (75-50 млн лет) характеризуется некоторой стабилизацией денудационной активности, при которой основные разломные структуры Южной Тувы пребывали в стабильном тектоническом состоянии. Последующее повышение денудации (до 40 м/млн лет на фоне 10-20 м/млн лет) пород фундамента Южной Тувы отмечается вдоль Южно-Таннуольской зоны разломов в позднем палеогене (50-25 млн лет). Денудация и эксгумация фундамента в позднем палеогене сопровождалась формированием грубообломочных отложений позднеэоценовой кургакской свиты в Убсунурской впадине. Эта денудационная активность продолжилась в неогене (25-0 млн лет), достигнув максимальных значений (до 50 м/млн лет) в зоне сочленения Южно-Таннуольской и Убсунур-Бийхемской разломных зон. Показатели денудации в области, контролируемой Агардакско-Окинской зоной разломов, в то же время незначительны (15-20 м/млн лет). Неогеновая повышенная денудация и эксгумация пород Южной Тувы подтверждается появлением континентальной молассы в Убсунурской впадине.

Считается, что на скорость денудации, а, следовательно, и на динамику тектонического поднятия фундамента может повлиять ряд факторов, включая тектонический, климатический и колебания глобального уровня мирового океана. В случае Южной Тувы, региональную дифференциацию денудационной истории, которая связана с неравномерной эксгумацией пород фундамента, сложно объяснить глобальным падением/подъемом уровня мирового океана и климатическими изменениями. Следовательно, ключевая роль в мезозойской и кайнозойской истории геологической эволюции верхней части земной коры Южной Тувы отведена тектоническим факторам.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10069.

## Литература

1. Ветров Е.В., Буслов М.М., Де Гравэ Й. Эволюция тектонических событий и рельефа юго-восточной части Горного Алтая в позднем мезозое—кайнозое по данным трековой термохронологии // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (1), 125-142 с.
2. Ветров Е.В., Ветрова Н.И. Модель термотектонической эволюции пород домезозойского фундамента Южной Тувы в позднем мезозое и кайнозое // Геодинамика и тектонофизика, 2023;14(6):0729. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-6-0729>
3. Kohn B.P., Ketcham R.A., Vermeesch P., Boone S.C., Hasebe N., Chew D., Bernet M., Chung L., Danišik M., Gleadow A.J.W., Sobel E.R. Interpreting and reporting fission-track chronological data // GSA Bulletin, 2024. <https://doi.org/10.1130/B37245.1>
4. Kohn B.P., Gleadow A.J.W., Brown R.W., Gallagher K., Lorencak M., Noble W.P. Vizualizing thermotectonic and denudation histories using apatite fission-track thermochronology // Reviews in mineralogy and geochemistry, 2005 58 (1), 527-565. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.20>.
5. Lisker F., Ventura B., Glasmacher U. A. Apatite thermochronology in modern geology // Geological Society, 2009. v.324. p. 1-23.

## U-Pb-Th ДАТИРОВАНИЕ АПАТИТА ИЗ ЩЕЛОЧНЫХ МАССИВОВ КОЛЬСКОЙ ЩЕЛОЧНОЙ ПРОВИНЦИИ: КОВДОР (ФОСКОРИТ) И ХИБИНЫ (АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВАЯ РУДА)

К.А. Докукина<sup>1</sup>, В.С. Шешуков<sup>1</sup>, Н.М. Кудряшов<sup>2</sup>, А.С. Дубенский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

U-Pb-Th датирование апатита ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH},\text{F},\text{Cl})_2$ ) осложнена низким изначальным соотношением концентраций U/Pb. Температура закрытия у апатита достаточно невысокая и составляет всего 425—500°C (см. например [10]).

В Геологическом институте РАН методом LA-ICP-MS было проведено U-Pb датирование апатита, извлеченного из фоскоритов щелочно-ультраосновной интрузии Ковдор и апатит-нефелиновой руды массива Хибины. LA-ICP-MS изотопный анализ проводился с использованием метода калибровки с внешним стандартом, основанном на предположении о совместимости матриц неизвестных и стандартных образцов, вследствие чего для одинаковых условий процессы лазерной абляции в них происходят идентичным образом. Особенностью датирования минералов с высоким содержанием нерадиогенного свинца является необходимость коррекции на нерадиогенный свинец калибровочного стандарта. В настоящей работе обработка и коррекция данных изотопного анализа в том числе и на нерадиогенный свинец производилась с использованием программы Lolite 4 с встроенным плагином VisualAge\_UcomPbine [5]. В качестве калибровочного стандарта использовался скорректированный на нерадиогенный свинец апатит Madagascar (473.5 млн лет) [7]. Для проверки качества анализа использовались контрольные стандарты апатита McClure (523.5 млн лет) [9] и Slyudyanka (465 млн лет) [8], измеряемые как неизвестные образцы в рамках текущей аналитической сессии. Для апатита из фоскоритов интрузии Ковдор ранее был получен возраст  $376.4 \pm 0.6$  млн лет [3], и в работе [6] этот апатит был рекомендован как потенциальный минеральный стандарт для U-Pb датирования. Возрастная оценка апатита из фоскорита Ковдора в ГИН РАН составила  $338.6 \pm 4.8$  Ma, что на  $\sim 40$  млн лет моложе, чем возраст апатита по данным [3].

Хибинский щелочной массив представляет собой сложное по форме и составу интрузивное тело больших размеров. Возраст образования главных типов горных пород по данным Pb-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd датирования от 380 до 360 миллионов лет назад [1]. Характерной особенностью Хибинского массива является кольцевое (в плане) строение.

Комплексы горных пород, слагающие массив, образуют вложенные друг в друга дуги, открытые к востоку, что объясняется внедрением магмы вдоль чередующихся кольцевых и конических разломов. Большая часть массива сложена породами двух групп — нефелиновых сиенитов и фойдолитов. Резко расширяющееся вблизи поверхности тело нефелиновых сиенитов разделено на две приблизительно равные по площади части конически-кольцевой зоной фойдолитов (мельтейгитов-ийолитов-уртитов), окаймлённых обогащёнными калием нефелиновыми сиенитами (рисчорритами). Апатито-нефелиновые и титанито-apatито-нефелиновые породы формируют залежи в верхних частях фойдолитовой толщи. В геологической литературе эта конически-кольцевая структура называется Главным кольцом или Центральной дугой.

U-Pb датирование апатита из апатит-нефелиновой руды из отвалов рудника Восточный методом LA-ICPMS дало возраст  $340.3 \pm 4.9$  млн лет. Датирование апатита классическим методом TIMS было проведено в ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты и дало возраст  $339.9 \pm 1.8$  млн лет. Полученные результаты на несколько десятков миллионов лет моложе установленного возраста формирования Хибинского массива, полученного другими методами [1]. Однако возрасты апатита из фоскоритов Ковдора и возраст апатита из апатит-нефелиновой руды из отвалов рудника Восточный получились сопоставимые  $\sim 340$  млн лет.

В работе [1] указывается U-Pb возраст цирконов  $\sim 340$  млн лет из щелочных сиенитов, который интерпретируется как время постмагматических процессов, фиксирующих завершение магматической активности в Хибинской кальдере.

В работе [2] на SHRIMP II было проведено U-Pb локальное датирование титанита из силикатных пород и апатит-нефелин-(сфеновых) руд палеозойского полифазного массива щелочных нефелиновых сиенитов Хибин. Расчет и построение линий смешения для титанитов каждой из проб, представляющих разновидности апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, показал, что возраст этих титанитов колеблется в интервале значений от 365 до 376 млн лет вне зависимости от локализации проб и типа руд. Температура закрытия уран-свинцовой изотопной системы титанита  $700\text{—}750$  °C (например, [4]) более чем на  $200$  °C выше, чем у апатита.

Таким образом возраст, полученный по апатиту Ковдора и Хибины  $\sim 340$  млн лет скорее всего отражает время остывания пород щелочных интрузивов до температуры  $\sim 450$  °C и завершение магматической деятельности в пределах Кольской щелочной провинции (отмирание плюма).

Исследования проведены в соответствии с темой НИР ГИН РАН (FMMG-2023-0007).

#### Литература

1. Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Травин А.В., Беяцкий Б.В., Шаматрина А.М., Антонов А.В., Ларионов А.Н., Родионов Н.В., Сергеев С.А. Длительность формирования палеозойской магматической системы в центральной части Кольского полуострова: U-Pb, Rb-Sr, AR-AR данные // Доклады РАН. 2007. Т. 413, № 5. С. 666—670.
2. Родионов Н.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Балашова Ю.С., Беяцкий Б.В., Арзамасцев А.А., Сергеев С.А. U-Pb SHRIMP-II возраст титанита и время образования апатит-нефелиновой минерализации палеозойских массивов агпаитовых нефелиновых сиенитов Кольского полуострова (Ловозеро и Хибины) // Геология и геофизика. 2018. № 8. С. 1195- 1210.
3. Amelin, Yu. & Zaitsev, A.N. (2002): Precise geochronology of phoscorites and carbonatites: the critical role of U-series disequilibrium in age interpretation. *Geochim. Cosmoch. Acta*. 2002. V. 66. P. 2399—2419.
4. Cherniak D.J. Diffusion in accessory minerals: zircon, titanite, apatite, monazite and xenotime // *Rev. Miner. Geochem.* 2010. V. 72. P. 827—869.
5. Chew D.M., Petrus J.A., Kamber B.S. U-Pb LA-ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb // *Chemical Geology*. 2014. № 363. P. 185–199.
6. Chew, D.M., Sylvester, P.J., Tubrett, M.N., 2011. U-Pb and Th-Pb dating of apatite by LA-ICPMS. *Chem. Geol.* 280 (1–2), 200–216.
7. Cochrane, R., Spikings, R. A., Chew, D., Wotzlaw, J. F., Chiaradia, M., Tyrrell, S., Schaltegger, U., and Van der Lelij, R.: High temperature (> 350°C) thermochronology and mechanisms of Pb loss in apatite // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2014. № 127. P. 39–56.
8. Reznitskii, L.Z., Fefelov, N.N., Vasil'ev, E.P., Zarudneva, N.V., Nekrasova, E.A., 1998. Isotopic composition of lead from metaphosphorites and problem of the Slyudyanka Group age, the southern Baikal, Western Khamar Daban region. *Lithology and Mineral Resources* 33 (5), 432–441.
9. Schoene Blair, Samuel Æ, Bowring A. U-Pb systematics of the McClure Mountain syenite: thermochronological constraints on the age of the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  standard MMhb // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2006. № 151. 3. 615–630.
10. Scoates J. S., Wall C. J. *Geochronology of Layered Intrusions* // *Layered Intrusions* / B. Charlier, O. Namur, R. Latypov, Ch. Tegner. Springer, 2015. P. 23–28. 748 p.

## ВОЗРАСТ И СОСТАВ ТИТАНИТА СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО БЕЛОМОРЬЯ

К.А. Докукина<sup>1</sup>, В.С. Шешуков<sup>1</sup>, О.И. Окина<sup>1</sup>, А.С. Дубенский<sup>1</sup>, Т.В. Каулина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Титанит (сфен)  $\text{CaTiSiO}_5$ , распространенный и реактивный акцессорный минерал изверженных и метаморфических пород способен включать в свой состав микроэлементы, которые могут быть индикаторами процессов магматического, метаморфического и гидротермального изменения. Содержание U и Th в титаните обычно варьирует от первых до сотен граммов на тонну [11], при этом эффективная диффузия свинца в кристаллической решетке титанита реализуется при относительно высоких температурах, что обеспечивает минимальное закрытие U-Pb изотопной системы при температуре  $\geq 650$  °C [7]. Титанит признается как важный высокотемпературный минерал-петрогеохронометр для пород, где необходимо интегрировать информацию о условиях формирования породы ( $P$  и  $T$ ) с точными временными интервалами и для пород, в которых отсутствует циркон. Кроме того, титанит по содержанию Zr можно использовать в качестве геотермобарометра [9], что позволяет построить температурно-временную зависимость. В ГИН РАН методом LA-ICP-MS было проведено U-Pb датирование и измерение концентраций элементов-примесей в коллекции титанитов из разных объектов Беломорского орогена, извлеченных из пород разного состава: 8 проб из 5 локаций. ICP-MS изотопный анализ проводился с использованием метода калибровки с внешним стандартом, основанного на предположении о совместимости матриц неизвестных и стандартных образцов, вследствие чего для одинаковых условий процессы лазерной абляции в них происходят идентичным образом [12]. Титанит характеризуется относительно высоким содержанием нерадиогенного Pb [11]. Особенностью датирования минералов с высоким содержанием нерадиогенного Pb является необходимость коррекции на нерадиогенный Pb калибровочного стандарта. В настоящей работе обработка и коррекция данных изотопного анализа в том числе и на нерадиогенный Pb производилась с использованием программы Iolite 4 с встроенным плагином VisualAge\_UcomPbine [8]. В качестве калибровочного стандарта использовался скорректированный на нерадиогенный Pb титанит OLT1 ( $1014.8 \pm 2.0$  млн лет) [13]. Для проверки качества анализа использовались контрольные стандарты титанита MKED1 ( $1521.02 \pm 0.55$  млн лет) [14] и Khan ( $522.2 \pm 2.2$  млн лет) [10], измеряемые как неизвестные образцы в рамках текущей аналитической сессии.

1. Корватундровская структура, амфиболит, расположенный в подошве Лапландского гранулитового надвига, проба В-3687. Возраст титанита составил  $1883 \pm 16$ , MSWD = 0.97, что неплохо соответствует результатам U-Pb датирования титанита этой же пробы [1] –  $1863 \pm 44$  Ма.

2. Узкая Салма, Fe-Ti эклогит, проба S204-2b является хорошим примером, где возраст титанита отражает не только закрытие U-Pb системы, но также отвечает времени формирования титанит-содержащих минеральных парагенезисов при метаморфизме, т.е. играет роль минерала-петрогеохронолога. На завершающих стадиях метаморфического преобразования породы в условиях амфиболитового метаморфизма в Fe-Ti эклогитах вместе с амфиболом растет титанит. Возраст титанита составил  $1902 \pm 76$ , MSWD = 2.0, N = 12, что соответствует результатам U-Pb датирования метаморфических оторочек циркона из этой же породы (~1.9 млрд лет), ранее полученными разными исследователями [3]. Температура кристаллизации титанита в среднем составила  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  при 7 кбар.

3. Озеро Малое Глубокое, амфиболит по гранат-клинопироксеновым гранулитам основного состава, проба GL3-4. Титанит в породе появляется в составе амфиболитов по гранулитам, сформированного при  $700\text{-}750 \text{ }^\circ\text{C}$  и 8-9.5 кбар. Возраст метаморфического циркона в пробе GL3-4 составил  $1881 \pm 21$  млн лет, MSWB = 2.1, N = 7. Возраст титанита составил  $2014 \pm 14$ , MSWD = 1.2, N = 20, что превышает U-Pb возраст кристаллизации метаморфического циркона из этой же пробы примерно на 100 млн лет. Температура кристаллизации титанита в этой пробе составила в среднем  $747 \text{ }^\circ\text{C}$  при 8 кбар, что соответствуют оценкам температуры для минеральных парагенезисов.

4.1. мыс Толстик, микроклиновый порфирированный гранит, проба 742-40. Циркон из гранитов был датирован методом TIMS и дал возраст ~ 2.4 млрд лет [2]. Возраст титанита составил  $1965 \pm 8$ , MSWD = 0.53, N = 20, что соответствует возрасту титанита из этой же пробы по литературным данным [4], который составляет  $1940 \pm 15$  млн лет.

4.2. мыс Толстик, микроклиновые жилки в тоналитовых гнейсах, проба 953K. Циркон в жилках был датирован методом TIMS и дал возраст ~ 1.94 млрд лет [2]. Возраст титанита составил  $2051 \pm 9$  лет, MSWD = 1.04, N = 18.

4.3. остров Кривой, габбронорит, проба GK-6-90. Метаморфический циркон дал возраст  $1916 \pm 4$  млрд лет [2]. Возраст титанита составил  $1950 \pm 17$  млн лет, MSWD = 1.6, N = 18. Полученное значение возраста титанита достаточно близко оценке возраста метаморфизма, полученной по циркону, однако почти на 100 млн лет превышает оценку U-Pb возраста



титанита из этой же пробы, полученного на SHRIMP II в ВСЕГЕИ –  $1842 \pm 3$  млн лет (устное сообщение А.Н. Ларионова).

4.4. остров Кривой, тоналитовый гнейс, проба GK-14-90. Циркон из гнейса был датирован методом TIMS и дал возраст  $2717 \pm 7$  млрд лет [2]. Возраст титанита составил  $1950 \pm 12$  млн лет, MSWD = 1.03, N = 14. Возраст титанита из гнейсов совпадает в пределах ошибки с возрастом титанита из габброноритов и практически совпадает с возрастом метаморфического циркона  $\sim 1.9$  млрд лет, полученного в габбронорите.

5. остров Столбиха, амфиболит на контакте эклогита, проба D21-2. В цирконах из эклогитов были получены архейские и палеопротерозойские U-Pb датировки циркона:  $\sim 2.76$  млрд лет в ядрах циркона;  $\sim 2.7$  и  $1.9$  млрд лет. Возраст титанита составил  $2084 \pm 17$  млн лет, MSWD = 1.9, N = 18.

Позднепалеопротерозойские значения U-Pb возраста указывает на полную перестройку изотопной системы титанита во всех породах Беломорского орогена и свидетельствует о том, что температура метаморфизма пород превышала  $650^\circ\text{C}$  [6]. Согласно оценкам по Ti-цирконовому термометру температуры кристаллизации метаморфических кайм и зерен циркона в Беломорском орогене, датированных  $1.92$ - $1.83$  млрд лет, преимущественно заключены в интервале  $690$ - $750^\circ\text{C}$  и соответствуют оценкам температуры формирования сфена  $700$ - $750^\circ\text{C}$ .

Исследования проведены в соответствии с темой НИР ГИН РАН (FMMG-2023-0007).

#### Литература

1. Ниткина Е.А., Беляев О.А., Доливо-Добровольский Д.В., Козлов Н.Е., Каулина Т.В., Козлова Н.Е. Метаморфизм Корватундровской структуры Лапландско-Кольского орогена (Арктическая зона Фенноскандинавского щита) // Геология и геофизика, 2022. Т. 63. № 4. С. 603-621.
2. Каулина Т.В., Богданова М.Н. Новые U-Pb данные для процессов магматизма и метаморфизма северо-западного Беломорья // ДАН. 1999. Т. 366. № 5. С. 677-679.
3. Каулина Т.В., Япаскурт В.О., Пресняков С.Л., Савченко Е.Э., Симакин С.Г. Метаморфическая эволюция архейских эклогитоподобных пород района Широкой и Узкой Салмы (Кольский полуостров): Геохимические особенности циркона, состав включений и возраст // Геохимия. 2010. Т. 48, № 9. С. 926–945

4. Кудряшов Н.М. U-Pb геохронология друзитового массива Жемчужный // Беломорский подвижный пояс: геология, геодинамика, геохронология. - Петрозаводск, 1997. – 39 с.
5. Balagansky V.V., Maksimov O.A., Gorbunov I.A. et al. Archean and paleoproterozoic eclogites and zoisitites in the Gridino area // Early Precambrian Eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield. Field Guidebook. Slabunov A.I., Balagansky V.V., Shchipansky A.A. (Eds.). Petrozavodsk: KarRC RAS. 20196. P. 11–48.
6. Bibikova E., Skiöld T., Bogdanova S. et al., 2001. Titanite-rutile thermochronometry across the boundary between the Archaean Craton in Karelia and the Belomorian Mobile Belt, eastern Baltic Shield. *Precambrian Research*. 2001b. Vol. 105, N 2–4. P. 315–330.
7. Cherniak D.J. Diffusion in accessory minerals: zircon, titanite, apatite, monazite and xenotime // *Rev. Miner. Geochem.* 2010. V. 72. P. 827–869.
8. Chew D.M., Petrus J.A., Kamber B.S. U–Pb LA–ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb // *Chemical Geology*. 2014. № 363. P. 185–199.
9. Hayden, L. A., Watson, E. B., & Wark, D. A. A thermobarometer for sphene (titanite). *Contribu. Mineral. .Petrol.* 2008. V. 155. № 4. P. 529–540.
10. Heaman, L.M. The application of U–Pb geochronology to Mafic, ultramafic and alkaline rocks: An evaluation of three mineral standards. // *Chemical Geology*. 2009. – 261. – P. 43–52.
11. Frost B.R., Chamberlain K.R., Schumacher J.C. Sphene (titanite): phase relations and role as a geochronometer // *Chem. Geol.*, 2000, v. 172 (1), p. 131–148.
12. Jackson, S.E., Pearson, N.J., Griffin, W.L., Belousova, E.A. The application of laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology, *Chem. Geol.*, 2004, v. 211, p. 47–69.
13. Kennedy, A.K., Kamo, S.L., Nasdala, L. & Timms, N.E. (2010): Greenville skarn titanite: Potential reference material for SIMS U–Th–Pb analysis // *Canadian Mineralogist*. 2010. – 48. – P. 1423–1443.
14. Spandler, C., Hammerli, J., Sha, P., Hilbert-Wolf, H., Hu, Y., Roberts, E. & Schmitz, M. MKED1: A new titanite standard for in situ analysis of Sm–Nd isotopes and U–Pb geochronology // *Chemical Geology*. – 2016. – 425. – P. 110–126.

## **(U-Th)/He ДАТИРОВАНИЕ ЦИРКОНОВ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОЗДНЕМЕЗОЗОЙСКИХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ**

**В.Б. Ершова<sup>1,2,3</sup>, А.В. Прокопьев<sup>3</sup>, М.Ю. Курапов<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

(U-Th)/He термохронология основана на измерении радиогенного  $^4\text{He}$ , образующегося при распаде  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{147}\text{Sm}$ . Диффузия гелия в апатите и цирконе термически контролируема и легко происходит при высоких температурах. Эти минералы накапливают радиогенный гелий по мере охлаждения при низких температурах в верхних слоях земной коры [2]. Температура закрытия (U-Th)/He системы в цирконе составляет  $\sim 185^\circ\text{C}$  [3, 4]. Помимо скорости охлаждения, размер зерна и радиационное повреждение также контролируют кинетику диффузии гелия в цирконе [1]. Фактически (U-Th)/He система показывает возраст остывания зерен циркона до определённой температуры. При этом при работе в складчатых поясах эти возраста интерпретируют как время подъема (воздымания) территории, отражающее этапы тектонических событий. Использование двух и более термохронометров может позволить реконструировать различные, в том числе разновозрастные этапы тектонической эволюции исследуемых регионов. (U-Th)/He датирование цирконов и реже апатитов при изучении осадочных бассейнов является мощным инструментом для реконструкции тектонической истории областей сноса и путей транспортировки обломочного материала. Применение двойного (U-Th)/He и U-Pb датирования одного и того же зерна позволяет установить как возраст его кристаллизации, так и время вывода на дневную поверхность в источнике сноса. Применение двойного датирования зачастую является единственным способом реконструкции источников сноса, имеющих многоэтапную тектоническую историю.

(U-Th)/He датирование цирконов проводилось нами в лаборатории Университета штата Техас в г. Остин по следующей методике. Зерна циркона тщательно проверяли на наличие видимых включений при 180-кратном увеличении с использованием стереомикроскопа Nikon с вращающимся столиком и возможностью использования как поляризованного, так и отраженного света. Для дальнейших исследований использовались зерна размером от 60 до 150 мкм. Подходящие зерна были измерены в двух направлениях и

каждое зерно помещалось в Pt-трубочку. Затем зерна подвергались лазерному нагреву в течение 10 мин при 1290°C с помощью Nd-YAG-лазера в высоковакуумной лазерной ячейке, подключенной к линии извлечения и измерения He, и анализировались на He, а затем повторно нагревались для обеспечения полной дегазации. После полной дегазации зерна извлекались из Pt-трубочек и растворялись в HF, HNO<sub>3</sub> и HCl с использованием процедур разложения в автоклавах в течение четырех дней. Полученные однозерновые растворы были внесены с использованием обогащенного индикатора <sup>235</sup>U-<sup>230</sup>Th-<sup>149</sup>Sm и проанализированы на концентрации U, Th и Sm, определенные методом изотопного разбавления ICP-MS с использованием Thermo Element2 HR-ICP-MS.

Нами проведено (U-Th)/He датирование цирконов из гранитоидных интрузий Северного Таймыра, мезозойских отложений арх. Земля Франца Иосифа и скважины Свердруп, пробуренной в Карском море.

(U-Th)/He датирование цирконов из гранитоидных интрузий Северного Таймыра показало, что подъем этой части Таймыра происходил 200-230 млн лет назад.

Источником сноса кластики верхнеюрских-раннемеловых отложений скважины Свердруп на основе петрографических исследований и датирования обломочных цирконов и рутилов являлся Таймырский ороген. При этом (U-Th)/He датирование обломочных цирконов показало, что основной подъем источника сноса обломочных зерен произошел около 225 млн лет назад (норий).

Для юрско-нижнемеловых отложений арх. Земля Франца Иосифа (U-Th)/He датирование обломочных цирконов показало, что в источнике сноса подчиненное значение имеют породы, выведенные на дневную поверхность около 420 и 360 млн лет назад, но при этом основная популяция обломочных цирконов имеет (U-Th)/He возраст 225 млн лет (норий).

Приведенные сведения о времени эксгумации как северного Таймыра, так и источников сноса для юрско-меловых отложений Карского моря и арх. ЗФИ указывают на крупное тектоническое событие позднего триаса в Западной Арктике, приведшее к значительному многокилометровому подъему Таймыро-Североземельского складчатого пояса и, вероятно, северной части шельфа Карского моря. В настоящее время геодинамические причины, вызвавшие подъем Таймыра и окружающих регионов, как и площадное распространение этих тектонических событий не до конца ясны.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной поддержке гранта РФФ № 20-17-00169 и проекта FUFГ-2024-0005.

#### Литература

1. Farley, K.A., 2002. (U-Th)/He Dating: Techniques, Calibrations, and Applications // Rev. Mineral. Geochemistry. 2002. № 47, P. 819–844. doi:10.2138/rmg.2002.47.18
2. Harrison T. M., Zeitler P. K. Fundamentals of Noble Gas Thermochronometry // Rev. in Mineralo.Geochemistry. 2005. № 58 (1). P. 123–149. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.5>
3. Reiners P.W., Campbell I.H., Nicolescu S., Allen C.M., Hourigan J.K., Garver J.I., Mattinson J.M., Cowan D.S. (U-Th)/(He-Pb) double dating of detrital zircons// Amer. J. of Sci. 2005. №305(4). P.259–311. <https://doi.org/10.2475/ajs.305.4.259>
4. Wolf M.R., Stockli D.F. Zircon (U–Th)/He thermochronometry in the KTB drill hole, Germany, and its implications for bulk He diffusion kinetics in zircon// Earth Planet. Sci. Lett. 2010. № 295. P. 69–82. doi:10.1016/j.epsl.2010.03.025

**U-Pb (LA-ICP-MS) АНАЛИЗ ДЕТРИТОВОГО ЦИРКОНА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ  
МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ТОЛЩ: НА ПРИМЕРЕ САРМИНСКОЙ СЕРИИ АКИТКАНСКОГО ОРОГЕННОГО  
ПОЯСА (ЮГ СИБИРСКОГО КРАТОНА)**

**У.С. Ефремова<sup>1</sup>, Т.В. Донская<sup>1</sup>, Д.П. Гладкочуб<sup>1</sup>, А.М. Мазукабзов<sup>1</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>,  
Н.В. Брянский<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Сибирский кратон был сформирован в раннем протерозое в результате объединения архейских и раннепротерозойских террейнов в единую структуру. Ключевыми элементами структуры Сибирского кратона являются раннепротерозойские орогенные пояса и шовные зоны [5], одним из которых является Аkitканский орогенный пояс, разделяющий Анабарский и Алданский супертеррейны. Аkitканский орогенный пояс представляет собой гетерогенную структуру, в пределах которой выделяются четыре основные региональные тектонические зоны (Голоустенская, Сарминская, Чуйская и Тонодская). Формирование Аkitканского орогенного пояса имело место на интервале 1.95–2.00 млрд лет [3, 5], а его дальнейшая эволюция маркируется внедрением магматических пород Южно-Сибирского постколлизийного магматического пояса (ЮСПМП) (1.84–1.88 млрд лет [5]). Сарминская зона выделяется в центральной части Аkitканского орогенного пояса и сложена преимущественно раннепротерозойскими породами сарминской серии, которые являются здесь наиболее древними метаосадочными образованиями. Ранее в составе сарминской серии выделялись разные свиты: харгитуйская и иликтинская [2], или иликтинская и анайская [4]. Основными критериями для объединения этих свит в единую серию являлись схожий литологический состав и степень метаморфической переработки пород.

*Харгитуйская свита.* Согласно данным [2], харгитуйская свита представлена кварцитами, кварцево-сланцевыми сланцами, роговообманково-биотитовыми или двуслюдяными гнейсами и метариолитами. Для пород харгитуйской свиты в северной части ее распространения установлен возраст метаморфизма на отметке 1.95 млрд лет [3], что указывает на ее раннепротерозойский возраст.

*Иликтинская свита.* Иликтинская свита представлена преимущественно песчаниками, сланцами различного состава и метаэффузивами среднего и кислого составов [2]. Геологические наблюдения и петрографические исследования показали, что в отличие от харгитуйской свиты, породы иликтинской свиты не были подвержены раннепротерозойскому метаморфизму, в них отмечаются только следы динамометаморфической переработки,

вероятнее всего, связанные с раннепалеозойской коллизией между Сибирским кратоном и раннепалеозойским Ольхонским террейном Центрально-Азиатского складчатого пояса.

*Анайская свита.* Породы анайской свиты были изучены в стратотипической местности Анайские гольцы, где они представлены конгломератами, гравелитами и песчаниками, которые сменяются хлоритоид-серицитовыми сланцами и кварцитами. Завершается разрез сплошной пачкой кварцитов с редкими прослоями хлорит-серицитовых сланцев.

Согласно [2], породы сарминской серии интродуцированы гранитоидами кочериковского комплекса (1.91 млрд лет [1]) и гранитоидами приморского комплекса (1.86 млрд лет [6]), входящими в состав ЮСПМП. Поскольку рассматриваемая территория имеет долгую и сложную тектоническую историю, то между вышеперечисленными свитами, а также между свитами и гранитоидами наблюдаются преимущественно тектонические контакты.

Основной задачей проведенного исследования явилось определение возраста детритового циркона из пород харгитуйской, иликтинской и анайской свит с целью определения возраста протолитов этих пород. Для проведения настоящего исследования были отобраны геохронологические пробы из разрезов вышеперечисленных свит. Породы харгитуйской свиты были отобраны и изучены на нескольких участках их распространения: в правом борту р. Элигей (лейкократовый гнейс №2109 и слюдисто-кварцевый сланец №2115), на мысе Ядор оз. Байкал (слюдисто-кварцевый сланец №2147), на юго-восточной окраине пос. Онгурен (слюдисто-кварцевый сланец №2155) и в обнажениях вдоль р. Анга близ пос. Еланцы (слюдисто-кварцевый сланец №21108). Породы верхней части иликтинской свиты были опробованы на участках пос. Онгурен (песчаник №2135), р. Курга (песчаник №0815) и р. Малая Иликта (песчаник №2205). Породы анайской свиты были отобраны на Анайских гольцах (кварцево-слюдистый сланец №1813). Из каждой пробы были выделены зерна детритового циркона без разбора по размеру и морфологии, которые были погружены в шайбу стандартного размера. U–Pb-изотопный анализ циркона проводился методом LA-ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900 с эксимерным лазером Analyte Excite и ячейкой двойного объема HelEx II в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН. Обработка измерений проводилась в программах Lolite [7] и Isoplot [6]. В интерпретации учитывались только оценки возраста, дискордантность которых не превышает 10 %. Гистограммы и кривые относительной вероятности построены по  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -значениям возраста с ошибкой  $1\sigma$ . Полученные результаты представлены на рис. 1.

