



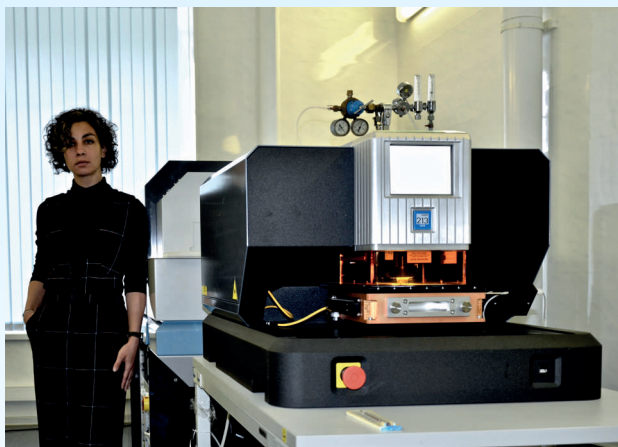
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Российская Академия наук  
Отделение наук о Земле РАН  
Научный Совет РАН по проблемам геохимии  
Научный Совет РАН по проблемам геологии докембрия  
Межведомственный стратиграфический комитет России  
Институт геологии и геохронологии докембрия РАН  
Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН

Материалы  
VIII Российской  
конференции  
по изотопной  
геохронологии

7-10 июня 2022 г.

ИГГД РАН  
Санкт-Петербург

# **Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов**



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Российская Академия наук  
Отделение наук о Земле РАН  
Научный Совет РАН по проблемам геохимии  
Научный Совет РАН по проблемам геологии докембрия  
Межведомственный стратиграфический комитет России  
Институт геологии и геохронологии докембрия РАН  
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

**VIII Российская конференция  
по изотопной геохронологии**

**ВОЗРАСТ И КОРРЕЛЯЦИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ, МЕТАМОРФИЧЕСКИХ,  
ОСАДОЧНЫХ И РУДООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ**

**7–10 июня 2022 г.  
ИГГД РАН, Санкт-Петербург**

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

Санкт-Петербург  
2022

УДК 550.93  
ББК26.331  
В64

**В64 Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов.** Материалы VIII Российской конференции по изотопной геохронологии (Санкт-Петербург, 7–10 июня 2022 г). — СПб: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2022. — 189 с.

ISBN 978-5-93761-871-9

*Тезисы докладов представлены в авторской редакции*

*Фотографии для обложки предоставлены В.П. Ковачем:*

- Прставка для лазерной абляции NWR 213 и ICP масс-спектрометр ELEMENT XR.*
- Алданский щит. Озеро Токко. Контакт Олондинского зеленокаменного пояса (слева) и ТТГ олекминского комплекса (справа).*

Редакционная коллегия: д. г.-м. н. А.Б. Кузнецов  
к. г.-м. н. Ю.В. Плоткина  
к. г.-м. н. Д.В. Доливо-Добровольский

© Коллектив авторов, 2022  
© ИГГД РАН, 2022  
© Картфабрика ВСЕГЕИ, 2022

## **Организаторы конференции**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Российская Академия наук  
Отделение наук о Земле РАН  
Научный Совет РАН по проблемам геохимии  
Научный Совет РАН по проблемам геологии докембрия  
Межведомственный стратиграфический комитет России  
Институт геологии и геохронологии докембрия РАН  
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

## **Организационный комитет конференции**

### ***Председатель***

И.В. Чернышев – академик РАН, ИГЕМ РАН, Москва

### ***Заместители председателя***

Ю.А. Костицын – академик РАН, ГЕОХИ РАН, Москва  
А.Б. Котов – член-корр. РАН, ИГГД РАН, Санкт-Петербург  
А.Б. Кузнецов – член-корр. РАН, ИГГД РАН, Санкт-Петербург

### ***Программная комиссия***

В.В. Акинин – член-корр. РАН, СВКНИИ ДВО РАН, Магадан  
И.М. Горохов – д.г.-м.н., ИГГД РАН, Санкт-Петербург  
С.И. Дриль – к.г.-м.н., ИГХ СО РАН, Иркутск  
Е.О. Дубинина – член-корр. РАН, ИГЕМ РАН, Москва  
А.В. Иванов – д.г.-м.н., ИЗК СО РАН, Иркутск  
В.П. Ковач – к.г.-м.н., ИГГД РАН, Санкт-Петербург  
И.К. Козаков – д.г.-м.н., ИГГД РАН, Санкт-Петербург  
Ю.О. Ларионова – к.г.-м.н., ИГЕМ РАН, Москва  
А.Н. Ларионов – к.г.-м.н., ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург  
Л.К. Левский – д.г.-м.н., ИГГД РАН, Санкт-Петербург  
М.М. Певзнер – д.г.-м.н., ГИН РАН, Москва  
В.М. Саватенков – к.г.-м.н., ИГГД РАН, Санкт-Петербург  
Е.Б. Сальникова – к.г.-м.н., ИГГД РАН, Санкт-Петербург  
А.В. Самсонов – член-корр. РАН, ИГЕМ РАН, Москва  
А.И. Слабунов – д.г.-м.н., ГИ КарНЦ, Петрозаводск  
А.В. Травин – д.г.-м.н., ИГМ СО РАН, Новосибирск  
К.Н. Шатагин – к.г.-м.н., ИГЕМ РАН, Москва  
О.В. Якубович – к.г.-м.н., ИГГД РАН, Санкт-Петербург  
В.В. Ярмолук – академик РАН, ИГЕМ РАН, Москва

### ***Ученый секретарь***

Ю.В. Плоткина – к.г.-м.н., ИГГД РАН, Санкт-Петербург

## Содержание

<b>Акбарпуран Хайяти С.А., Гульбин Ю.Л., Борисовский С.Е.</b>	
Изотопные свидетельства позднекаледонского возраста метаморфизма докембрийских комплексов Нью-Фрисланды, о. Западный Шпицберген .....	12
<b>Акинин В.В., Ползуненков Г.О., Готтлиб Э.Ш.</b>	
U-Pb SIMS-датирование неполированных кайм циркона для определения возраста наиболее молодых событий.....	14
<b>Алексеев Д.В., Травин А.В., Юдин Д.С.</b>	
Измерение $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастных спектров образцов с низким содержанием аргона и узкими температурными пиками его выделения .....	15
<b>Андреичев В.Л., Соболева А.А., Довжикова Е.Г., Миллер Э.Л., Кобл М.А.</b>	
U-Pb (SIMS) цирконовая хронология интрузивного магматизма Печорской зоны фундамента Печорской синеклизы.....	16
<b>Аносова М.О., Астраханцев О.В., Постников А.В., Кирнозова Т.И., Федотова А.А., Фугзан М.М., Зуева О.А., Сабиров И.А.</b>	
U-Pb изотопный возраст циркона гранат-биотитовых гнейсов Лещевского комплекса (южная часть Средневожского мегаблока Волго-Уралья, Восточно-Европейский кратон).....	18
<b>Арзамасцев А.А., Иванова А.А., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Котов А.Б.</b>	
Длительность формирования Хибино-Ловозерского магматического комплекса: U-Pb геохронологические и изотопно-геохимические данные .....	20
<b>Багдасарян Т.Э., Веселовский Р.В., Латышев А.В., Томсон С., Зайцев В.А., Марфин А.Е.</b>	
Термальная эволюция Сибирской трапповой провинции по новым результатам трекового анализа апатита из интрузивных комплексов.....	22
<b>Баянова Т.Б., <u>Каменский И.Л.</u>, <u>Капитонов И.Н.</u>, <u>Лохов К.И.</u>, Елизаров Д.В.</b>	
Изотопные (Os-He-Sr) систематики в мультиметалльных Cu-Ni-Cr-Ti-V (ЭПГ) месторождениях палеопротерозоя С-В части Фенноскандинавского щита Арктической зоны.....	23
<b>Беляцкий Б.В., Никитина Л.П., Корешкова М.Ю., Крымский Р.Ш., Богомолов Е.С., Сергеев С.А.</b>	
Датирование процессов в верхней мантии и нижней коре по ксенолитам в базальтах и кимберлитах: изотопный подход, вопросы методики .....	24
<b>Беляцкий Б.В., Родионов Н.В., Лепехина Е.Н., Ларионов А.Н., Антонов А.В., Каулина Т.В., Сергеев С.А.</b>	
Новый минеральный U/Pb стандарт «титанит GK-6-90» для локального датирования докембрийских образований .....	26
<b>Богомолов Е.С., Левский Л.К., Мезенцева А.В., Сергеева Н.А.</b>	
Радиогенные и нерадиогенные изотопы свинца в перидотите .....	28
<b>Богомолов Е.С., Левский Л.К., Мезенцева А.В., Сергеева Н.А.</b>	
Pb-Pb возраст архейских пород Охотского массива .....	29
<b>Васильева И.М., Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Ризванова Н.Г.</b>	
Применение метода ступенчатого растворения для уточнения Pb-Pb возраста карбонатных пород камовской серии (Байкитская антеклизы Сибирской платформы).....	30
<b>Васильева Н.А., Якубович О.В., Подольская М.М.</b>	
Первые результаты U-Th-He датирования арсенопирита .....	32

**Ветрин В.Р., Родионов Н.В., Серов П.А.**

U-Pb возраст и Sm-Nd изотопная систематика эндербитов и гнейсов северной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита .....34

**Ветров Е.В.**

Региональные данные высоко- и низкотемпературной геохронологии магматических комплексов Таннуольского террейна Тувы .....35

**Ветрова Н.И., Летникова Е.Ф., Ветров Е.В.**

Корреляция раннекембрийских карбонатных отложений в южном складчатом обрамлении Сибирской платформы: данные Sr- и C-хемостратиграфии .....37

**Власов Е.А., Иванова Е.С., Мочалов А.Г., Якубович О.В.**

<sup>190</sup>Pt-<sup>4</sup>He-возраст самородных минералов платины Баимского россыпного золотоносного узла, Западная Чукотка .....39

**Вревский А.Б.**

Изотопно-геохимический состав и геодинамическая природа людиковия Раахе-Ладожской зоны Фенноскандинавского щита .....41

**Голубев В.Н., Чернышев И.В.**

Изотопная U-Pb и Pb-Pb систематика локальных микропроб минералов при изучении геохронологии уранового рудообразования .....41

**Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Константинова Г.В., Дубинина Е.О., Липенков Г.В., Ризванова Н.Г.**

Метод ступенчатого растворения в хемостратиграфии и геохронологии: Sr-Pb изотопная систематика в доломитах билляхской серии Анабарского поднятия .....44

**Докукина К.А., Окينا О.И., Шешуков В.С., Баянова Т.Б., Серов П.А., Пожиленко В.И.**

Неопротерозойский гидротермальный циркон в метасоматизированных гарцбургитах эклогитовой ассоциации Салма, Беломорская эклогитовая провинция .....45

**Докукина К.А., Шешуков В.С., Дубенский А.С., Каулина Т.В.**

Первый опыт U-Pb изотопного датирования титанита методом LA-ICP-MS в Геологическом институте РАН .....47

**Дриль С.И., Ковач В.П., Ларин А.М.**

Позднепалеозойско-раннемезозойские коллизионные гранитоиды Восточного Забайкалья: геохронология и источники вещества по изотопным данным .....49

**Дрогобужская С.В., Баянова Т.Б.**

Проблема дискордантности в U-Pb систематике и избыточного <sup>207</sup>Pb (LA-ICP-MS данные по <sup>231</sup>Pa/<sup>235</sup>U) в бадделеите палеозойских месторождений (арктический регион Фенноскандинавского щита) .....50