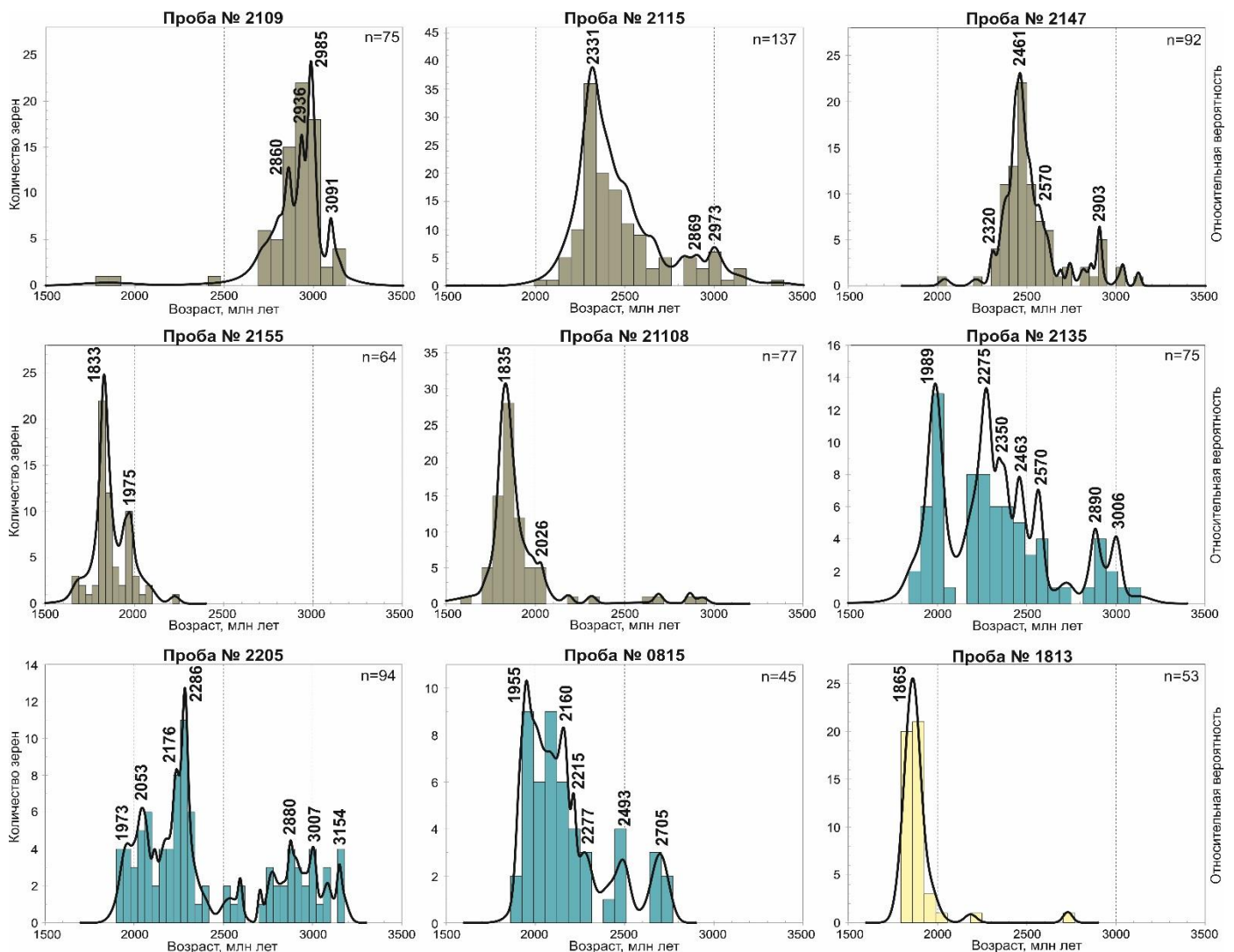


Рис. 1. Гистограммы и кривые относительной вероятности U-Pb возраста детритового циркона из пород харгитуйской (коричневые), иликтинской (голубые) и анайской (желтый) свит.

Полученные результаты геохронологических исследований позволили сделать следующие выводы:

- в составе единой харгитуйской свиты объединены породы, сформированные на трех разных временных интервалах. Формирование протолитов лейкократовых гнейсов (проба №2109) началось после временной отметки в 2.7 млрд лет. Формирование слюдисто-кварцевых сланцев (пробы №№ 2115, 2147) происходило на временном интервале 1.95–2.15 млрд лет, согласно возрасту наиболее молодых зерен циркона (2.15 млрд лет) и возрасту метаморфизма (1.95 млрд лет), который испытали эти породы. Слюдисто-кварцевые сланцы (пробы №№ 2155, 21108) были сформированы уже после временной отметки в 1.7 млрд лет,



т.е. после окончательного формирования Аkitканского орогенного пояса, что не позволяет рассматривать их в составе сарминской серии;

– время накопления терригенных пород иликтинской свиты можно оценить в узком диапазоне 1.91–1.95 млрд лет, нижняя граница которого обосновывается тем, что эти породы не были вовлечены в процессы регионального метаморфизма (1.95 млрд лет), а верхняя – прорыванием пород иликтинской свиты гранитоидами кочериковского комплекса (1.91 млрд лет). Полученные U-Pb геохронологические данные по возрасту детритовых цирконов также подтверждают этот вывод;

– породы анайской свиты накапливались после временной отметки 1.86 млрд лет, т.е. после формирования пород ЮСПМП, что также указывает, что анайскую свиту нельзя относить к раннепротерозойской сарминской серии.

Полученные результаты позволили обосновать основные временные интервалы, которые соответствуют отдельным этапам эволюции Аkitканского орогенного пояса, и в дальнейшем могут быть применены для расшифровки истории формирования Аkitканского орогена.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-17-00196, <https://rscf.ru/project/23-17-00196/>.

#### Литература

1. Бибилова Е.В., Кориковский С.П., Кирнозова Т.И., Сумин Л.В., Аракелянц М.М., Федоровский В.С., Петрова З.И. Определение возраста пород Байкало-Витимского зеленокаменного пояса изотопно-геохронологическими методами // Изотопное датирование процессов метаморфизма и метасоматоза / Ред. Ю.А. Шуколюков. М.: Наука. 1987. С. 154–164.

2. Галимова Т.Ф., Пермяков С.А., Бобровский В.Т., Пашкова А.Г. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Лист N-48-Иркутск. Объяснительная записка. 2009. 490 с.

3. Савельева В.Б., Данилова Ю.В., Шумилова Т.Г., Иванов А.В., Данилов Б.С., Базарова Е.П. Эпигенетическая графитизация в фундаменте Сибирского кратона – свидетельство миграции обогащенных углеводородами флюидов в палеопротерозое // Доклады академии наук. 2019. Т. 486, № 2. С. 217–222.

4. Федоровский В.С. Нижний протерозой Байкальской горной области. М: Наука,1985. 200 с.
5. Donskaya T.V. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic granitoids // Precambrian Research. 2020. V. 348, No 1, 105869.
6. Ludwig K.R. User's manual for Isoplot 3.75. A geochronological toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center. Sp. Publ. 2012. № 5. 75 p.
7. Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J. and Hergt J. Lolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2011. V. 26. P. 2508–2518.

## ТЕРМАЛЬНАЯ ИСТОРИЯ СЛЮДЯНСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

**А.В. Иванов<sup>1</sup>, Е.И. Демонтерова<sup>1</sup>, Л.З. Резницкий<sup>1</sup>, Н.В. Брянский<sup>1</sup>, А.А. Каримов<sup>1,2</sup>,  
А.С. Мальцев<sup>1</sup>, К.Г. Ерофеева<sup>3</sup>, А.С. Дубенский<sup>4</sup>, С.В. Малышев<sup>5</sup>, Л.П. Семенова<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Слюдянский кристаллический комплекс – минералогическая Мекка Сибири. Он сложен метаморфическими породами раннеордовикского возраста вплоть до гранулитовой фации. То есть, метаморфизм происходил в низах коры. На этом же уровне происходило плавление, внедрение и кристаллизация интрузивных пород кислого и среднего составов. В нашей работе высокотемпературная часть остывания интрузивных пород реконструируется по данным Sm/Nd датирования гранат-содержащих сиенитов и U-Pb датирования титанита и апатита из них. Среднетемпературная часть остывания – по K-Ar и <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датированию мусковита и гиалофана из пегматитов. Низкотемпературная – по трековому датированию апатита из сиенитов. Использовано также U-Pb датирование апатита из метаморфических пород и гидротермальных жил. Выделяются: первая стадия (~490-470 млн лет назад) остывания сиенитовой интрузии от магматических температур (>750 °C) до температуры окружающей нижней коры (~550 °C), вторая стадия (~290-270 млн лет назад) остывания от нижнекоровых температур до ~ 150 °C, и третья стадия (~ 160 млн лет назад) остывания до температур закрытия трековой системы в апатите (~80 °C). Вторая и третья стадии остывания очевидно связаны с резким выведением Слюдянского комплекса в сторону поверхности. Обращает внимание, что вторая стадия по времени близка к заключительному этапу формирования Ангаро-Витимского батолита, а третья стадия – к началу рифтогенеза в Забайкалье, связанного с коллапсом Монголо-Охотского орогена.

U-Pb датирование апатита выполнено по гранту РФФИ № 22-77-00035.

## АНАЛИЗ ПРЕССОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ ТАБЛЕТОК (ПЕЛЛЕТЫ) МЕТОДОМ LA-ICP-MS – ПЕРВЫЙ ОПЫТ

**А.А. Каримов<sup>1,2</sup>, В.М. Чубаров<sup>1</sup>, А.С. Мальцев<sup>2</sup>, Н.В. Брянский<sup>2,3</sup>, С.Ю. Скузоватов<sup>1</sup>,  
А.Н. Жиличева<sup>2</sup>, А.В. Иванов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН), Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН), Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Иркутский Государственный Университет (ИГУ), Иркутск, Россия

В последнее время был достигнут значительный прогресс в повышении прецизионности, пределов определения, экспрессности анализов *in situ* лазерной масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором (LA-ICP-MS), что привело к повсеместному применению этого метода в науках о Земле [1]. Однако до сих пор остается нерешенной проблема использования эталонных материалов, отвечающих матрице неизвестных образцов. Соответствующие эталонные материалы довольно редки, а калибровка прибора только с использованием распространенных синтетических стекол NIST SRM 610-614 без коррекции на матричный стандарт может привести к систематической погрешности по ряду элементов [2,3].

Целью данной работы является подготовка методики локального редкоэлементного анализа методом LA-ICP-MS порошков горных пород (ультраосновные породы – серпентинизированные перидотиты) в виде прессованных таблеток – пеллетов и оценка достоверности получаемых результатов. Первично методика создания пеллетов для LA-ICP-MS отработывалась на порошках серпентинизированных перидотитов массива Ургамал (Монголия), а также на хорошо охарактеризованных стандартных образцах порошкового типа – МУН-1 (гарцбургит) и MGL-GAS (серпентинит). Качество подготовки наших пеллетов сравнивалось в съемке в рамках одной аналитической сессии с пеллетами компании Mu Standards (Германия) – DTS-2B-np (дунит) и UB-N-np (серпентинизированный перидотит).

При создании пеллетов для LA-ICP-MS необходимо получить максимально однородный материал как по составу, так и по реологическим свойствам во всем объеме препарата. Выполнение обоих условий может обеспечить воспроизводимость получаемых результатов. Для первичного истирания серпентинизированных перидотитов использовалась вибрационная шаровая мельница Retsch MM400. Порошок породы массой ~1 г истирался в течение 10 минут с частотой 30 Гц до размерности <10 мкм. Контроль размерности

получаемых частиц проводился на гранулометре Analysette 22 Nanotec (Fritsch) методом лазерной дифракции. Затем мелкодисперсный порошок перемешивали с 0.1 г воска Hoechst wax C (Merck, Германия) в агатовой ступке в течение 3 минут. Полученную смесь помещали в металлический цилиндр и добавляли 3 грамма борной кислоты в качестве подложки с целью получения стабильного излучателя. С помощью гидравлического пресса ПЛГ-20 (ЛабТулс, Санкт-Петербург, Россия) под усилием 12 тонн получали на выходе готовый пеллет для анализа методом LA-ICP-MS. Анализ проводился на связке приборов – квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900 и эксимерном лазере Teledyne Analyte Excite 193 nm. В данном исследовании было задействовано оборудование двух ЦКП: «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН и «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

Таким образом, при проведении серии экспериментов, которые включали подбор соотношения порошок – связующий воск, давление пресса, параметров лазерной абляции (мощность, частота и общее время) нам удалось получить гомогенные и поддающиеся равномерной абляции препараты и воспроизводимые результаты измерений. Так, для пеллета подготовленного из порошка МУН-1 для большинства основных и рассеянных элементов (Na, Mg, Al, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Rb, Sr, Nb, Cs и всех REE) ошибка определения (изм / атт в отн. %) составляет не более 10 отн. % (среднее 4.03 отн. %). Для пеллетов компании Mu Standards с которыми проводилось сравнение ошибки определения составляют в среднем 11.7 отн. % (UB-N-np) и 18.11 отн. % (DTS-2B-np), по некоторым элементам (Na, Sc, Rb, Cs, Eu и Tm) ошибки определения составляют >30 отн. % и не входят в подсчет среднего.

Подготовленная нами методика позволяет проводить анализ порошков горных пород (в частности, ультраосновных) *in situ* методом LA-ICP-MS и является удобным решением в качестве замены классического ICP-MS с кислотным разложением образцов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-10038, <https://rscf.ru/project/21-77-10038/>).

## Литература

1. Koch J., Günther D. Review of the State-of-the-Art of Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry // *Appl Spectrosc* 2011. 65. P. 155–162. doi:10.1366/11-06255.
2. Garbe-Schönberg D., Müller S. Nano-Particulate Pressed Powder Tablets for LA-ICP-MS. // *J. Anal. At. Spectrom.* 2014. 29. P. 990–1000. doi:10.1039/C4JA00007B.
3. Светов С.А., Степанова А.В., Чаженина С.Ю., Светова Е.Н., Рыбникова З.П., Михайлова А.И., Парамонов А.С., Эхова М.В., Колодей В.А. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // *Труды Карельского научного центра РАН* № 7.2015. С.54-73. doi:10.17076/geo140

## СПОСОБ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО КАЛЬЦИТА В КАРБОНАТНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ ПО ДАННЫМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

**В.В. Коробкин<sup>1</sup>, А.Е. Чакликов<sup>1</sup>, Ж.С. Тулемисова<sup>1</sup>, И.Б. Саматов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Казахстанско-Британский Технический Университет, г. Алматы, Казахстан

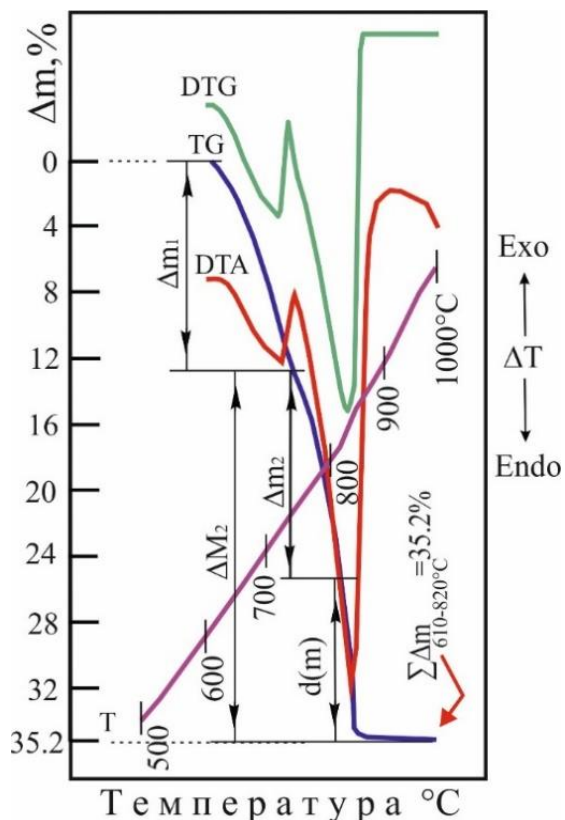
<sup>2</sup>Институт Геологических наук им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

На базе изучения термического поведения карбонатных пород, предлагается способ диагностики и количественного определения вторичных минералов, образующихся в парагенетических (магнезит-доломит-кальцитовых – МДКО) природных ассоциациях. Определение вторичного кальцита в магнезит-доломит-кальцитовых образованиях основано на использовании термогравиметрических данных деструкции рассматриваемого комплекса в промежутке температур 730-820°C со скоростью  $V=10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  (рис. 1 и 2) [1-3].

Предлагаемый способ определения дает важную информацию минерального состава, фильтрационно-емкостных свойств карбонатных коллекторов, степени кристаллического строения минеральных компонентов, их кристаллических решеток и физико-химических свойств магния, кальция и других катионов в структурообразующих системах. Он основан на данных дифференциального термического анализа процессов деструкции доломита, кальцита и магнезита, полученных при их динамическом нагревании. Способ выявления вторичного кальцита в карбонатных образованиях по результатам комплексного термического анализа относится к методикам определения минерального и вещественного состава пород при разработке нефтегазовых месторождений. Он базируется на применении широкого спектра научно-инструментальных средств, среди которых – термические анализаторы, термогравиметрические устройства, рентгеновские дифрактометрические установки и другое оборудование.

Главным признаком наличия в составе доломит-кальцитовом образовании (ДКО) вторичного кальцита по данным дифференциального термического анализа (DTA) являются не только температурно-хронологические параметры разложения их структур, но и скорости выбросов из системы диоксида углерода (по результатам термогравиметрических (TG и DTG) определения разложения кальцитовой части изучаемой породы).

Процессы термической деструкции доломита изучались многими исследователями. Глубокое осмысливание указанной проблемы в свое время дали исследователи Л.Г. Берг, А.В. Николаев, А.И. Цветков, Г.О. Пилоян и другие.



.1. Общая схема графического построения термического разложения магнезит-доломит-кальцитового образования (МДКО), на примере термической деструкции образца 1 в диапазоне ~ 600-900°C. Чем прямее TG-линия, отражающая второй этап выброса из системы CO<sub>2</sub>, тем выше вероятность развития в ней вторичного кальцита.

температур образует (согласно рис.1) две неравные ступени потери веса –  $\Delta m_1$  и  $\Delta m_2$ , из которых  $\Delta m_2 > \Delta m_1$  на величину  $d$  м. Данная разница потерей веса свидетельствует, что наряду с доломитом в образце присутствует кальцит. Количество его в составе ДКО определяется этой разностной величиной ( $dm$ ), а вторичность происхождения указанного карбоната выявится степенью искривления наклонной TG-линии второй ступени потери веса ( $\Delta m_2$ ) (рис. 1 и 2).

В предлагаемой методике, изложены возможности термического метода, идентифицировать не только минеральный состав карбонатов, но также устанавливать генетический тип кальцитов, т.е. определять вторичность происхождения указанного

Отличием нашего подхода к способу диагностики карбонатных минералов относительно методик, представленных в выше указанной научной литературе, заключается в следующем – по данной тематике ограничиваются методикой нахождения в породах мономинеральных образований, упуская из поля зрения сопутствующие структурные формирования, которые генетически связаны с развитием главных мономинеральных систем.

В нашем случае, наряду с определением интересующих нас минералов, при идентификации сопутствующих примесей (в частности кальцита), производился учет его термического поведения. Термохимические и кинетические параметры разложения кальцитовой составляющей в изучаемой породе характерны для вторичности кальцита. Об этом свидетельствует морфология DTA-кривой. В исследуемом ДКО указанная кривая отмечает явно выраженные признаки деструкции доломита (два эндотермические эффекта в пределах 730-880°C, а TG-кривая в указанном диапазоне



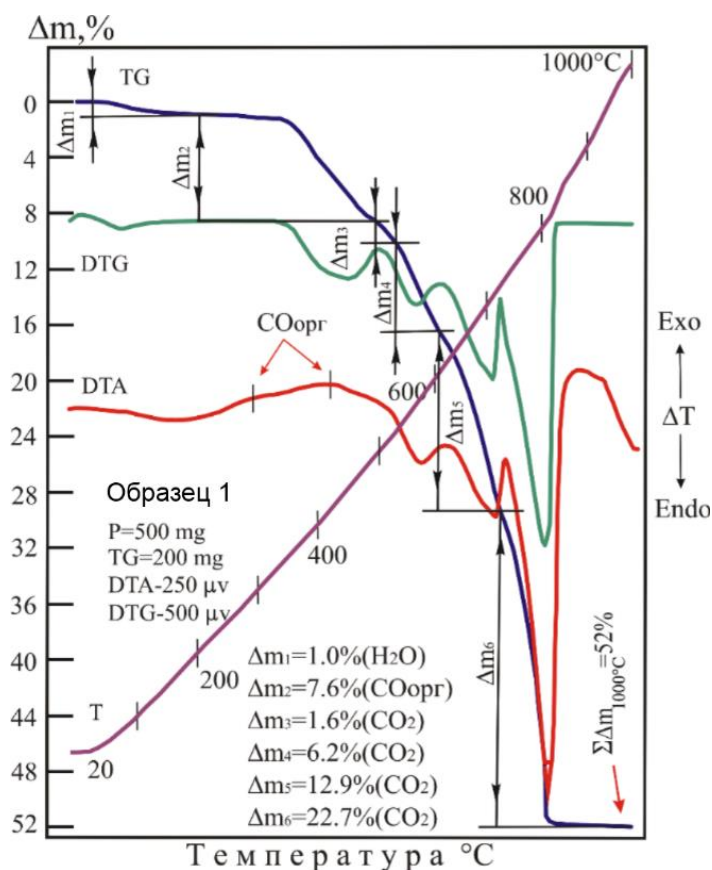


Рис. 2. Дериватограмма образца 1.

траектории TG-линии, второй ступени ( $\Delta m_2$ ) разложения ДКО.

Диагностика вторичного кальцита и определение его количества может быть окончательно решена с привлечением термогравиметрических данных используемого анализа. Предлагаемый способ определения дает важную информацию, касающуюся минерального состава карбонатов, фильтрационно-емкостных (ФЕС) свойств коллекторов, степени кристаллического строения минеральных компонентов, их кристаллических решеток и физико-химических характеристик магния, кальция и прочих катионов в структурообразующих системах. Поскольку вторичный кальцит отрицательно влияет на ФЕС, закупоривая пустотное пространство и препятствует продвижению углеводородов в резервуаре, то информация о наличии его в карбонатных коллекторах может существенно скорректировать результаты поисково-съёмочных работ на предмет нефтегазоносности изучаемых объектов.

Таким образом, учет генетического происхождения вторичного кальцита в карбонатных коллекторах может быть использован в качестве фактора определения продуктивности нефтеносных залежей.

минерала. Вторичные кальциты, сформированные в результате ионного замещения в доломите магния катионом кальция. В этом плане новообразованный кальцит в системе ДКО может служить индикатором, определяющим степень продуктивности нефтеносных коллекторов. При определении количественного содержания кальцита в составе изучаемого комплекса использовалась величина потери веса ( $\Delta m$ ), а при выявлении генетического типа указанного минерала (вторичность происхождения), учитывалось постоянство скорости выброса в атмосферу  $\text{CO}_2$ , т. е. прямолинейность

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Программа целевого финансирования 2023–2025 № BR21882301 «Комплексное решение актуальных вопросов, связанных геологией, добычей и переработкой минерального и углеводородного сырья»

#### Литература

1. Korobkin V., Samatov I., Chaklikov A., Tulemissova Zh. S. Peculiarities of Dynamics of Hypergenic Mineral Transformation of Nickel Weathering Crusts of Ultramafic Rocks of the Kempirsay Group of Deposits in Western Kazakhstan // Minerals. – 2022. – V.12. –P. 650. DOI:10.3390/min12050650
2. Korobkin V.V., Chaklikov A.Ye., Tulemissova Zh. S., Samatov I.B., Dobrovolskaya Ye.A. Results of the Study of Epigenetic Changes of Famennian–Tournaisian Carbonate Rocks of the Northern Marginal Shear Zone of the Caspian Syncline (Kazakhstan) // Minerals. – 2023. – V. 13 (2). – P. 249. DOI.org/10.3390/min13020249
3. Коробкин В.В., Саматов И.Б., Тулемисова Ж.С., Чакликов А.Е., Абдирахманов А. Патент № 8623. На полезную модель. Способ количественного определения вторичного кальцит. Республика Казахстан.2023.

## ТЕРМОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОЛГО-УРАЛЬСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕКОВОГО АНАЛИЗА АПАТИТА

П.А. Красильников<sup>1</sup>, А.В. Куликова<sup>1</sup>, Д.К. Нурғалиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный Университет (КФУ), Казань, Россия

Трековое датирование - метод определения времени остывания минералов, основанный на подсчете плотности треков осколков спонтанного деления ядер урана (U238), накапливающихся в природных минералах в ходе геологической истории [1]. Как правило, трековые возрасты отражают запись термальных и тектонических процессов, которые контролируют эволюцию длительной денудации земной поверхности, а не возрасты первоначального образования или осадконакопления. Рассмотрение трекового возраста и длин треков вместе, отражает комбинацию времени, за которое треки сохранились и термальную историю пород за этот временной период. Моделирование даёт возможность установить не только максимум палеотемпературы до которой нагревались осадки, но и изменение температуры во времени, а также этапы погружений и воздыманий земной коры рассматриваемого региона, что выражается в виде различных термальных воздействий.

Район исследования расположен в центральной части Волго-Уральской антеклизы, которая, в свою очередь, занимает большую площадь на востоке Восточно-Европейской платформы. В рельефе кристаллического фундамента выделяется крупнейший структурный элемент – Татарский мегаблок. На востоке мегаблок ограничивает Камско-Бельский, а на юге - Серноводско-Абдулинский авлакогены. По отложениям осадочного чехла Татарскому мегаблоку фундамента соответствует Татарское сводовое поднятие, состоящее из отдельных куполов, именуемых Северо-Татарским и Южно-Татарским сводами (ЮТС). Эти структурные элементы окружают Казанско-Кировский прогиб, Верхнекамская и Мелекесская впадины. На Северо-Татарском и Южно-Татарском сводах фундамент располагается на глубине 1,5-1,65 км, В Мелекесской впадине и Казанско-Кировском прогибе погружается до 1,75-1,95 км, а в Камско-Бельском и Серноводско-Абдулинском авлакогенах до 4,5-6,5 км [2].

В ходе научного исследования нами были детально изучены породы из скважинного материала кристаллического фундамента, а также терригенных пород осадочного чехла Южно-Татарского свода, Мелекесской впадины, Серноводско-Абдуллинского и Камско-Бельского авлакогенов.

Полученные модели термальной эволюции для верейских терригенных пород (два образца) Южно-Татарского свода имеют подобный характер и позволяют предположить, что в среднекаменноугольное время зерна апатита попали в седиментационный бассейн, после чего происходило погружение осадочной породы на глубины 3-4 км до температур 80-120°C, где апатиты были подвержены полному или частичному отжигу треков. Начиная со средней-поздней перми (263-254 млн лет) породы медленно остывают до температур 45-55°C. А в неоген-четвертичное время породы резко выводятся до современных отметок (около 20°C). По полученным моделям термальной эволюции для пород кристаллического фундамента Южно-Татарского свода (три образца) можно предположить, что породы достигали температуры до 80-100°C примерно в ранне-среднетриасовое время (238-255 млн лет), после чего породы медленно остывают до ~60°C. В неоген-четвертичное время породы резко выводятся до современных отметок (около 30-40°C).

В пределах Мелекесской впадины было изучено два образца кристаллического фундамента. Полученные трековые возрасты (246-224 млн лет) и модели термальной эволюции показывают, что породы достигли температур 110-120°C в средней юре, после чего находились в стабильном состоянии.

В пределах авлакогенов были изучены два образца кристаллического фундамента (глубины отбора около 3000 м). Породы имеют смешанные трековые возрасты, что говорит о нахождении породы в настоящее время в зоне частичного отжига. Согласно полученным моделям термальной эволюции, породы могли достигать температуры до 180-240°C, после чего медленно остывали до температур 40-70°C, а в неоген-четвертичное время температуры пород резко увеличились до 80-110°C.

Сравнивая термотектонические модели пород кристаллического фундамента осадочного чехла Южно-Татарского свода, Мелекесской впадины и Камско-Бельского и Серноводско-Абдулинского авлакогенов следует отметить, что в средне-позднепермское время на изученной территории наблюдается максимальное повышение значений температурного поля. В московско-позднекаменноугольное время произошел рост Уральского орогена [4,5]. Соответственно максимальный прогрев исследуемых пород можно связать с эрозией Уральского орогена и сносом терригенного материала в осадочный бассейн. Породы, по-видимому, после выхода на эрозионный срез начали погружение за счет накопления осадочных пород в пермское время и претерпели максимальный прогрев в средне-позднепермский период. Начиная с поздней перми породы находятся в

относительной стабилизации. Согласно [4] в поздней перми денудационные процессы Урала затухают. С этого времени активные аккумулятивные процессы в осадочном бассейне ЮТС заканчиваются, начинаются эрозионные. В неоген-четвертичное время для положительной тектонической структуры Южно-Татарского свода наблюдается резкое охлаждение пород до современных отметок, тогда как для гранитогнейсов кристаллического фундамента Камско-Бельского и Серноводско-Абдулинского авлакогенов в этот же период наблюдается увеличение температур до 80-110°C. В это время произошла реактивация территории с формированием купольной структуры и соответственно денудацией осадочного чехла ЮТС, что привело к интенсивному накоплению осадков в авлакогенах [3].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2022-299 в рамках программы развития НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты»

#### Литература

1. Соловьев А.В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового датирования и структурного анализа. М.: Наука (Тр. ГИН РАН), 2008. Вып. 577. 319
2. Сунгатуллин Р. Х., Сунгатуллина Г. М. Геология республики Татарстан. Казань: К(П)ФУ, 2014. 72 с.
3. Чернова И.Ю., Нургалиев Д.К., Нургалиева Н.Г., Нугманов И.И., Чернова О. С., Кадыров Р.И. Реконструкция истории Татарского свода в неоген-четвертичный период по данным морфометрического анализа // Нефтяное хозяйство, 2013. №. 6. С. 12-15
4. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и среднего Урала. Уфа: ГИЛЕМ, 2000. 146с.
5. Glasmacher U. A., Wagner G. A., Puchkov V. N. Thermotectonic evolution of the western fold-and-thrust belt, southern Uralides, Russia, as revealed by apatite fission track data. Tectonophysics. 2002. Т. 354. №. 1-2. С. 25-48.

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ (Li, Cs) ПЕГМАТИТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВАСИН-МЫЛЬК НА ОСНОВЕ НАСЫЩЕНИЯ РАСПЛАВА ЦИРКОНИЕМ И ТЕРМОМЕТРИИ ЦИРКОНА (КОЛЬСКИЙ РЕГИОН)

**Н.М. Кудряшов<sup>1</sup>, А.А. Калинин<sup>1</sup>, О.В. Удоратина<sup>2</sup>, Е.Л. Кунаккузин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Геологический институт ФИЦ Кольского Научного Центра РАН, Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии ФИЦ Коми Научного Центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Россия

В фундаментальной работе по гранитным пегматитам А.Е Ферсман выделяет несколько этапов их становления. Первый, магматический этап – это кристаллизация магматического расплава при температурах 900-800 °С, второй этап эпимагматический T=800-700 °С, затем следует пневматолитический T=700-350 °С, который включает главные фазы пегматитообразования, завершающие этапы гидротермальный T=400-50 °С и гипергенный [3]. В настоящее время, с накоплением новых физико-химических данных, включая экспериментальные работы, предложено множество разных моделей кристаллизации пегматитов и концентрации в них стратегически важных металлов, при этом важным инструментом для более точного определения температуры при пегматитовом процессе, служат различные геотермометры. Одними из широко используемых геотермометров являются термометр по насыщению расплава цирконием (Mineral Saturation Thermometry) [6] и титан-цирконовый термометр (Ti-in-Zircon Thermometry) [7].

В Кольском регионе среди осадочно-вулканогенных толщ мезоархейского зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья известны два крупных поля редкометальных пегматитов (Li, Cs с попутными Nb, Ta, Be). В северо-западной части пояса расположены месторождения лития и цезия Охмыльк, Васин-Мыльк, Олений хребет и Полмос, в юго-восточной части – Колмозерское месторождение сподуменовых пегматитов. Месторождения пегматитов в северо-западной части пояса обнажаются среди амфиболитов. Колмозерские пегматиты прорывают интрузивное тело метагабброанортозитов Патчемварекского массива с возрастом 2.93 млрд лет [1].

Месторождение Васин-Мыльк (Li, Cs) представлено субпараллельными пологими жилами длиной до 220 м с падением на юго-восток 10-30°. Незначительная часть пегматитовых жил выходит на поверхность, большинство прослежены на глубину до 350 м при прохождении шурфов и скважин. Жилы имеют зональное строение. В эндоконтактах как у висячего, так и у лежащего зальбанда развита кварц-плагиоклазовая зона с шерлом и мусковитом среднезернистой до мелкозернистой структуры. Далее к центру с постепенным

переходом располагается кварц-альбитовая зона мощностью 0.5-3.5 м с микроклином, мусковитом и бериллом, на отдельных участках обогащенная турмалином (шерл), структура пород средне и мелкозернистая. Кварц-альбитовая зона с поллуцитом и лепидолитом мощностью 8-10 м занимает центральную часть жил. В раздувах жил установлена зона блокового микроклина мощностью 5-6 м. В зоне блокового микроклина развиты участки мусковитового грейзена, встречаются небольшие кристаллы сподумена, мусковита, апатита, танталит-колумбита. В самом центре жилы выделяется кварцевое ядро.

Циркон для минералого-геохимического и изотопно-геохронологического изучения был выделен из штуфных образцов месторождения, где присутствуют две генерации циркона. Первая генерация наблюдалась преимущественно в зернистых кварц-полевошпатовых (альбит, КПШ) и крупнопластинчатых альбитовых агрегатах. Кристаллы циркона часто находятся совместно с другими акцессорными минералами – поллуцитом, тантитом, монтебразитом, гидроксилapatитом. В строении циркона отчетливо выделяются внутренние зоны и внешние каймы. Внутрифазовая неоднородность внутренних зон представлена участками неправильной формы с различной интенсивностью в BSE, различной степенью пористости, трещиноватости и насыщенности включениями. Внешние каймы кристаллов имеют небольшую мощность, развиты неравномерно и разбиты радиальной трещиноватостью (рис. 1а). Возраст внутренних зон циркона по результатам локального датирования циркона составил ~2.62 млрд. лет, возраст краевых зон находится в диапазоне ~1.9-1.7 млрд. лет [2].

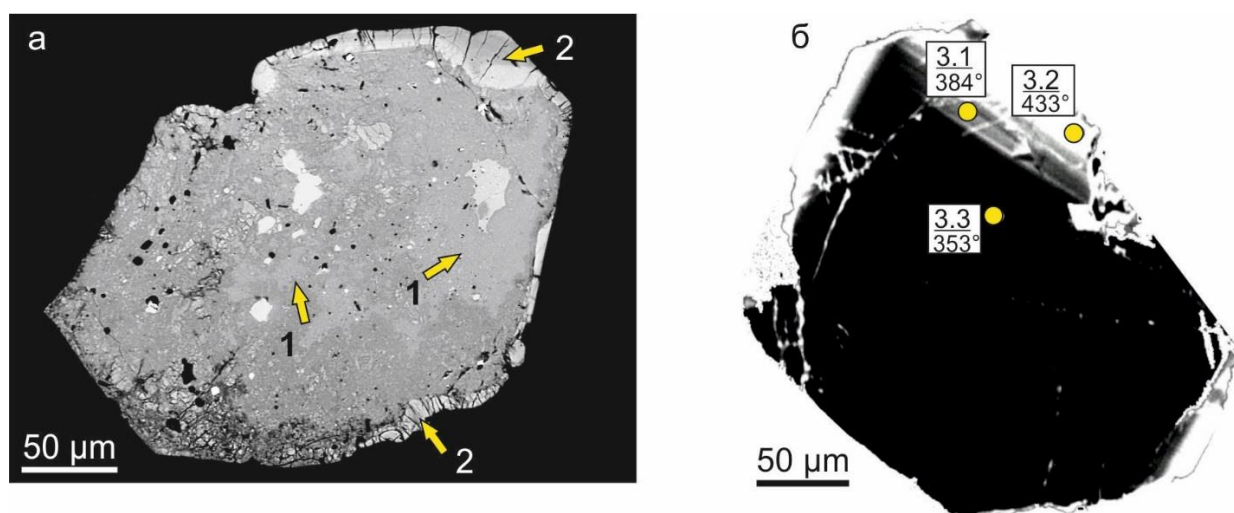


Рис. 1. Изображения кристаллов циркона из месторождения Васин-Мыльк: а) циркон первой генерации в BSE: 1 - неоднородности внутренней зоны; 2 - перекристаллизованная кайма; б) высокогафниевый циркон второй генерации в CL: цифрами показаны аналитические точки с температурами по [6].

Вторая генерация циркона с аномально высоким содержанием гафния была обнаружена в участках тонкозернистого грейзена альбит-лепидолит-кварцевого состава. Кристаллы циркона находятся в тесной ассоциации с холтитом и стибиотанталитом, представляя собой идиоморфные, практически без трещин зерна дипирамидального габитуса размером около 500 мкм розовато-желтого и желто-оранжевого цвета. Исследование циркона на электронно-зондовом микроанализаторе показало содержание  $\text{HfO}_2$  до 48.31 мас. %. Эти содержания были установлены в тонких каймах циркона, мощностью от 5 до 20 мкм (рис. 16). Каймы отличаются от основной части зерна более светлой окраской в CL и имеют либо четкую с ней границу со следами растворения, либо постепенный переход. Характерной особенностью этого циркона является практическое отсутствие в нем урана (менее 1 ppm), что делает практически невозможным определение его U-Pb изотопного возраста [5].

С использованием формулы из работы [6] по насыщению расплава цирконием для образцов из центральной кварц-альбитовой зоны пегматитовой жилы оценена температура кристаллизации породы. Для более насыщенных цирконием участков ( $\text{Zr} = 14\text{-}67$  ppm) температура составила  $T = 624\text{-}748$  °C, для менее насыщенных ( $\text{Zr} = 3\text{-}4$  ppm)  $T = 552\text{-}575$  °C. Эти значения можно рассматривать как среднюю температуру кристаллизации главной фазы пегматитов.

Расчеты температуры кристаллизации циркона по титан-цирконовому термометру [7] проводились в Стэнфордском университете. В ходе U-Pb (SHRIMP) изотопно-геохронологического исследования циркона в нем было также измерено содержание  $^{48}\text{Ti}$ . Концентрация Ti в разных зонах кристаллов циркона из пегматитов месторождения Васин-Мыльк оказалась различной. Во внутренних слабоизмененных зонах циркона содержание Ti составило в среднем 5-20 ppm, что соответствует  $T = 680\text{-}750$  °C. В перекристаллизованных краевых зонах содержания Ti достигали 100-300 ppm, а рассчитанные значения температуры превышали 1000°C. Поскольку наиболее точная оценка температуры кристаллизации возможна при содержании Ti в цирконе не выше 30-40 ppm [4], эти завышенные значения не принимались нами за реальные. При расчете температуры по содержанию титана в высокогафниевом цирконе по трем аналитическим точкам получены значения  $T = 353\text{-}453$ °C (рис. 16). Данная температура отражает, вероятно, более поздний гидротермальный этап становления пегматитовых жил на месторождении Васин-Мыльк.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ. Грант № 22-17-20002.  
<https://rscf.ru/project/22-17-20002/>



## Литература

1. Кудряшов Н.М., Мокрушин А.В. Мезоархейский габбро-анортозитовый магматизм Кольского региона: петрохимические, геохронологические и изотопно-геохимические данные // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 173-189.
2. Кудряшов Н.М., Калинин А.А., Лялина Л.М., Удоратина О.В., Селиванова Е.А., Галеева Е.В., Зыкова Т.С. Редкометалльные пегматитовые месторождений Охмыльк и Васин-Мыльк (северо-восточная часть Фенноскандинавского щита): U-Pb изотопно-геохронологические исследования циркона // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2023. С. 588-596.
3. Ферсман А.Е. Пегматиты их научное и практическое значение. Т.1. Гранитные пегматиты. Л.: Изд. Академии Наук СССР, 1932. 622 с.
4. Ferry, J.M., Watson, E.B., 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers // Contrib. Mineral. Petrol. V. 154 (4). P. 429–437.
5. Kudryashov N.M., Skublov S.G., Galankina O.L., Udoratina O., Voloshin A.V. Abnormally high-hafnium zircon from rare-metal pegmatites of the Vasin-Mylk deposit (the northeastern part of the Kola Peninsula) // Geochemistry 2020. V. 80 (3). 125489.
6. Watson E. B., Harrison T. M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // Earth Planet. Sci. Lett. 1983. V. 64. P. 295–304.
7. Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contribution to Mineralogy and Petrology. 2006. V. 151. P. 413–433.

## ФЛОГОПИТОВЫЙ ЭКЛОГИТ МАРУН-КЕУ ПОЛЯРНОГО УРАЛА: СОСТАВ И ВОЗРАСТ

К.В. Куликова<sup>1</sup>, А.В. Куликова<sup>2</sup>, О.В. Удоратина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup>Казанский Федеральный Университет, Казань, Россия

В строении западной мегазоны Полярного Урала развит эклогит-амфиболит-гнейсовый комплекс хребта Марун-Кеу. Наиболее изученным в пределах комплекса является район Слюдяной Горки [1, 2, 5, 6, 7, 10, 11], где наблюдается два текстурных типа пород: блоки массивных гранатовых перидотитов, метагаббро и эклогитов находятся в матриксе полосчатых амфиболит-эклогит-гнейсовых пород. К северу от Слюдяной Горки вдоль ручья Няхар-Нео-Шор обнажаются коренные выходы пород полосчатого матрикса: чередующихся гнейсов, фенгит-кианитовых эклогитов, амфиболитов. При полевых работах 2017 года среди фенгит-кианитовых эклогитов была обнаружена линза флогопитовых эклогитов. Этот тип пород для комплекса Марун-Кеу ранее не был известен.

Протолитом флогопитового эклогита был щелочной базальт ( $\text{SiO}_2$  – 45.62 %;  $\text{TiO}_2$  – 0.39 %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 16.04 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ общ – 8.2 %,  $\text{CaO}$  – 7.47 %,  $\text{MgO}$  – 13.98 %;  $\text{K}_2\text{O}$  – 3.71%,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 2.36 %; сумма РЗЭ=22 г/т).

Состав: гранат (зерна до 2 мм), омфацит (призмы до 3 мм), флогопит (чешуйки 2-3 мм).

Центры гранатов по составу соответствуют  $\text{Gros}_{18}\text{Alm}_{25}\text{Pyg}_{44}$ , каймы –  $\text{Gros}_{24}\text{Alm}_{29}\text{Pyg}_{35}$ , наиболее железистыми являются мелкие новообразованные зерна  $\text{Gros}_{19}\text{Pyg}_{29}\text{Alm}_{37}$ .

Омфацит имеет практически однородный состав – Jd компонент 33-38 %,  $x(\text{Mg})$  - 82-84. Флогопит также однообразен по составу,  $x(\text{Mg})$  - 81-83. Ядра гранатов насыщены пойкилобластовыми сингенетическими включениями кианита, фенгита, флогопита, реже омфацита и апофлогопитового амфибола, каймы не содержат инородных включений. Омфацит содержит сингенетические гранат, флогопит и фенгит, и более поздние клиноцоизит, амфибол и альбит. Фенгиты имеют  $\text{Si}$  – 3.23-3.25 формульных единиц,  $\text{Ti}$  – 0.03. Для определения  $P$ - $T$  условий образования метаморфических парагенезисов использовалась программа TPE, а также различные термометры и барометры [3, 8, 9]. Пиковые условия метаморфизма для флогопитового эклогита (центры гранатов и омфацитов с сингенетическими включениями), соответствуют цоизитовой субфации эклогитовой фации метаморфизма при  $P = 28 \text{ kbar}$ ,  $T = 680^\circ\text{C}$ . Регрессивные условия: формирование кайм гранатов и омфацитов соответствуют амфиболит-цоизитовой субфации эклогитовой фации ( $P$

= 14 kbar, T = 652°C), новообразованные мелкие гранаты и амфиболы отражают эпидот-амфиболитовую фацию метаморфизма (P = 11 kbar, T = 512°C).

По флогопитовому эцлогиту были получены U-Pb датировки по циркону (таблица 1), Ar-Ar возраст по флогопиту и сделан трековый анализ по апатиту.

Таблица 1. U-Pb датировки по цирконам из флогопитового эцлогита, данные получены на приборе SHRIMP RG в университете г. Стэнфорда.

KV26-17 кратер	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> %	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	Возраст млн лет		D,%	Изотопные отношения			Rho
			<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
4.1	3,11	0,44	1158±49	673±235	-75	0,0875±3.1	1,65±11.8	0,193±4.5	0,4
8.1	1,37	0,26	1186±86	912±165	-31	0,0809±6.0	1,91±10.9	0,200±7.5	0,7
3.1	0,86	0,56	1218±50	1000±82	-23	0,0797±2.3	2,06±5.9	0,206±4.2	0,7
1.1	0,31	0,43	1253±61	1179±35	-7	0,0819±1.4	2,34±5.3	0,214±5.0	0,9
2.1	0,46	0,43	1262±51	1234±43	-2	0,0854±1.6	2,43±4.7	0,216±4.2	0,9
7.1	0,33	0,42	1430±57	1410±33	-1	0,0921±1.3	3,06±4.5	0,248±4.1	0,9
5.1	0,13	0,18	1995±135	1906±30	-5	0,1178±1.7	5,80±7.0	0,360±6.8	1,0
6.1	0,11	0,23	2641±156	2707±20	+2	0,1869±1.2	13,09±5.5	0,510±5.3	1,0

Таблица 2. Содержания редких элементов в цирконах из флогопитового эцлогита

KV26-17 точки	Компоненты												
	Y	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Hf	Fe	T <sup>[12]</sup>
4.1	1412	0,02	78	1,5	4,6	0,38	31	133	258	450	9876	3,08	1039
8.1	2121	0,02	67	4,3	7,4	0,34	52	220	489	1059	13408	4,00	797
3.1	968	0,02	230	1,6	2,0	0,30	15	75	189	413	12157	3,86	921
1.1	4330	0,08	181	11,8	18,9	0,27	123	445	793	1304	10818	2,64	917
2.1	3167	0,03	128	4,6	9,1	0,27	72	293	560	974	11386	4,39	920
7.1	5259	0,24	191	26,8	26,9	0,36	161	543	977	1583	7829	2,78	872
5.1	667	0,04	233	0,9	1,2	0,35	13	49	115	300	12065	7,72	877
6.1	1853	0,05	161	1,6	5,2	0,46	39	175	322	604	12341	4,83	898

В продатированных цирконах были проанализированы РЗЭ (таблица 2), концентрации этих элементов указывают на магматический генезис этого минерала и отсутствие каких-либо преобразований. Полученные по цирконам датировки от  $1430 \pm 57$  млн. лет до  $1158 \pm 49$  млн. лет фиксируют, на наш взгляд, магматические события на окраине палеоконтинента Балтика.

Абсолютный возраст по флогопиту (Ar-Ar) составляет  $442.2 \pm 5$  млн. лет и фиксирует, на наш взгляд, время субдукции [4].

Трековый возраст по апатиту из флогопитового эклогита составляет  $269 \pm 14.2$  млн. лет. Данный пермский возраст согласуется со временем формирования главной гранитной оси Урала, когда в Уральском орогене шло завершение коллизионных процессов.

### Литература

1. Austrheim, H., Influence of fluids and deformation on metamorphism of the deep crust and consequences for the geodynamics of collision zones. In: Hacker, B.R., Liou, J.G. (Eds.), *Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*. Kluwer Academic Publishing, Netherlands, 1998. pp. 297-323.

2. Glodny, J., Pease, V. L., Montero, P., Austrheim, H., Rusin, A. I., Protolith ages of eclogites, Marun-Keu complex, Polar Urals, Russia: implications for the pre- and early Uralian evolution of the northeastern European continental margin. *Geological Society of London, Memoirs*, 2004. 30, 87-105.

3. Konilov A. N., Graphchikov A. A., Kopylov P. N. and Fonarev V. I. TPF: A bank of geological thermometers, barometers and oxygen barometers // *Experiment in Geosciences*, 1995. V. 4. № 4. P. 63–65.

4. Kulikova K.V., Varlamov, D.A., Travin A.V. Phlogopite eclogite of the Marun-Keu Complex (Polar Urals) – PT conditions and absolute age data // *Abstract Volume of the 13th International Eclogite Conference / C. Mattinson, D. Castelli, S.W. Faryad, J. Gilotti, G. Godard, A. Perchuk, D. Rubatto, H.-P. Schertl, T. Tsujimori, Y.-F. Zheng (Eds.)*. Petrozavodsk: KRC RAS, 2019. P.43

5. Liu, Y. Y., Perchuk, A. L., Philippot, P., Eclogites from the Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: a record of hot subduction and sub-isothermal exhumation. *Geological Society, London, Special Publications*, 2018. 474.

6. Meng F., Fan Y, Shmelev V.R., Kulikova K.V. Constraints of eclogites from the Marun-Keu metamorphic complex on the tectonic history of the Polar Urals (Russia) // *Journal of Asian Earth Sciences*. 187 (2020). P.104087

7. Molina, J. F., Austrheim, H., Glodny, J., Rusin, A., The eclogite of the Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high P metamorphism. *Lithos* 2002. 61, 55-78.
8. Perchuk A.L. A new variant of omphacite-albite-quartz geobarometer, taking into account the structural states of omphacite and albite, *DAN SSSR*. 1992. V.324. c. 1286-1189
9. Ravana E.K. The garnet-clinopyroxene Fe<sup>2+</sup>-Mg geothermometer: an updated calibration // *J. Metamorph. Geol.*, 2000. V.18. P. 211-219
- Shatsky, V. S., Simonov, V. A., Jagoutz, E., Koz'menko, O. A., Kurenkov, S. A., New Data on the age of eclogites from the Polar Urals. *Doklady Earth Sciences* 2000. 371A, 534-538.
10. Udovkina, N.G., 1985. Eclogites of the USSR(in Russian). Moscow, Nauka Press, 1-285(in Russian).
11. Ulyasheva, N. S., Pystin, A. M., Panfilov, A. V., Potapov, I. L., 2015. Two series of primary magmatic rocks in the marunkeu eclogite-gneiss complex, the Polar Urals. *Vestnik of Institute of Geology, Komi Science Centre, Ural Branch of RAS*, (11), 3-12(in Russian with English abstract).
12. Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. (2006) Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 151(4), 413-433.

# РЕКОНСТРУКЦИЯ МЕЗОЗОЙСКОЙ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ТАЙМЫРО-СЕВЕРОЗЕМЕЛЬСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВАНИИ (U-Th)/He ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНОВ

**М.Ю. Курапов<sup>1,2,3</sup>, В.Б. Ершова<sup>1,2</sup>, А.В. Прокопьев<sup>1</sup>, Д. Стокли<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт Наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Всероссийский геологический научно-исследовательский институт (ВСЕГЕИ), г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Jackson School of Geoscience, University of Texas at Austin, Austin, USA

Таймыро-Североземельская складчатая область является крайне удаленной территорией арктического региона России, геологическая изученность которой до сих пор остается недостаточной. Исследования последних лет [2–6] показывают, что тектоническая эволюция изучаемой территории остается предметом дискуссий.

Данные трекового анализа апатита (АФТ) для метаосадочных пород центрального и северного Таймыра [2, 6] указывают на развитие нескольких тектоно-магматических этапов в триасово-юрское время в пределах центрального и северного Таймыра. Однако, результаты (U-Th)/He термохронологии цирконов из осадочных пород острова Октябрьской Революции (Ershova et al., 2022) фиксируют поднятие территории в каменноугольное время. Ограниченное количество данных низкотемпературной термохронологии в пределах Таймыро-Североземельской складчатой области обуславливает необходимость дополнительного изучения минералов термохронометров. Исследование (U-Th)/He системы в цирконе из одиннадцати ранее изученных массивов гранитоидов [3, 4] центрального и северного Таймыра позволяет существенно дополнить существующие представления о развитии региона.

Полученные нами значения возраста для 47 зерен циркона варьируют от 135 до 274 млн лет. Температура закрытия (U-Th)/He системы в цирконе составляет 170-190°C [1], что соответствует глубине 5-5.5 км. Полученные данные указывают на эксгумацию пород до глубин менее 5-5.5 км в поздне триасовое-среднеюрское время, что хорошо согласуется с данными трекового датирования апатита из метаосадочных пород [2, 6].

Исследование поддержано грантом РФФ 20-17-00169.

## Литература

1. Carrapa, B.; Di Giulio, A.; Mancin, N.; Stockli, D.F.; Fantoni, R.; Hughes, A.; Gupta, S. Tectonic Significance of Cenozoic Exhumation and Foreland Basin Evolution in the Western Alps. *Tectonics* 2016, doi:10.1002/2016TC004132.
2. Khudoley, A.K.; Verzhbitsky, V.E.; Zastrozhnov, D.A.; O'Sullivan, P.; Ershova, V.B.; Proskurnin, V.F.; Tuchkova, M.I.; Rogov, M.A.; Kyser, T.K.; Malyshev, S.V.; et al. Late Paleozoic – Mesozoic Tectonic Evolution of the Eastern Taimyr-Severnaya Zemlya Fold and Thrust Belt and Adjoining Yenisey-Khatanga Depression. *J. Geodyn.* 2018, 119, 221–241, doi:10.1016/j.jog.2018.02.002.
3. Kurapov, M.Y.; Ershova, V.B.; Khudoley, A.; Luchitskaya, M.V.; Makariev, A.A.; Makarieva, E.M.; Vishnevskaya, I.A. Late Palaeozoic Magmatism of Northern Taimyr: New Insights into the Tectonic Evolution of the Russian High Arctic. *Int. Geol. Rev.* 2020, 1–23, doi:10.1080/00206814.2020.1818300.
4. Kurapov, M.Y.; Ershova, V.B.; Khudoley, A.K.; Luchitskaya, M.V.; Stockli, D.F.; Makariev, A.A.; Makarieva, E.M.; Vishnevskaya, I.A. Latest Permian–Triassic Magmatism of the Taimyr Peninsula: New Evidence for a Connection to the Siberian Traps Large Igneous Province. *Geosphere* 2021, doi:10.1130/GES02421.1.
5. Vernikovskiy, V.A.; Vernikovskaya, A.E.; Proskurnin, V.F.; Matushkin, N.Y.; Proskurnina, M.A.; Kadilnikov, P.; Larionov, A.N.; Travin, A.V. Late Paleozoic–early Mesozoic Granite Magmatism on the Arctic Margin of the Siberian Craton during the Kara-Siberia Oblique Collision and Plume Events. *Minerals* 2020, doi:10.3390/min10060571.
6. Zhang, X.; Pease, V.L.; Carter, A.; Kostuychenko, S.; Suleymanov, A.; Scott, R.A. Timing of Exhumation and Deformation across the Taimyr Fold-Thrust Belt: Insights from Apatite Fission Track Dating and Balanced Cross-Sections. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 2018, 460, 315–333, doi:10.1144/sp460.3.

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ ОБРАЗОВАНИЙ ДОЮРСКОГО КОМПЛЕКСА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ

А.В. Латышев<sup>1,2</sup>, А.О. Хотылев<sup>1</sup>, В.Б. Хубанов<sup>3</sup>, И.В. Панченко<sup>4</sup>, П.Ю. Куликов<sup>4</sup>, М.Е.Смирнова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>4</sup> ЗАО «Моделирование и мониторинг геологических объектов им. В.А. Двуреченского» (ЗАО «МиМГО»), Москва, Россия

Западно-Сибирский бассейн представляет собой уникальную нефтегазоносную провинцию и занимает ключевое положение в структуре Северной Евразии. На настоящий момент не существует общепризнанной модели строения и тектонической эволюции фундамента Западной Сибири. Расшифровка истории развития Западной Сибири в доюрское время крайне важна как для тектонических реконструкций Центрально-Азиатского складчатого пояса, так и для уточнения поисково-разведочных целей для добычи углеводородов, особенно если учесть огромный коллекторский потенциал доюрского комплекса [4]. В данной работе приводятся результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования цирконов триас-нижнеюрских терригенных пород из трех скважин (Ит302, Ц15, Г44) в пределах Краснотенинско-Фроловского района (центральная часть Западно-Сибирской плиты).

Возраст детритовых цирконов был определен в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) с помощью одноколлекторного магнитно-секторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Element XR и установки для лазерной абляции NWR 213. Размер кратера составлял 25–40 мкм. Эталон циркона 91500 использовался в качестве внешнего стандарта, эталоны GJ и Plesovice - контрольные образцы. Обработка данных масс-спектрометрического анализа проводилась с помощью программы GLITTER. Подробное описание методики исследования приведено в работе [3]. При рассмотрении возраста, для зерен моложе 1000 млн лет использовался возраст, рассчитанный по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , а для зерен древнее 1000 млн лет использовался возраст по отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . Для каждой пробы было проанализировано 110 зерен циркона, из которых для дальнейшего анализа было отобрано от 86 до 104 зерен с дискордантностью менее 10%.

Во всех трех скважинах были исследованы терригенные породы от песчаников до гравелитов, залегающие на глубинах 3015-3060 м и перекрывающие магматические и



метаморфические образования доюрского комплекса. Окатанность и сортировка варьируют от очень плохой (скв. Ц15) до хорошей (скв. Ит302). Среди крупных обломков гравийной размерности преобладают кислые вулканические породы, реже встречаются метаморфизованные базальты, долериты, а также кварциты, метапесчаники и кремнистые породы.

В пробе Ц15 возрасты цирконов образуют два отчетливых пика на 250 и 282 млн лет (63 и 36 определений соответственно). Первый пик отвечает возрастам кислых вулканитов расположенного рядом Рогожниковско-Назымского грабена [4], второй – гранитоидным массивам Красноленинского свода [2].

Проба Г44 демонстрирует основной максимум возрастов в диапазоне 325-302 млн лет (ранний-поздний карбон). Происхождение этого кластера (90 определений), вероятно, связано с широко распространенными в районе исследования надсубдукционными вулканитами и гранитоидами аналогичного возраста [Latyshev et al., in prep.]. Единичные определения соответствуют более древним палеозойским интервалам (355, 379, 393 млн. лет), докембрию (1019, 2525 млн лет) и перми-триасу (284, 247, 204 млн. лет).

В пробе Ит302 выделяется несколько кластеров палеозойского возраста и единичные докембрийские зерна. Наиболее интенсивный пик отвечает концу девона – началу карбона (максимум на 364 млн. лет, более 25 определений), побочные пики выделены по 9-12 датировкам и отвечают возрастам 319, 391, 440 млн. лет. Источник цирконов с возрастными около 319 млн. лет, вероятно, аналогичен таковому для одновозрастных зерен пробы Г44 – кислые вулканиты и гранитоиды. Ордовикско-силурийские цирконы могут быть связаны с размывом гранитоидов типа Нялинского массива соответствующего возраста [1]. Что касается наиболее распространенных позднедевонских возрастов, то их происхождение на текущий момент остается неясным. Относительно мелкие массивы измененных надсубдукционных гранитоидов с возрастными  $365 \pm 3$  и  $379 \pm 4$  млн лет известны немного западнее от рассматриваемого района, в пределах Ем-Еговской площади [2]. Обилие цирконов девонского возраста в песчаниках скважины Ит302 может указывать на гораздо более широкое развитие продуктов девонского магматизма в фундаменте рассматриваемого района Западно-Сибирской плиты.

Таким образом, изученные цирконы фиксируют три крупных тектоно-магматических этапа в эволюции доюрского комплекса Западной Сибири: 1) ордовик-силур, 2) поздний девон - карбон, 4) пермь – начало триаса.

## Литература

1. Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Коротеев В.А. Первые сведения о раннепалеозойских гранитоидах в фундаменте Западной Сибири // ДАН. 2013. Т. 453. №6. С. 650–653.
2. Хотылев А.О, Майоров А.А., Худолей А.К., Ершова В.Б., Калмыков Г.А., Хубанов В.Б., Червяковская М.В. Гранитоидные массивы Красноленинского свода в Западной Сибири: состав, строение, возраст и условия формирования // Геотектоника. 2021. №2. С.70-93.
3. Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Цыганков А.А. U-Pb изотопное датирование цирконов из PZ3-MZ магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставление с SHRIMP данными // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 241–258.
4. Smirnova M.E., Panchenko I.V., Kulikov P.Y., Latyshev A.V., Tokmakova A.I., Trushkova J.I., Sapogova E.E., Bakulin A.A., Shmakov V.D. Structure, Rock Types, and Reservoir Properties of Altered Permian–Triassic Rhyodacites in Grabens of the Frolov Megadepression in Western Siberia // Lithology and Mineral Resources, 2024, Vol. 59, No. 2, pp. 206–233.

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ ГРАНИТОВ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. ИНДИГИРКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕКОВОГО ДАТИРОВАНИЯ АПАТИТА (АФТ)

**С. В. Малышев<sup>1</sup>, М. А. Красова<sup>2</sup>, А. Д. Савельев<sup>1,3</sup>, А. К. Худолей<sup>1</sup>, Н. В. Брянский<sup>4</sup>,  
А. А. Каримов<sup>4,5</sup>, А. В. Иванов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,  
Россия

<sup>2</sup>ООО «ЛИМС», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского

<sup>4</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>5</sup>Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

Район среднего течения р. Индигирка охватывает мезозойские складчато-надвиговые структуры Верхояно-Колымского пояса, в которые входят деформированные глубоководные мезозойские осадочные отложения Кулар-Нерского и Инъяли-Дебинского террейнов, прорванные гранитными интрузиями Главного (Колымского) и Тас-Кыстабытского батолитовых поясов. Главный батолитовый пояс состоит из гранитоидных батолитов поздней юры – раннего мела, простирающийся параллельно структурам складчатого пояса, и имеет протяженность более 1100 км при ширине до 300 км. Возраст внедрения гранитоидов Главного пояса оценивается в интервале 158–144 млн лет, и обстановка их формирования связывается с активноокраинным магматизмом Андийского типа [1]. Интрузии Тас-Кыстабытского пояса располагаются прерывистой цепью, которая протягиваются в северо-северо-западном направлении и пересекает Адыча-Тарынскую зону разломов. Большая часть интрузий располагается в пределах Кулар-Нерского террейна. Внедрение батолитов данного пояса происходило как синхронно с батолитами Главного пояса – ~145 млн лет, так и в посторогенный этап – ~90–83 млн лет [2]. Для трекового датирования по апатиту было выбрано два массива из Главного батолитового пояса – Порожноцепинский (145.6±1.1 млн лет) и Чён (144.3±1.3 млн лет), и один массив из Тас-Кыстабытского пояса – Усть-Нерский (83.7±0.8 млн лет). Указанные возрасты получены U-Pb методом по циркону в ЦИИ Института Карпинского на SHRIMP II. Трековое датирование проводилось для установления низкотемпературной термической истории, интерпретация которой позволяет установить время эксгумации и эрозии данных комплексов, как отражение постколлизийных деформационных событий.

Для трекового датирования было отобрано по одному образцу из Порожноцепинского и Усть-Нерского массивов и два образца были отобраны из массива Чён с различных высот. Из всех 4 образцов были выделены зерна апатита и имплантированы в эпоксидные полированные препараты (шайбы). Для подсчета треков в образцах, замера Drag и длин замкнутых треков была использована установка Autoscan (РЦ «РДМИ», СПбГУ) и компьютерная программа TrackWorks. Измерение концентраций урана в зернах апатита производилось методом LA-ICP-MS в лаборатории Института Земной коры СО РАН (Иркутск) на масс-спектрометре Agilent 7900 с лазерной абляцией Analyte Excite 193nm [3]. Калибровка концентрации урана производилась с использованием стекла NIST 612. При расчете трековых возрастов был рассчитан калибровочный коэффициент  $\zeta$  путем анализа возрастного стандарта Durango. Термическая история моделировалась в программе HeFTy [4].

Вычисленный трековый возраст апатита для изученных массивов находится в интервале от 79 до 59 млн лет. Данный возрастной интервал указывает на главную фазу выведения гранитных комплексов в верхние области земной коры во время завершающих коллизионных процессов. Трековые возрасты для различных уровней массива Чён составили 59 и 72 млн лет, соответственно, что позволяет оценить скорость эрозии в 25м/млн лет. Инверсионные модели свидетельствуют, что все три комплекса после довольно быстрой эксгумации в позднем мелу пребывали в пределах зоны частичного отжига, то есть на глубине ~2-3 км вплоть до 25-20 млн лет, после чего были выведены на дневную поверхность. Последний этап также фиксируется низкотемпературными датировками на Омудевском террейне и на Хадараньинском плутоне (ZHe и AFT, [5]), и возможно является следствием взаимными перемещений между Евразийской и Северо-Американской плитами в кайнозой [5].