**Ефремова У.С., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Иванов А.В., Брянский Н.В.**

Оценка возраста детритовых цирконов как инструмент в разделении сильно дислоцированных метаморфических толщ (на примере харгитуйской свиты Байкальского выступа фундамента Сибирской платформы) .....52

**Жиличева А.Н., Иванов В.А.**

Неоднозначность интерпретации дискордантных значений бадделеита .....54

**Зайцева Т.С., Горохов И.М., Прияткина Н.С., Ковач В.П., Адамская Е.В., Гороховский Б.М., Плоткина Ю.В.**

U-Th-Pb возраст детритовых цирконов из рифейских отложений камовской серии, Байкитская антеклиза Сибирской платформы .....56

<b>Иванов А.В., Летникова Е.Ф., Прошенкин А.И.</b> Возраст раннепалеозойских осадочно-вулканогенных комплексов юга Тувы: данные U-Pb датирования цирконов и Sr-хемостратиграфии .....	58
<b>Иванов А.В., Паверман В.И.</b> DEZIRTEER – программа для расчета U-Pb данных для детритового циркона: примеры применения .....	59
<b>Иванова А.А., Сальникова Е.Б., Козловский А.М., Никифоров А.В., Ярмолюк В.В., Котов А.Б., Плоткина Ю.В.</b> Результаты U-Pb геохронологических исследований (ID-TIMS) метамиктного циркона из щелочных пород Арысканского REE-Nb-Ta-Zr-Th-U месторождения .....	60
<b>Иванова Е.С., Якубович О.В.</b> Изучение сохранности радиогенного гелия в минералах платиновой группы при длительном нагреве до 850°C в присутствии атмосферы .....	62
<b>Кармышева И.В., Яковлев В.А., Юдин Д.С., Семенова Д.В.</b> Возраст основных даек по данным U-Pb и Ar-Ar датирования (Каахемский магматический ареал, Восточная Тува) .....	63
<b>Ковач В.П., Адамская Е.В., Котов А.Б., Березкин В.И., Тимофеев В.Ф., Попов Н.В., Плоткина Ю.В., Федосеенко А.М., Загорная Н.Ю., Гороховский Б.М.</b> Возраст и источники метатеригенных отложений Нижнеханнинской грабен-синклинали западной части Алданского щита: результаты U-Th-Pb (LA-ICP-MS) геохронологических и Nd изотопных исследований .....	64
<b>Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Котов А.Б., Плоткина Ю.В.</b> Возрастные рубежи формирования метаморфических комплексов Центральной Азии .....	66
<b>Козловский А.М., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Саватенков В.М., Травин А.В., Оюунчимэг Ц.</b> Субсинхронный позднепалеозойский салический магматизм I- и A-типа Заалтайской Гоби: изменение геодинамического режима или разные условия магмогенерации? .....	67
<b>Колесов К.К., Летникова Е.Ф., Иванов А.В., Спичак О.А.</b> Возраст и корреляции позднедокембрийских осадочных и осадочно-вулканогенных комплексов Большого Каратау, Южный Казахстан: данные U-Pb датирования цирконов и Sr-хемостратиграфии .....	69
<b>Корешкова М.Ю., Даунс Х., Стифеева М.В., Акимова Е.Ю., Пейчева И., Димитрова Д., Мачева Л., Ларионов А.Н.</b> U-Pb возраст циркона, рутила и титанита в ксенолитах из трубки Нюрбинская, Якутия .....	71
<b>Королева О.В., Прокопьев А.В., Полянский О.П., Васильев Д.А.</b> Ar-Ar датирование среднепалеозойского базитового магматизма Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции, восток Сибирской платформы .....	72
<b>Костева Н.В., Ларионов А.Н.</b> Структурные соотношения в фундаменте СВ Свальбарда: U-Pb возрасты детритовых цирконов из пород серии Моссель (СВ Шпицберген) и псаммитов Северо-Восточной Земли .....	74
<b>Костицын Ю.А., Криволицкая Н.А., Сомсикова А.В., Аносова М.О.</b> Изотопно-геохимические критерии рудоносности интрузивных пород Норильского региона .....	76
<b>Кудряшов Н.М., Удоратина О.В., Калинин А.А., Галеева Е.В., Гроув М.</b> Геохронология редкометалльных (Li, Cs) пегматитов пояса Колмозеро-Воронья (Кольский регион) .....	77

<b>Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В., Страшко А.В., Новикова А.С.</b> Верхнее ограничение возраста офиолитовой ассоциации мыса Фиолент (запад Горного Крыма) по результатам U-Pb изотопного датирования плагиориолитов (скала Монах).....	79
<b>Куликова К.В., Удоратина О.В., Шуйский А.С., Травин А.Л., Соболев И.Д.</b> Мелкие жильные тела гранитоидов зоны ГУР (Полярный Урал): геохронологические данные .....	80
<b>Кучеровский Г.А., Чекулаев В.П., Егорова Ю.С., Арестова Н.А., Зайцева Т.С., Гороховский Б.М., Плоткина Ю.В.</b> О возрасте полимиктовых конгломератов Центрально-Карельского домена Карельской провинции .....	82
<b>Лебедев И.Е., Тихомиров П.Л.</b> Новые геохронологические ограничения возраста для северной части Охотско-Чукотского вулканического пояса.....	84
<b>Лебедева Н.М., Носова А.А., Ларионова Ю.О., Возняк А.А.</b> Влияние коровой контаминации на определение возраста даек лампрофиров .....	85
<b>Летникова Е.Ф., Жданов А.А., Школьник С.И., Ветрова Н.И., Летникова А.Ф., Докукина Г.А.</b> Геохронология и Sr-хемостратиграфия осадочно-вулканогенных последовательностей Сибирской платформы и ее складчатого обрамления: новые данные о вулканизме и карбонатакоплением в позднем докембрии.....	86
<b>Лобач-Жученко С.Б., Егорова Ю.С., Каулина Т.В., Юрченко А.В.</b> Циркон как индикатор геологических событий в гранулитогнейсовых областях (на примере тектоно-магматической брекчии Бугского комплекса Сарматского кратона).....	88
<b>Лыхин Д.А., Иванова А.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ярмолюк В.В.</b> Новые данные о времени формирования щелочных гранитов Огнитского комплекса на Снежном месторождении (Восточный Саян) .....	90
<b>Мамыкина М.Е.</b> Возраст гранитов Белокурихинского массива (Горный Алтай): U-Pb данные .....	92
<b>Мочалов А.Г., Якубович О.В.</b> Возможности $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$ метода датирования минералов платины и платинометального рудообразования.....	93
<b>Мурзинцев Н.Г., Травин А.В.</b> Гранитная магмогенерация как результат термического взаимодействия плюма на примере модели формирования гранитных магм Калбо-Нарымского батолита Таримским плюмом.....	95
<b>Мыскова Т.А., Никонова А.С., Никонов К.А., Житникова И.А., Львов П.А.</b> Состав и возраст пород Кукаозерской структуры Балтийского щита в свете новых геохимических и изотопно-геохронологических данных .....	97
<b>Нагорная Е.В., Аносова М.О., Бакшеев И.А., Костицын Ю.А.</b> Возраст магматитов и метасоматитов золоторудного месторождения Кекура (Западная Чукотка, Россия): U/Pb и Rb/Sr изотопные данные .....	99
<b>Недосекова И.Л., Баянова Т.Б., Серов П.А., Червяковская М.В., Червяковский В.</b> О возрасте карбонатитов, миаскит-пегматитов и Nb-Zr минерализации Ильмено-Вишневогорского комплекса, Ю. Урал, Россия (Sm-Nd, Rb-Sr, U-Pb изотопные данные) .....	100



<b>Никифоров А.В., Козловский А.М., Хертек А.К., Ярмолюк В.В.</b> Ar-Ar и U-Pb исследования пород щелочных комплексов – необходимость заверки первых результатов .....	102
<b>Овчинников Р.О., Ковач В.П., Хи W.L.</b> Sm-Nd изотопно-геохимические особенности условно неархейских метаморфических пород Сынчугинского блока Буреинского континентального массива восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса .....	104
<b>Овчинников Р.О., Козловский В.М., Козаков И.К., Кирилова Т.И., Фугзан М.М.</b> Петрографические особенности, оценка возраста метаморфизма высокobarных бластолитов Гонжинского блока Аргунского супертеррейна восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса .....	105
<b>Парфенов А.В., Лебедев В.А., Oyan V., Özdemir Y.</b> Новые данные о проявлениях N-Q щелочного базальтового магматизма в пределах клина Аравийской плиты .....	108
<b>Певзнер М.М., Толстых М.Л., Волынец А.О., Горбач Н.В., Лебедев В.А., Овсянников Г.Н., Бабанский А.Д., Парфенов А.В., Каримов Т.Д.</b> Миграция позднеплиоцен-четвертичной вулканической и сейсмической активности (Срединный хребет, Камчатка) .....	110
<b>Попов Н.В., Мальковец В.Г., Лиханов И.И.</b> Возраст автономных анортозитов Каларского массива (Юго-Запад Алдано-Станового щита) .....	112
<b>Прокопьев А.В., Стокли Д.Ф., Васильев Д.А.</b> Реконструкция надвиговой структуры Южно-Верхоянского орогенного пояса (СВ Азии) по данным U-Pb датирования детритовых и ксеногенных цирконов .....	113
<b>Пушкарев Е.В., Готтман И.А., Родионов Н.В., Юдин Д.С.</b> Верхний возрастной предел формирования Омутнинского платиноносного массива на Среднем Урале по данным U-Pb и <sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar датирования жильных габброидов и горнблендитов .....	115
<b>Пушкарев Е.В., Солошенко Н.Г., Юдин Д.С.</b> Возраст ортоклаз-нефелиновых тылаитов Нижнетагильского массива по разным изотопным системам: время завершения формирования платиноносного пояса Урала .....	116
<b>Пыстин А.М., Пыстина Ю.И.</b> Геохронология метаморфизма донеопротерозойских образований Приполярного Урала .....	116
<b>Ризванова Н.Г., Ларин А.М.</b> Опыт использования касситерита в качестве U-Pb геохронометра .....	118
<b>Румянцева Н.А.</b> Изотопно-геохимическая характеристика циркона из пород хребта Шака (Южная Атлантика): U-Pb данные, изотопы кислорода .....	120
<b>Рыцк Е.Ю., Великославинский С.Д., Толмачева Е.В., Родионов Н.В., Бережная Н.Г., Федосеенко А.М.</b> О возрасте петротипических баргузинских гранитоидов Ангаро-Витимского батолита (верховья реки Баргузин): U-Pb изотопные данные по циркону (SHRIMP-II) .....	121
<b>Рыцк Е.Ю., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Родионов Н.В., Лебедева Ю.М., Бережная Н.Г., Федосеенко А.М.</b> О возрасте формирования и метаморфизма гранитоидов Абчадского массива в Северном Прибайкалье: U-Pb изотопные данные по циркону (SHRIMP-II) .....	123