#### Литература

1. Akinin V.V., Miller E.L., Toro J., Prokopiev A.V., Got-tlieb E.S., Pearce S., Polzunenkov G.O., Trunilina V.A. Epidocity and the dance of late Mesozoic magmatism and deformation along the northern circum-Pacific margin: north-eastern Russia to the Cordillera // Earth-Sci. Rev. 2020. Vol. 208. P. 103272.
2. Layer, P.W., Newberry, R., Fujita, K., Parfenov, L., Trunilina, V., Bakharev, A. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and trace element geochemistry // Geology 29, 2001, P. 167-170.

3. Woodhead J. D., Hellstrom J., Hergt J. M., Greig A., Maas R. Isotopic and elemental imaging of geological materials by laser ablation Inductively Coupled Plasma mass spectrometry // Journal of Geostandards and Geoanalytical Research, 31, 2007. P. 331–343.

4. Ketchum R. A. Forward and Inverse Modeling of Low-Temperature Thermochronometry Data // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2005. Vol. 58, 1. P. 275–314.

5. Прокопьев, А.В., Ершова, В.Б., Стокли, Д., Тимофеев, В.Ф. (U-Th)/He термохронология обломочных и магматических цирконов (ZHe) из пород юго-восточной части Верхояно-Колымской складчатой области / Геодинамика и минерагения Северной Евразии: материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН, 2023, 431–434.

## АПАТИТ СЛЮДЯНКИ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ LA-ICP-MS

**А.С. Мальцев<sup>1</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>, А.Н. Жиличева<sup>1</sup>, А.А. Каримов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН), Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН), Иркутск, Россия

Апатит – один из наиболее распространенных минералов, встречающийся во всех типах горных пород (магматических, метаморфических, осадочных). Его состав может нести важную информацию о генезисе магм, процессах метаморфических преобразований и источниках сноса осадочного вещества. Кроме того, апатит является U-Pb геохронометром, а также используется при термохронологических исследованиях в области малых температур с помощью трекового (AFT) и U,Th-He датирования. Апатит включает в себя широкий спектр микроэлементов, таких как Sr, Y, U, Th, а также редкоземельные элементы. Основная проблема определения химического состава апатита заключается в отсутствии унифицированных и стандартизированных методик измерений. В последние годы масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS) стала рутинным методом быстрого многоэлементного анализа апатита для решения задач в различных геологических областях. Количественное определение концентраций элемента в LA-ICP-MS основано на способе внешней калибровки, но на данный момент отсутствуют эталонные образцы матрицы апатита с аттестованными значениями концентрации для калибровки прибора. Применение искусственных стандартов NIST 610 и NIST 612 (стекло) в качестве калибровочных образцов для анализа апатита существенно повышает неопределенность измерений из-за возможных матричных эффектов. Принимая эталоны возраста апатита (Durango, Fish Canyon Tuff, Otter Lake и т.п.) в качестве калибровочных образцов, соответствующих матрице, существует высокая вероятность получения значительной систематической ошибки из-за химической неоднородности этих кристаллов апатита. Кроме того, некоторые апатиты, предлагаемые и используемые в качестве стандартов возраста, не имеют достаточной элементной характеристики. В данной работе представлена оценка однородности апатита Слюдянки, который потенциально может быть использован в качестве натурального калибровочного образца. На рисунке 1 в качестве примера представлены LA-ICP-MS карты распределения элементов Y, Pb, U, La в пробе апатита. В дальнейшем планируется получить полную характеристику апатита Слюдянки с использованием различных аналитических методов.

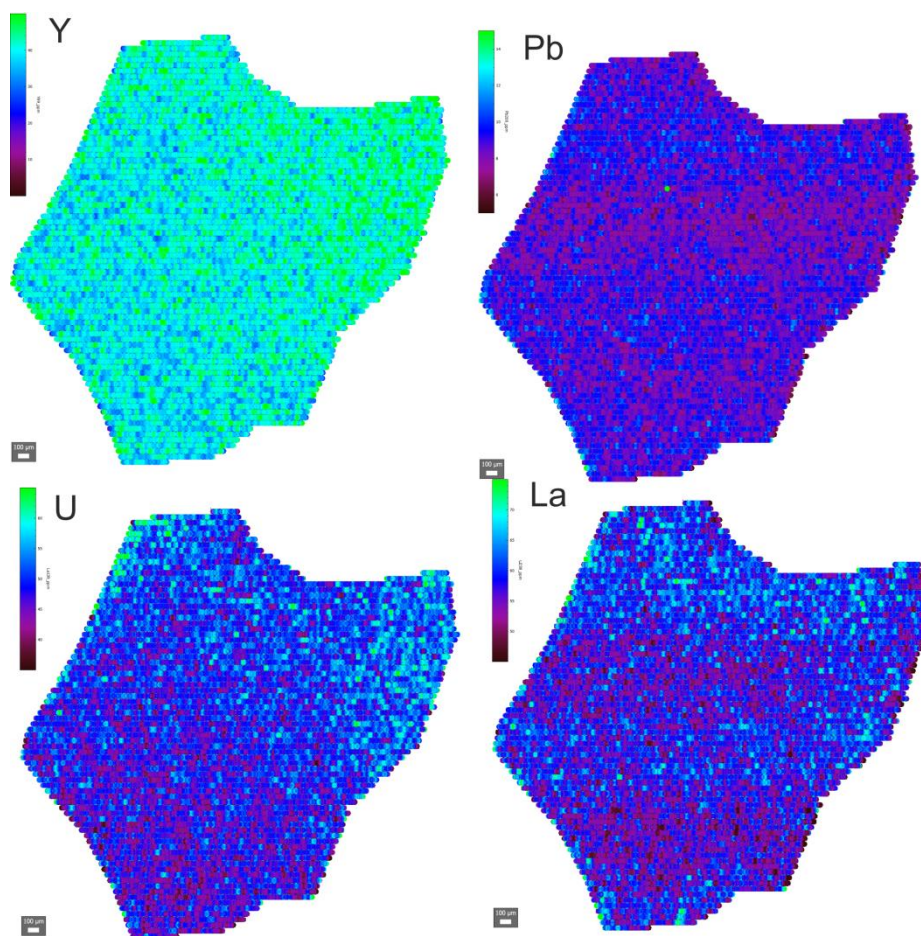


Рис. 1. Карты LA-ICP-MS, показывающие распределение элементов Y, Pb, U, La в пробе апатита

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-00035, <https://rscf.ru/project/22-77-00035/>.

## ДААННЫЕ ПО U-Pb ДАТИРОВАНИЮ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ ИЗ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮЖНО-ТАТАРСКОГО СВОДА

К.Р. Миннебаев<sup>1</sup>, А.В. Куликова<sup>1,2</sup>, Д.К. Нурғалиев<sup>1</sup>, Д.В. Семенова<sup>1,2</sup>, П.Д. Котлер<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Совокупность возрастных спектров детритовых цирконов и данных о вещественном составе осадочных толщ отражает процессы, протекающие как, собственно, в бассейнах седиментации, так и на прилегающих к ним территориях, выступающих в качестве источников сноса обломочного материала. В свою очередь определение состава и районов сноса обломочного материала, из которого образовались породы-коллекторы, является важным этапом в рассмотрении генезиса месторождений нефти и газа и составлении палеогеографических реконструкций изучаемой территории. В ходе изучения терригенных отложений осадочного чехла Южно-Татарского свода (ЮТС) Восточно-Европейской платформы нами были получены данные о составе и U-Pb датировки детритовых цирконов из песчаников живетского яруса и пашийского горизонта среднего девона, тиманского (кыновского) горизонта верхнего девона, бобриковского и верейского горизонтов нижнего и среднего карбона соответственно, а также уфимского яруса перми.

Породы средне-, верхнедевонского и нижнекаменноугольного возраста имеют преимущественно кварцевый состав, хорошую сортировку и окатанность обломочного материала, что позволяет говорить нам о его длительном, возможно многостадийном переносе и осаждении в стабильных условиях. Согласно [5] формирование этих терригенных отложений происходило в условиях среднего шельфа современных морей.

Образец среднекаменноугольного возраста резко отличается от более древних пород. В его составе отмечаются полевые шпаты, кальцит, кварц, акцессорные минералы и обломки горных пород. Материал плохо сортирован, зерна полуокатанные, угловатые. Наблюдается большое количество микрофоссилий хорошей сохранности. Это может указывать на близость и разнообразие источников поступления обломочного материала. Формирование терригенных отложений верейского горизонта среднего карбона происходило, вероятнее всего, в условиях мелководного шельфа.

Образец пермского возраста так же обладает рядом особенностей, которые отличают его от остальных проб. В первую очередь отмечается наличие в образце органического



вещества – высоковязких углеводов. Подавляющее содержание кварца в составе, а также приуроченность места отбора образца к гряде вытянутых песчаных тел северо-западного простирания, вероятным палеобарам [3], позволяет предположить формирование данных пород в мелководных условиях впадения речной сети в морской бассейн.

Согласно результатам U-Pb датирования детритовых цирконов для девонских и раннекарбонового образцов в источниках сноса преобладали докембрийские комплексы с явным преобладанием зерен цирконов мезо-палеопротерозойских и нео-мезоархейских возрастов (рис. 1). Высокая степень окатанности зерен говорит нам о дальнем переносе детритового материала. Цирконы, как правило, со сложным внутренним строением, признаками метамиктизации, которые характерны для метаморфических и гидротермально проработанных цирконов. Редко встречаются зерна цирконов с осцилляторной, полосчатой и секториальной зональностью, которые можно отнести к магматическим.

По результатам U-Pb датирования образца среднекаменноугольного возраста, в источниках сноса преобладали палеозойские комплексы с явным доминированием зерен каменноугольного, ордовикского и кембрийского возрастов, а также комплексы с цирконами неопротерозойского возраста (рис. 1). Мезо-палеопротерозойские и архейские зерна встречаются крайне редко. Палеозойские и неопротерозойские зерна циркона со средней и плохой степенью окатанности, большинство имеют удлиненно призматическую форму. Цирконы, как правило, имеют полосчатую и осцилляторную зональность, реже сложное внутреннее строение. Вероятнее всего, большая часть цирконов имеет магматическое происхождение. Мезо-палеопротерозойские и архейские зерна хорошо окатаны и, как правило, имеют сложное внутреннее строение, признаки митамиктизации.

Полученные данные U-Pb датирования образца пермского возраста позволяют нам установить молодую и древнюю группы источников сноса. В молодой группе преобладают зерна раннекаменноугольного возраста, которые образуют явный возрастной пик. Зерна представлены со средней и плохой степенью окатанности, преимущественно осцилляторной зональностью и могут быть идентифицированы как магматические цирконы. Цирконы протерозойского возраста имеют широкое возрастное распределение, зерна обладают высокой степенью окатанности, сложным внутренним строением и признаками метамиктизации. Возможно сделать предположение об их различном – как магматическом, так и метаморфическом – происхождении.

Согласно [5, 10–12] преобладающим направлением сноса детритового материала в осадочный бассейн в девон-раннекаменноугольное время было юго-восточное. Здесь прослеживается нормальный фациальный ряд, протягивающийся от области сноса (суши) и континентально-дельтовых обстановок через мелководный морской бассейн различной солености к континентальному склону и, далее, к океаническим обстановкам: преддуговому прогибу, островным дугам и задуговому бассейну Уральского палеоокеана. Бассейн ЮТС располагался на значительном удалении (около 500–1000 км) как от предполагаемой основной береговой линии суши, так и от границы (бровки) континентального склона (активной окраины). На основе опубликованных и согласно полученным нами результатам, для пород среднедевонского-раннекаменноугольного возраста в качестве доминирующего источника сноса можно предположить породы Фенноскандии [6, 8]. В московско-позднекаменноугольное время произошел рост Уральского орогена [4], что привело к резкой смене питающих провинций для отложений верейского горизонта среднего карбона. Направление сноса детритового материала поменялось в противоположную сторону, а вышедшие на поверхность породы Урала стали доминирующими источниками детритового материала [2, 4, 7]. В свою очередь для пород пермского возраста возможно установление как древнего, так и молодого источников сноса на основе данных распределения U-Pb датировок цирконов. Вероятно, в бассейн ЮТС одновременно поступал обломочный материал как с территории Восточно-Европейской платформы, при помощи речной сети, так и с территории Уральского орогена, близость которого так же может является ключевым фактором [3, 9]. Однако существует и другое мнение среди исследователей, которые предполагают терригенные отложения ашинской серии южного сегмента Западно-Уральской мегазоны в качестве вторичного источника мезопротерозойских цирконов [1]. Таким образом данный вопрос об источниках сноса обломочного материала для Южно-Татарского свода в пермское время остается дискуссионным и требует выполнения дополнительных исследований для его решения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению No 075-15-2022-299 в рамках программы развития НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты»

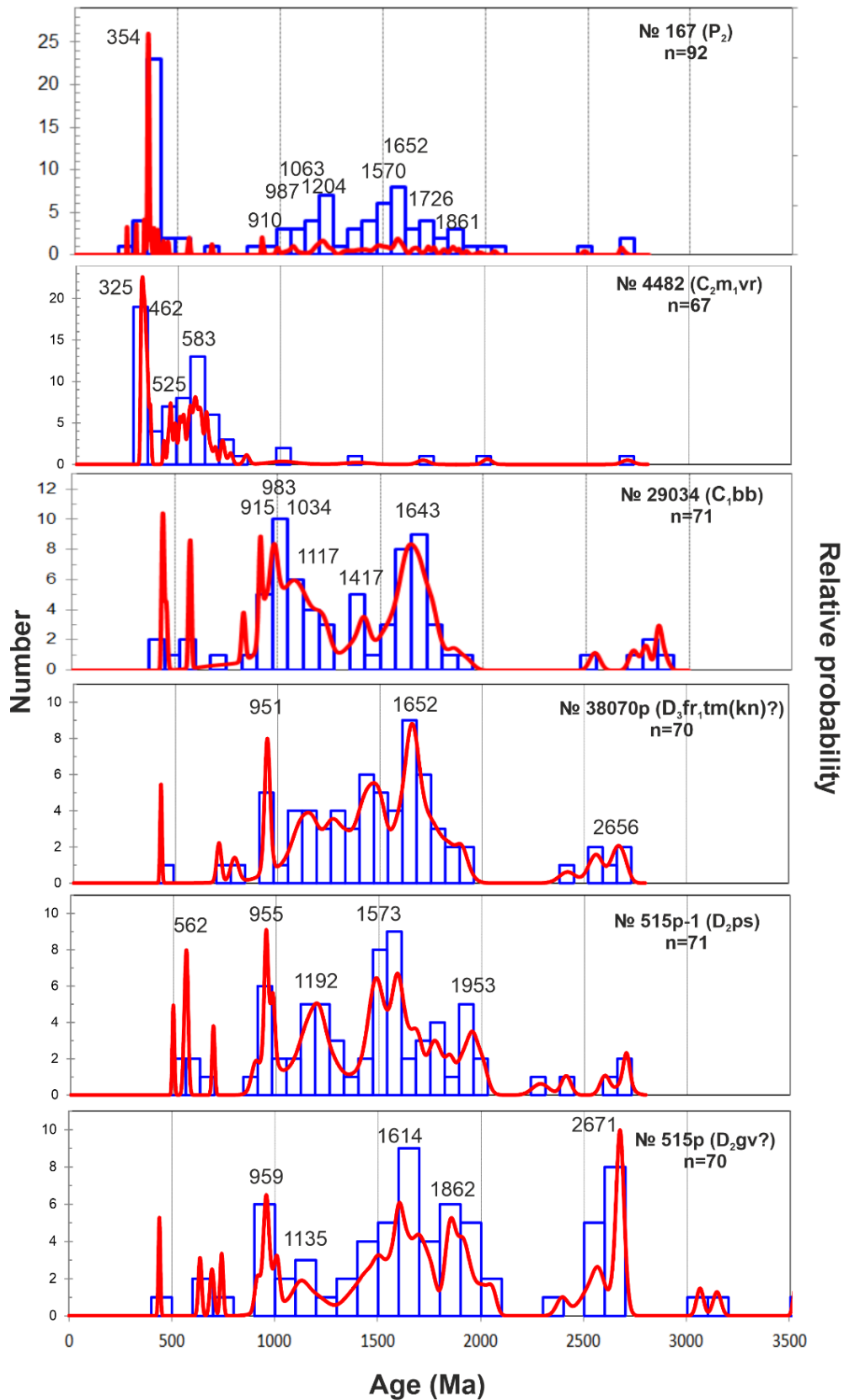


Рис. 1. Гистограмма и график плотности вероятности распределения возрастов детритовых цирконов

## Литература

1. Колодяжный С.Ю., Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В. [и др.] Природа Пучеж-Катункской импактной структуры (центральная часть Восточно-Европейской платформы): результаты изучения U–Th–Pb изотопной системы зерен детритового циркона из взрывчатых брекчий // Геотектоника. – 2023. – № 5. – С. 70-95. – DOI 10.31857/S0016853X23050041. – EDN UZXOSR.
2. Краснобаев А.А., Вализер П.М., Анфилогов В.Н., Медведева Е.В., Бушарина С.В. Цирконология рутиловых эклогитов Максютковского комплекса (Южный Урал) // Докл. РАН. 2017. Т. 477. № 3. С. 342–346.
3. Новикова С.П., Нургалиев Д.К., Судаков В.А., Делев А.Н., Нургалиева Н.Г., Лябипов М.Р., Ахмадуллин Р.Р. Особенности построения геологической модели залежи сверхвязкой нефти при планировании системы разработки методом парогравитационного дренажа // Георесурсы. 2017. Т. 19. № 4. Ч. 1. С. 331-340. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.19.4.5>
4. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: ГИЛЕМ, 2000. 146 с.
5. Силантьев В.В., Валидов М.Ф., Мифтахутдинова Д.Н., Морозов В.П., Ганиев Б.Г., Лутфуллин А.А., Шуматбаев К.Д., Хабибов Р.М., Нургалиева Н.Г., Толоконникова З.А., Королев Е.А., Судаков В.А., Смирнова А.В., Голод К.А., Леонтьев А.А., Шамсиев Р.Р., Нойкин М.В., Косарев В.Е., Никонорова Д.А., Ахметов Р.Ф. Модель осадконакопления пашийского горизонта (терригенная толща девона) Южно-Татарского свода Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 4. С. 12–39.
6. Светов А.П., Свириденко Л.П. Рифейский вулcano-плутонизм Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: Кар. НЦ РАН, 1995. 211 с
7. Удоратина О.В., Куликова К.В., Шуйский А.С., Соболева А.А., Андрейчев В.Л., Голубева И.И., Капитанова В.А. Гранитоидный магматизм Севера Урала: U–Pb возраст, эволюция, источники. // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12, № 2. 287–309 с.
8. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. Москва: Научный мир, 2001. 606 с.
9. Чистякова А.В., Веселовский, Р. В., Семенова Д. В. [и др.] Стратиграфическая корреляция пермо-триасовых разрезов Московской синеклизы: первые результаты U–Pb датирования обломочного циркона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 492, № 1. – С. 23-28. – DOI 10.31857/S2686739720050060. – EDN TKNRES.
10. Golonka J., Kiessling W., Phanerozoic time scale and definition of time slices / Kiessling W., Flügel E., Golonka J. (Eds.). Phanerozoic Reef Patterns // Society for Sedimentary Geology. Special Publication. 2002. V. 72. P. 11–20.

11. Golonka J. Late Devonian paleogeography in the framework of global plate tectonics // Global and Planetary Change. 2020. V. 186. P. 1–19.

12. Nikishin A.M., Ziegler P.A., Stephenson R.A., Cloetingh S.A. P.L., Fume A.V., Fokin P.A., Ershov A.V., Bolotov S.N., Korotaev M.V., Alekseev A.S., Gorbachev V.I., Shipilov E.V., Lankreijer A., Bembinova E.Yu., Shalimov I.V. Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution // Tectonophysics. 1996. V. 268. P. 23–63.

## **ЭВОЛЮЦИЯ ЮГА СИБИРИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ U-Pb LA-ICP-MS ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ ИЗ ПОРОД МОТСКОЙ СЕРИИ ПОЗДНЕГО ВЕНДА – РАННЕГО КЕМБРИЯ**

**З.Л. Мотова<sup>1</sup>, Д.П. Гладкочуб<sup>1</sup>, Т.В. Донская<sup>1</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>, Н.В. Брянский<sup>1,2</sup>, В.Б. Хубанов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Поздневендско-раннекембрийский этап является одним из наиболее интересных в эволюции Сибирского кратона, так как именно в течение этого временного интервала произошло региональное изменение палеогеографии, а именно смена периферийного форландового осадочного бассейна мелководным эпиконтинентальным морским бассейном южной окраины Сибири [4, 8]. Осадочные отложения, отражающие смену бассейнов осадконакопления, а также переход от континентальных условий осадконакопления к прибрежно-морским фиксируются вдоль всей южной окраины Сибирского кратона от Енисейского кряжа на западе и до Патомского нагорья на востоке [4, 8]. На всей территории Сибирского кратона эти толщи несогласно залегают на вендских терригенно-карбонатных породах, которые реконструируются как отложения форландового бассейна, и согласно перекрываются кембрийскими галогенно-карбонатными породами, накопление которых происходило в мелководном эпиконтинентальном морском бассейне [3, 7]. На юге Сибирского кратона осадочные отложения этого возраста объединяются в присаянский региональный стратиграфический горизонт [3]. В Иркутском Присаянье породы присаянского регионального горизонта представлены терригенно-карбонатными отложениями мотской серии, в составе которой выделяются (снизу вверх): хужирская, шаманская и иркутская свиты [1, 3]. Однако принадлежность пород нижней части мотской серии, а именно хужирской свиты, к присаянскому горизонту является предметом дискуссий. Ряд исследователей относили все свиты мотской серии, включая хужирскую, к присаянскому горизонту [1, 3, 8]. В то же время Ю.К. Советов [4] коррелировал хужирскую свиту с отложениями айсинской свиты оселковой серии Бирюсинского Присаянья и качергатской свиты Прибайкалья, относимых к жуинскому региональному стратиграфическому горизонту позднего венда, формирование которых происходило в пределах периферийного форландового бассейна [3]. В данной работе представлена сравнительная характеристика U-Pb (LA-ICP-MS) геохронологических исследований детритовых цирконов из терригенных пород хужирской, шаманской и

иркутской свит мотской серии. Изотопные исследования детритовых цирконов из терригенных пород хужирской свиты были выполнены в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН и опубликованы в работе [2]. Изучение детритовых цирконов из терригенных пород шаманской свиты проводилось в ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, результаты опубликованы в работе [9]. Исследования детритовых цирконов из песчаника иркутской свиты мотской серии выполнены В.В. Марусиным с соавторами [8]. Основной целью исследования являлось определение времени накопления пород стратиграфических подразделений, выделяемых в составе мотской серии, а также реконструкция условий формирования этих пород.

В ходе сопоставления значений U-Pb возраста детритовых цирконов из песчаников хужирской, шаманской и иркутской свит мотской серии обнаружилось значительное различие. Так, возрасты детритовых цирконов из трех проб песчаников хужирской свиты образуют 9 основных пиков: 621 (14%), 781 (35%), 1113 (2%), 1421 (2%), 1857 (20%), 2301 (3%), 2553 (13%), 2761 (10%), 3229 (2%) млн лет. Максимальный возраст осадконакопления оценивается как  $605 \pm 6$  млн лет и позволяет ограничить время седиментации этих пород поздним вендом. Обильная популяция детритовых цирконов архей-раннепротерозойского возраста соответствует возрасту пород, слагающих фундамент южной окраины Сибирского кратона [6, 10]. Основной пик на 621 млн лет близок времени проявления карбонатитового и щелочно-силикатного магматизма, известного на юге Сибирского кратона, а именно, в пределах Урикско-Ийского грабена и Шарыжалгайского выступа фундамента [5, 11]. Пик на 781 млн лет соответствует возрасту пород террейнов северного сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), располагающегося вблизи южной окраины Сибирского кратона [2].

Возрастные спектры детритовых цирконов из вышележащих пород мотской серии, а именно из песчаников шаманской и иркутской свит, обнаруживают единичные зерна архей-раннепротерозойского возраста. Возрасты самых молодых детритовых цирконов из песчаников шаманской (528 млн лет) и иркутской (522 млн лет) свит свидетельствуют о седиментации этих пород в раннем кембрии. Наибольшее количество зерен детритовых цирконов из песчаников шаманской и иркутской свит образуют два основных пика поздневендского (613 (74%) и 634 (65%) млн лет, соответственно в шаманской и иркутской свитах) и раннекембрийского (538 (17%) и 535 (26%) млн лет, соответственно) возраста. В качестве основных источников обломочного материала рассматриваются породы террейнов северного сегмента ЦАСП [8, 9].

Таким образом, совокупность данных по U-Pb исследованию детритовых цирконов из терригенных пород хужирской, шаманской и иркутской свит мотской серии, подтверждает выводы Ю.К. Советова, сделанные на основании литолого-стратиграфических исследований [4], и позволяет пересмотреть отнесение терригенных пород всех трех свит мотской серии к единому присаянскому региональному горизонту. Предполагается, что породы хужирской свиты формировались в раннем венде в форландовом бассейне, образованном на раннем этапе аккреционно-коллизийных событий, известных на юге Сибирского кратона, в основном за счет разрушения пород фундамента южной окраины Сибирского кратона при незначительном участии пород террейнов северного сегмента ЦАСП [2, 7]. Образования хужирской свиты по возрасту соответствуют жуинскому региональному стратиграфическому горизонту [3]. Вышележащие породы шаманской и иркутской свиты относятся к присаянскому региональному горизонту и накапливались не ранее раннего кембрия в основном за счет разрушения пород раннекембрийских и поздневендских террейнов северного сегмента ЦАСП [4, 8, 9].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00196, <https://rscf.ru/project/23-17-00196/>

#### Литература

1. Галимова Т.Ф., Пермьяков С.А., Бобровский В.Т., Бормоткина Л.А., Пашкова А.Г., Поваринцева С.А., Матвейчук А.А., Намолова М.М., Садриев В.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N–48 – Иркутск. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009.
2. Гладкочуб Д.П., Иванов А.В., Донская Т.В., Мотова З.Л., Брянский Н.В., Решетов Е.В. Первое свидетельство докембрийской алмазности сибирской платформы: результаты U–Pb (LA-ICP-MS)-геохронологических исследований детритового циркона из осадочных пород мотской серии // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. 2023. Т. 510. № 1. С. 18–24.
3. Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Часть 1 (Верхний протерозой и нижний палеозой). Новосибирск, 1983. 215 с.



4. Советов Ю.К. Седиментология и стратиграфическая корреляция вендских отложений на юго-западе Сибирской платформы: выдающийся вклад внешнего источника кластического материала в образование осадочных систем // Литосфера. 2018. Т. 18(1). P. 20–45.
5. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В. Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // ДАН. 2005. Т. 404. № 3. С. 400–406.
6. Donskaya T.V. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic granitoids // Precambrian Research. 2020. V. 348. P. 105869.
7. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean // Gondwana Research. 2019. V. 65. P. 1–16.
8. Marusin V.V., Kolesnikova A.A., Kochnev B.B., Kuznetsov N.B., Pokrovsky B.G., Romanyuk T.V., Karlova G.A., Rud'ko S.V., Shatsillo A.V., Dubenskiy A.S., Sheshukov V.S., and Lyapunov S.M. Detrital zircon age and biostratigraphic and chemostratigraphic constraints on the Ediacaran–Cambrian transitional interval in the Irkutsk Cis–Sayans Uplift, southwestern Siberian Platform // Geological Magazine. 2021. V. 158. No. 7. P. 1156–1172.
9. Motova Z.L., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Khubanov V.B. U-Pb ages of detrital zircons and composition of clastic sedimentary rocks from the southern periphery of the Siberian craton: Implications for the earliest Cambrian evolution of southern Siberia // Journal of Asian Earth Sciences. 2024. V. 264. P. 106048.
10. Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Demoux A., Xia X., Wang W., Donskaya T., Liu D., Sun M. Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: Significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Research. 2011. V. 19(3). P. 751–763.
11. Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Savelyeva V.B., Kотов А.В., Danilova Y.V., Bazarova E.P., Danilov B.S. Timing of carbonatite ultramafic complexes of the Eastern Sayan alkaline province, Siberia: U–Pb (ID–TIMS) geochronology of Ca–Fe garnets // Minerals. 2023. V. 13, 1086.

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ ПО АПАТИТУ ИЗ ФОРЛАНДА ЮЖНОГО ВЕРХОЯНЬЯ

А.А. Пазухина<sup>1</sup>, С.В. Малышев<sup>1</sup>, А.К. Худолей<sup>1</sup>, Н.В. Брянский<sup>2,3</sup>, А.А.Каримов<sup>2,3</sup>,  
У.С. Ефремова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,  
Россия

<sup>2</sup>Институт геохимии СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Один из широко применяемых методов низкотемпературной термохронологии — метод датирования апатита по трекам осколков деления урана. Метод позволяет определить время охлаждения пород до примерно 110°C и, как следствие, время тектонического поднятия и эрозии в складчато-надвиговых областях. Для надвиговых пластин Южного Верхоянья ранее производилась оценка возраста деформаций и этапов надвигообразования в пределах Южно-Верхоянского сектора с помощью методов низкотемпературной термохронологии — трекового анализа циркона и апатита [1, 4]. Представленная работа существенно дополняет и уточняет предшествующие результаты и позволяет обобщить термическую историю форланда южного Верхоянья.

Район исследования охватывают Кыллахскую и Сетте-Дабанскую зоны Южно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса [3]. Кыллахская зона прослеживается вдоль границы с Сибирской платформой и сложена рифейскими, вендскими, кембрийскими и ордовикскими терригенно-карбонатными отложениями. Сетте-Дабанская зона занимает осевое положение Южно-Верхоянского сектора и сложена преимущественно карбонатными отложениями венда, нижнего и среднего палеозоя. Осадочный чехол в пределах исследуемой зоны прорван дайками и силлами основного состава, имеющими рифейский и палеозойский возраст. В данном исследовании было проанализировано 7 проб песчаников и 4 пробы долеритов, отобранных из коренных выходов пород по субширотному профилю, проходящему через ядро Горностахской антиклинали, а также через хребет Эбейке-Хаята.

Для подсчета треков в образцах, замера Drag и длин замкнутых треков была использована установка Autoscan (РЦ «РДМИ», СПбГУ) и компьютерная программа TrackWorks. Измерение концентраций урана в зернах производилось методом LA-ICP-MS в лаборатории Института Земной коры СО РАН (Иркутск) на масс-спектрометре Agilent 7900 с

лазерной абляцией Analyte Excite 193nm [6]. Калибровка концентрации урана производилась с использованием стекла NIST 612. При расчете трековых возрастов был рассчитан калибровочный коэффициент  $\zeta$  путем анализа возрастного стандарта Durango. Термическая история моделировалась в программе HeFTy [5].

Полученные результаты трекового датирования апатита Южно-Верхоянского сектора позволяют оценить время поднятия исследуемой территории и охлаждения пород, слагающих её. Для проанализированных образцов были получены возрасты в интервале  $52 \pm 7$ – $91 \pm 21$  млн лет. Результаты представлены на рис. 1 и позволяют сделать следующие выводы:

1. Для нижнерифейских горизонтов хр. Эбейке-Хаята получен трековый возраст  $62 \pm 6$  и  $73 \pm 10$  млн лет, что указывает на то, что подъем пород в приповерхностную зону (2–3 км) и эрозия происходили в данном возрастном диапазоне. Для образца среднерифейского песчаника хр. Эбейке-Хаята, а также образцов из фланга западного крыла Горностахской антиклинали были получены более древние возрасты ( $79 \pm 27$ ,  $81 \pm 19$ ,  $88 \pm 26$  и  $91 \pm 21$  млн лет). Более древний возраст для этих образцов может быть обусловлен частичной переустановкой системы в образцах. Для образцов ядра Горностахской антиклинали и к востоку от него были получены возрасты  $52 \pm 7$ ,  $61 \pm 21$ ,  $61 \pm 8$ ,  $66 \pm 29$  и  $56 \pm 6$  млн лет. Омоложение возрастов в восточном направлении может быть обусловлено как увеличением мощности разреза в восточном направлении и разнице в амплитуде размыва, так и более ранним формированием фронтальных структур.

2. Согласно результатам термического моделирования, полученным по двум образцам из отложений хр. Эбейке-Хаята и ядра Горностахской антиклинали, эксгумация пород выше изотермы закрытия в апатите происходила в два обособленных этапа. Первый этап соответствует полученным трековым датировкам и отражает основной этап тектонического поднятия с последующей эрозией (70–80 млн лет). Второй этап эксгумации на t-T моделях ограничивается возрастным интервалом 10–15 млн лет и указывает на окончательную эксгумацию надвиговых пластин и формирование рельефа в данном регионе. На кайнозойское тектоническое событие в регионе указывает наличие конгломератовой толщи олигоценного возраста в Нижнеалданской впадине, расположенной севернее от Кыллахской тектонической зоны [2].

Таким образом, в результате выполненного исследования было получено 11 новых трековых датировок образцов из южной части форланда Верхоянского складчато-надвигового пояса. Для хр. Эбейке-Хаята в Кыллахской тектонической зоне термохронологические данные

по апатиту были получены впервые. Согласно полученным результатам, поднятие пород в данном регионе происходило в три этапа: первый этап был зафиксирован в работе [1] в 115–130 млн лет, второй этап выведения пород в приповерхностную зону по результатам данной работы произошел в 70–80 млн лет, а окончательная эксгумация пород произошла 10–15 млн лет назад.

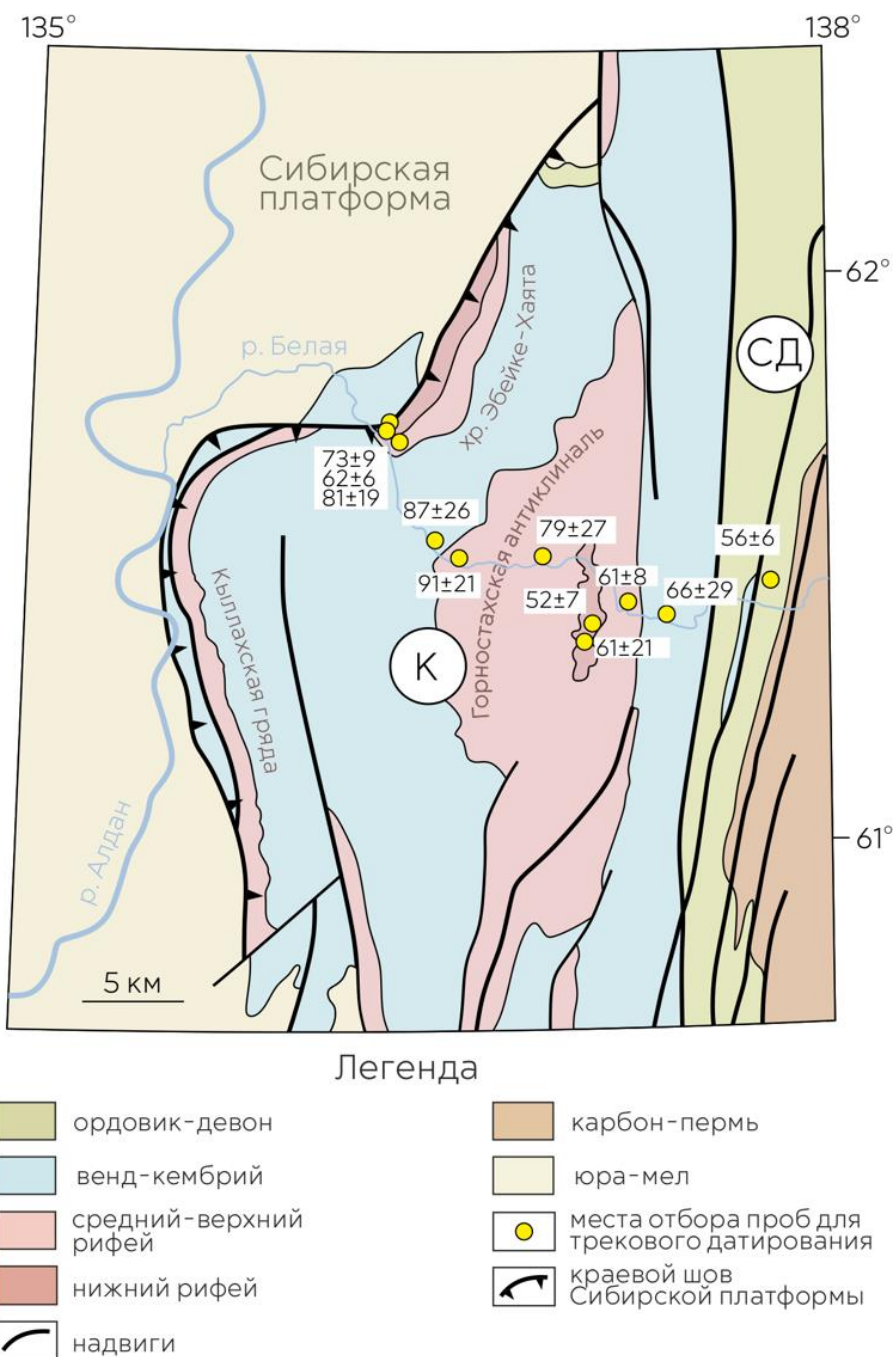


Рис. 1. Схематичная геологическая карта района исследования с результатами датирования по трекам осколков деления урана. Тектонические зоны: К — Кыллахская, СД — Сетте-Дабанская. По [3] с изменениями и дополнениями.

## Литература

1. Малышев С. В., Худoley А. К., Глазмахер У. А., Казакова Г. Г., Калинин М. А. Определение этапов формирования юго-западной части Верхоянского складчато-надвигового пояса по данным трекового датирования апатита и циркона // Геотектоника, 2018. С. 55–68.
2. Парфенов Л. М., Прокопьев А. В., Спектор В. Б. Рельеф земной поверхности и история его формирования // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). Под ред. Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин. М.: МАИК Наука/Интерпериодика, 2001. С. 12–32.
3. Прокопьев А. В., Дейкуненко А. В. Деформационные структуры складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). Под ред. Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин. М.: МАИК Наука/Интерпериодика, 2001. С. 156–198.
4. Прокопьев А. В., Торо Х., Думитру Т. А., Миллер Э. Л., Хоуриган Дж. К. История формирования надвиговых структур Южного Верхоянья (Восточная Якутия) на основе метода трекового датирования (АФТА) // Эволюция тектонических процессов в истории Земли: материалы XXXVII Тектонического совещания. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. С. 86–88.
5. Ketcham R. A. Forward and Inverse Modeling of Low-Temperature Thermochronometry Data // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2005. Vol. 58, 1. P. 275–314.
6. Woodhead J. D., Hellstrom J., Hergt J. M., Greig A., Maas R. Isotopic and elemental imaging of geological materials by laser ablation Inductively Coupled Plasma mass spectrometry // Journal of Geostandards and Geoanalytical Research, 2007, 31. P. 331–343.

## ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ ГРАНУЛИТОВОГО КОМПЛЕКСА СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ И СТАДИЙНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕГМАТИТОВ

М.Е. Петракова<sup>1</sup>, Ш.К. Балтыбаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет – Институт наук о Земле,  
Санкт-Петербург, Россия

Гранитные пегматиты широко распространены в складчатых областях континентальной земной коры, характеризующихся широким развитием кислого магматизма. Появление пегматитовых жил знаменует поздние стадии формирования орогенических комплексов и начало стабилизации коры при снижении температур до условий преобладания хрупких деформаций над пластичными. В Северном Приладожье большинство пегматитовых жил сформировано в высокотемпературном Южном домене (ЮД), который надвинут на Северный домен (СД) по мощной Мейерской зоне пологих надвигов [5].

ЮД представляет блок Свекофеннского пояса, метаморфизованный до гранулитовой фации, с многочисленными интрузиями габбро-эндербитов, тоналит-диоритов, гранитов и рассматривается как высокотемпературное ядро зонально-метаморфизованного комплекса региона [5; 6]. По данным минеральной термобарометрии P-T параметры образования гранулитовых парагенезисов достигали 780–830°C, 5–6 кбар. По U-Pb изотопным возрастам силлиманита, циркона, монацита пик метаморфизма пород ЮД оценен узким интервалом 1881–1878 млн лет назад [1].

Кислый магматизм в ЮД проявился в 4 стадии или этапа магматизма, которые по наиболее крупным петротипическим массивам условно можно выделить как: 1) кузнеченский, 2) кильполский, 3) тервуский, 4) бородинский.

### *1. Кузнеченские граниты*

Массивы гранитов кузнеченского типа обычно сложнодислоцированные, от огнейсованных до трахитоидных, иногда содержат гранат. Их контакты отчетливо указывают на прорывание ими вмещающих интенсивно мигматизированных биотитовых и биотит-гранатовых, гранат-силлиманит-кордиеритовых гнейсов, а также развитых здесь более древних тоналитов и плагиогранитов.

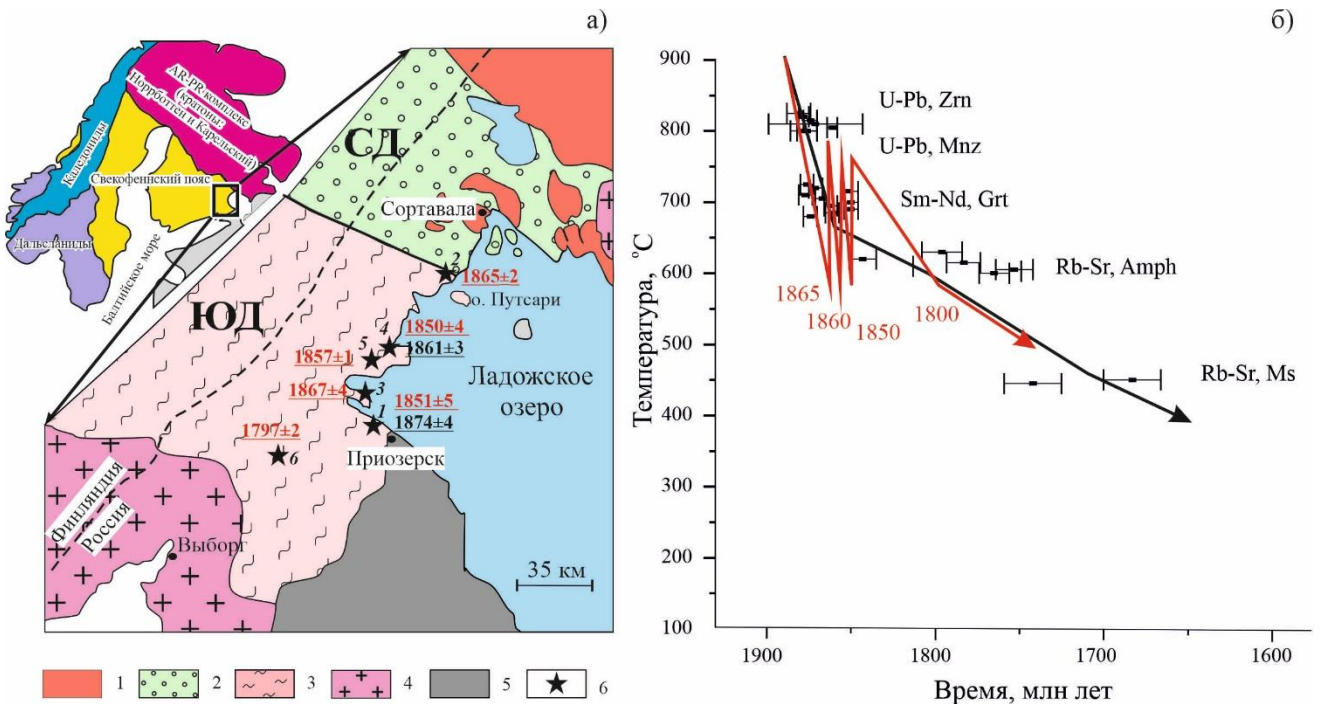


Рисунок 1. а) Схематическое отображение двух доменов Северного Приладожья с указанием участков преимущественного развития пегматитов и позднеорогенных гранитных жил: 1 – архейский Карельский кратон; 2, 3 – свекофеннский метаморфический комплекс, Северный (СД) и Южный (ЮД) домены; 4 – рапакиви; 5 – участки, перекрытые рифейскими отложениями; 6 – местоположение датированных пород. Красным цветом показаны возрасты в млн лет и их погрешности, полученные U-Pb датированием монацита, черным – циркона. На врезке: схема геологического строения Фенноскандинавского щита с указанием прямоугольником изученной площади.

б) T-t кривая остывания пород гранулитового блока Северного Приладожья по данным изучения U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr систем в минералах (линия черного цвета, по [1]) и предполагаемое изменение температуры гранулитов при внедрении четырех генераций пегматитов (красная линия).

Граниты имеют U-Pb возраст по циркону  $1874 \pm 4$  млн лет, по монациту  $1851 \pm 5$  млн лет, что, по-видимому, отражает время закрытия U-Pb системы монацита и соответствует P-T условиям метаморфизма амфиболитовой фации [4]. С ними связаны пегматиты и жилы гранитов, которые прорывают плагиограниты, они тектонически переориентированы, что свидетельствует об их вовлечении в последующие деформации.

## 2. Кильполские граниты

Эти гранатовые лейкограниты имеют незначительное развитие на островах Кильпола и Вавасари (рис. 1). Их особенность в том, что при высоком содержании калиевого полевого шпата они почти не содержат биотита; содержание граната достигает 15-20 об.% [6]. Состав гранитоидов позволяет относить их к S-гранитам, формирующихся в результате анатексиса в

условиях высокотемпературного метаморфизма. Граниты местами сильно разгнейсованы, имеют гранобластовые структуры. Имеют конкордантный возраст по монациту  $1867 \pm 4$  млн лет (проба Б-2000-29) [6], что близко с полученным U-Pb возрастом по циркону  $1868 \pm 4$  млн лет [7] для схожих гранитов в районе Путсари. С этими гранитами связан дайковый комплекс габбро. Мафические анклавы обильны и образуют сетчато-прожилковые системы, иногда представлены в виде будин. Возраст даек основного состава оценен U-Pb методом по циркону  $1870 \pm 4$  млн лет, что в пределах погрешности совпадает с возрастом гранитов, и оценивается как их синплутонический возраст кристаллизации.

### *3. Тервуские граниты*

Граниты этого типа представлены двумя интрузиями: Тервуской и Пелтолской. Эти граниты в виде интрузий и более мелких тел внедряются в тектонически ослабленную зону при смене пластических деформаций на упруго-пластические во время брекчирования свекофеннских пород [3]. Об этом свидетельствуют признаки “залечивающих” гранитов со следами слабо проявленных деформаций в них, а также насыщенность многочисленными включениями пород рамы и обилие теневых текстур.

U-Pb-возраст монацита из гранитов крупной Пелтолской интрузии соответствует значению  $1859 \pm 4$  млн лет. Определенный U-Pb-возраст циркона из гранитов крупной Тервуской интрузии –  $1859 \pm 3$  млн лет [3; 6]. С этими плутонами связаны фации аплитовидных жильных гранитов, которые кристаллизуются на заключительных фазах формирования тервуских гранитов, местами не обнаруживают следов деформации. Конкордантный возраст для жильной фации гранита по монациту равен  $1850 \pm 4$  млн лет [6].

### *4. Бородинские граниты*

Граниты этого типа слагают Бородинский и некоторые другие массивы, который сложен порфиroidными биотитовыми крупнозернистыми гранитами, которые внедряются в мигматизированные гнейсы. Породы в основном однородные, лишь иногда имеются постепенные переходы от редких среднезернистых массивных к наиболее типичным порфиroidным трахитоидным разновидностям, местами разгнейсованы, изредка встречаются гранатсодержащие разновидности. U-Pb изотопные исследования монацита выполнены для двух образцов гранитов Бородинского массива (Б-098, Б-272), конкордантный возраст соответствует значению  $1797 \pm 2$  млн лет [2]. С ними связаны пегматиты и жилы, которые прорывают раннее деформированные жилы гранитов кузнеченского типа.



На данный момент это является самым молодым жильным формированием (1800 млн лет) на стадии позднеорогенного развития зоны сочленения двух крупнейших блоков Фенноскандинавского щита – Карельского кратона и Свекофеннского пояса.

Формирование гранулитового комплекса и последовательности интрузивных, дайковых и жильных кислых магматических пород – это события очень короткого в геологических масштабах временного интервала, которые требуют прогрева коры (до 700–800°C) для образования анатектических выплавок, затем её остывания (до 500–600°C) и формирования трещин, по которым бы поднимались образованные расплавы. Однако, по изотопным оценкам на основе изучения U-Pb, Sm-Nd, K-Ar, Rb-Sr систем минералов из пород Юд история остывания пород в координатах T(температура)-t(время) реконструируется как монотонная с регрессивным спадом температуры от 800–900°C на момент времени 1.88–1.89 млрд лет назад и до 300–400°C около 1.70–1.75 млрд лет назад [1]. Геологические наблюдения и цикличность проявления кислого жильного магматизма (1865, 1860, 1850, 1800 млн лет) говорит, о том, что это было не постепенное остывание, а прерывистое, с пиками нагрева и охлаждения новообразованной коры Свекофеннского орогена.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00106).

#### Литература

1. Балтыбаев Ш. К., Левченков О. А., Левский Л.К. Свекофеннский пояс Фенноскандии: пространственно-временная корреляция раннепротерозойских эндогенных процессов / СПб.: Наука, 2009. 328 с.
2. Балтыбаев Ш. К., Ризванова Н. Г., Глебовицкий В.А. Бородинский массив калиевых порфиroidных гранитов: результаты U-Pb-датирования и обоснование тектонической позиции (Фенноскандинавский щит) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2016. Т. 470. № 1. С. 67–71.
3. Балтыбаев Ш. К., Ризванова Н. Г., Кузнецов А. Б., Петракова М. Е., Вивдич Э. С. Позднеорогенные гранитоиды в Тервуской агматитовой зоне в юго-восточной части Свекофеннского пояса (Северное Приладожье, Россия) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 2. С. 72–80. DOI: 10.31857/S2686739723600546

4. Балтыбаев Ш. К., Сальникова Е. Б., Глебовицкий В. А., Бережная Н. Г., Яковлева С. З., Ковач В. П. Кузнеченский массив калиевых порфировидных гранитов: результаты U-Pb датирования и обоснование тектонической позиции // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2004а. Т. 398. № 4. С. 519–523.

5. Балтыбаев Ш.К., Глебовицкий В.А., Козырева И.В. Конопелько Д.Л., Левченков О.А., Седова И.С., Шульдинер В.И. Геология и петрология свекофеннид Приладожья / СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 198 с.

6. Балтыбаев Ш.К., Левченков О.А., Бережная Н.Г., Левский Л.К., Макеев А.Ф., Яковлева С.З. Время и длительность свекофеннской плутоно-метаморфической активности на юго-востоке Балтийского щита (Приладожье) // Петрология. 2004б. Т. 12. №4. С. 374–393.

7. Konopelko D., Eklund O. Timing and geochemistry of potassic magmatism in the eastern part of the Svecofennian domain, NW Ladoga Lake Region, Russian Karelia // Precambrian Research. 2003. Vol. 120. P. 37–53. DOI: 10.1016/S0301-9268(02)00141-9

## ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ МОНЦОНИТОИДОВ ВЕЛИТКЕНАЙСКОГО КОМПЛЕКСА (АРКТИЧЕСКАЯ ЧУКОТКА)

Г.О. Ползуненков<sup>1</sup>, В.В.Акинин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, Россия

В пределах Арктического побережья Чукотки обнажены метаморфические и магматические комплексы мелового возраста, относящиеся к периоду событий растяжения в террейне Арктическая Аляска-Чукотка (ААЧ). В качестве объекта исследования выбраны интрузии монцонитоидов Велиткенайского комплекса, расположение которых контролируется системой трещинных нарушений сдвигового генезиса. Они перекрыты известково-щелочными вулканитами Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП), (U/Pb, циркон, 91 млн. лет).

Термохронологические исследования монцонитоидов Велиткенайского комплекса показали различия в возрасте закрытия изотопных систем:  $106 \pm 2$  млн лет (U/Pb, циркон, кварцевые монцониты) [1], от  $100 \pm 1$  до  $97 \pm 1$  млн лет (Ar/Ar, амфибол, кварцевые монцониты) и  $96.5 \pm 1$  млн лет (Ar/Ar, биотит, кварцевые монцониты) [3]. Учитывая возраст и температуру закрытия изотопных систем (U/Pb, циркон,  $\sim 800\text{--}900$  °C; Ar/Ar, амфибол,  $\sim 500$  °C и биотит,  $\sim 300$  °C) проведена оценка кривой остывания монцонитоидов, которая отвечает снижению температур более чем на 600 °C в течении с 106 до 96 млн лет. Выведение Велиткенайских монцонитоидов с глубинных уровней земной коры ( $\sim 14$  км) [2] на современный уровень, согласно термобарометрическим и термохронологическим данным, происходило со скоростью около 1.4 км / 1 млн лет и длилось  $\sim 10$  млн лет при динамике понижения температуры 60 °C за 1 млн лет. Похожие раннемеловые термальные события проявились не только на Арктическом побережье Чукотки, но также затронули метаморфические комплексы о-ва. Врангеля. Они проявились потерей аргона в калиевом полевоом шпате из неопротерозойских метаморфитов ( $\sim 105$  млн лет). Возраст экспонирования метаморфитов о-ва. Врангеля на современный уровень по данным трекового датирования апатитов оценивается около 94 млн лет [3], что согласуется с оценками возраста закрытия Ar/Ar системы в биотите из монцонитоидов Велиткенайского комплекса (96 млн лет) и U-Pb возрастом циркона из перекрывающих вулканитов ОЧВП (91 млн лет).

Продemonстрированные отличия в возрастах закрытия изотопных систем могут отражать утонение земной коры в Чукотском блоке террейна ААЧ в процессе растяжения и развала орогена. Структурные и геохронологические данные указывают на то, что главные гранитоидные комплексы Чукотки сформированы в апте-альбе и вскрыты в сеномане-туроне.

Работа выполнена по государственному заданию СВКНИИ ДВО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (программа НИР 1023110300019-3-1.5.6).

#### Литература

1. Акинин В.В., Ползуненков Г.О., Готтлиб Э.Ш., Миллер Э.Л. Меловой монцонит-гранит-мигматитовый Велиткеный комплекс: петрология, геохимия пород и циркона (U-Pb, Hf и O) в приложении к реконструкции эволюции магматизма и континентальной коры в блоке Арктическая Аляска-Чукотка // Петрология. 2022. Т. 30. № 3. С. 227–259.

2. Ползуненков Г.О. Оценка P-T и fO<sub>2</sub> условий кристаллизации монцонитоидов Велиткеныйского гранит-мигматитового массива (арктическая Чукотка) по данным минеральной термобаро- и оксидометрии // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 5. С. 97–111.

3. Miller E.L., Akinin V.V., Dumitry T.A., Gottlieb E.S., Grove M., Meisling K., Seward G. Deformational history and thermochronology of Wrangel Island, East Siberian Shelf and coastal Chukotka, Arctic Russia. In: Pease V. and Coakley B. (eds.) Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geological Society, London, Special Publications 460. 2018. P. 207–238.

## (U-Th)/He ГЕОТЕРМОХРОНОЛОГИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

**А.В. Прокопьев<sup>1</sup>, В.Б. Ершова<sup>1,2,3</sup>, Д.А. Васильев<sup>1</sup>, В.Ф. Тимофеев<sup>1</sup>, Д. Стокли<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

<sup>2</sup>Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Jackson School of Geoscience, University of Texas at Austin, USA

Термохронологические исследования были проведены в центральной части Верхояно-Колымской складчатой области (с запада на восток): на границе Полоусного синклинория и Нагонджинского террейна, на востоке Омудевского террейна, в южной части Приколымского террейна и в Сугойском синклинории.

(U-Th)/He датирование детритовых цирконов (ZHe) выполнено в геохронологическом центре UTChron Департамента наук о Земле Техасского университета в Остине, США. Были выбраны зерна циркона диаметром не менее 70 мкм, которые не содержали видимых включений. Из-за обломочного характера большинства образцов и потенциальной дисперсии возрастов охлаждения (U-Th)/He для некоторых образцов было проанализировано до 6 отдельных зерен, в результате чего в общей сложности было проведено 123 анализа из 24 образцов пород различного возраста. Анализы проводились в соответствии с аналитическими процедурами, описанными в [12]. Все возрасты были скорректированы с учетом эффектов  $\alpha$ -выброса [7] и с аналитической ошибкой  $\sim 8\%$  ( $2\sigma$ ). Практически все полученные из обломочных пород ZHe возрасты моложе времени осадконакопления, что свидетельствует об их постседиментационной переустановке.

Были получены следующие результаты:

1) На юге Полоусного синклинория (район Sn месторождения Депутатское) из трех образцов нижней части верхней юры (оксфорд) был получен ZHe возраст ок. 125–128 млн лет, а из ааленских песчаников (один образец) расположенного южнее и перемещенного по надвигам на толщи Полоусного синклинория Нагонджинского террейна – ок. 132 млн лет.

2) В трех образцах силурийских гравелитов Омудевского террейна были получены близкие ZHe возраста ок. 70 млн лет (кампан–маастрихт). ZHe возраст прорывающих их позднеюрских гранитов оценен в  $25 \pm 3,2$  млн лет (олигоцен).

3) В девяти образцах мезо- и неопротерозойских, кембрийских, ордовикских и девонских песчаников и вулканитов юга Приколымского террейна получен сходный ZHe

возраст 135–137 млн лет (валанжин). В расположенных несколько южнее двух образцах песчаников из среднекаменноугольных метаморфизованных в зеленосланцевой фации пород был получен ZHe возраст 100–104 млн лет (альб).

4) Для юрских песчаников расположенного южнее Сугойского синклинория зафиксирован ZHe возраст ок. 90–100 млн лет (сеноман-турон). Прорывающие их позднемеловые гранит-порфиры Арангасского плутона [9] имеют близкий термохронологический возраст.

Время эксгумации пород Нагонджинского террейна с глубин порядка 5–6 км началось на рубеже валанжина–готерива. Одновременно произошел подъем южной части Приколымского террейна (валанжин) после внедрения позднеюрских гранитоидов Главного (Колымского) пояса и формирования Уяндино-Ясачненской магматической дуги [2]. Вероятно, синхронно внедрились трахиты и трахидолериты в Рассохинском блоке Омудевского террейна и в Арга-Тасском террейне (136–137 млн лет [5]), а также произошло «остывание» плутонов Северного и Главного батолитовых поясов ( $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датирование слюд, амфиболов, пород [8]).

Начало тектонического подъема южной части Полоусного синклинория произошло несколько позднее – в конце баррема–начале апта. Шарьирование образований Нагонджинского террейна на юрские отложения Полоусного синклинория [11] произошло раньше, поскольку эти надвиговые структуры прорываются гранитоидами, U-Pb возраст кристаллизации которых поздняя юра–ранний мел [6].

Описанные выше события могут фиксировать либо заключительные стадии становления Верхояно-Черского орогена, либо являться отражением закрытия Южно-Ануйского океана, формирования одноименной сутуры и Новосибирско-Чукотского орогенного пояса.

Следующий этап тектонического подъема, отмеченный на юге Приколымского террейна, имел место в альбское время одновременно с началом формирования Охотско-Чукотского вулcano-плутонического пояса [1] и субдукционными процессами вдоль Восточно-Азиатской активной континентальной окраины. Можно предположить, что формирование Депутатского гранитного плутона (112 млн лет) и последующего Sn оруденения одноименного месторождения (~106 млн лет) [10], Куларского гранитного плутона (111–103 млн лет) [6] и крупного Au месторождения Кючус (~106 млн лет) [10] произошло на заключительных стадиях этого подъема в альбское время.

Раннепалеозойские толщи восточного фланга Омuleвского террейна испытали основной тектонический подъем в кампане–маастрихте. В это время происходило финальное накопление вулканогенно-осадочных толщ в Омсукчанском прогибе Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса, породы которого перекрывают структуры южной части Приколымского террейна, и их последующая деформация, которая могла продолжаться до конца мела или начала палеогена [9]. Можно предположить, что этот подъем связан с приключением Охотского вулканического плато к восточной окраине Евразии и заклиниванием зоны субдукции под Охотско-Чукотским вулканоплутоническим поясом, начавшемся в конце турона и завершившемся в кампане–начале маастрихта [3].

Олигоценый ZHe возраст гранитного плутона (25 млн лет) в Рассохинском блоке Омuleвского террейна близок к установленному нами ранее [4] на северо-востоке террейна в Хадараньинском плутоне (25–26 млн лет, трековое датирование апатита). Этот подъем может быть связан с кайнозойскими перемещениями между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами, граница которых трассируется вдоль хр. Черского.

Работы выполнены частично по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект FUGG-2024-0005), изотопно-геохимические исследования и интерпретация результатов проведены при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-17-00169).

#### Литература

1. Акинин В.В., Миллер Э.Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Петрология. 2011. Т. 19. № 3. С. 249–290.
2. Акинин В.В., Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л., Вуден Дж., Горячев Н.А., Альшевский А.В., Бахарев А.Г., Трунилина В.А. U-Pb-SRIMP-возраст гранитоидов Главного батолитового пояса (СВ Азии) // Доклады РАН. 2009. Т. 426. № 2. С. 216–221.
3. Богданов Н.А., Добрецов Н.Л. Охотское океаническое вулканическое плато // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 2. С. 101–114.
4. Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л., Лейер П.У., Хоуриген Дж.К., Бахарев А.Г., Зайцев А.И., Думитру Т., Джерелс Дж.Э., Уоллес В.Л., Третьяков Ф.Ф., Тарабукин В.П. Новые U-Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопные геохронологические и AFT термохронологические данные по северо-востоку Якутии и их возможная тектоническая и геодинамическая интерпретации // Рудогенез и металлогения Востока Азии. Якутск: ИГАБМ СО РАН, 2006. С. 145–148.

5. Сычев С.Н., Лебедева О.Ю., Худолей А.К., Соколов С.Д., Рогов А.В., Маклашин В.С., Львов П.А. Валанжинский умеренно-щелочной магматизм Рассохинского и Арга-Тасского терейнов (северо-восток России) // Доклады РАН. 2021. Т. 501. № 1. С. 34–42.
6. Akinin V.V., Miller E.L., Toro J., Prokopyev A.V., Gottlieb E.S., Pearcey S., Polzunenkov G.O., Trunilina V.A. Episodicity and the dance of late Mesozoic magmatism and deformation along the northern circum-Pacific margin: north-eastern Russia to the Cordillera // Earth-Science Reviews. 2020. V. 208, 103272.
7. Farley K.A., Wolf R., Silver L. The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages // Geochimica Cosmochimica Acta. 1996. V. 60(21). P. 4223–4229.
8. Layer P.W., Newberry R., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V.A., Bakharev A.G. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and trace element geochemistry // Geology. 2001. V. 29. № 2. P. 167–170.
9. Prokopyev A.V., Ershova V.B., Stockli D.F. Detrital zircon U-Pb data for Jurassic–Cretaceous strata from the South-Eastern Verkhoyansk-Kolyma Orogen—correlations to magmatic arcs of the North-East Asia active margin // Minerals. 2021. V. 11. Iss. 3. Art. No. 291.
10. Prokopyev A.V., Borisenko A.S., Gamyarin G.N., Pavlova G.G., Fridovsky V.Yu., Kondrat'va L.A., Anisimova G.S., Trunilina V.A., Ivanov A.I., Travin A.V., Koroleva O.V., Vasiliev D.A., Ponomarchuk A.V. Age constraints and tectonic settings of metallogenic and magmatic events in the Verkhoyansk–Kolyma folded area // Russian Geology and Geophysics. 2018. V. 59. P. 1237–1253.
11. Prokopyev A.V., Oxman V.S. Multi-phase tectonic structures in the collision zone of the Kolyma-Omolon microcontinent and the eastern margin of the North Asian craton, Northeastern Russia // Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. Vol. 4. Copernicus Publications, 2009. P. 65–70.
12. Wolfe M.R., Stockli D.F. Zircon (U–Th)/He thermochronometry in the KTB drill hole, Germany, and its implications for bulk He diffusion kinetics in zircon // Earth and Planetary Science Letters. 2010. V. 295(1–2). P. 69–82



## ПЕРВЫЕ ТРЕКОВЫЕ ДАННЫЕ ПО АПАТИТУ МЕЗОЗОЙСКИХ МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СЕВЕРНОГО ПРИОХОТЬЯ

**Л. П. Семенова<sup>1,2</sup>, С. В. Малышев<sup>2</sup>, А. А. Каримов<sup>3,4</sup>, Н. В. Брянский<sup>3,4</sup>, У. С. Ефремова<sup>3</sup>,  
А.А. Аленичева<sup>1</sup>, Ю.Ю. Юрченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Всероссийский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>4</sup> Иркутский государственный университет, физический факультет, Иркутск, Россия

Район Северного Приохотья в структурно-тектоническом плане приурочен к западной части Тихоокеанского подвижного пояса — мегаструктуры, которая включает в себя ряд активных окраин, обрамляющих одноименный океан. Объект входит в состав Западно-Корякской складчатой системы, сформированной к позднемезозойскому времени между структурами Верхояно-Колымского складчато-надвигового пояса и Корякско-Камчатской складчатой системы [6]. По большей части она состоит из островодужных комплексов и реликтов континентальных окраин андийского типа от позднепалеозойского до мелового возраста [1]. Среди таких структур выделяются Удско-Мургальский вулканический пояс, а также присутствуют более древние комплексы, представленные Кони-Тайгоносской дугой. На комплексы Западно-Корякской складчатой системы и Верхояно-Колымского складчато-надвигового пояса наложены породы мелового Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП). При сравнении ОЧВП с другими субдукционными комплексами фанерозойского возраста, такими как Юго-Восточно-Китайский пояс, Восточно-Сихотэ-Алиньский пояс, Балхаш-Илийский пояс и другими масштаб извержений и объём изверженного материала ОЧВП значительно превосходят сходные по обстановке структуры, из-за чего в ряде работ его рассматривают как в контексте субдукционного пояса, так и SLIP (Silic Large Igneous Province) [3]. Однако, оценка параметров вулканизма производилась без учёта эродированного материала [2].