- Рязанцев А.В., Разумовский А.А., Новиков И.А., Куртукова А.И., Яшунский Ю.В.**  
Вулканические туфы в разрезах ашинской серии венда (эдиакария) на Южном Урале и их возраст: результаты U-Th-Pb (SIMS) датирования акцессорного циркона .....125
- Саватенков В.М., Мезенцева А.В., Галанкина О.В., Шпакович Л.В., Кузнецов М.В.**  
Методика анализа локальных вариаций изотопного состава Sr и Pb в кристаллической структуре минералов – ключ к реконструкции условий протекания геологических процессов .....126
- Савко К.А., Самсонов А.В., Стифеева М.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Кузнецов А.Б., Ларионова Ю.О., Кориш Е.Х., Червяковская М.В., Толмачева Е.В.**  
Сложности геохронологических исследований метаморфизованного раннедокембрийского щелочно-карбонатитового комплекса Курского блока Сарматии .....128
- Сальникова Е.Б., Иванова А.А., Рыцк Е.Ю., Котов А.Б., Плоткина Ю.В., Федосеенко А.М.**  
О возрасте гелиодора Супруновского пегматитового месторождения (Северо-Байкальская провинция): U-Pb изотопные данные по циркону (ID TIMS) .....130
- Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Иванова А.А., Суханова М.А., Стифеева М.В., Плоткина Ю.В., Федосеенко А.М., Толмачева Е.В.**  
Метод дифференциального растворения в U-Pb геохронологии: прошлое и настоящее .....131
- Самсонов А.В., Ларионова Ю.О., Ларионов А.Н., Ерофеева К.Г., Постников А.В., Спиридонов В.А., Сабиров И.А., Спиридонов И.В.**  
Тунгусский супертеррейн, Сибирский кратон: границы и коровая эволюция по результатам изотопно-геохронологического изучения керн скважин .....132
- Самсонов А.В., Служеникин С.Ф., Ларионова Ю.О., Ларионов А.Н., Ерофеева К.Г., Полозов А.Г.**  
U-Pb, Sm-Nd и Rb-Sr изотопные исследования ксенолитов из раннетриасовой эксплозивной диатремы для расшифровки фундамента Норильского района, Сибирская платформа .....134
- Серов П.А.**  
Селективное обогащение сульфидов неодимом как индикатор их гидротермального или метаморфического генезиса .....136
- Серов П.А., Морозова Л.Н.**  
Изотопно-геохронологические исследования редкометалльных пегматитов: возможности и ограничения современных методов .....137
- Скублов С.Г., Березин А.В., Салимгараева Л.И.**  
Дискуссия о возрасте эклогитов Беломорского подвижного пояса: результаты комплексного датирования и новые аргументы .....139
- Скузоватов С.Ю., Ван К.-Л., Ли Х.-Я., Ли С.-Х., Шацкий В.С.**  
Метаморфическая модификация циркона и ее значение для реконструкции истории высокоградных комплексов: *in situ* геохронологические и изотопно-геохимические данные исследований эклогит-гнейсового комплекса Северо-Муйского блока (Забайкалье) .....141
- Слабунов А.И., Азимов П.Я.**  
Возрасты и геохимия цирконов из мигматизированного архейского флиша Беломорской провинции и геодинамические следствия .....143
- Соболева А.А., Андреичев В.Л., Хубанов В.Б., Зархидзе Д.В.**  
U-Pb (LA-ICP-MS) возраст детритовых цирконов из верхнедокембрийских отложений полуострова Канин .....145

**Соколова Л.А., Якубович О.В.**

Влияние дислокаций в апатите на сохранность гелия.....147

**Степанова А.В., Сальникова Е.Б., Самсонов А.В., Суханова М.А., Устинова В.В.**

Основной магматизм 2.0 млрд лет в Онежской структуре Фенноскандинавского щита: первые результаты U-Pb (ID-TIMS) датирования бадделеита.....148

**Стешенко Е.Н., Баянова Т.Б., Чащин В.В.**

Последовательность преобразования амфиболитов Кандалакшско-Колвицкого комплекса (арктическая зона Фенноскандинавского щита): новые данные (U-Pb, TIMS) по циркону.....149

**Стифеева М.В., Владыкин Н.В., Сотникова И.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б.**

Новые данные о возрасте Сыннырского массива (Северное Прибайкалье) .....151

**Стифеева М.В., Никифоров А.Н., Сальникова Е.Б., Плоткина Ю.В., Котов А.Б.**

U-Pb возраст граната из скарнов Хову-Аксинского Ni-Co-As месторождения .....152

**Стифеева М.В., Савельева В.Б., Сальникова Е.Б., Котов А.Б.**

Новые данные о возрасте формирования щелочных пород Большетагнинского массива (Зиминский рудный узел, Восточно-Саянская щелочная провинция).....153

**Суханова М.А., Сальникова Е.Б., Степанова А.В., Стифеева М.В., Котов А.Б., Азимов П.Я., Галанкина О.В.**

Термохронология метаморфических комплексов Гридинско-Амбарнинского домена Беломорской провинции Фенноскандинавского щита .....155

**Терехов Е.Н., Скублов С.Г., Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В.**

Возраст циркона (U-Pb, SHRIMP-II) из раннерифейских образований внешних островов Финского залива.....156

**Травин А.В., Зимановская Н.А., Анникова И.Ю., Мурзинцев Н.Г., Айтбаева С.С.**

Этапы редкометалльного магматизма Калба-Нарымского пояса (Восточный Казахстан) .....158

**Туркина О.М., Родионов Н.В., Бережная Н.Г.**

Цирконы из мафических пород: магматические vs. ксеногенные (примеры из раннедокембрийских пород юго-запада Сибирского кратона).....160

**Удортина О.В., Вирюс А.А.**

U-Th-Pb возраст монацитов редкометалльно-редкоземельных проявлений Косьюского рудного узла (Средний Тиман) .....162

**Удортина О.В., Никулова Н.Ю., Хубанов В.Б.**

Возраст рудных метапесчаников (Маньхамбо, Северный Урал) .....163

**Хубанов В.Б., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н.**

Возраст и геохимия базитовых субвулканитов позднепалеозойской Баргузинской провинции: свидетельства гетерогенности мантии .....165

**Цховребова А.Р., Костицын Ю.А.**

Нарушение замкнутости Rb-Sr изотопной системы во флогопите из карбонатита массива Одихинча (Маймеча-Котуйская провинция, Сибирь).....166

**Чистякова А.В., Веселовский Р.В.**

Новые результаты U-Pb датирования обломочного циркона из пограничных перм-триасовых разрезов восточного борта Московской синеклизы.....168

<b>Чугаев А.В., Чернышев И.В., Будяк А.Е., Ларионова Ю.О., Тарасова Ю.И., Травин А.В., Рассохина И.В.</b>	
Этапы формирования орогенных золоторудных месторождений «сухоложского» типа (Бодайбинский район, Северное Забайкалье, Россия): Rb-Sr и $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ геохронологические данные.....	169
<b>Шатагин К.Н.</b>	
Rb-Sr геохронология многофазного гранитного массива Раумид (Южный Памир): результаты изучения породообразующих минералов .....	171
<b>Школьник С.И., Летникова Е.Ф., Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Беляев В.А., Резницкий Л.З.</b>	
Метаморфические «глыбы» складчатого обрамления Сибирской платформы: интерпретация новых изотопно-геохронологических данных .....	172
<b>Шуйский А.С., Удоратина О.В., Гроув М.</b>	
Гранитоиды Нодэягинского массива (Полярный Урал): U-Pb (SIMS) данные.....	174
<b>Юдин Д.С., Дамдинов Б.Б., Дамдинова Л.Б.</b>	
$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ исследование миларита из Ермаковского F-Ве месторождения (Западное Забайкалье, Россия).....	175
<b>Якубович О.В.</b>	
Современное состояние U-Th-He метода.....	177
<b>Georgieva M., Vladinova Tz.</b>	
Multiple metamorphic events recorded in kyanite-andalusite gneisses from Parvenets complex, Thracian lithotectonic unit, Bulgaria .....	178
<b>Georgieva S., Vassileva R., Milenkov G., Stefanova E., Peytcheva I.</b>	
<i>In situ</i> U-Pb geochronology on pegmatite-hosted titanite from the vicinity of Strashimir Pb-Zn vein deposit, Central Rhodopes, Bulgaria: an indication for overprinting hydrothermal event .....	179
<b>Georgieva Y., Milenkov G., Vassileva R.</b>	
A new age of pegmatite-hosted titanite from the Govedarnika Pb-Zn deposit, Central Rhodopes, Bulgaria .....	181
<b>Kudryavtsev A., Vasilev E., Telnova O., Marshall J.</b>	
Sample preparation by Ar Ion Beam for Microanalysis in Earth Science .....	183
<b>Macheva L.A., Machev Ph.A., Plotkina J.V., Salnikova E.B., Koreshkova M.J., Ryazantsev A., Stifeeva M.V., Peycheva I.M.</b>	
Eclogites from Devisil lithotectonic unit (East Rhodopes, Bulgaria) – main features and possible protolithic age.....	184
<b>Vassileva R., Peytcheva I., Grozdev V., Plotkina Yu., Salnikova E., Stifeeva M., Machev P.</b>	
Implications of LA-ICP-MS <i>in situ</i> U-Pb geochronology on garnet and titanite: a case study from the Western Rhodopes, South Bulgaria .....	186
<b>Богомоллов Е.С., Жуланова И.Л., Левский Л.К., Мезенцева А.В., Сергеева Н.А.</b>	
Хронология древних верхнемантийных пород – новый подход .....	189

## Изотопные свидетельства позднекаледонского возраста метаморфизма докембрийских комплексов Нью-Фрисланда, о. Западный Шпицберген

С.А. Акбарпуран Хайяту<sup>1</sup>, Ю.Л. Гульбин<sup>1</sup>, С.Е. Борисовский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, [9195848@gmail.com](mailto:9195848@gmail.com)

<sup>2</sup> Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, [dronino@yandex.ru](mailto:dronino@yandex.ru)

В докладе приводятся новые данные по химическому Th-U-Pb изохронному датированию (СНМЕ метод) монацита из метаморфических пород, слагающих кристаллический фундамент полуострова Нью Фрисланд (остров Западный Шпицберген).

В геологическом строении Нью Фрисланда принимают участие комплексы складчатого основания архипелага (PR<sub>1</sub>-PZ<sub>1</sub>) и отложения позднепалеозойского осадочного чехла [1]. Более древние комплексы формируют структуру 1-го порядка – субмеридиональный антиклинорий Западного Нью Фрисланда протяженностью около 150 км. В его западной и центральной части развиты осадочно-вулканогенные толщи палеопротерозойской серии Атомфьелла (PR<sub>1</sub>). Слагающие их породы (кристаллические сланцы, гнейсы, кварциты, амфиболиты, мраморы) сложнодислоцированы и прорваны небольшими по размерам телами анатектических гранитов, секущими интрузиями метаультрабазитов и силлами метагабброидов. Восточнее на дневную поверхность выходят метаосадочные толщи нижнерифейской серии Моссель (RF<sub>1</sub>), главным отличием разреза которой выступает полное отсутствие тел амфиболитов. Отложения серии залегают в виде крутой моноклинали, со структурным несогласием перекрывающей отложения серии Атомфьелла, и имеют на востоке тектонический контакт с верхнерифейской серией Лумфьорд (RF<sub>2</sub>).

Наиболее древние датировки, полученные U-Pb методом по детритовому циркону из метаосадочных пород (2.8–2.5 Ga), отвечают неоархейскому времени и указывают на возраст протолита, за счет которого формировались толщи серии Атомфьелла [3]. Второй возрастной максимум (1770–1730 Ma) соответствует времени образования анатектических гранитов [1]. Более поздние магматические события, связанные с серией Атомфьелла, имели место в раннем (1471±13 Ma) и среднем (1349±11 Ma) рифее. По данным U-Pb датирования циркона, подобные возрасты имеют метаультрабазиты и метагабброиды соответственно [2].

Временной интервал формирования серии Моссель не определен изотопно-геохронологическими методами из-за отсутствия в ее составе магматических пород. По данным U-Pb датирования детритового циркона серия Моссель была сформирована не позднее 1200 Ma; предполагаемый на основе геологических данных возраст метаморфизма – 1150–950 млн лет, что отвечает гренвильской эпохе тектогенеза [3].

В ходе каледонского тектоно-термального события образовались щелочные гранитоиды Ньютонтоппен в южной части полуострова. Их возраст – 432–430 Ma. О влиянии этого события на породы серий Атомфьелла и Моссель свидетельствуют изотопные датировки, полученные K-Ar, Rb-Sr и Ar-Ar методами, максимум которых приходится на интервал 470–380 Ma [5]. Сходный возраст (431 ± 7 Ma) имеет «метаморфогенный» циркон из метаультрабазитов [2].

Каменным материалом для исследования послужили представительные образцы Ms-Bt-Grt (± St) сланцев свиты Риттерватнет, серия Атомфьелла (обр. 3912-3а) и свиты Флоен, серия Моссель (обр. 3885-1) из коллекции проф. А.Н. Сироткина. Датирование монацита осуществлялось *in situ* в прозрачно-полированных шлифах. Исследования проводились в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8200 с 5-ю волновыми спектрометрами. Было выполнено 37 анализов для 19 зерен монацита из обр. 3912-3а и 21 анализ 15 зерен монацита из обр. 3885-1 на Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, PbO, FeO, MnO, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O. Для вычисления возраста использовалась компьютерная программа [6]. Входными данными для расчетов служили содержания ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, PbO. По результатам расчетов строились изохроны (рис. 1).

Полученные данные можно использовать для определения возраста метаморфизма докембрийских пород Нью Фрисланда. Оцененный Th-U-Pb изохронным методом возраст

кристаллизации монацита (~380 Ma) указывает на связь метаморфизма докембрийских комплексов с позднедевонским (элмирским) орогенезом (383–359 Ma), являющимся наиболее поздней фазой каледонской коллизии. С учетом ранее полученных выводов о средне-позднесилурийском возрасте (425–412 Ma) завершающих фаз каледонских преобразований фундамента [5], этот результат можно интерпретировать как свидетельство растянутости во времени и связи процессов каледонского орогенеза на изучаемой территории с несколькими эпизодами тектоно-термальной активности. В пользу такого предположения говорит «омоложение» каледонских возрастов минеральных парагенезисов (410–400 Ga), ранее зафиксированное при датировании монацита из метапелитового сланца серии Моссель [4].

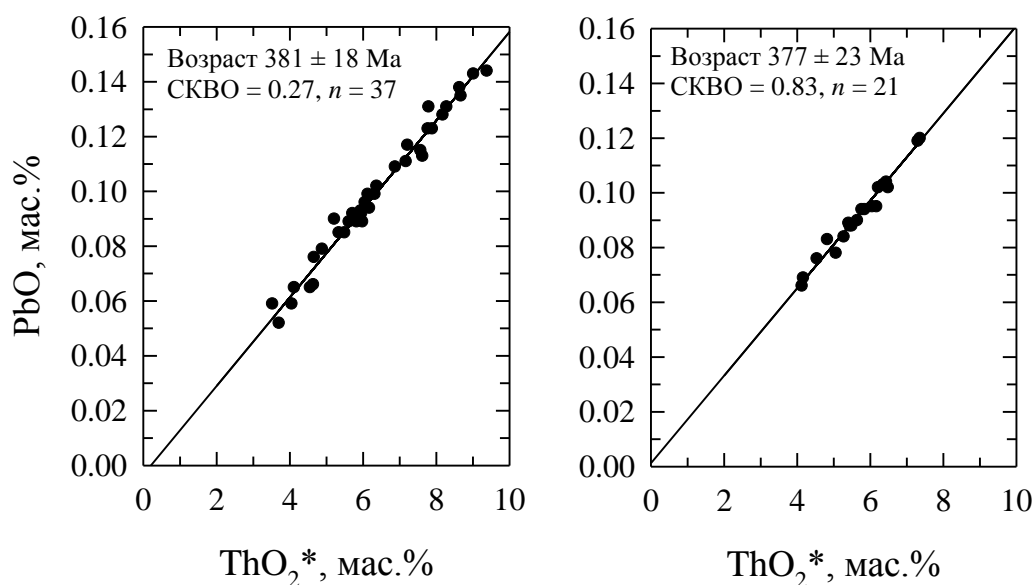


Рис. 1. Изохроны для монацита из изученных образцов.

- [1] Сироткин А.Н., Евдокимов А.Н. Эндогенные режимы и эволюция метаморфизма складчатых комплексов фундамента архипелага Шпицберген (на примере полуострова Нью-Фрисланд). – СПб: ВНИИОкеангеология, 2011. – 270 с.
- [2] Сироткин А.Н., Евдокимов А.Н. Новые данные по U-Pb датированию метаморфизованных интрузий основного и ультраосновного составов северной части полуострова Нью-Фрисланд (остров Западный Шпицберген) // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 81. – С. 45–59.
- [3] Тебеньков А. М., Джи Д. Г., Йохансен У., Ларионов А.Н. История тектонического развития фундамента Шпицбергена (по геохронологическим данным). В кн.: Комплексные исследования природы Шпицбергена. Вып. 4. – Апатиты, 2004. – С. 90–100.
- [4] Bazarnik J., Kosminska K., Majka J., Zielinski G. Metamorphic evolution of the Planetfjella Group, Mosselhalvøya, northern Svalbard. Mineralogia – Spec. Papers, Poland, 2014. –V. 42. – P. 38–40.
- [5] Gee D., Page L.M. Caledonian terrane assembly on Svalbard: New evidence from Ar/Ar dating in Ny Friesland // Amer. J. Sci. – 1994. – V. 294. – P. 1166–1186.
- [6] Kato T., Suzuki K., Adachi M. Computer program for the CHIME age calculation // J. Earth Planet. Sci. – 1999. – V. 46. – P. 49–56.

## U-Pb SIMS-датирование неполированных кайм циркона для определения возраста наиболее молодых событий

*В.В. Акинин<sup>1</sup>, Г.О. Ползуненков<sup>1</sup>, Э.Ш. Готтлиб<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, [akinin@neisri.ru](mailto:akinin@neisri.ru)

<sup>2</sup>Kaiser-Francis Oil Company, Tulsa, USA

Традиционные методы локального SIMS анализа циркона включают U-Pb датирование, как правило, внутренних частей кристаллов. В ряде случаев есть необходимость датировать очень тонкие (<2 мкм) каймы полихронных кристаллов циркона, которые встречаются либо в метаморфических породах, либо в магматических породах с относительно растянутой по времени историей кристаллизации. SIMS-метод идеально подходит для решения такого рода задач, так как его преимуществом является высокое пространственное разрешение и возможность выполнять аналитические измерения объема материала от 1 до 5 нанограмм, в результате остается кратер шириной от 15 до 25 мкм и глубиной до 2 мкм. В микроаналитическом центре Стэнфордского университета разработана методика датирования тонких кайм неполированных идиоморфных кристаллов циркона, которые запрессовываются в мягкий металлический индий, таким образом, используя низкую скорость напыления, на поверхности обнажается поверхность грани, которая датируется. В дальнейшем такие неполированные зерна, инкрустированные индием, могут быть отполированы, чтобы вскрыть и датировать их внутренние ядерные части. Для получения U-Pb и U-Th возрастов из молодых вулканических пород такая техника особенно актуальна, так как поверхность циркона регистрирует последнее событие кристаллизации и с наибольшей вероятностью соответствует возрасту извержения. В магматических породах циркон нередко демонстрирует некоторую небольшую растяжку конкордантных возрастов (подтверждается методом CA-TIMS), что объясняется автокристовой и антекристовой природой циркона [1]. В случае метаморфических пород со сложной термальной историей, имеются примеры, когда только в тонкой поверхностной кайме запечатлена история какого-либо молодого «быстрого» термального события.

Рассмотрены примеры датирования поверхности кристаллов циркона из молодых вулканических пород, а также из мигматитов с унаследованными древними ядрами. Последние происходят из Велиткенайского монцонит-гранит-мигматитового купола на Чукотке [2]. Геолого-петрологические и геохронологические исследования показали, что центральная часть купола сложена мигматизированными неопротерозойскими ортогнейсами (U-Pb возраст циркона из палеосомы 660 – 600 млн лет, неосомы ~ 103 ± 2 млн лет). Магматические образования купола представлены двумя плутоническими фазами альбского возраста: деформированными крупнопорфировыми монцонитоидами ранней фазы с возрастом кристаллизации 106-103 млн лет (циркон без унаследованных древних ядер) и мелкозернистыми лейкогранитами поздней фазы с возрастом кристаллизации 102-101 млн лет (циркон систематически содержит унаследованные неопротерозойские ядра с ювенильными метками изотопного состава Hf и  $\delta^{18}\text{O}$ ). В цирконе мигматитов как правило устанавливаются унаследованные конкордантные неопротерозойские ядра, а также каймы с нарушенными U-Pb датами, которые дискордантны и не имеют геологического смысла. Для установления возраста неосомы в одном из образцов мигматита (U-Pb возраст палеосомы 623 ± 23 млн лет) мы провели датирование неполированной поверхности кристаллов циркона, запрессованного в индий, и установили, что  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возраст составил 103 ± 1.5 млн лет. Эта дата хорошо согласуется с возрастом по нижнему пересечению дискордии в других образцах мигматизированных ортогнейсов.

[1] Charlier B.L.A., Wilson C.J.N., Lowenstern J.B., Blake S., Van Calsteren P.W., Davidson J.P. Magma generation at a large, hyperactive silicic volcano (Taupo, New Zealand) revealed by U-Th and U-Pb systematics in zircons // *Journal of Petrology*. – 2004. – 46. – P. 3–32.

[2] Акинин В.В., Ползуненков Г.О., Готтлиб Э.Ш., Миллер Э.Л. Меловой монцонит-гранит-мигматитовый Велиткенайский комплекс: петрология, геохимия пород и циркона (U-Pb, Hf

и О) в приложении к реконструкции эволюции магматизма и континентальной коры в блоке Арктическая Аляска-Чукотка // Петрология. – 2022. –3. – С. 1-33.

## Измерение $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастных спектров образцов с низким содержанием аргона и узкими температурными пиками его выделения

*Д.В. Алексеев, А.В. Травин, Д.С. Юдин*

*Новосибирск, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, [a.daniil.v@yandex.ru](mailto:a.daniil.v@yandex.ru)*

При  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датировании достаточно часто встречается задача измерения возрастных спектров для образцов с низким содержанием аргона. К указанной категории относятся небольшие навески труднодоступных образцов, образцы с низким содержанием калия, а также предельно молодые образцы. В данном случае возникает следующая проблема. С одной стороны, для надёжного выделения возрастного плато, возрастной спектр должен быть измерен достаточно подробно, с другой – увеличение числа ступеней дегазации приводит к неконтролируемому росту погрешности из-за деления содержащегося в образце аргона на слишком малые порции. На данный момент, при датировании образцов с низким содержанием аргона используется либо максимально возможное увеличение массы навески, что далеко не всегда реализуемо, либо проведение измерений на масс-спектрометрах с меньшим объёмом вакуумной камеры, что дает увеличение сигнала в 2-3 раза [1-2].