Для установления возраста поднятия территории и характера эксгумации, а также оценки объёма и скорости эрозии для мезозойских магматических комплексов, приуроченных к субдукционной окраине Евразийского континента на отрезке северного Приохотья, применен метод трекового датирования апатита, как один из методов низкотемпературной термохронологии. Данный метод позволяет оценить время остывания

пород и выведения их на поверхность, так как метод является чувствительным в температурном диапазоне 60-110°C. В то же время методика измерения длин замкнутых треков даёт возможность выполнить термохронологическое инверсивное моделирование [5], которое в сочетании с U-Pb данными для апатита и циркона позволяет изучать процессы от высокотемпературных до низкотемпературных.

Для настоящих исследований было произведено опробование гранитов и диоритов альбского возраста, относящихся к породам полифазного магаданского комплекса, широко проявленного в прибрежной части Охотского моря (образец 52093/1) и слагающего тело Магаданского батолита, а также речного гипабиссального комплекса, к которому относят синхронные субвулканические образования (образец 61038/1).

U-Pb возраст цирконов для указанных образцов составляет  $103 \pm 1$  и  $106 \pm 1,5$  млн лет соответственно (по неопубликованным данным А. А. Аленичевой с соавторами). Полученные трековые возрасты по апатиту находятся в интервале 75–80 млн лет с усредненной стандартной ошибкой  $\pm 17$  млн лет, в то время как U-Pb возраст апатита для образца гранита составляет  $105,8 \pm 3,7$  млн лет (образец 52093/1). Расчёт трекового и U-Pb возраста апатита производился при изучении 27 зёрен апатита. Было осуществлено численное моделирование с помощью программы HeFTy [5]. Для инверсионного моделирования были использованы данные по 33 и 148 замкнутым трекам соответственно.

Полученные предварительные данные могут быть интерпретированы следующим образом:

Кристаллизация опробованных пород магаданского и речного комплексов происходила в альбское время на глубине не менее 4 км, но не более 13 км при расчёте с учетом среднего геотермического градиента 30°/км.

Возраст деформаций, согласно AFT данным обоих образцов, можно оценить как 75-80 млн лет.

Согласно полученным инверсионным t-T моделям, охлаждение и эксгумация пород происходила в 2 этапа. В промежутке около 105-75 млн лет происходит быстрая эксгумация со скоростью не менее 1,5 км/млн лет. Такой темп эрозии характерен для действующих активных окраин [4]. Этот этап приходится на время заложения ОЧВП. Примерно с 75 млн лет до настоящего времени происходит второй этап эксгумации со скоростью порядка 0,05 км/млн лет, что превышает среднюю скорость эксгумации для тектонически нейтральных областей. В это время затухает активность ОЧВП, к юго-востоку закладывается новая зона

субдукции, что на изучаемой территории отражается в заложении рифтогенных впадин в кайнозойское время.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2022 г. №049-00018-22-01 по объекту «Создание и подготовка к изданию государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 третьего поколения по группе листов территории Российской Федерации в 2021-2023 годах (листы О-55, 56)».

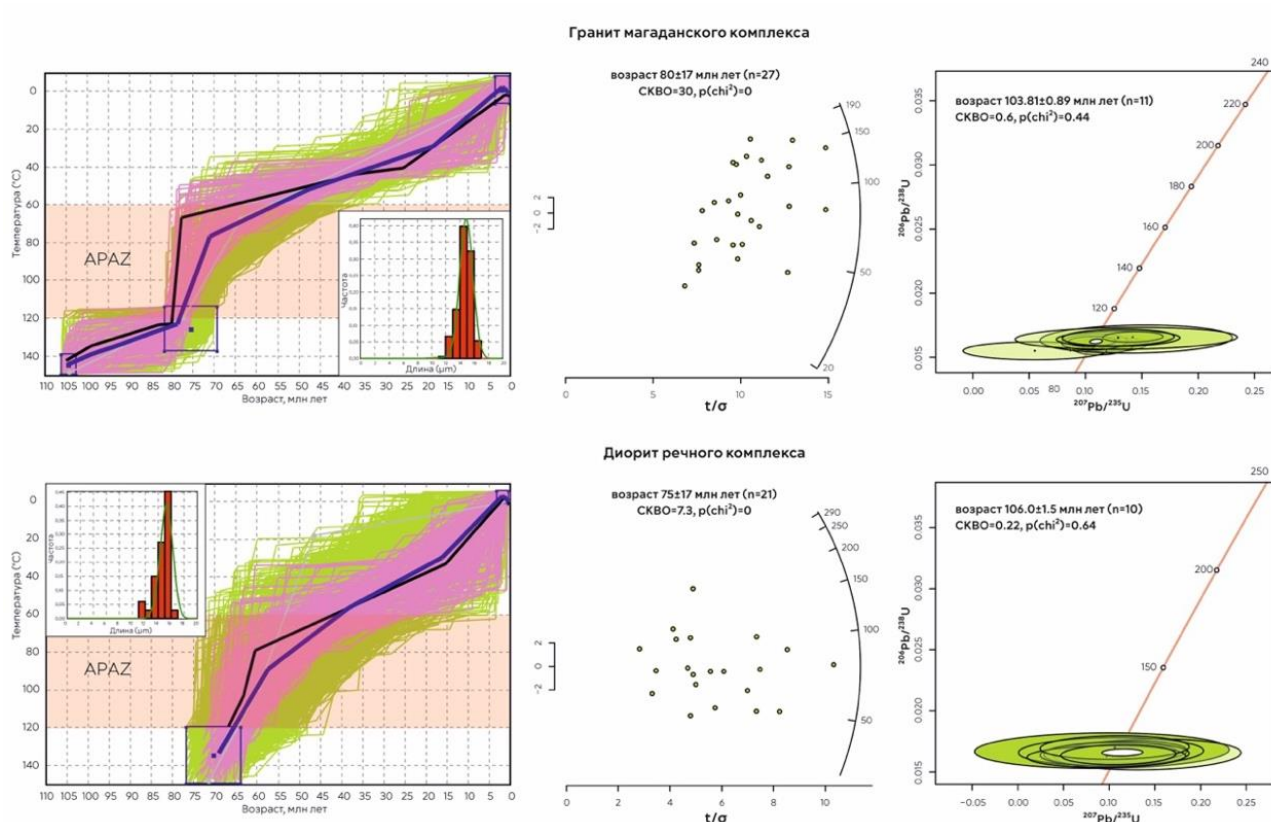


Рис. 1. Слева: инверсионные t-T модели, полученные по результатам измерения длин треков. В центре: результаты трекового датирования апатита. Справа: результаты U-Pb датирования циркона.

### Литература

1. Соколов С. Д. Аккреционная тектоника Корякско-Чукотского сегмента Тихоокеанского пояса. М: Наука, 1992. 479 с.
2. Тихомиров П. Л. Меловой окраинно-континентальный магматизм Северо-Востока Азии и вопросы генезиса крупнейших фанерозойских провинций кремнекислого вулканизма. ГЕОС, 2020. 376 с.

3. Bryan S. E., Ernst, R. E. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs) // *J. Earth-Science Reviews*. 2008. № 86. P. 175–202. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.08.008>.
4. Dunai T. J. *Cosmogenic Nuclides. Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences*. Cambridge University Press, 2010. 187 p.
5. Ketcham R.A. Hefty version 1.6.7, program by: Richard A. Ketcham. Apatite to Zircon, Inc. and Richard A. Ketcham. 2009. P. 65.
6. Sokolov S. D., Bondarenko G. Ye., Khudoley A. K., Morozov O. L., Luchitskaya M. V., Tuchkova M. I., Layer P. W. Tectonic reconstruction of Uda-Murgal arc and the Late Jurassic and Early Cretaceous convergent margin of Northeast Asia–Northwest Pacific // *J. Stephan Mueller Special Publication Series*. 2009. № 4. P. 273–288. <https://doi.org/10.5194/smsps-4-273-2009>.

# IN-SITU LA-ICP-MS/MS Rb-Sr ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОБАРИЧЕСКИХ ПОРОД: РОЛЬ МЕТАСОМАТОЗА, ДЕФОРМАЦИЙ И ОГРАНИЧЕНИЯ ТЕРМОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ

**С.Ю. Скузоватов<sup>1</sup>, А.В. Скобленко<sup>1,2</sup>, А. Везине<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> ISTerre, CNRS, Université Grenoble, Grenoble, France

Для реконструкции тектонической и термальной истории субдукционно-аккреционных комплексов наряду с распространенными акцессорными минералами повсеместно используются данные  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  и Rb-Sr геохронологии, наиболее актуальные для низко- и среднетемпературных парагенезисов [1-3]. С учетом оценок температур закрытия изотопных систем данные геохронометры должны фиксировать время остывания от условий пикового погружения до регрессивного метаморфизма при эксгумации. В то же время, недавними исследованиями неоднократно показано, что изотопная систематика слюд представляет объективные сложности ввиду сохранности неперекристаллизованных (проградных) доменов [4], и различной степени элементного/изотопного обмена в результате взаимодействия с флюидами [5]. Неопределенность  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  и Rb-Sr возрастов фенгита критична как для характеристики флюидного режима и динамики зон субдукции, так и для тектонических построений, поскольку продуцируемые диапазоны дат могут достигать ~30–40 млн. лет [5]. В рамках данного исследования проведен текстурно привязанный локальный LA-ICP-MS/MS Rb-Sr анализ фенгита из двух палеосубдукционных комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса с целью определения степени равновесия изотопных систем и надежности опубликованных ранее  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датировок.

Общая изохрона, полученная по фенгиту из секущих эклогиты Северо-Балхашской офиолитовой зоны фенгит-амфиболовых жил ( $482 \pm 16$  млн. лет, MSWD = 3.3) (рис. 1) в пределах ошибки соответствует возрасту  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ , использованному ранее в качестве репера высокобарического метаморфизма (~491 млн. лет), что в совокупности с составом самого фенгита напрямую указывает на соответствие возрастной оценки эпизоду ретроградной флюидной переработки, а не собственно высокобарическому метаморфизму.

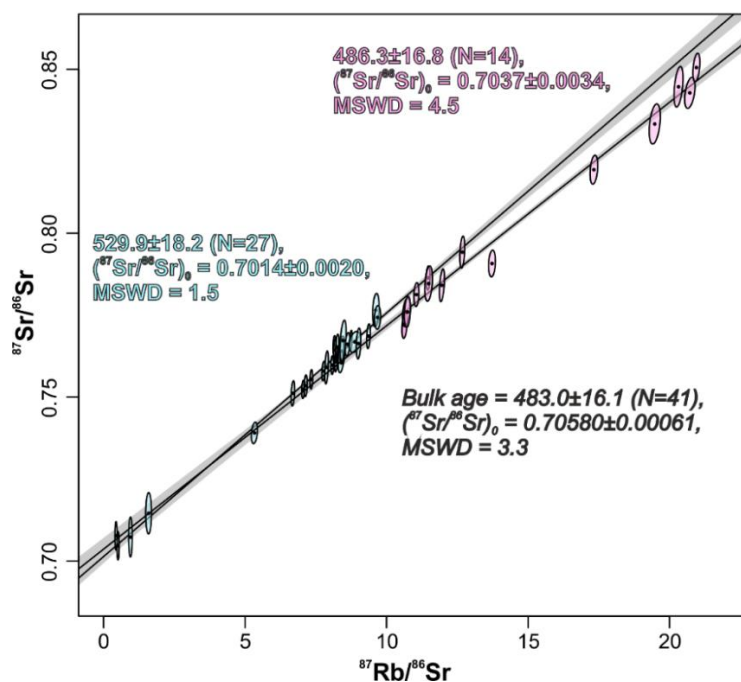


Рис. 1. Rb-Sr систематика и восстановленные изохроны по фенгиту из эклогитов Северо-Балхашской офиолитовой зоны.

Вместе с тем, для популяции фенгита с низким (<10) отношением  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  восстанавливается изохрона с существенно более древним возрастом, но с более прецизионной оценкой ( $530 \pm 18$  млн. лет, MSWD = 1.5,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of  $0.7014 \pm 0.0020$ ). Данные наблюдения предполагают, что общий возраст пикового метаморфизма мог быть заметно омоложен за счет флюидного метасоматоза с привнесом K-LILE из обогащенного (к примеру, метаосадочного) источника и сопутствующим ростом-модификацией фенгита.

Среди раннекембрийских эклогитов аккреционного комплекса Алаг-Хадны в юго-западной Монголии наиболее распространены заметно деформированные разновидности с различной степенью амфиболитизации, с подчиненным количеством массивных эклогитов. Фенгит в породах (1-5 об. %) приурочен к омфацит-амфибол-клиноцоизитовому матриксу, а в деформированных породах ориентирован строго согласно главной полосчатости и параллельно игольчатому омфациту. Полученные ранее  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датировки (543–537 млн. лет) были условно приняты за возраст эклогитового метаморфизма [6], однако целый ряд иных датировок для вмещающих гнейсов тем же методом (617–573 млн. лет) указывает на отсутствие единой и согласованной оценки возраста высокобарического события. Полученная нами прецизионная оценка для богатого селадонитом (3.35–3.39 Si ф.е.) и несомненно высокобарического фенгита из массивного эклогита соответствует возрасту ( $568 \pm 9$  млн. лет, MSWD = 1.3) (рис. 2). Данная оценка представляется минимально возможной (к примеру,

относительно Sm-Nd и Lu-Hf возрастов) и может указывать на заметно омоложенный  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возраст, интерпретируемый как время завершения аккреционных событий в данном сегменте ЦАСП. Наряду с этим, для деформированного эклогита анализ столь же богатого селадонитом фенгита (3.36–3.40 Si ф.е.) дал заметный разброс возраста условно рассчитанных изохрон/эрохрон возраста, от ~466 млн. лет до ~636млн. лет при высокой неопределенности и схожих диапазонах использованных отношений  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ . Для наиболее деформированного и регидратированного эклогита с крупными пойкилообластами амфибола данный разброс составляет от  $491 \pm 17$  млн. лет до  $611 \pm 7$  млн. лет и сопровождается заметным изменением состава самого фенгита (3.25-3.31 Si ф.е.). Данный факт может свидетельствовать о позднем в сравнении с эклогитовым метаморфизмом более низкобарическом деформационном событии (не древнее позднего кембрия) и ремобилизацию дневного компонента Sr при динамической перекристаллизации слюд.

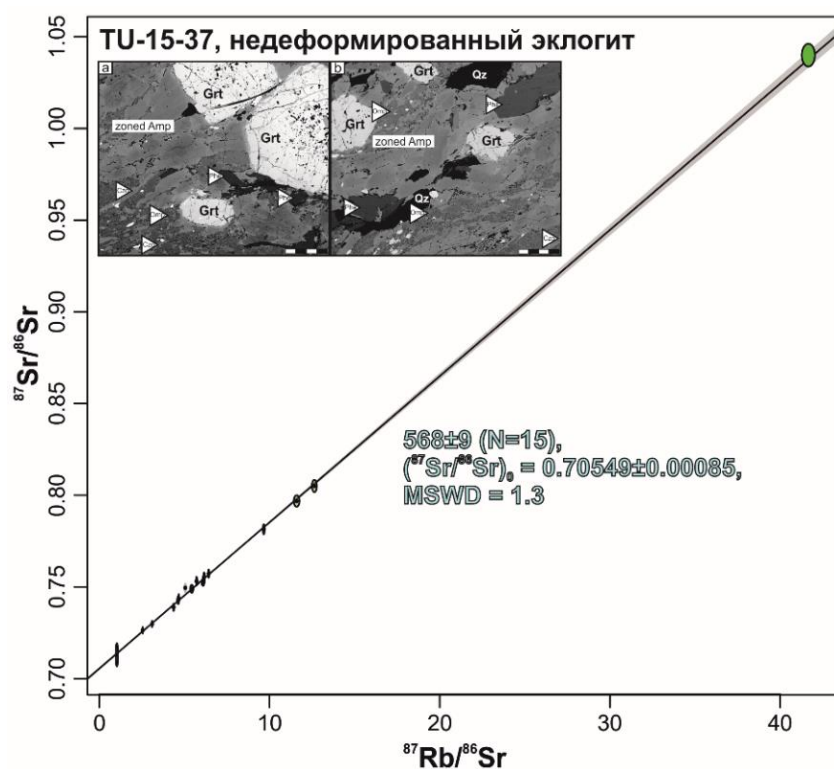


Рис. 2. Rb-Sr систематика и восстановленные изохроны по фенгиту из эклогитов аккреционного комплекса Алаг-Хадны (юго-западная Монголия).

Полученные данные по фенгиту из эклогитов двух комплексов указывают на возможную недооценку реальных возрастов субдукционно-аккреционных событий по их  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  оценкам, что потенциально значимо для восстановления тектонометаморфической эволюции складчатых поясов и проведения региональных корреляций между их соседними

сегментами. Стоит предполагать, что в флюидонасыщенных условиях и при метасоматозе богатыми K и LILE флюидами (в случае эклогитов Северо-Балхашской зоны), а также сопутствующих флюидной активности и деформациях, Rb-Sr и более низкотемпературные изотопные термохронометры могут давать неравновесные и омоложенные возрастные оценки, и следовательно исключают их прямое использование в термохронологических реконструкциях.

Исследования поддержаны Российским научным фондом (проект №21-77-10038, <https://rscf.ru/project/21-77-10038>).

#### Литература

1. Glodny J., Austrheim H., Molina J.F., Rusin A.I., Seward D. Rb/Sr record of fluid–rock interaction in eclogites: the Marun-Keu complex, Polar Urals, Russia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2003. V. 67. P. 4353–4371.
2. Schneider J., Bosch D., Monié P. Individualization of textural and reactional microdomains in eclogites from the Bergen Arcs (Norway): consequences for Rb/Sr and Ar/Ar radiochronometer behavior during polymetamorphism // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2008. V. 9(12). Q12001.
3. Menold C.N., Grove M., Sievers N.E., Manning C.E., Yin A., Young E.D., Ziegler K. Argon, oxygen, and boron isotopic evidence documenting  $^{40}\text{Ar}/\text{E}$  accumulation in phengite during water-rich high-pressure subduction metasomatism of continental crust // *Earth and Planetary Science Letters*. 2016. V. 446. P. 56–67.
4. Gyomlai T., Agard P., Herviou C., Jolivet L., Monié P., Mendes K., Iemmolo A. In situ Rb–Sr and  $^{40}\text{Ar}/\text{Ar}$  dating of distinct mica generations in the exhumed subduction complex of the Western Alps // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2023. V. 178. P. 58.
5. Catlos E.J., Sorensen S.S. Phengite-based chronology of K- and Ba-rich fluid flow in two paleosubduction zones // *Science*. 2003. V. 299. P. 92.
6. Štípská P., Schulmann K., Lehmann J., Corsini M., Lexa O., Tomurhuu D. Early Cambrian eclogites in SW Mongolia: evidence that the Palaeo-Asian Ocean suture extends further than expected // *J. Metamorph. Geol.* 2010. V. 28. P. 915–933.



## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ <sup>40</sup>AR/<sup>39</sup>AR ДАТИРОВАНИЯ СЕРИЦИТА ИЗ БЕРЕЗИТИЗИРОВАННЫХ ВУЛКАНИТОВ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ПОЛЯРНАЯ НАДЕЖДА, ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ

И.Д. Соболев<sup>1</sup>, И.В. Викентьев<sup>1</sup>, А.Дж. Свечеревский<sup>1</sup>, А.В. Травин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Золоторудное проявление Полярная Надежда находится в Войкарской зоне Полярного Урала, на сопках Малого Урала, в 7 км к северо-западу от оз. Ворчато. Рудопроявление расположено в кровле ранне-среднедевонского габбро-диорит-плагиогранитного Собского батолита (включает в себя интрузивные породы собского, конгорского и янаслорского комплексов) [1, 2], среди верхнесилурийско-нижнедевонских островодужных вулканогенных и осадочно-вулканогенных пород малоуральской свиты. Рудовмещающие туфы и туффиты, преимущественно среднего состава, прорваны штоком габбро и дайками диорит-порфиритов (северного простирания), которые в ходе поисково-разведочных работ (ИМГРЭ, 2009–2012 гг.) принято было относить к первой и второй интрузивным фазам конгорского комплекса соответственно. Сульфидная прожилково-вкрапленная (пиритовая, реже халькопирит-пиритовая) минерализация образует линейно вытянутые в плане субмеридионально простирающиеся (на 250–650 м, при мощности 5–90 м) штокверковые тела, приуроченные к эндоконтактам диоритов Собского батолита и к его апофизам – штокам и дайкам диорит-порфиритов. Рудное поле локализовано в пределах тектонического блока, ограниченного разломами северного – северо-северо-восточного (субмеридионального) и запад-северо-западного (субширотного) простирания.

Выявленная в ходе поисково-разведочных работ (ИМГРЭ, 2009–2012 гг.) пространственная ассоциация рудной и метасоматической минерализации с диоритоидами собского и конгорского комплексов позволяет предполагать их генетическое родство. Для дополнительной проверки этого предположения нами была предпринята попытка изотопного датирования серицита из березитизированных брекчированных вулканитов малоуральской свиты, содержащих обильную прожилково-вкрапленную сульфидную (≈колчеданную) минерализацию (образцы 335–338 отобраны на рудопроявлении Полярная Надежда, из скважины №5, на интервале глубин 4–9 м, координаты скважины: 66°11'55.5" с.ш., 63°52'08.5" в.д.).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование серицита выполнено методом ступенчатого прогрева в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), по стандартной методике [3]. Возраст плато (включает около 60% выделенного  $^{39}\text{Ar}$ ) составляет  $396\pm 5$  млн лет, что весьма близко к возрасту интрузивных образований собского ( $404\pm 6$ ,  $389\pm 4$ ,  $401\pm 5$  млн лет [1]) и конгорского ( $392\text{--}400$  и  $396\pm 1$  млн лет [2]) комплексов, датированных в этом районе Полярного Урала. Близкий возраст формирования околорудных метасоматитов проявления Полярная Надежда и интрузивных пород Собского батолита свидетельствует о непосредственной связи оруденения с ранне-среднедевонскими островодужными интрузивами, что позволяет рассматривать гипабиссальные диоритовые тела, гидротермально-метасоматические преобразования вмещающих вулканитов и штокверковую рудную минерализацию рудопроявления в рамках единой порфировой системы.

Полевые работы, геологическая и палеотектоническая интерпретация данных выполнены при финансовой поддержке гранта РФФ 23-17-00266.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование выполнено в рамках госзадания ИГМ СО РАН.

#### Литература

1. Ремизов Д.Н., Шишкин М.А., Григорьев С.И., Степунин А.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000 (второе издание, цифровое). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XVI (г. Хордьюс). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.
2. Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоратина О.В., Варламов Д.А., Хоуриган Дж.К., Хубанов В.Б., Буюнтуев М.Д., Соболева Д.А. Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала // Геотектоника. 2018. № 5. С. 39–74. DOI: 10.1134/S0016853X18050065.
3. Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2009. Т. 11. С

## ВОЗРАСТ ЭПИТЕРМАЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ КАЛАРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (ГОРНАЯ ШОРИЯ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ (U,Th)-НЕ ДАТИРОВАНИЯ ПИРИТА

Л.А. Соколова<sup>1,2</sup>, П.Н. Лейбгам<sup>3</sup>, О.В. Якубович<sup>1,2</sup>, А.И. Черных<sup>4</sup>, Е.А. Наумов<sup>3</sup>,  
М.О. Аносова<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт Наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт Геологии и Геохронологии Докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, Москва, Россия

<sup>4</sup>УК «Полюс», Москва

<sup>5</sup> Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, Россия

Добыча золота на эпипермальных месторождениях составляет 13% от общемировой добычи золота [3]. Образование месторождений этого типа происходит в приповерхностных условиях (до 1 км) при воздействии низкотемпературных (до 300 °С) гидротерм.

Определение времени и длительности формирования эпипермальной минерализации является довольно сложной геохронологической задачей. На сегодняшний день для решения этой задачи используют U-Pb, Ar-Ar, Rb-Sr методы по минералам, образование которых связано с формированием рудных зон [6, 7]. В некоторых случаях возраст минерализации удается определить напрямую Re-Os методом [7]. В данной работе впервые рассматривается возможность определения времени формирования эпипермальной минерализации путем (U,Th)-Не датирования пирита на примере Каларского рудного поля, Горная Шория.

На территории Алтае-Саянской складчатой области (АССО) в последние десятилетия было описано несколько рудопроявлений эпипермального типа, что позволяет рассматривать этот район, как перспективный на обнаружение промышленного Au-Ag оруденения [3]. Каларское рудное поле располагается в пределах Кабурчакской ранне-среднедевонской вулканической структуры (ВТС), которая является фрагментом девонского вулканического пояса в западной части АССО. Породы Кабурчакской ВТС представлены ранне-среднедевонскими вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами. В южной части ВТС породы прорваны граносиенит-гранит-лейкогранитовыми интрузивами кистальского комплекса (402-403 млн лет [1]). Возраст Каларского рудопроявления ранее оценивался по нескольким изотопным системам: Ar-Ar датирование серицита из околорудных метасоматитов – 396±3.8 млн лет [4]; U-Pb датирование циркона из риолитов – 379±1.6 млн лет [2]. Полученные значения возраста не перекрываются в пределах аналитических ошибок.

Высокая сохранность радиогенного гелия в пирите позволяет рассматривать этот минерал, как (U,Th)-He геохронометр [5]. Возможность (U,Th)-He датирования пирита из рудных месторождений была продемонстрирована на примере колчеданного месторождения Узельга [11], метасоматитов месторождения Новогоднее Монто [12] и др.

Образцы и методы. Для (U,Th)-He датирования были выбраны зерна пирита размером от 700 до 1000 мкм из трех аншлифов рудных зон Каларского рудопроявления. Эти зоны представляют собой в основном массивные сульфидные жилы, которые были вскрыты скважинами на глубинах 33.3 и 40.1 м (скв. 7к) и 84.8 м (скв. С2) м. Основными минералами рудных жил являются арсенопирит, пирит, галенит, халькопирит, сульфосоли, самородное золото и другие [8]. Предшественниками выделяется не менее 4 генераций пирита в пределах одного небольшого фрагмента породы, а также отмечается вариативность минерального состава рудных зон.

Для определения (U,Th)-He возраста навеска зерен 1.5-2 мг помещалась в кварцевую трубку, которая запаивалась в форвакуумных условиях. Концентрация радиогенного гелия определялась на масс-спектрометре МСУ-Г-01-М (ИГГД РАН) по методике, описанной в [11]. Содержание урана и тория определялось методом изотопного разбавления на ICP-MS ELEMENT XR Thermo Scientific (ГЕОХИ РАН). Для этого образец растворялся в смеси плавиковой, азотной и хлорной кислот с добавлением трассера  $^{230}\text{Th}$ - $^{235}\text{U}$ . Разложение пробы происходило в автоклаве при температуре  $220^\circ$  на протяжении 48 часов. Вычисление возраста производилось в программе IsoplotR [10]; учитывая относительно большие размеры зерен поправка на ядра-отдачи не вводилась.

Для определения бланка измерений параллельно измерялись концентрации He, U и Th в пустых кварцевых ампулах. С помощью международного стандарта для (U,Th)-He датирования – апатита Дуранго – контролировалась достоверность аналитических данных. Калибровка гелиевого масс-спектрометра проводилась с использованием платинового стандарта Ps-Pt, метеорита Княгиня.

Всего было получено 10 значений (U,Th)-He возраста. Концентрации гелия, урана и тория во всех образцах выше фоновых значений. Полученные значения (U,Th)-He возраста распределены в широком диапазоне от 328 до 402 млн лет. Также наблюдается зависимость значения возраста от размера зерна: зерна меньшего размера имеют более древние значения возраста. Подобная зависимость может указывать на наличие разновозрастных генераций пирита в пределах рудопроявления. Косвенно это подтверждается и

«противоречивыми» данными по Ar-Ar ( $396 \pm 3.8$  млн лет) и U-Pb ( $379 \pm 1.6$  млн лет) системам для этого рудного поля, а также геохронологическими данными, полученными предшественниками по другим эпипермальным месторождениям: например, на примере эпипермальных руд месторождения Серро Байо (Чилийские Анды), образование которого связано с субдукцией андского типа, было показано что они могут формироваться в несколько этапов, на протяжении 30 и более млн лет [9]. В близком к Каларскому Чуринском рудопоявлении, находящемся в том же поясе, но 100 км южнее, по результатам U-Pb SHRIMP датирования циркона, выделенного из брекчированных рудных тел, также фиксируются конкордантные цирконы со значениями возраста от 400 до 327 млн лет [3].

Верхняя граница полученных значений (U,Th)-He возрастов пирита соответствует возрасту Кистальского массива (403-404 млн лет; [2]), нижняя граница интервала близка к возрасту коллизионных событий серпуховского века (323-330 млн лет, [1]). Таким образом, вероятно, формирование золоторудной минерализации Каларского рудного поля происходило в несколько стадий, и гидротермальная активность сохранялась на протяжении длительного интервала с 400 млн лет (следствие субдукции) и до 330 млн лет (окончание субдукции, коллизия).

Работы по изучению (U, Th)-He возраста пирита выполнены при финансовой поддержке проекта РФФ 22-77-10088.

#### Литература

1. Бабин, Г. А., Зейферт, Л. Л., Щигрев, А. Ф. (2006). Легенда Алтае-Саянской серии листов государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (третье поколение). Запсибгеолсъемка.
2. Вареник, А. В. (2020). Поисковые работы на золото-серебряное оруденение в пределах перспективных участков Красногорско-Кабурчакской площади (Кемеровская область): геологический отчет о результатах работ.
3. Гусев, Н. И., Гусев, А. И., Шокальский, С. П., Кашин, С. В., Ларионов, А. Н., & Толмачева, Е. В. (2014). Мезозойская тектонотермальная активизация и эпипермальное золотое оруденение в северо-восточном Горном Алтае. Региональная Геология и Металлогения, 57, 49–62.
4. Черных, А. И., Неволько, П. А., Борисенко, А. С. (2013). Эпипермальное золото-серебряное оруденение Кабурчакского рудного узла (Горная Шория) – особенности

локализации, минералогия и возраст. Минералогия, Рудные и Нерудные Полезные Ископаемые., 15(3), 76–82.

5. Якубович, О. В., Гедз, А. М., Викентьев, И. В., Котов, А. Б., & Гороховский, Б. М. (2019). Миграция радиогенного гелия в кристаллической структуре сульфидов и возможности их изотопного датирования. *Петрология*, 27(1), 65–86.

6. Baumgartner, R., Fontboté, L., Spikings, R., Ovtcharova, M., Schaltegger, U., Schneider, J., Page, L., & Gutjahr, M. (2009). Bracketing the age of magmatic-hydrothermal activity at the cerro de pasco epithermal polymetallic deposit, central peru: A U-Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  study. *Economic Geology*, 104(4), 479–504.