В представленной работе предложен метод измерения возрастных спектров образцов с низким содержанием аргона, основанный на накоплении выделяемого газа, что позволяет проводить измерения, практически для всех ступеней, в области оптимальной аналитической ошибки измерительного тракта масс-спектрометра. Ступенчатая дегазация образца проводится так же, как и при классическом методе ступенчатого прогрева, однако откачка вакуумной системы закрыта на протяжении всего цикла измерения возрастного спектра. Количество каждого из изотопов аргона, выделенное на текущей ступени, вычисляется как разность между измеренным количеством данного изотопа и количеством того же изотопа, находящимся в вакуумной системе до выполнения текущей ступени. После каждой ступени дегазации вычисляется количество изотопов аргона, которое остаётся в вакуумной системе после измерений; другими словами выполняется учёт расхода газа на анализ его изотопного состава. В случае низкого содержания аргона в датированном образце, быстрый рост погрешности, при увеличении числа ступеней дегазации, обусловлен приближением величины сигнала к пределу чувствительности масс-спектрометра. Накопление выделяемого газа в вакуумной системе обеспечивает увеличение сигнала, за счёт чего происходит существенное снижение погрешности измерений и, как следствие существенное снижение общей погрешности, несмотря то, что количество каждого из изотопов вычисляется как разность. Накопление фонового аргона в вакуумной системе, в процессе цикла измерений, может быть учтено, однако в проведенных на текущий момент экспериментах существенного влияния на результаты не оказывало.

Предложенный метод измерений может быть востребован при исследованиях образцов, имеющих узкий пик выделения аргона по температуре (например, амфиболы), для которых информативность возрастного спектра определяется, детальностью полученного спектра в области пика выделения. В число таких трудных для  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования минералов попадает и алунит. Предложенный метод может применяться на отдельных участках возрастного спектра, измеряемого классическим методом, в частности на участках, требующих малых шагов по температуре, с сохранением приемлемой аналитической погрешности.

С помощью предложенного метода был измерен возрастной спектр алунита (рис.1а). Возрастной спектр включает 12 ступеней; возрастное плато состоит из 7 ступеней, рассчитанный методом плато возраст составил 90.2 млн лет, средняя погрешность возраста ступеней, входящих в плато – 3.1 млн лет. В возрастном спектре того же образца, измеренном классическим методом (рис. 1б), (масса навески приблизительно в полтора раза больше, чем в предыдущем случае) возрастное плато выделить не удалось, имеется только одна ступень с достаточно низкой погрешностью, возраст которой составляет  $89.3 \pm 1.4$  млн лет.



Представленные возрастные спектры хорошо согласуются. Величина сигнала при измерении классическим методом составляла 4% от верхней границы его допустимых значений, при измерении с помощью предложенного метода, величина сигнала, приходящаяся на каждую из ступеней, приблизительно в 10 раз меньше. Представленный пример демонстрирует применимость предложенного метода, а также существенное увеличение числа ступеней дегазации без заметного роста погрешности.

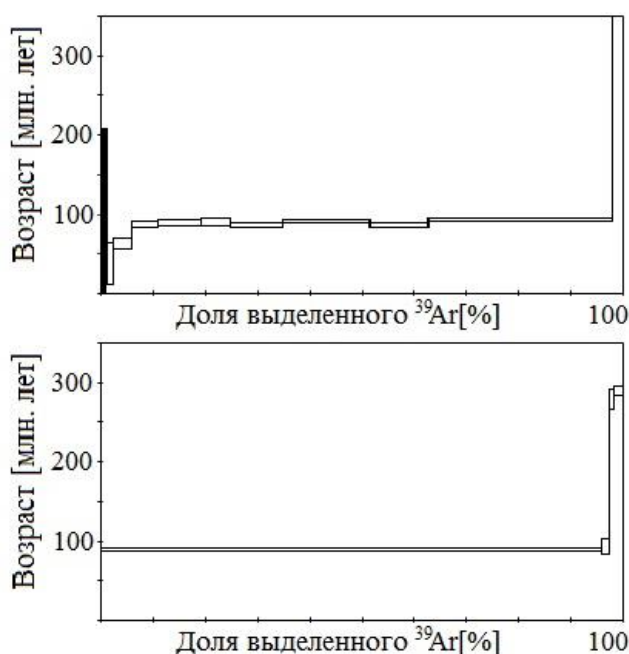


Рис. 1. Возрастной спектр алуниита, измеренный с помощью предложенного (а) и традиционного (б) методов.

- [1] Nyodo H. Laser probe  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating: History and development from a technical perspective // Gondwana Research, 2008, v. 14, p. 609–616.
- [2] Сокол Э.В., Новикова С.А., Алексеев Д.В., Травин А.В. Природные угольные пожары Кузбасса: геологические предпосылки, климатические обстановки, возраст // Геология и геофизика, 2014, т. 55, №9, с. 1319-1343.

### U-Pb (SIMS) цирконовая хронология интрузивного магматизма Печорской зоны фундамента Печорской синеклизы

*В.Л. Андреев<sup>1</sup>, А.А. Соболева<sup>1</sup>, Е.Г. Довжикова<sup>2</sup>, Э.Л. Миллер<sup>3</sup>, М.А. Кобл<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Сыктывкар, Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, [andreichev@geo.komisc.ru](mailto:andreichev@geo.komisc.ru);  
[aa\\_soboleva@mail.ru](mailto:aa_soboleva@mail.ru)

<sup>2</sup> Ухта, Ухтинский государственный технический университет, [dovzh57@yandex.ru](mailto:dovzh57@yandex.ru)

<sup>3</sup> Стэнфорд, Стэнфордский университет, [elmiller@stanford.edu](mailto:elmiller@stanford.edu)

Печорская синеклиза представляет собой крупную региональную тектоническую структуру в составе Тимано-Печорской плиты, занимая пространство между Тиманом и Предуральским краевым прогибом. Фундамент синеклизы слагают верхнедокембрийские осадочно-метаморфические и прорывающие их магматические образования, повсеместно погребенные под ордовикско-кайнозойским платформенным чехлом мощностью 1–7 км. На основании геофизических данных и результатов бурения в составе фундамента по вещественному составу и характеру магматизма выделяются Большеземельская, Печорская и Ижемская зоны. Две первые зоны объединяются в Большеземельский мегаблок, а Ижемская зона с примыкающим с юго-запада Тиманом – в Тиманский мегаблок. Граница между мегаблоками проводится по зоне Припечорского и Илыч-Чикшинского глубинных разломов [6].

Общее строение фундамента Печорской синеклизы, наблюдаемый спектр магматических пород послужили основанием интерпретировать Тиманский мегаблок как область отложений

пассивной континентальной окраины [4]. Она простиралась до Припечорско-Ильч-Чикшинской зоны разломов, представляющей собой сутуру орогена Тиманид – след замыкания Печорского океана [7] в результате аккреционных [2 и др.] или коллизионных [5] процессов. В этой зоне, а также в расположенных северо-восточнее Печорской и Большеземельской зонах обнаруживаются породы, образовавшиеся в условиях активной окраины [2, 3, 8].

В Печорской зоне интрузивные породы вскрыты в двух скважинах. Скв. 1-Северный Савинобор в интервале 4123–4744 м (забой) прошла по диоритам, на отдельных участках переходящим в габбродиориты и амфиболовое габбро и пересекаемым телами микродиоритов и плагиогранитов с видимой мощностью от первых дециметров до 1–2 м. Диориты – средне- и мелкозернистые массивные породы, сложенные зональным плагиоклазом состава  $An_{45-55}$  в центральных частях зерен и  $An_{45-30}$  по краям (40–60 об. %), зеленой роговой обманкой (20–35 об. %), кварцем (5–10 об. %), биотитом (0–10 об. %). Структура породы гипидиоморфнозернистая. Из вторичных минералов развиты хлорит, эпидот, клиноцоизит, карбонат; из аксессуарных – апатит, магнетит, гранат, циркон, титанит, лейкоксен. Габбродиориты и амфиболовые габбро отличаются более высокими содержаниями темноцветных минералов. Породы содержат 51.3–54.4 мас. %  $SiO_2$  и, согласно петрохимической классификации, относятся к семействам габброидов (габбро) и диоритов (габбродиориты и диориты). Содержания и характер распределения элементов-примесей в исследованных габбродиоритах типичны для пород, образовавшихся в геодинамической обстановке незрелой островной дуги [2].

В скв. 1-Новая в интервале 4230–4501 м (забой) вскрыты амфиболовые габбро, прорванные гранодиоритами и плагиогранитами. Плагиограниты, из которых исследовались цирконы, имеют среднезернистую гипидиоморфнозернистую структуру и массивную текстуру. Породы сложены примерно равными количествами ксеноморфных зерен кварца, идиоморфных и гипидиоморфных табличек зонального плагиоклаза, а также гипидиоморфными и ксеноморфными листочками коричневого частично хлоритизированного биотита (10–15 об. %). Более кальциевые внутренние части зерен плагиоклаза сильно сосюритизированы, сохранившиеся более кислые зоны имеют состав  $An_{30-35}$ . Аксессуарные минералы представлены апатитом, титанитом и цирконом. Порода содержит 70.7 мас. %  $SiO_2$ , 1.16 мас. %  $K_2O$  и по петрохимической классификации она определяется как плагиогранит. Содержания и характер распределения элементов-примесей в плагиограните типичны для гранитов, образовавшихся в глубинных частях зрелой островной дуги [2].

U-Pb датирование цирконов проведено методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде обратной геометрии SHRIMP-RG, принадлежащем Стэнфордскому университету и Геологической службе США.

В скв. 1-Северный Савинобор проанализированы цирконы из габбродиорита (обр. 37с, гл. 4474–4480 м). Изотопные данные по 11 зернам (U – 32–96 мкг/г, Th – 15–64 мкг/г, Th/U – 0.37–0.92) образуют кластер с конкордантным средневзвешенным возрастом  $673 \pm 7$  млн лет ( $2\sigma$ , СКВО – 1.3).

Цирконы в скв. 1-Новая отобраны из плагиогранита (обр. 67, гл. 4500–4501 м). По семи зернам (U – 112–332 мкг/г, Th – 80–215 мкг/г, Th/U – 0.34–0.91) получен средневзвешенный возраст  $564 \pm 5$  млн лет ( $2\sigma$ , СКВО – 2.2).

Таким образом, U-Pb возрасты цирконов из интрузивных пород Печорской зоны фундамента Печорской синеклизы указывают на два эпизода островодужного магматизма. Первый имел место в конце рифея, а второй приурочен к границе раннего–позднего венда. Возраст габбродиоритов из скв. 1-Северный Савинобор, интерпретируемых как производные начальной стадии развития островной дуги, составляет  $673 \pm 7$  млн лет. Позднеостроводужные плагиограниты скв. 1-Новая имеют возраст  $564 \pm 5$  млн лет и предшествуют коллизионным гранитоидам Припечорской разломной зоны с U-Pb (SIMS) возрастaми 555–544 млн лет [1].

[1] Андреев В.Л., Соболева А.А., Довжикова Е.Г., Миллер Э.Л., Кобл М.А., Ларионов А.Н., Вакуленко О.В., Сергеев С.А. Возраст гранитоидов Припечорской разломной зоны

- фундамента Печорской синеклизы: первые U-Pb (SIMS) данные // ДАН. – 2017. – Т. 474. – 3. – С. 321-326.
- [2] Белякова Л.Т., Богацкий В.И., Богданов Б.П., Довжикова Е.Г., Ласкин В.М. Фундамент Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна. – Ухта: ГУП РК ТП НИЦ. 2008. – 288 с.
- [3] Белякова Л.Т., Степаненко В.И. Магматизм и геодинамика байкалитид фундамента Печорской синеклизы // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1991. – 12. – С. 106-117.
- [4] Гецен В.Г. Геодинамическая реконструкция развития северо-востока европейской части СССР для позднепротерозойского этапа // Геотектоника – 1991. – № 5. – С. 26-37.
- [5] Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Удоратина О. В., Герцева М.В. Доордовикские гранитоиды Тимано-Уральского региона и эволюция Протоуралид-Тиманид. Сыктывкар: ГЕОПРИНТ, 2005. – 100 с.
- [6] Оловянишников В.Г., Бушуев А.С., Дохсаньянц Э.П. Строение зоны сочленения Русской и Печорской плит по геолого-геофизическим данным // Докл. РАН. – 1996. – Т. 351. – № 4. – С. 209-231.
- [7] Пучков В.Н. Эволюция литосферы: от Печорского океана к Тиманскому орогену, от Палеоуральского океана к Уральскому орогену // Проблемы тектоники Центральной Азии. – М.: ГЕОС, 2005. – С. 309-342.
- [8] Dovzhikova E., Pease V. Remizov D. Neoproterozoic island arc magmatism beneath the Pechora Basin, NW Russia // GFF. – 2004. – V. 126. – P. 353-362.

### **U-Pb изотопный возраст циркона гранат-биотитовых гнейсов Лещевского комплекса (южная часть Средневожского мегаблока Волго- Уралья, Восточно-Европейский кратон)**

*М.О. Аносова<sup>1</sup>, О.В. Астраханцев<sup>1</sup>, А.В. Постников<sup>2</sup>, Т.И. Курнозова<sup>1</sup>, А.А. Федотова<sup>1</sup>,  
М.М. Фугзан<sup>1</sup>, О.А. Зуева<sup>2</sup>, И.А. Сабиров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Москва, ГЕОХИ РАН, [anosova@geokhi.ru](mailto:anosova@geokhi.ru)

<sup>2</sup> Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина

Волго-Уральский сегмент фундамента Восточно-Европейского кратона (ВЕК) находится под осадочным чехлом, являясь наименее изученным из трёх сегментов [1]. Присутствие архейского материала в Волго-Уралье доказано, но его объём достоверно не определен.

Средневожский мегаблок занимает центральную и восточную части Волго-Уралья [1, 2]. С севера он ограничен Елабужской зоной деформаций, а с юга – Шарлыкским поясом, с запада к нему примыкает Волго-Донской ороген. В свою очередь, в составе Средневожского мегаблока выделяются (с севера на юг) Татарский и Самарский блоки, разделённые Жигулёвско-Туймазинским поясом деформаций [1]. Северо-восточную часть Средневожского мегаблока слагает Бакалинский гранитоидный массив.

Лещевский комплекс высокоглинозёмистых метаосадочных пород, испытавших метаморфизм в условиях и гранулитовой, и амфиболитовой фаций, и связанных с ними анатектических S-гранитоидов, распространён на юго-востоке Самарского блока.

Задачей исследования является решение вопроса: представляют ли собой метаосадочные породы Лещевского комплекса стратиграфический аналог большечеремшанской серии неорархей или южновожского комплекса палеопротерозоя. Для её решения проведено изучение биотит-гранатовых гнейсов Лещевского комплекса Самарского блока и циркона из этих пород.

Изображения циркона получены на электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 (ГЕОХИ РАН) в режиме катодоллюминесценции. Исследования U-Pb изотопной системы проведены методом LA-ICP-MS на масс-спектрометре Element XR с лазерной приставкой UP-213 (ГЕОХИ РАН) по методике [3].

Для изотопного изучения вручную под бинокляром выбраны зёрна из размерной фракции < 100 мкм. Кристаллы прозрачные, со сглаженными вершинами и рёбрами, эллипсоидной и изометричной формы,  $K_{удл}$  варьирует от 1 до 5. Практически все зёрна характеризуются наличием ядер и оболочек.

По морфологии и внутреннему строению в зёрнах циркона выделяется два типа ядер. Ядра первого типа, составляющие большинство в изученной выборке, обладают изометричной или короткопризматической формой.  $K_{удл}$  таких ядер циркона составляет от 1 до 2 по длинной оси. Грани призм (100), (110) и в продольных срезах – грани бипирамиды (211) хорошо проявлены. Ядра в большинстве случаев имеют ярко выраженную осцилляторную зональность. Иногда они представлены угловатыми остроугольными обломками кристаллов. В отдельных случаях ядра первого типа имеют светлую на CL-изображениях тонкую прерывистую оболочку, секущую осцилляторную зональность. Описанные выше особенности морфологии кристаллов характерны для циркона, формировавшегося на магматической и позднемагматической стадиях кристаллизации гранитоидных интрузивов при температурах 600-700°C [4, 5].

Второй тип ядер характеризуется продольно-параллельной зональностью, выраженными гранями призм и отсутствием или неясными очертаниями граней на головке кристаллов.  $K_{удл}$  ядер циркона варьирует от 3 до 5 по длинной оси. Количество зёрен циркона с вторым типом ядер не превышает 5 % от общего объёма выборки.

Оба типа ядер обрастают серой на CL-изображениях однородной, шириной до 20 мкм, каймой с неровными внутренними границами и гладкой внешней поверхностью.

По результатам изотопного U-Pb исследования ядер циркона построена диаграмма с конкордией для 55 точек. Большинство значений дискордантны (Рис. 1а). Анализ распределения относительных вероятностей возрастов по изотопному отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  для значений с  $D \leq 2$  выявляет пик 2.58 млрд лет и единичные точки 2.4, 2.7 и 3.1 млрд лет (Рис. 1б). Модельный возраст гранат-биотитовых гнейсов составил 2.8 млрд лет (при расчёте принято:  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513099$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.212$ ).

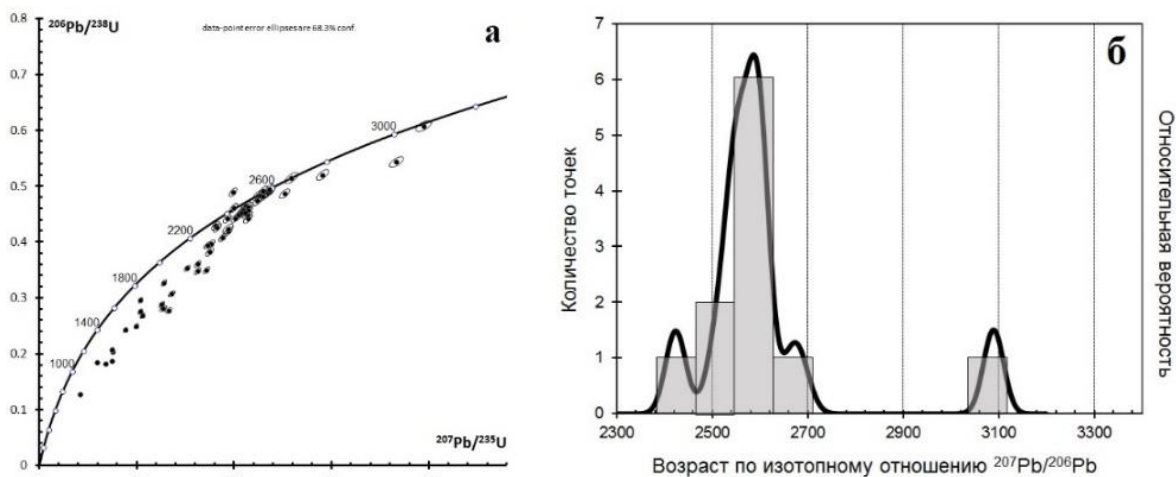


Рис 1. а) Диаграмма с конкордией для ядер циркона из образца гранат-биотитовых гнейсов Лещевского комплекса; б) гистограмма и кривая распределения относительных вероятностей возрастов циркона по изотопному отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ( $D \leq 2$ ).

Полученные результаты в совокупности с данными по большечеремшанской серии [6] дополняют сведения об объёме распространения и диапазонах возрастов архейского материала Волго-Уральского сегмента ВЕК. Определение природы геологических процессов этапа 2,58 млрд лет в истории преобразований метаосадочных пород Лещевского комплекса, их масштаба, как и решение вопроса корреляции толщ, требует дополнительных исследований.

*Выполнено по теме госзадания лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН.*

- [1] Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G. EUROPE|East European Craton. // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. – Elsevier. 2016. – P.34-49.
- [2] Бибикова Е.В., Богданова С.В., Постников А.В., Попова Л.П., Кириозова Т.И., Фугзан М.М., Гущенко В.В. (2009) Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: Изотопно-

- геохронологическая характеристика супракрустальных пород и гранитоидов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2009. – Том 17. – №6. – С. 3-16.
- [3] Костицын Ю.А., Аносова М.О. U-Pb возраст экструзивных пород кальдеры Уксичан в Срединном хребте Камчатки – применение лазерной абляции к датированию молодых цирконов. // Геохимия. – 2013. – № 2. – С. 171-179.
- [4] Pupin J.P. Zircon and Granite Petrology // Contribution of Mineralogy and Petrology. – 1980. – Vol. 73. – P. 207-220.
- [5] Носырев И.В., Робул В.М., Есипчук К.Е., Орса В.И. Генерационный анализ акцессорного циркона. –М.: Наука. – 1989. – 203 с.
- [6] Бибикина Е. В., Богданова С. В., Постников А. В., Федотова А. А., Клаэссон С., Кирнозова Т. И., Фугзан М. М., Попова Л. П. Ранняя кора Волго-Уральского сегмента Восточно-Европейского кратона: изотопно-геохронологическое изучение терригенного циркона из метаосадочных пород большечеремшанской серии и их Sm-Nd модельный возраст. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2015. – Том 23. – № 1. – С. 1-24.

### Длительность формирования Хибино-Ловозерского магматического комплекса: U-Pb геохронологические и изотопно-геохимические данные

*А.А. Арзамасцев, А.А. Иванова, Е.Б. Сальникова, В.П. Ковач, А.Б. Котов*

*Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [arzamas@ipgg.ru](mailto:arzamas@ipgg.ru)*

Одной из главных задач изотопной геохронологии является определение длительности геологических и, в частности, магматических процессов в конкретных геологических структурах. Значительный объем геохронологических данных, накопленный в течение последних десятилетий, позволяет оценить время и длительность формирования Кольской щелочной провинции в интервале 390(404) – 362 млн лет [1, 2, 3, 4 и др.], т.е. более 25 млн лет. Аналогии с кайнозойскими магматическими провинциями (например, провинция Восточно-Африканских рифтов) допускает вероятность длительного (> 15 Ma) развития плюм-литосферных процессов, ответственных за формирование щелочных провинций. Однако значительные расхождения в оценке возраста конкретных интрузий, превышающие пределы точности геохронологических методов, а также различия в оценке возраста одного и того же объекта с помощью различных изотопных систем, приводят к необходимости дополнительных геохронологических исследований с применением наиболее точных методов датирования.

Определение длительности формирования магматической системы Хибинского и Ловозерского агпаитовых массивов предполагает оценку интервала становления комплексов от момента заложения кальдер до завершающих событий, проявившихся в образовании трубок взрыва, прорывающих щелочные комплексы и жил поздних пегматоидов. Для решения этой задачи ранее использовалось Rb-Sr изохронное датирование и определение  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возраста пород по флогопиту и амфиболу [5]. Полученные данные позволили ограничить интервал формирования Хибино-Ловозерской магматической системы в пределах 388 – 359 млн. лет назад [5]. Результаты датирования циркона из щелочных сиенитов Ловозерского массива (U-Pb, SHRIMP) расширяют диапазон его формирования до  $347 \pm 8$  млн лет назад [5].