7. Huang, H., Liu, H., Li, G., Zhang, L., Cao, H., & Zhou, Q. (2019). Zircon U-Pb, Molybdenite Re-Os and Quartz Vein Rb-Sr Geochronology of the Luobuzhen Au-Ag and Hongshan Cu Deposits, Tibet, China: Implications for the Oligocene-Miocene Porphyry–Epithermal Metallogenic System.

8. Leibham, P. N. (2022). Au-Ag mineralization of the Kalar orefield, Gornaya Shoriya, Russia. In: Christie AB (Ed.) *Proceedings of the 16th SGA Biennial Meeting*, 192–195.

9. Poblete, J. A., Bissig, T., Mortensen, J. K., Gabites, J., Friedman, R., & Rodriguez, M. (2014). The Cerro Bayo District, Chilean Patagonia: Late Jurassic to Cretaceous Magmatism and Protracted History of Epithermal Ag-Au Mineralization. *Economic Geology*, 109(2), 487–502.

10. Vermeesch, P. (2018). IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9(5), 1479–1493.

11. Yakubovich, O., Podolskaya, M., Vikentyev, I., Fokina, E., & Kotov, A. (2020). U-Th-He geochronology of pyrite from the Uzelga VMS deposit (South Urals)—new perspectives for direct dating of the ore-forming processes. *Minerals*, 10(7), 1–20.

12. Yakubovich, O., Vikentyev, I., Ivanova, E., Podolskaya, M., Sobolev, I., Tyukova, E., Kotov, A. (2021). U-Th-He Geochronology of Pyrite from Alteration of the Au-Fe-Skarn Novogodnee-Monto Deposit (Polar Urals, Russia)—The Next Step in the Development of a New Approach for Direct Dating of Ore-Forming Processes. *Geosciences*, 11(10), 408.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЕОТЕРМОХРОНОЛОГИИ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ОЦЕНОК СКОРОСТЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.В. Соловьев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ФГБУ «ВНИГНИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт РАН (ГИН РАН), Москва, Россия

Процессы образования и разрушения горных систем (складчатых поясов), формирования осадочных бассейнов являются интегральными и зависят от соотношения активности эндогенных (тектоника, магматизм) и экзогенных (денудация, эрозия) факторов. В истории горных систем выделяется три основных стадии формирования: конструктивная (увеличение градиента рельефа), стабильная (устойчивость градиента рельефа), деструктивная (уменьшение градиента рельефа) [2, 4].

### *Методология*

Для изучения пространственно-временной взаимосвязи между тектоническими процессами, формированием рельефа, эрозией и седиментацией применяются методы структурного анализа и геотермохронологии (датирование единичных зерен обломочных минералов методами U/Pb SHRIMP, U/Pb LA-ICPMS, U-Th/He, трековый). Данная комплексная методика позволила дать количественные оценки времени и скорости развития тектонических процессов (аккреция, коллизия, эксгумация), реконструировать эволюцию складчатых систем и осадочных бассейнов для Корякско-Камчатского региона, Арктики, Крыма, оценить термальную эволюцию нефтематеринских толщ для снижения риска при проведении поисковых работ на углеводородное сырье [2].

*Кайнозойская геодинамика северо-восточной окраины Азии (Южная Корякия, Камчатка)*

Установлено время и оценены скорости эоценовой коллизии мел-палеоценовой островной дуги с северо-восточной окраиной Азии. На севере Камчатки границей Омгонско-Укэляятского и Ачайваям-Валагинского террейнов является Лесновско-Ватынский надвиг, формирование которого завершилось около 45 млн лет назад [2]. На юге Камчатки (Малкинское поднятие Срединного хребта) коллизия дуги и континента началась 55-53 млн лет назад, а завершилась до 50 млн лет назад [2, 6]. И на севере, и на юге Камчатки коллизионные структуры сформированы за короткие отрезки времени, менее 5 млн лет [2].

Коллизия палеодуги и континента происходила диахронно: 55-50 млн лет назад на юге и 48-45 млн лет назад на севере Камчатки. Коллизионные деформации везде начинаются с формирования пологого надвига островодужных комплексов на терригенные толщи, на севере процесс коллизии на этом и завершился. А на юге мощность аллохтона была значительно больше, чем на севере. На юге Камчатки в процессе коллизии (55-53 млн лет) комплексы дуги были надвинуты на отложения континентальной окраины, что вызвало их быстрое погружение, прогрев коры, метаморфизм, мигматизацию и выплавление гранитоидов 52±2 млн лет назад. Аномально быстрый прогрев коры был связан с подъемом астеносферных масс в результате отрыва слэба Евразийской плиты, погружавшейся под Ачайваям-Валагинскую дугу.

Впервые методом трекового датирования апатита в зоне эоценовой коллизии дуга-континент получены скорости постколлизионного воздымания и прослежено их изменение вдоль сутуры протяженностью 1500 км с севера (Олюторская зона) до юга (юг Камчатки). На севере Камчатки в интервале 40–10 млн лет постколлизионный рост гор был медленным, со скоростями 10-50 м/млн лет, так как коллизия произошла на уровне верхней коры. На юге Срединного хребта орогенез протекал быстрее со скоростью около 180–670 м/млн лет, как результат подъема астеносферных масс в результате отрыва слэба Евразийской плиты в процессе коллизии.

#### *Тектоническая и термальная эволюция мезозойских осадочных бассейнов Российской Арктики*

Развитие оборудования и прецизионных методик геотермохронологических исследований открыло новые возможности для изучения осадочных бассейнов [2]. Анализ возрастов единичных обломочных цирконов из песчаников является мощным инструментом для определения областей сноса терригенного материала, обоснования палеогеографических и палеогеодинамических реконструкций. Трековое датирование апатита позволяет получить возраст остывания осадочных толщ при выведении на поверхность и оценить скорости эксгумации комплексов, что является важным для прогноза нефтегазоносности и поиска углеводородов. В результате проведенных исследований идентифицированы основные источники сноса терригенного материала для мезозойских осадочных бассейнов Арктики в триасовое [3, 7] и в позднеюрско-раннемеловое время [8], что дало возможность разработать новые палеогеографические схемы и палеотектонические реконструкции.



Трековое датирование апатита позволило охарактеризовать термальную историю и оценить скорости эксгумации нефтематеринских толщ осадочных бассейнов Арктики. Например, триас-юрские отложения скважины Ферсмановская-1 (Баренцево море) находились в зоне частичного отжига (~120-80°C) в средней юре - мелу, а эксгумация (uplift) началась около 60 млн лет назад [9]. Трековые возрасты апатита из скважины Северная (Земля Франца-Иосифа) показывают, что эксгумация триасовых пород началась раньше около 90 млн лет и ее скорость в интервале 90 - 70 млн лет назад оценивается в 75 м/млн. лет (рис. 1) [1]. Данные трекового датирования имеют важное значение для построения моделей тектонической эволюции Арктики.

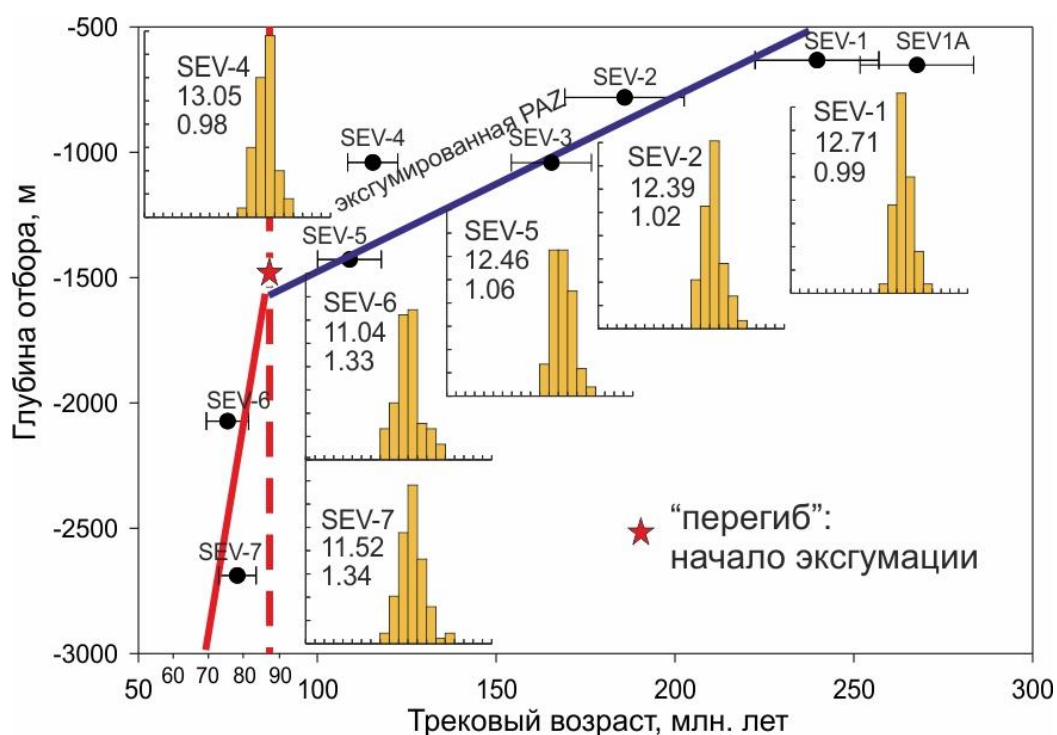


Рис. 1. График распределения трековых возрастов апатита из скважины Северная (о. Грэм Белл, Земля Франца-Иосифа) [1], демонстрирующий "классическую" форму [5] эксгумированной зоны частичного отжига (PAZ - Partial Annealing Zone). Трековый возраст ( $\pm 1\sigma$ ) в зависимости от глубины отбора пробы. Показаны репрезентативные распределения длин треков с номерами образцов: средняя длина (например, 12,71 мкм) и стандартное отклонение (например, 0,99 мкм). Красная звезда обозначает нижнюю границу эксгумированной зоны частичного отжига и указывает на начало быстрой эксгумации.

Таким образом, комплексирование методов структурного анализа и геотермохронологии позволяет получать количественные оценки времени и скорости тектонических процессов, реконструировать эволюцию складчатых систем и осадочных бассейнов, а также оценивать термальную эволюцию нефтематеринских толщ для снижения риска при проведении поисковых работ на углеводородное сырье.

## Литература

1. Зайончек А.В., Соловьев А.В. Позднемеловой (сеноман-коньяк) этап развития рифтинга в северной части Северной Атлантики и Арктическом бассейне // Геотектоника. 2024. (в печати).
2. Соловьев А.В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового датирования и структурного анализа // М.: Наука, 2008. 319 с.
3. Соловьев А.В., Зайончек А.В., Супруненко О.И., и др. Эволюция источников сноса триасовых отложений архипелага Земля Франца-Иосифа: U/Pb LA-ICPMS датирование обломочных цирконов из скважины Северная // Литология и полезные ископаемые. 2015. № 2. С. 113-128.
4. Burbank D.W., Anderson R.S. Tectonic Geomorphology, Second Edition. Wiley-Blackwell. 2011. 460 p.
5. Fitzgerald P.G., Malusà M.G. Concept of the exhumed partial annealing (retention) zone and age-elevation profiles in thermochronology / Malusà M. G. and Fitzgerald P. G. (Eds.) Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology // Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. 2019. pp. 165-188.
6. Hourigan J.K., Brandon M.T., Soloviev A.V., et al. Eocene arc-continent collision and crustal consolidation in Kamchatka, Russian Far East // American Journal of Science, 2009. Vol. 309. p. 333-396.
7. Miller E.L., Soloviev A.V., Prokopiev A.V., et al. Triassic river systems and the paleo-Pacific margin of northwestern Pangea // Gondwana Research. 2013. Vol. 23. Issue 4. pp. 1631-1645.
8. Miller E., Soloviev A., Kuzmichev A., et al. Jurassic and Cretaceous foreland basin deposits of the Russian Arctic: Separated by birth of the Makarov Basin? // Norwegian Journal of Geology. 2008. Vol. 88. № 4. pp. 201-226.
9. Sobolev P.O., Soloviev A.V. Constraints on the magnitude and timing of Cenozoic exhumation for the Russian Barents Sea // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013. London, United Kingdom, 10 - 13 June 2013. DOI: 10.3997/2214-4609.20131053

## ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ ГРАНИТОИДНЫХ БАТОЛИТОВ

А.В. Травин<sup>1,2</sup>, Н.Г. Мурзинцев<sup>1</sup>, М.М. Буслов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

При палеогеографических и палеотектонических реконструкциях орогенов перспективным является изучение термической истории магматических и метаморфических пород, формирующихся в их корневых частях. Такой подход оказался эффективным при реконструкции этапов тектоно-термической эволюции Западного Забайкалья (Россия), выполненной на основе исследований крупнейшего фанерозойского Ангаро-Витимского гранитоидного батолита [1], а также - при реконструкции тектоно-термической истории Северного Вьетнама – Южного Китая на примере раннепалеозойского гранитогнейсового массива Шонгчай [4]. Настоящее сообщение, в первую очередь, посвящено обсуждению методических особенностей тектоно-термического изучения корневых частей орогенных структур, представленных гранитоидами и гранито-гнейсами.

Реконструкция термической истории основывается на использовании комплекса методов, характеризующихся различными температурами закрытия изотопных систем: от U/Pb датирования циркона (температура закрытия  $T_c \approx 900^\circ\text{C}$ ),  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования амфибола ( $T_c \approx 550^\circ\text{C}$ ),  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования биотита ( $T_c \approx 330^\circ\text{C}$ ), полевого шпата/плагиоклаза ( $T_c \approx 250^\circ\text{C}$ ), до трекового датирования апатита ( $T_c \approx 110^\circ\text{C}$ ) [3]. U/Pb датирование определяет возраст формирования породы,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датировки по амфиболам, слюдам и полевому шпату фиксируют положение породы (с учетом градиента температур с глубиной  $25\text{-}30^\circ/\text{км}$ ) на глубинах от 20 до 8 км. Начиная с глубины 4-3 км до вывода к поверхности термическая эволюция породы характеризуется с помощью метода трекового датирования по апатиту. Термическая история пород может быть реконструирована численным методом решения обратных задач с построением области наиболее вероятных трендов изменения температурного режима породы во времени (t-T). Отбор трендов может проводиться на соответствие данным трекового датирования, либо – на соответствие результатам комплексного изотопного датирования. Принимая за основу градиент изменения температур с глубиной ( $25\text{-}30^\circ/\text{км}$ ), на основе полученных t-T-трендов могут быть оценены мощность и скорость денудации орогенов.

В сводке [3] приведены значения температур закрытия, рассчитанные на основе определенных в лабораторных экспериментах кинетических параметров для скорости охлаждения системы 5°C/год. Изменение скорости охлаждения в достаточно широком диапазоне приводит к изменению расчетной температуры закрытия в пределах  $\pm 30^\circ\text{C}$ , при этом относительное положение изотопных систем сохраняется. Поэтому, как правило, приведенные значения используются в качестве начального приближения. В тех случаях, когда удается использование нескольких изотопных систем, а также - независимых геологических оценок, появляется возможность уточнить как скорость охлаждения системы, так и фактические значения температур закрытия.

Для корректной интерпретации термохронологических данных важно понимание, к каким парагенезисам - первично-магматическим, наложенным син-тектоническим, наложенным метаморфическим относятся используемые при датировании минералы. Кроме этого, при реконструкциях сложной, многоэтапной термической истории важно представлять соотношение между температурой закрытия изотопной системы  $T_c$  и температурой формирования  $T_f$  датированной минеральной фазы (Рис. 1).

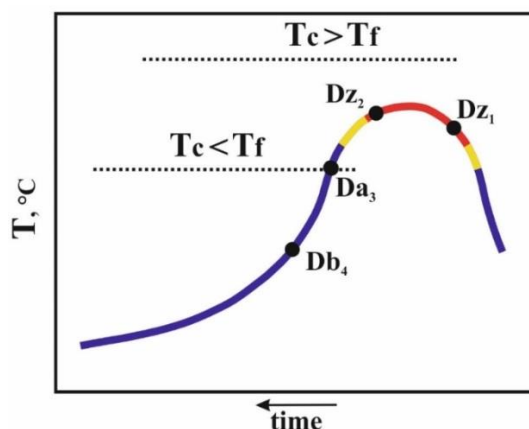


Рис. 1. Схема, демонстрирующая варианты соотношения между температурой закрытия изотопной системы минерала - геохронометра и температурой его формирования. Линия синего цвета – термическая история системы. Желтый цвет соответствует периоду в эволюции системы, когда протекают процессы рекристаллизации, красный – процессы плавления. Dz1, Dz2 – датировки U/Pb методом по циркону ( $T_c \approx 900^\circ\text{C}$ ,  $T_f \approx 750^\circ\text{C}$ ); Da3, Db4 – датировки  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  методом по магматическому амфиболу и биотиту ( $T_c \approx 550^\circ\text{C}$  и  $T_c \approx 330^\circ\text{C}$ ,  $T_f \approx 750^\circ\text{C}$ ) соответственно.

Термохронологический подход, предложенный в работе [2], основывается на измеренных в лабораторных условиях кинетических параметрах дочерних изотопов [3] и предполагает неизменность кристаллической структуры минерала, при этом рассматривается

случай, когда температура закрытия значительно меньше температуры формирования минерала -  $T_c < T_f$ . На схеме рис. 1 этому случаю соответствуют датировки Da3 (40Ar/39Ar по амфиболу) и Db4 (40Ar/39Ar по биотиту), если амфибол и биотит действительно магматического парагенезиса и их структура не была преобразована во время поздних событий. В этом случае полученная датировка соответствует времени закрытия соответствующей изотопной системы. В некоторых ситуациях соотношение между температурой закрытия изотопной системы  $T_c$  и температурой формирования  $T_f$  датированной минеральной фазы обратное -  $T_c > T_f$ . На схеме рис. 1 этому случаю соответствуют датировки Dz1, Dz2 (U/Pb по циркону). При таком соотношении полученная датировка напрямую соответствует возрасту формирования датированной минеральной фазы, а именно, - циркона.

Сводки полученных различными методами датировок, отобранных на современном эрозионном срезе пород Ангаро-Витимского батолита и гранитогнейсового массива Шонг-Чай приведены соответственно на рисунках 2, 3. Каждой датировке соответствует значение температуры закрытия изотопной системы ( $T_c$ ), либо - формирования ( $T_f$ ) соответствующей минеральной фазы. Детальный разбор и интерпретация термохронологических данных для Ангаро-Витимского батолита и гранитогнейсового массива Шонг-Чай приведены в соответствующих публикациях [1, 4].

В результате анализа полученных результатов могут быть сформулированы следующие выводы. Оба рассматриваемых гранитоидных батолита характеризуются длительными термическими историями, растянутыми во времени от формирования до наших дней. При этом, в геологической истории батолитов выделяются с одной стороны, «спокойные» периоды, когда происходит экспонирование пород на фиксированной глубине, или медленный их подъем, связанный с естественной эрозией земной поверхности. С другой стороны, выделяются эпизоды активизации, во время которых происходит заметное ускорение процессов остывания и эксгумации пород. В некоторых случаях такие эпизоды начинаются с повторного погружения пород. Таким эпизодом является погружение в триасе гранитогнейсов массива Шонг-Чай на глубину более 10 км и тектоническое перемещение в северо-восточном направлении вместе с вмещающими массив нижнепалеозойскими осадочными породами в процессе коллизии Индо-Китая с Южно-Китайским блоком. Все эпизоды такого рода активизации связаны с проявлением региональных орогенических процессов (рис. 2, 3).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 22-17-00038.

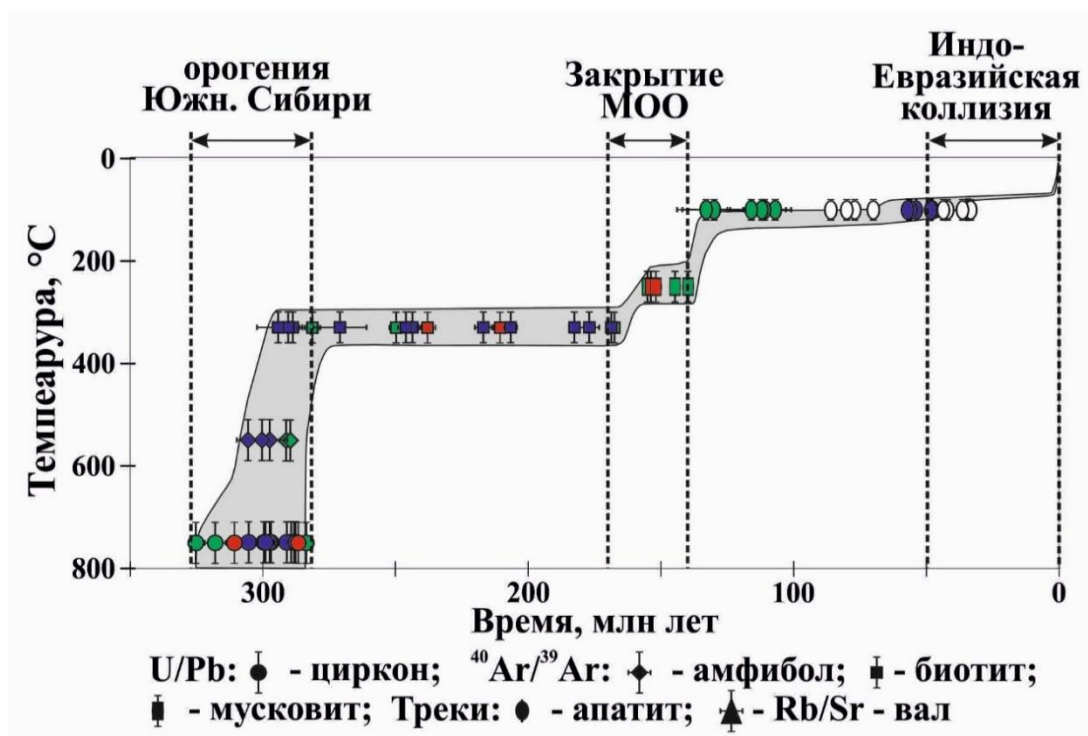


Рис. 2. Термохронологическая диаграмма эволюции гранитоидов Ангаро-Витимского батолита [1] из района полуострова Святой нос, Чивыркуйского залива и восточного берега оз. Байкал (синий цвет); юго-западной части, включая Курбатский участок (зеленый цвет); района оз. Баунт (красный цвет).

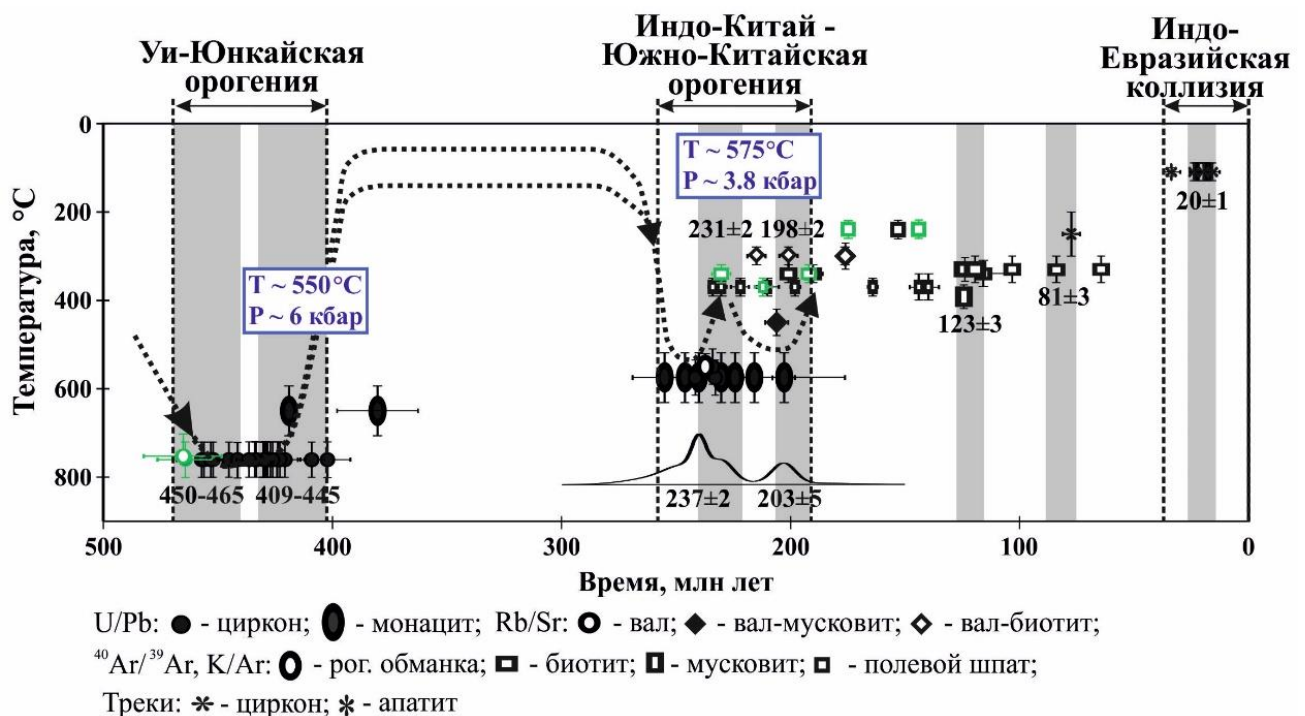


Рис. 3. Термохронограмма гнейсогранитного массива Шонг-Чай [4]. Синими прямоугольниками показаны оценки условий стадий метаморфизма. Черной сплошной линией выше показана кривая плотности вероятности датирования Th/Pb методом по монацитовым включениям из слюдяного сланца.

## Литература

1. Травин А.В., Буслов М.М., Бишаев Ю.А., Цыганков А.А., Михеев Е.И. Тектонотермическая эволюция Забайкалья в позднем палеозое-кайнозое: термохронология Ангаро-Витимского гранитоидного батолита // Геология и геофизика. Т. 64. № 9. С. 1303-1317.
2. Dodson, M.H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems // Contrib. Mineral. Petrol. 1973. V. 40. P. 259-274.
3. Hodges, K.V. Geochronology and thermochronology in orogenic systems, in: Treatise on Geochemistry. Elsevier, Oxford, pp. 263–292.
4. Travin A., Murzintsev N., Kruk N. Thermochronology of the Laojunshan-Song Chai Granite Gneiss Massif (North Vietnam, South China) // Minerals. 2024. № 14. 251.

## ЭТАПЫ ИНТРУЗИВНОГО МАГМАТИЗМА РУДНОГО АЛТАЯ

С.В. Хромых<sup>1</sup>, Д.В. Семенова<sup>1</sup>, И.А. Ильичева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Рудный Алтай является известной металлогенической провинцией в Центральной Азии и характеризуется развитием значительного числа полиметаллических месторождений [6, 7]. Формирование этих месторождений связывается с эпизодами средне-позднепалеозойской эндогенной активности, происходившей в геодинамической обстановке активной континентальной окраины, возникшей на краю Сибирского палеоконтинента при взаимодействии с Обь-Зайсанским палеоокеаном.

На территории Рудного Алтая проявлены значительные объемы интрузивного магматизма, как базитового, так и гранитоидного состава. Исследования состава и возраста магматизма Рудного Алтая проводилось в последние годы в основном для его северо-западной части (в пределах РФ). Наиболее древними интрузиями являются габбро и гранодиориты алейского комплекса, формирование которых оценивается ранним девонем. Следующий интрузивный комплекс, имеющий наиболее широкое распространение – змеиногорский габбро-диорит-гранодиорит-гранитный, время его формирования, по данным работ последних лет оценивается в 395-380 млн лет, что соответствует среднему девону [5]. В конце девона на северо-западе Рудного Алтая были сформированы гранит-лейкогранитные интрузии, отнесённые к устьянскому комплексу, их возраст недавно оценен U-Pb датированием в 370-360 млн лет [3]. Следующий эпизод эндогенной активности относится к среднему карбону, когда были проявлены небольшие интрузии гилевского комплекса с возрастом 322-318 млн лет [4]. Завершающими интрузивными образованиями на территории северной части Рудного Алтая являются раннетриасовые лейкогранитные интрузии с возрастом около 250 млн лет [2].

Наибольшая часть геологических структур Рудного Алтая расположена на территории Республики Казахстан в Восточно-Казахстанской области. Геологические и геолого-съёмочные работы проводились здесь активно во второй половине XX века, однако в последние десятилетия на этой территории не проводились исследования магматических комплексов на современном уровне. Соответственно достоверные данные о возрасте интрузивных комплексов до сих пор отсутствовали. По представлениям казахстанских геологов [1, 6],



интрузивный магматизм казахстанской части Рудного Алтая представлен следующими главными комплексами: 1) змеиногорский габбро-диорит-гранодиорит-гранитный, возраст которого оценивается как средний-поздний карбон или поздний карбон-ранняя пермь; 2) комплекс гранит-лейкогранитов калбинского типа, возраст которых оценивается как поздняя пермь – ранний триас; 3) комплекс базитовых и гранитоидных даек, возраст которых оценивается как средний – поздний триас.

Для уточнения возрастных этапов и создания схемы корреляции интрузивного магматизма Рудного Алтая мы начали работы его в казахстанской части. Геохронологические исследования выполнялись в ИГМ СО РАН методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерной абляцией (LA-SF-ICP-MS) с использованием масс-спектрометра Thermo Fisher Scientific Element XR и эксимерной системы лазерной абляции 193нм Analyte Excite (Teledyne Cetac Technologies).

В северной части территории, вблизи г. Шемонаиха были исследованы породы, относимые к межовскому комплексу – аналогу устьянского комплекса на территории российской части Рудного Алтая. Межовский массив сложен двумя фазами – ранними амфиболовыми гранодиорит-гранитами и поздними биотитовыми лейкогранитами. Биотитовые лейкограниты – ярко-розовые породы, по геохимическим характеристикам соответствуют описанным лейкогранитам устьянского комплекса [3]. Возраст формирования массива определен в интервале 359–352 млн лет, что соответствует раннему карбону. Этот возраст близок к возрасту лейкогранитов устьянского комплекса (370-360 млн лет).

В южной части территории, к югу от г. Зыряновск, были изучены интрузивные массивы, сложенные широким спектром пород от габбро и диоритов до гранодиоритов, гранитов, граносиенитов и лейкогранитов. Они отнесены к змеиногорскому комплексу и комплексу гранитоидов калбинского типа. Породы змеиногорского комплекса были детально исследованы в Нижнечеремшанском массиве. Главное распространение здесь имеют биотит-амфиболовые гранодиориты при подчиненной роли диоритов. Возраст формирования массива определен в интервале в 362-359 млн лет, а возраст амфиболового гранита из южной части Крестовского массива этого же комплекса определен в  $370 \pm 2$  млн лет. Таким образом, по предварительным данным, возраст змеиногорского комплекса в казахстанской части Рудного Алтая оказывался не карбоновым, как предполагали ранее, а поздне-девонским; что близко к оценкам возраста этого комплекса для российской части Рудного Алтая.

Возраст гранитоидов калбинского типа был определен нами путем датирования пород Орловского массива. Здесь представлено большое разнообразие пород, нами были отобраны пробы и продатированы: диорит –  $299 \pm 2$  млн лет; сиенит –  $298 \pm 2$  млн лет; граносиенит –  $299 \pm 2$  млн лет; амфиболовый лейкогранит –  $300 \pm 2$  млн лет; биотитовый лейкогранит –  $293 \pm 2$  млн лет. Полученные значения возраста свидетельствуют о раннепермском возрасте магматизма, что совпадает с возрастом гранитоидов Калбинского батолита в сопряженной Калба-Нарымской зоне. Кроме того, следует отметить разнообразие раннепермских пород по составу, что позволяет заключить что раннепермский магматизм в Рудном Алтае представлен не только гранитоидами, а имеет корово-мантийную природу.

Полученные первые данные позволяют сделать предварительные выводы о этапах интрузивного магматизма Рудного Алтая:

1) масштабный средне-поздне девонский этап, представленный породами змеиногорского комплекса, развитыми как на территории России, так и Казахстана;

2) средне-поздне-карбоновый этап, представленные немногочисленными интрузиями, обнаруженными пока только в российской части Рудного Алтая;

3) масштабный раннепермский этап, представленный разнообразными породами с преобладанием гранитоидов; он проявлен в казахстанской части Рудного Алтая в то время как в Российской части пока не обнаружен;

4) раннетриасовый этап, представленный крупными, но единичными массивами, развитыми на севере Рудного Алтая.