С целью уточнения интервала формирования палеозойской магматической системы в центральной части Кольской щелочной провинции проведено U-Pb (ID-TIMS) геохронологическое исследование циркона из разных зон Хибинского и Ловозерского комплексов. Вследствие высокой щелочности и относительно низкого содержания кремнезема в агпаитовых сиенитах, слагающих основной объем этих плутонов, циркон в этих породах отсутствует. Вместе с тем, цирконсодержащие породы, генетически связанные со щелочными интрузиями, установлены как в обрамлении, так и в центральных частях этих массивов. Были проведены U-Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования циркона из нескольких разновидностей таких пород Хибинского и Ловозерского массивов.

- Субщелочные сиениты отобраны из тела мощностью  $> 370$  м, располагающегося в центральной части Ловозерского массива (обр. 903/978) в интервале глубин 827 – 1196 м под породами дифференцированного комплекса лувритов-фойяитов-уртитов. Оно было подсечено структурной скважиной, пробуренной на северном берегу оз. Сейдявр. Циркон из щелочного сиенита представлен кристаллами двух типов: непрозрачными метамиктными кристаллами светло-коричневого цвета, а также прозрачными и полупрозрачными желтыми и бесцветными кристаллами с высоким двупреломлением. Для геохронологических исследований были использованы кристаллы второго типа. Кристаллы крупные (до 500 мкм), представлены обломками неправильной формы. В примесном составе отмечается повышенное содержание тория. Возраст циркона составляет, согласно предварительным данным,  $377 \pm 2$  млн лет;

- Микроклин-альбитовые пегматоиды с ильменитом и цирконом были отобраны в северо-восточном контакте Ловозерского массива (обр. L05-73). Крупные идиоморфные кристаллы циркона дипирамидального габитуса достигают в размере 0.5-1 см. Кристаллы прозрачные, коричневого цвета. Предварительная оценка возраста, полученная для этого циркона, составляет  $378 \pm 2$  млн лет;

- Поздняя содалит-эгирин-микроклиновая жила локализована в К-агпаитовых сиенитах (рисчорритах) пика Марченко (центральная часть Хибинского массива). Кристаллы циркона, заключенные в массе натролитизированного содалита (обр. КН-1), достигают 0.5 см. Циркон прозрачный, бесцветный или желтый. Оценка возраста этого циркона соответствует  $372 \pm 1$  млн лет.

Новые U-Pb данные фиксируют более древние значения возраста цирконов в сравнении с полученными ранее Rb-Sr оценками возраста главных комплексов нефелиновых сиенитов Хибинского и Ловозерского массивов [2] и находятся в пределах возрастного интервала формирования интрузий щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов [3, 4]. Таким образом, можно предположить, что формирование интрузий Кольской щелочной провинции происходило в более узком возрастном интервале и завершилось  $\sim 370$  млн лет назад.

- [1] Kramm U., Kogarko L.N., Kononova V.A., Vartiainen H. The Kola Alkaline Province of the CIS and Finland: Precise Rb-Sr ages define 380-360 age range for all magmatism // *Lithos.* – 1993. – 30. – P. 33-44.
- [2] Kramm U., Kogarko L.N. Nd and Sr isotope signatures of the Khibina and Lovozero agpaitic centres, Kola Alkaline Province, Russia // *Lithos.* – 1994. – 32. – P. 225-242.
- [3] Amelin Ju.V., Zaitsev A.N. Precise geochronology of phoscorites and carbonatites: The critical role of U-series disequilibrium in age interpretations // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2002. – 66. – 13. – P. 2399-2419.
- [4] Арзамасцев А.А., Ву Фу-Ян. U-Pb геохронология и изотопная (Sr, Nd) систематика минералов щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции // *Петрология.* – 2014. – 22. – 5. – С. 496–515.
- [5] 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 полифазной магматической системы палеозойских щелочных комплексов центральной части Кольского полуострова: U-Pb, Rb-Sr, Ar-Ar данные. Доклады РАН. – 2007. – 413. – 5. – С. 666-670.

## Термальная эволюция Сибирской трапповой провинции по новым результатам трекового анализа апатита из интрузивных комплексов

*Т.Э. Багдасарян<sup>1,2</sup>, Р.В. Веселовский<sup>1,2</sup>, А.В. Латышев<sup>1,2</sup>, С. Томсон<sup>3</sup>, В.А. Зайцев<sup>4</sup>,  
А.Е. Марфин<sup>5</sup>*

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

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

<sup>3</sup> Тусон, Аризонский университет

<sup>4</sup> Москва, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

<sup>5</sup> Иркутск, Институт земной коры СО РАН

Основная фаза траппового магматизма в пределах Сибирской платформы оценивается в интервале времени 252-250 млн. лет на основании U-Pb и Ar/Ar определений [1, 2, 3 и др.]. Однако наличие геохронологических определений, приходящихся на интервал ~240-230 млн. лет (главным образом Ar/Ar [4] и единичных U-Pb [3 и др.]), с одной стороны указывает, что магматизм в пределах Сибирской трапповой провинции мог продолжаться более длительное время, с другой стороны можно предположить, что различие U-Pb и Ar/Ar возрастов связано с тепловой эволюцией Сибирской платформы в целом и интрузивных тел Сибирской трапповой провинции, в частности. Для восстановления термальной эволюции Сибирской трапповой провинции мы используем один из наиболее распространенных методов низкотемпературной термохронологии – трековый анализ апатита. Мы представляем результаты трекового анализа апатита и других геохронологических определений (U-Pb (LA-MC-ICPMS) и Rb-Sr по апатиту) нескольких интрузий, расположенных в разных частях Сибирской трапповой провинции: (1) щелочно-ультраосновных кольцевых плутонов Одихинча, Ессей и Маган, (2) интрузий Норильск-1 и Контайской, (3) Падунского силла и (4) Котуйской дайки. Трековое датирование проводилось методом внешнего детектора [5, 6] в университете Аризоны (Тусон) при помощи отожженных низкоурановых детекторов из мусковита.

Полученные значения средневзвешенного трекового возраста находятся в диапазоне 207-173 млн. лет со средним значением  $193 \pm 19$  (1 $\sigma$ ) млн. лет. Значения длин треков находятся в диапазоне  $14.89 \pm 0.27$  и  $13.59 \pm 0.34$   $\mu\text{m}$  при среднем значении  $14.18 \pm 0.17$   $\mu\text{m}$ . Распределение длин треков унимодальное и преимущественно узкое, что свидетельствует о быстром прохождении породами температурного диапазона 110-60°C (зоны частичного отжига треков в апатите).

Для реконструкции термальной истории пород и разработки модели термальной эволюции верхних горизонтов коры Сибирской платформы нами использовались полученные U-Pb, Rb-Sr и трековые возрасты, а также уже опубликованные U-Pb и Ar/Ar определения с позиции их термохронологической интерпретации и концепции температур закрытия изотопных систем.

Наиболее вероятный сценарий тектоно-термальной эволюции комплексов, объясняющий более молодой трековый возраст, заключается в том, что после внедрения в приповерхностных глубинах около 250 млн лет рассматриваемые интрузивные тела были погребены ниже изотермы 110°C из-за накопления мощного вулканогенно-осадочного чехла. Этот процесс мог происходить одновременно с увеличением теплового потока в триасовое время относительно сегодняшнего дня, что было отмечено в [7]. В результате этого породы нагрелись выше температуры полного отжига треков в апатите. В тоже время, вышележащие породы могли действовать как «тепловое одеяло» (thermal blanket) [8] и привести к повышенным температурам без значительного погружения интрузивных комплексов.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проекты № 20-35-90066, 18-35-20058, 18-05-00590 и 18-05-70094), госзадания 0137-2019-0014, Программы развития МГУ, Центра коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН и Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

[1] Падерин П.Г., Деменюк А.Ф., Назаров Д.В., Чеканов В.И. и др. // Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Норильская. Лист R-45. 2016.

- [2] Burgess S.D., Bowring S.A. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction // *Science Advances*. 2015. V. 1. № 7. P. 1-14
- [3] Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Yu., Fedorenko V.A., Davis D.W., Trofimov V.R. Rapid eruption of Siberian flood volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. V. 214. P. 75-92.
- [4] Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Paleskii S.V., Nikolaeva I.V. Siberian Traps large igneous province: evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism // *Earth-Science Reviews*. 2013. V. 122. P. 58–76.
- [5] Gleadow A.J.W. Fission-track dating methods: what are the real alternatives? // *Nuclear Tracks*. 1981. V. 5 (1-2), P. 3–14.
- [6] Malusà M.G., Fitzgerald P.G., eds. *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology* // Springer. 2019. 393 p.
- [7] Розен О.М., Соловьев А.В., Журавлев Д.З. Термальная эволюция северо-востока Сибирской платформы в свете данных трекового датирования апатитов из ядра глубоких скважин // *Физика Земли*. 2009. № 10. С. 79-96.
- [8] Łuszczak K., Persano C., Stuart F.M. Early Cenozoic denudation of central west Britain in response to transient and permanent uplift above a mantle plume. *Tectonics* 37, 914–934. 2018.

### Изотопные (Os-He-Sr) систематики в мультиметальных Cu-Ni-Cr-Ti-V (ЭПГ) месторождениях палеопротерозоя С-В части Фенноскандинавского щита Арктической зоны

Т.Б. Баянова<sup>1,2</sup>, И.Л. Каменский<sup>1</sup>, И.Н. Капитонов<sup>3</sup>, К.И. Лохов<sup>3</sup>, Д.В. Елизаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> г. Апатиты, Геологический институт КНЦ РАН, [tamara@geoksc.apatity.ru](mailto:tamara@geoksc.apatity.ru)

<sup>2</sup> г. Москва, Институт динамики геосфер ИГД РАН

<sup>3</sup> г. Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ

Расслоенные мультиметальные интрузии (Cu-Ni, Cr-Ti-V и ЭПГ) расположены в С-В части Фенноскандинавского щита и образуют два (300-350 км) пояса: Кольский (Мончегрский, Федорово-Панский и Имандровский рудные узлы) и Финско-Карельский (Бураковский массив, Пеникат и др.). Расслоенные интрузии формировались в интервале 2.5-2.4 млрд.лет (U-Pb данные по бадделеиту и циркону) и относятся к обширной (LIP) Восточно-Скандинавской изверженной провинции [1].

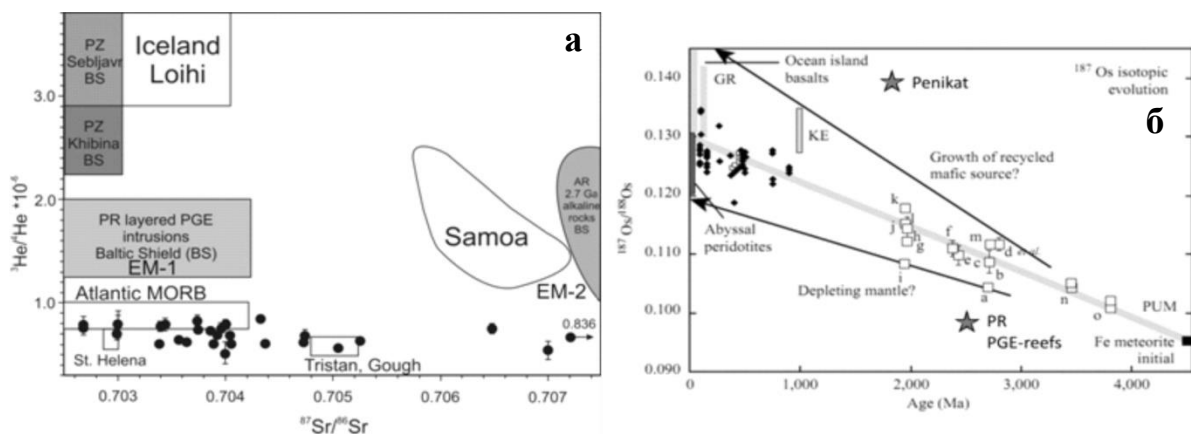


Рис. 1. He-Sr изотопные отношения в ксенолитах (а) и первичный <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os изотопный состав мантии (б) [3].