Полученные выводы являются предварительными и в ближайшее время работа по установлению этапов, оценке масштабов интрузивного магматизма и построению петрогенетических моделей будет продолжена.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-27-00198).

#### Литература

1. Артемьев В.Е., Навозов О.В., Башкирцев А.М. и др. Отчет о результатах геологического доизучения масштаба 1:200 000 в Зырянском горнорудном районе (листы М-44-XXIV, М-45-XIX), по работам 2001-2003 гг. ГРК Топаз. 2003.

2. Гаврюшкина О.А., Травин А.В., Крук Н.Н. Длительность гранитоидного магматизма периферических частей крупных изверженных провинций (по данным  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопных

исследований пермотриасовых гранитоидов Алтая) // Геодинамика и тектонофизика. 2017 т. 8. № 4. с. 1035-1047

3. Крук Н.Н., Куйбида М.Л., Соколова Е.Н., Котлер П.Д., Яковлев В.А. Позднедевонские известково-щелочные высококалиевые фракционированные лейкограниты “Ferroan” I-типа (Рудный Алтай) // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23603644>

4. Куйбида М.Л., Крук Н.Н., Мурзин О.В., Шокальский С.П., Гусев Н.И., Кирнозова Т.И., Травин А.В. Геологическая позиция, возраст и петрогенезис плагиогранитов северной части Рудного Алтая // Геология и геофизика. 2013. т. 54. № 10. с. 1668-1684.

5. Куйбида М.Л., Крук Н.Н., Шокальский С.П., Гусев Н.И., Мурзин О.В. Надсубдукционные плагиограниты Рудного Алтая: возраст и особенности состава // Доклады Академии наук. 2015. т. 464. № 3. с. 317-322

6. Щерба Г.Н., Дьячков Б.А., Стучевский Н.И., Нахтигаль Г.П., Антоненко А.Н., Любецкий В.Н. Большой Алтай (геология и металлогения) / Кн. 1. Геологическое строение. Алматы: Гылым. 1998. 304 с.

7. D'yachkov B.A., Mizernaya M.A., Khromykh S.V., Bissatova A.Y., Oitseva T.A., Miroshnikova A.P., Frolova O.V., Kuzmina O.N., Zimanovskaya N.A., Pyatkova A.P., Zikirova K., Ageyeva O.V., Yeskaliyev Y.T. Geological history of the Great Altai: Implications for mineral exploration // Minerals. 2022. v. 12. Iss. 6. Art. No. 744.

## ПЕТРОХРОНОЛОГИЯ ДЕТРИТНЫХ ЦИРКОНОВ: К ОЦЕНКЕ МОЩНОСТИ ПОЗДНЕПАЛЕОЗОЙСКОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАРГУЗИНСКОЙ ГРАНИТОИДНОЙ ПРОВИНЦИИ

**В.Б. Хубанов<sup>1,2</sup>, А.М. Хубанова<sup>1</sup>, Ю.Д. Щербаков<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup>Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова, Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

Целью настоящего сообщения является рассмотреть возможности приложения петрохронологического исследования детритных цирконов из современного аллювия р. Уда и р. Баргузин Западного Забайкалья для оценки мощности коры на момент формирования центральной части Баргузинской гранитоидной провинции (Анагаро-Витимского гранитоидного батолита).

Петрохронология – это относительно новое направление, которое опирается на интерпретацию изотопных датировок в свете дополнительной информации об элементном и/или изотопном составе одного и того же минерала (ов) [1]. Особо интересным является петрохронологический подход для мониторинга мощности континентальной коры во времени. Метод основан на использовании геохимического состава и возраста циркона [2]. В качестве индикатора глубины магмогенерации принимается европиевая аномалия в цирконе. Эффект заключается в том, что значение  $Eu/Eu^*$  в цирконе увеличивается с увеличением глубины генерации магмы. Поскольку наиболее глубинные очаги плавления возникают в условиях максимального утолщения коры, то средние значения  $Eu/Eu^*$  в цирконах коррелируют с мощностью коры. Таким образом, одновременное локальное датирование цирконов позволяет оценить изменение  $Eu/Eu^*$  во времени. Иными словами, можно будет проследить эволюцию мощности коры при петрохронологическом изучении детритовых цирконов.

Позднепалеозойская Баргузинская салическая (гранитоидная) крупная изверженная провинция имеет площадь более 500 тыс. км<sup>2</sup> и объединяет в себя крупнейший Анагаро-Витимский батолит (ареал-плутон) известково-щелочных гранитоидов. Продолжительность формирования провинции составляет более 40 млн. лет (~ 280 – 320 млн. лет назад). Геологические, геохимические и геохронологические данные, в том числе гигантские масштабы гранитообразования и выдержанность состава известково-щелочных гранитоидов

баргузинского комплекса, типоморфных для АВБ, свидетельствуют о формировании батолита в результате плюм-литосферного взаимодействия. При этом предполагается, что это взаимодействие происходило на фоне утолщения континентальной коры Западного Забайкалья [3].

Для исследования с помощью шлихового опробования было отобрано 144 зерна из современного аллювия р. Баргузин и 124 зерна из отложений р. Уда. Водосборная площадь обеих рек охватывает центральную часть Ангаро-Витимского батолита. Внутренняя морфология цирконов изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMN (ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН, Иркутск). U-Pb изотопное датирование и определение микроэлементного состава цирконов проводилось LA-ICP-MS методом (ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН, Улан-Удэ).

Из 268 обломочных зерен условиям отбора [2] для оценки вариаций значений  $Eu/Eu^*$  соответствовало только 142 циркона позднепалеозойского возраста (270 – 325 млн. лет). Значения  $Eu/Eu^*$  в них варьировали от 0.03 до 0.9. Для корректной оценки цирконы возрастного периода 270 – 325 млн. лет разделены на группы с шагом 5 млн. лет, для которых были рассчитаны медианные значения мощности коры, варьирующие в диапазоне 35 – 43 км.

Таким образом, полученные данные указывают на то, что мощность коры в период максимального позднепалеозойского гранитообразования в пределах центральной части Баргузинской провинции составляла не менее сорока километров.

U-Pb изотопная геохронология и петрохронология имеют и приобретают все большую популярность среди исследователей в науках о Земле. Этот комплекс методических подходов можно организовать вокруг одной установки LA-ICP-MS. Однако, несмотря на стабильно увеличивающееся в России количество лабораторий с LA-ICP-MS методом, наблюдается большая их загруженность, что заставляет многих отечественных геологов выполнять подобные исследования в зарубежных лабораториях. Поэтому очевидно, что развитие LA-ICP-MS метода и создание новых лабораторий является весьма актуальным научно-аналитическим направлением в нашей стране и представляется залогом опережающего развития фундаментальных и прикладных исследований.

Обзор, разработка методов и исследования проведены в рамках заявок РНФ проектов № 24-27-20075 и № 24-47-03003.

## Литература

1. Kylander-Clark A.R.C., Hacker B.R., Cottle J.M. Laser-ablation split-stream ICP petrochronology // Chemical Geology. 2013. V. 345. PP. 99–112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.02.019>
2. Tang, M., et al. Reconstructing crustal thickness evolution from europium anomalies in detrital zircons // Geology. 2020. V. 49. PP. 76–80. <https://doi.org/10.1130/G47745.1>
3. Хубанов В.Б., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н. Продолжительность и геодинамика формирования Ангаро-Витимского батолита: по данным U-Pb изотопного LA-ICP-MS датирования магматических и детритовых цирконов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 12. С. 1619–1641. <https://doi.org/10.15372/GiG2021112>

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РАМАНОВСКОГО «ДАТИРОВАНИЯ» ДЛЯ ОБЛОМОЧНОГО ЦИРКОНА ИЗ ПЕРМО-ТРИАСОВОГО ОСАДОЧНОГО КОМПЛЕКСА РУССКОЙ ПЛИТЫ

**А.В. Чистякова<sup>1,2</sup>, Р.В. Веселовский<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, Москва, Россия

Рамановская спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеяния) – неdestructивный и экспрессный метод исследования вещества с очень широкой областью применения в геологии. Особое место этот метод занимает в исследованиях циркона, так как позволяет с высоким разрешением фиксировать степень радиационного повреждения (метамиктизации) кристаллической структуры последнего. Доза авторадации, которой подвергся циркон, является функцией его возраста и концентрации радиоактивных изотопов. В работе [2] определена эмпирическая зависимость степени метамиктности циркона от дозы авторадации и сделан вывод, что отклонения от неё связаны с частичным или полным восстановлением кристаллической структуры циркона под воздействием термического отжига. Таким образом, существует инструмент выявления и оценки возраста наложенных термальных событий, которые могут происходить без потери цирконом радиогенного свинца. Современные кинетические модели термического отжига [1] определяют температуры «закрытия» накопления авторадационных повреждений в цирконе в интервале ~250-400°C. В соответствии с этими моделями, в нашей работе анализировались линии рамановского спектра, чувствительные к отжигу в температурном диапазоне 330-370 °C.

В силу того, что популяции обломочного циркона с аналогичными возрастными характеристиками могут включать субпопуляции с различной термальной историей, в работе [3] предложена методика детализации источников сноса, которая основана на сочетании методов определения U-Pb возраста циркона с использованием LA-ICP-MS и рамановской спектроскопии. Мы применили данный подход в рамках исследований, направленных на характеристику эволюции питающих провинций и уточнения региональной схемы корреляции пограничных пермо-триасовых толщ Московской синеклизы [4].

Методика была реализована для семи проб из пяти пермо-триасовых разрезов Московской синеклизы: Жуков овраг, Асташиха, Недуброво, Клыково и Балебиха. Рамановский анализ выполнялся в ЦКП ИФЗ РАН (Москва). Съёмка спектров проводилась с

использованием рамановской приставки EnSpectr R532 к прямому оптическому микроскопу Olympus BX53M. Статистически значимое количество зёрен циркона, испытавших воздействие наложенного термального события, было зафиксировано в трёх пробах из верхнепермского интервала разрезов Жуков овраг и Асташиха. Отжигу оказались подвержены часть популяций зёрен с возрастными интервалами в 900–3200 млн. лет, а оценка возраста наложенного термального события составила приблизительно 550 млн. лет. Широкий диапазон возрастов зёрен циркона позволяет считать, что термальное событие проявилось в пределах «промежуточного» бассейна седиментации. Этот терригенный комплекс рассматривается нами в качестве отдельного источника сноса, идентификация которого была бы невозможна без привлечения подхода с использованием рамановской спектроскопии. В докладе будут представлены результаты и выполнена оценка эффективности применения данного подхода при изучении континентальных формаций.

#### Литература

1. Härtel B., Jonckheere R., Wauschkuhn B., Hofmann M., Frölich S., & Ratschbacher L. Zircon Raman dating: Age equation and calibration. *Chemical Geology*. 2021. 579, 120351. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120351>.
2. Nasdala L., Wenzel M., Vavra G., Irmer G., Wenzel T., Kober B. Metamictisation of natural zircon: accumulation versus thermal annealing of radioactivity-induced damage. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2001. 141 (2), 125–144.
3. Resentini A., Andò S., Garzanti E., Malusà M.G., Pastore G., Vermeesch P., Chanvry E. and Dall'Asta M. Zircon as a provenance tracer: Coupling Raman spectroscopy and U–Pb geochronology in source-to-sink studies. *Chem. Geol.* 2020. V. 555 (119828). <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119828>.
4. Чистякова А.В., Веселовский Р.В., Хубанов В.Б., Иванов А.В., Марфин А.Е., Брянский Н.В., Голубев В.К. Реконструкция питающих провинций Московского бассейна в пермско-триасовое время по данным U-Pb LA-ICP-MS датирования и рамановской спектроскопии обломочного циркона. *Геодинамика и тектонофизика*. 2023. 14(5):0718. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-5-0718>



## ДЕТРИТОВАЯ ХРОНОЛОГИЯ УГЛЕНОСНЫХ И «ДИНОЗАВРОВЫХ» ГОРИЗОНТОВ ГУСИНООЗЕРСКОЙ СЕРИИ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

**Д.Е. Юдин<sup>1,2</sup>, А.В. Филимонов<sup>2</sup>, В.Б. Хубанов<sup>1,2</sup>, А.В. Сизов<sup>3</sup>, Г.Д. Санжиев<sup>2</sup>, А.М. Хубанова<sup>2</sup>,  
Н.С. Назихина<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова, Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия

Мезозойские впадины широко распространены в Забайкалье, одной из наиболее крупных и типоморфных из них является Гусиноозерская рифтовая структура. Она выполнена терригенными угленосными отложениями одноименной серии. В рамках настоящего исследования нами предпринята попытка с помощью датирования обломочных цирконов установить возраст питающих провинций и оценить нижний возрастной предел формирования гусиноозерской серии.

Стратиграфическая схема Гусиноозерской депрессии базируется на разрезах, составленным по многочисленным буровым разведочным линиям и группам обнажений. Для обоснования возраста использованы комплексы ископаемых пресноводных остракод, пелицепод, гастропод, спор и пыльцы, редких остатков рыб и динозавров. В итоговой схеме выделяются снизу галгатайская свита (J3, мощность 300-350 м, титон-оксфорд(?), 150-133(?) млн лет) и гусиноозерская серия, включающая: муртойская свита (K1, мощность до 300 м, поздний воланжин-баррем, около 133-125 млн лет), убукунская свита (K1, мощность 400-500 м, готерив, 132,6 -129,4 млн лет), селенгинская свита (K1, мощность 1000-1300 м, готерив-баррем, около 130 млн лет), хольбоджинская свита (K1, мощность более 1300 м, баррем-апт, 129.4-113 млн лет) [1, 2]. Полученные предшественниками данные по U-Pb возрасту детритового циркона из базальной муртойской свиты, свидетельствуют о начале погружения бассейна не ранее 136 млн. лет (одно зерно). Более представительная выборка (3 зерна) молодых цирконов дает возраст в 150-153 млн. лет. Первая датировка лучше согласуется с биостратиграфическими данными [2]. По пресноводным моллюскам возраст муртойской свиты оценивался как берриас- воланжин (около 145-139.2 млн лет) [3], а по остракодам интервал расширялся до берриас-готерива [1]. Палинокомплексы селенгинской и хольбоджинской свит характеризуются позднеюрскими (переотложенными(?)) видами, тогда как остатки макрофлоры относятся к раннемеловой эпохе [4]. Раннемеловые палинокомплексы получены из селенгинской свиты, а также из местонахождений динозавров

в муртойской свите. Присутствие некоторых видов палинофлоры ограничивает нижнюю границу времени формирования этой свиты серединой нижнего воланжина [5]. Среди обломочных цирконов из селенгинской свиты есть одно зерно с датой 116 млн лет [2].

Нами проведено дополнительное датирование цирконов из: песчаников основания угленосной пачки хольбоджинской свиты (угольный горизонт №9) Хольбоджинского разреза; из риолитовой гальки конгломератов и косослоистых песчаников муртойской свиты в местности Могойто, где описаны остатки динозавров (Averianov et al., 2022); песчаников селенгинской свиты Загустайского месторождения бурого угля. Возраст риолитов составляющих галечный материал в базальных горизонтах муртойской свиты составил 164 млн. лет. По-видимому, этот возраст характеризует время формирования вулканитов ичетуйской серии, слагающих западное обрамление Гусиноозерской впадины. Цирконы из налегающих на конгломератах песчаников показали три возрастные группы: девонские (400-370 млн лет), позднепалеозойские (370-250 млн лет) и мезозойские (220-169 млн лет). Близкий спектр возрастов обнаружен для обломочных цирконов хольбоджинской свиты, за исключением того, что среди них есть зерна с возрастом 120 млн лет и 450 млн лет. Спектры возрастов цирконов из селенгинской свиты также указывают на то, что источниками сноса были магматиты с палеозой-мезозойского возраста, при этом самые молодые цирконы – 158 млн лет. Таким образом, наиболее молодые даты (120-116 млн лет) ограничивают осадконакопление гусиноозерской серии периодом не ранее аптского времени.

#### Литература

1. Скобло В. М., Лямина Н. Ам Руднев А. Ф., Лузина И. В, Континентальный верхний мезозой Прибайкалья и Забайкалья (стратиграфия, условия осадконакопления, корреляции). — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2001. — 332 с.
2. Arzhannikova A.V., Demonterova E.I., Sizov A.V., Jolivet M., Mikheeva E.A., Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Khubanov V.B. Early cretaceous topographic evolution associated with the collapse of the Mongol-Okhotsk orogen in Western Transbaikalia: an integrated analysis // International Geology Review. – 2022. DOI: 10.1080/00206814.2022.2139296
3. Колесников Ч. М. Система, стратиграфическое распределение, зоогеография мезозойских лимнических двустворчатых моллюсков СССР// Лимнобиос древних озерных бассейнов Евразии. —Л.: Наука, Ленингр. отд-ние 1980. — С. 9—65.

4. Jolivet, M., Arzhannikova, A., Frolov, A., Arzhannikov, S., Kulagina, N., Akulova, V., and Vassallo, R., 2017, Late Jurassic – Early Cretaceous paleoenvironment evolution of the Transbaikalian basins (SE Siberia): Implications for the Mongol-Okhotsk orogeny // Bulletin - Societe Geologique de France. 2017. V. 188, no. 1–2, p. 9. 10.1051/bsgf/2017010

5. Averianov, A.O., Sizov, A.V., Grigoriev, D.V., Pestchevitskaya, E. B., Vitenko, D.D., and Skutschas, P.P., 2022, New data on dinosaurs from the Lower Cretaceous Murtoi formation of Transbaikalia, Russia // Cretaceous Research. 2022. V. 138. P. 105287. doi: 10.1016/j.cretres.2022.105287

## 40AR/39AR ДАТИРОВАНИЕ ДЖЕРФИШЕРИТА

**Д.С. Юдин<sup>1</sup>, Т.А. Алифирова<sup>1</sup>, И.С. Шарыгин<sup>1,2</sup>, И.Ю. Васькова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Джерфишерит  $K_6(Fe,Ni,Cu)_{25}S_{26}Cl$ , хлорсодержащий щелочной сульфид, является распространенным акцессорным минералом метеоритов, медно-никелевых руд, щелочных магматических пород и кимберлитов [1, 8]. В кимберлитах джерфишерит представляет собой позднемагматический минерал и встречается в основной массе [4, 6, 8].

Первые успешные попытки датировать К-сульфиды  $40Ar/39Ar$  методом были предприняты для щелочных основных пород диатремы Койот Пик (шт. Калифорния, США; [7]). Таким образом, логично предположить, что датирование джерфишерита из основной массы кимберлита  $40Ar/39Ar$  методом может позволить надёжно определять возраст кимберлитов. Сложность при  $40Ar/39Ar$  датировании джерфишерита в первую очередь связана с малым размером зёрен К-сульфида (от 5 до 50 мкм); это может привести к эффекту «отдачи»  $39Ar$  при облучении быстрыми нейтронами и к искажению возраста. Во-вторых, выделение мономинеральной фракции затруднено тем, что джерфишерит в породах часто слагает тесные сростания (обрастания) с другими сульфидами. Для преодоления вышеупомянутых сложностей предлагается проводить отделение всех калиевых фаз (кроме К-сульфидов) из измельченной основной массы кимберлита и последующее использование лишь сульфидной фракции для дальнейшего датирования.

В данной работе выделенная сульфидная фракция (с некоторым содержанием джерфишерита) из основной массы кимберлита трубки Удачная-Восточная (Якутия) была разделена на две примерно равные части и проанализирована  $40Ar/39Ar$  методом (рис. 1). Результаты, полученные на основе настоящего исследования ( $388.4 \pm 5.1$  и  $385.4 \pm 4.9$ ), хорошо согласуются с возрастом внедрения кимберлитовой трубки [2, 3, 5], что доказывает перспективность применения джерфишерита для датирования геологических событий, связанных с кимберлитовым и щелочным магматизмом, а также образованием рудных месторождений.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400171-5).

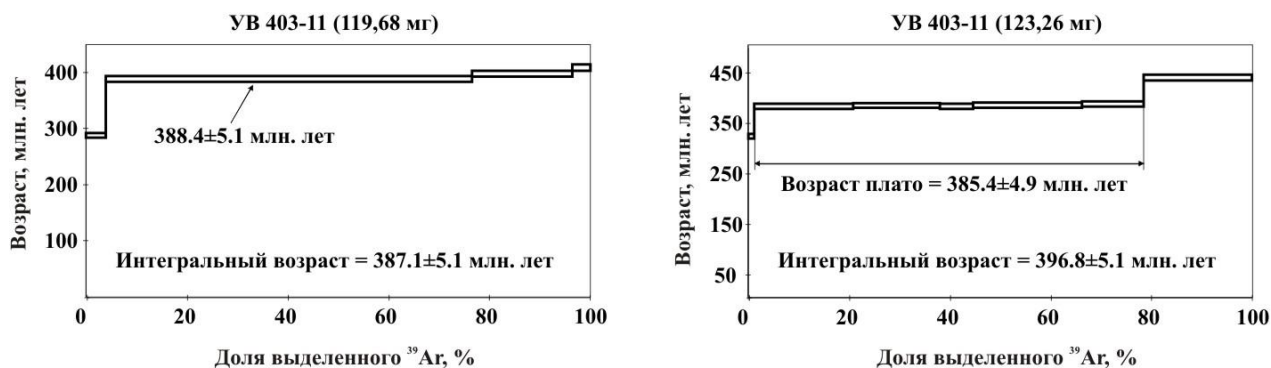


Рис.1.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возрастные спектры, полученные по сульфидной части (с некоторым содержанием джерфишериита) из основной массы кимберлита трубки Удачная-Восточная.

### Литература

1. Добровольская М.Г. Сульфиды щелочных металлов в природе. Москва. 2018. 159 С.
2. Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. ИГАБМ СО РАН; Якутск: Офсет, 2010. 108 с.
3. Кинни П.Д., Гриффин Б.Дж., Хеамэн Л.М., Брахфогель Ф.Ф., Специус З.В. Определение U-Pb возрастов перовскитов из якутских кимберлитов ионно-ионным масс-спектрометрическим (SHRIMP) методом // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 1. С. 91—99.
4. Шарыгин И.С., Головин А.В., Похиленко Н.П. Джерфишериит в кимберлитах Куойкского поля как индикатор обогащения хлором кимберлитовых расплавов // Доклады Академии Наук. 2011. Т. 436. № 6. С. 820-826.
5. Юдин Д.С., Томиленко А.А., Травин А.В., Агашев А.М., Похиленко Н.П., Орихаши Ю. Возраст внедрения кимберлитовой трубки Удачная-Восточная: U/Pb и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  данные // Докл. РАН. 2014. Т. 455. № 1. С. 91-93.
6. Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Goemann K., Golovin A.V., Sharygin I.S., Giuliani A., Rodemann T., Spetsius Z.V., Kamenetsky M. Djerfisherite in kimberlites and their xenoliths: implications for kimberlite melt evolution // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2019.
7. Czamanske G.K., Lanphere M.A., Erd R.C., Blake M.C. Age measurements of potassium-bearing sulfide minerals by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  technique // Earth and Planetary Science Letters. 1978. V. 40. № 1. P. 107-110.
8. Sharygin V.V., Golovin A.V., Pokhilenko N.P., Kamenetsky V.S. Djerfisherite in the Udachnaya-East pipe kimberlite Sakha-Yakutia, Russia: paragenesis, composition and origin // Eur. J. Mineral. 2007. V. 19. P. 51– 63.

## ГЕОХРОНОЛОГИЯ И ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ ПО РАДИОГЕННОМУ ГЕЛИЮ:

### МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

О.В. Якубович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт Наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт Геологии и Геохронологии Докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

(U,Th)-He метод (иногда записывается как (U-Th)/He; U-Th-He; (U+Th)/He) в настоящее время используется для решения широкого спектра геологических задач: эволюция осадочных бассейнов, моделирование образования орогенических областей, датирование молодых извержений, определение времени формирования рудной минерализации, датирование процессов выветривания и преобразования осадочного материала, датирование карбонатов (арагонит) и разрывных нарушений, а также реконструкции полей распространения палеопожаров [1].

В основе (U,Th)-He метода лежит радиоактивный распад урана и тория и членов их радиоактивных семейств. В некоторых случаях в качестве дополнительного источника радиогенного гелия в минералах богатых РЗЭ рассматривают изотоп <sup>147</sup>Sm, который также является альфа-радиоактивным. Главными особенностями (U,Th)-He изотопной системы, относительно других классических изотопных систем (Rb-Sr, Sm-Nd и др.) являются: (а) эффект ядер-отдачи – образовавшаяся в результате радиоактивного распада альфа-частица (ядро атома <sup>4</sup>He) обладает большой кинетической энергией и пролетает порядка 14-20 мкм в минерале до полной остановки; (б) высокая подвижность атомов гелия – за счет своего небольшого размера и химической инертности атомы гелия способны мигрировать из кристаллических решеток ряда минералов даже при незначительном увеличении температуры; (в) метод по сути не является изотопным – возраст рассчитывается исходя из элементной распространенности гелия, урана и тория в минерале.

Эти три особенности (U,Th)-He изотопной системы являются основными факторами погрешности определения возраста этим методом, и, как следствие, достоверности получаемого результата:

(а) Эффект ядер-отдачи наиболее ярко проявлен для зерен менее 200 мкм (как правило, размер акцессорного апатита, циркона, рутила который используется для (U,Th)-He датирования 100–200 мкм). Радиогенный гелий может теряться (эджектироваться), либо, наоборот, имплантироваться в минерал из вмещающих пород. Учитывая, что распределение

урана в породе, а зачастую и в минералах, негетогенно, то достоверно рассчитать долю потерянной/избыточной компоненты для таких зерен нельзя. Поэтому введение математической поправки является лишь некоторым решением проблемы, но предпочтительно выбирать для анализа более крупные зерна и применять абразию – механически удалять внешние 20 мкм каймы зерен. В этом случае достоверность получаемого результата будет существенно выше.

(б) При интерпретации данных (U,Th)-He датирования оперируют к модельной величине – температуре закрытия (U,Th)-He системы в конкретном минерале. Эта величина является функцией от размера диффузионной ячейки, параметров диффузии гелия в этом минерале и скорости остывания. Как правило, предполагают, что размер зерна и размер диффузионной ячейки совпадают, а диффузионные параметры для одних и тех же минеральных видов близки. Но при этом отмечают, что наличие радиационных дефектов может существенно и нелинейно влиять на диффузионные параметры гелия – настолько что температура закрытия (U,Th)-He изотопной системы в низко или наоборот слишком высоко урановом цирконе, становится ниже, чем температура закрытия апатита. Таким образом, (U,Th)-He значения возраста, если при интерпретации используется концепция температуры закрытия, то это лишь оценка времени последнего температурного воздействия. Достоверность этой оценки будет различной для каждого конкретного случая.

(в) Аналитическая воспроизводимость (U,Th)-He значений возраста, например, апатита составляет в среднем порядка 2–3 % на уровне  $2\sigma$ . Эта ошибка складывается из ошибок калибровки гелиевого масс-спектрометра, стабильности работы анализатора, точности измерений содержаний урана и тория в образце. Овердисперсия получаемых значений отражает либо недоучтенный вклад описанных в пунктах (а) и (б) факторов, либо может быть связана с аналитическими «ошибками», к которым относятся потеря урана и тория при перегреве образца в камере масс-спектрометра, и/или за счет неполного разложения; потеря гелия при недостаточном нагреве образца; наличие избыточного гелия, связанного с флюидными включениями.

Многообразие минералов, пригодных для (U,Th)-He датирования и областей применения этого метода инициировало разработку различных методических протоколов, к которым относятся как классическая экстракция гелия диодным лазером в платиновых миниконвертах с последующим измерением урана и тория методом изотопного разбавления на квадрупольном ICP-MS, так и более редкие варианты, такие как *in situ* экстракция

радиогенного гелия, либо предварительное облучение минерала в реакторе с целью построения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  диффузионного профиля и др. В ИГГД РАН с учетом особенностей масс-спектрометрического комплекса МСУ-Г-01-М и имеющего в распоряжении оборудования и материалов также имеются собственные протоколы для (U,Th)-He датирования. Главная их особенность — это использование кварцевых ампул, которые исключают потери урана и тория при нагреве образцов, и/или ступенчатый нагрев в высокотемпературном реакторе, который позволяет параллельно мониторить кинетику выделения радиогенного гелия из минерала и производить отбраковку данных по этому признаку. К очевидным минусам такого подхода относятся трудозатратность. По этой причине для решения более рутинных задач в области (U,Th)-He датирования в ближайшие месяцы планируется запуск высоковакуумной лазерной ячейки, наличие которой, как ожидается, позволит сравниться по производительности с большинством (U,Th)-He лабораторий в мире.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФ 22-77-10088.

#### Литература

1. Flowers, R. M., Zeitler, P. K., Danišić, M., Reiners, P. W., Gautheron, C., Ketcham, R. A., Metcalf, J. R., Stockli, D. F., Enkelmann, E., and Brown, R. W.: (U-Th)/He chronology: Part 1. Data, uncertainty, and reporting, Bull. Geol. Soc. Am., 135, 104–136, <https://doi.org/10.1130/B36266.1>, 2023.



## MONAZITE FISSION-TRACK THERMOCHRONOLOGY AS A POSSIBLE PROXY FOR LOW MAGNITUDE EROSION

**G. Jepson<sup>1,2</sup>, B. Carrapa<sup>2</sup>, S. Jones<sup>3</sup>, B. P. Kohn<sup>3</sup>, A. J. W. Gleadow<sup>3</sup>, S. W. M. George<sup>1,2</sup>, C. J. Howlett<sup>2</sup>, K. Gallagher<sup>4</sup>, A. Frickenstein<sup>1</sup>, L. E. Hunt<sup>1</sup>, G. Gehrels<sup>2</sup>, A. Triantafyllou<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>School of Geosciences, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma 73019, USA

<sup>2</sup>Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA

<sup>3</sup>School of Earth Sciences, University of Melbourne, Melbourne, Victoria, 3010, Australia

<sup>4</sup>Géosciences Rennes, UMR6118, CNRS Université de Rennes, France

<sup>5</sup>Lyon Geology Laboratory - Earth, Planets and Environment (LGL-TPE), Université Lyon 1, ENS de Lyon, CNRS, UMR 5276, Villeurbanne, France

Conventional low-temperature thermochronology can resolve cooling typically associated with ~2 – 6 km of erosion. However, lower magnitudes of erosion (< 2 km) produced by structural and surface processes are often difficult to quantify. Here, we apply a new, low-temperature thermochronometer (partial annealing zone of <50 – 25 °C), monazite fission-track (MFT), to the Catalina-Rincon metamorphic core complex (MCC), Arizona, USA which has a well-constrained tectonic and paleoclimatic history. In the Catalina-Rincon, traditional low-temperature thermochronology (apatite and zircon fission-track and apatite and zircon [U-Th-Sm]/He) record timing of cooling related to metamorphic core complex detachment faulting and subsequent Basin and Range normal faulting (26 – 20 Ma and 15 – 12 Ma, respectively). We present two monazite fission-track age-elevation profiles across southwestern and eastern extent of the Catalina-Rincon. The southwestern profile (~ 1000 m relief) records a Pleistocene age-elevation trend, with older ages at higher elevations (2.8 – 1.0 Ma). Whereas the eastern profile (~ 500 m) records a late Miocene-Pliocene age-elevation trend, also with older ages at higher elevations (7.4 – 3.0 Ma). The profile from the eastern part of the Catalina MCC likely records a period of upper crustal erosion due to footwall uplift post Basin and Range extension. Whereas the southwestern profile does not correlate with known tectonic activity in the region, yet they are consistent with Pliocene intensification of the North American Monsoon. However, such a low closure temperature could suggest that fission-tracks in monazite are not stable at surface temperatures and lie in the partial annealing zone. Despite this concern, we attribute Pleistocene MFT ages to record climate-enhanced erosion during a known period of increased precipitation. We compare results from the Catalina MCC to MFT data collected along the Main Frontal Thrust in the Nepalese Himalaya and from boreholes in the Anadarko Basin, OK, U.S.A. These results suggest that MFT has potential for dating low-magnitude erosion associated with climate and relief-forming processes.

# **ГЕОТЕРМОХРОНОЛОГИЯ: МЕТОДЫ, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Материалы всероссийской конференции с международным участием

Выпуск 1