На основе REE и Nd-Sr систематики мультиметальные месторождения рудных регионов были сформированы при плюмовом магматизме из источников типа обогащенной мантии EM-1 [2].



Новые изотопные He-Sr исследования пород и руд месторождений представлены на рис. 1.

Изучение Os систематики было проведено во ВСЕГЕИ по минералам платиновой группы (МПГ) из Pt-Pd рифов ЭПГ месторождений Федорово-Панского массива и представлены на рис. 1.

Можно отметить, что низкое отношение  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}=0.09821$  в МПГ соответствует резервуару субхондритовой мантии [3-4].

В ЭПГ интрузии Пеникат (Финляндия), изучение изотопной систематики по Os проводились по породам в целом только в МПГ из Pt-Pd рифа Федорово-Панского массива впервые измерены такие низкие значения.

Таким образом для изучения времени, генезиса и источников формирования расслоенных мультиметалльных интрузий палеопротерозоя С-В части Фенноскандинавского щита были впервые применены все известные изотопные систематики: U-Pb (по бадделлиту и циркону), Sm-Nd (по породообразующим и рудным минералам и породам), Rb-Sr (по породе), He<sup>3</sup>/He<sup>4</sup> по породам и рудам и Os<sup>187</sup>/Os<sup>188</sup> по породе и МПГ.

Все исследования проводятся в рамках программ НИР 0226-2019-0053 и частично по гранту РФФИ № 21-17-00161.

- [1] Mitrofanov F. P., Bayanova T. B., Ludden J. N., Korchagin A. U., Chashchin V. V., Nerovich L. I., Serov P. A., Mitrofanov A. F., Zhirov D. V. Origin and Exploration of the Kola PGE-bearing Province: New Constraints from Geochronology / Ore Deposits: Origin, Exploration, and Exploitation / Edited by Sophie Decree and Laurence Robb // Geophysical Monograph Series. Wiley. – 2019. – P. 3-36.
- [2] Hoffman A.W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism // Nature. – 1997. – V. 385. – P. 219-229.
- [3] The Mantle and Core: Treatise on Geochemistry. – V. 2. ed. R.W. Carlson. Elsevier. – 2005. – P. 608
- [4] Малич К. Н. Комплексные платинометалльные месторождения Полярной Сибири (состав, источники вещества и условия образования) // Автореф. дисс. на соискание степени док. геол.-мин. наук. Новосибирск. – 2021. – 50 с.

### **Датирование процессов в верхней мантии и нижней коре по ксенолитам в базальтах и кимберлитах: изотопный подход, вопросы методики**

*Б.В. Беляцкий<sup>1</sup>, Л.П. Никитина<sup>2</sup>, М.Ю. Корешкова<sup>3</sup>, Р.Ш. Крымский<sup>1</sup>, Е.С. Богомолов<sup>1</sup>,  
С.А. Сергеев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, ЦИИ, ФГБУ «ВСЕГЕИ» [bbelyatsky@mail.ru](mailto:bbelyatsky@mail.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [lpnik@mail.ru](mailto:lpnik@mail.ru)

<sup>3</sup> Санкт-Петербург, Институт Наук о Земле, СПбГУ, [m.koreshkova@spbu.ru](mailto:m.koreshkova@spbu.ru)

Изотопное датирование мантийных процессов и пород представляет определенную сложность не столько с аналитической точки зрения (реститовые мантийные породы обычно существенно обеднены литофильными элементами), сколько с модельной. Минералы-индикаторы петрогенетических процессов, возникшие в условиях мантийных температур и давлений, при выводе их в приповерхностные зоны часто оказываются неустойчивыми, а их изотопные системы подвергаются изменениям, как за счет термической диффузии элементов в мантии, так и при взаимодействии с расплавами и флюидами при транспортировке ксенолитов к поверхности [1, 2]. Даже циркон, термически устойчивый до 1300°C, и встречающийся, хотя и редко, в мантийных породах, обычно характеризуется нарушенной уран-свинцовой изотопной системой [3, 4]. Использование изохронной модели для оценки возраста ксенолитов по минеральным парагенезисам часто затруднено отсутствием равновесных минеральных ассоциаций для ксенолита в целом, а локальные парагенезисы ограничены по числу минеральных фаз и требуют использования локального изотопного анализа, а также дополнительного минералого-петрологического контроля равновесности этих парагенезисов.

Изохронное датирование пироксенитовых ксенолитов, с использованием изотопных данных по валовым пробам и мономинеральным фракциям гранатов и клинопироксенов иногда позволяет получить трехточечные изохроны [5], но чаще более достоверный возраст пород удается получить только по гранат-пироксеновым парам, т.е. двухточечным изохронам [6]. Но, и для такого подхода к оценке возраста, размеры и состав конкретного образца ксенолита ограничивают возможность проведения высокоточных аналитических измерений. Поэтому наиболее распространенный прием – использование изохронного датирования (Re–Os, Rb–Sr, Sm–Nd, Pb–Pb, Lu–Hf) по совокупности валовых проб (или пироксену, как концентрату литофильных элементов) различных мантийных ксенолитов в предположении, что все они характеризуют один и тот же мантийный процесс [7, 8, 9]. Основная неопределенность таких построений – отсутствие прямого контроля замкнутости и гомогенности изотопной системы совокупности мантийных ксенолитов (начальные параметры и эволюция), которые предполагаются исключительно на основе сходства их петрологических характеристик.

Применимость такого подхода демонстрируется нами на примере изотопного исследования ксенолитов пироксенитов в кайнозойских базальтах СЗ Шпицбергена. Состав и структура ксенолитов отражают проявление в них нескольких этапов метаморфизма. Первичные шпинелевые (Spl) пироксениты являются  $Orx + Crx \pm Spl$  кумулатами – продуктами кристаллизации базальтовых расплавов в условиях нижней коры при давлении 1.2–2 ГПа. Замещение  $Spl \rightarrow Grt$  и образование гранат-содержащих вебстеритов и клинопироксенитов, происходившее уже в условиях малоглубинной верхней мантии (при  $P$  от 1.7–1.8 до 3.0 ГПа, ниже кривой фазового перехода  $Spl \rightarrow Grt$ ), является показателем деламинации коры региона в мантию. Последующий подъем литосферы, проявился в образовании  $Orx-Spl$  келифитовых кайм вокруг  $Grt$ , распаде твердых растворов в пироксенах и декомпрессионном частичном плавлении. Для определения возраста каждого из этапов на основании детального петрологического исследования были подобраны совокупности ксенолитов, отражающие проявление соответствующего процесса, и выбран изотопный метод.

Поскольку процессы метасоматоза, в отличие от плавления, не оказывают значительного влияния на Re–Os изотопную систему вследствие высокой концентрации Os в мантии и низкой концентрации его во флюидах, для определения возраста процесса замещения шпинели гранатом в  $Spl-Orx-Crx$  пироксенитах и преобразования в гранат-содержащие была использована Re–Os изотопная система, а полученная изохронная датировка по гранат-содержащим вебстеритам  $457 \pm 3.5$  млн лет, рассматривается как наиболее адекватная оценка верхней возрастной границы деламинации коры в мантию. Локальным U–Pb методом (SHRIMP-II) по автохтонному, явно магматического генезиса циркону из ксенолитов  $Spl-Grt$  клинопироксенитов, максимально подвергшихся плавлению, был оценен возраст этапа декомпрессионного плавления в  $310 \pm 3$  млн лет. Однако он значительно меньше установленного Rb–Sr методом также для гранат-содержащих клинопироксенитов, несущих признаки интенсивного плавления (до 20%) в  $446 \pm 78$  млн лет. Возможно, значения, полученные разными методами, отражают длительность процесса декомпрессионного плавления – заключительного этапа формирования пироксенитов, который имел прерывистый характер и продолжался в течение длительного времени: от 450 до 300 млн лет назад.

- [1] Sun J., Liu Ch.-Zh., Wu F.-Y. et al. Metasomatic origin of clinopyroxene in Archean mantle xenoliths from Hebi, North China Craton: trace-element and Sr-isotope constraints // Chem. Geol. –2012. –328. –P. 123–136.
- [2] Tilhac R., Oliveira B., Griffin W.L. et al. Reworking of old continental lithosphere: unradiogenic Os and decoupled Hf–Nd isotopes in sub-arc mantle pyroxenites // Lithos. –2020. –354–355. –105346.
- [3] Konzett J., Wirth R., Hauzenberger C., Whitehouse M. Two episodes of fluid migration in the Kaapvaal Craton lithospheric mantle associated with Cretaceous kimberlite activity: evidence from a harzburgite containing a unique assemblage of metasomatic zirconium-phases // Lithos. –2013. –182–183. –P. 165–184.

- [4] Liu J., Carlson R.W., Rudnick R.L. et al. Comparative Sr–Nd–Hf–Os–Pb isotope systematics of xenolithic peridotites from Yangyuan, North China Craton: additional evidence for a Paleoproterozoic age // *Chem. Geol.* –2012. –332–333. –P. 1–14.
- [5] Ackerman L., Bizimis M., Haluzova E. et al. Re–Os and Lu–Hf isotopic constraints on the formation and age of mantle pyroxenites from the Bohemian Massif // *Lithos.* –2016. –256–257. –P. 197–210.
- [6] Shu Q., Brey G.P., Gerdes A. et al. Mantle eclogites and garnet pyroxenites – the meaning of two-point isochrons, Sm–Nd and Lu–Hf closure temperatures and the cooling of the subcratonic mantle // *Earth. Planet. Sci. Lett.* –2014. –389. –P. 143–154.
- [7] Aulbach S., Heaman L.M., Jacob D.E. et al. Ages and sources of mantle eclogites: ID-TIMS and in situ MC-ICPMS Pb–Sr isotope systematics of clinopyroxene // *Chem. Geol.* –2019. –503. –P. 15–28.
- [8] Shchukina E.V., Agashev A.M., Soloshenko N.G. et al. Origin of V.Grib pipe eclogites (Arkhangelsk region, NW Russia): geochemistry, Sm–Nd and Rb–Sr isotopes and relation to regional Precambrian tectonics // *Mineral. Petrol.* –2020. –113. –P. 593–612.
- [9] Wittig N., Barker J.A., Downes H. Dating the mantle roots of young continental crust // *Geology.* –2006. –34. –P. 237–240.

### Новый минеральный U/Pb стандарт «титанит GK-6-90» для локального датирования докембрийских образований

Б.В. Беляцкий<sup>1</sup>, Н.В. Родионов<sup>1</sup>, Е.Н. Лепехина<sup>1</sup>, А.Н. Ларионов<sup>1</sup>, А.В. Антонов<sup>1</sup>, Т.В. Каулина<sup>2</sup>,  
С.А. Сергеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, ЦИИ, ФГБУ «ВСЕГЕИ», [bbelyatsky@mail.ru](mailto:bbelyatsky@mail.ru)

<sup>2</sup> г. Апатиты, Геологический институт КНЦ РАН, [kaulina@geoksc.apatity.ru](mailto:kaulina@geoksc.apatity.ru)

Разнообразие химического и минерального состава геологических объектов предполагает соответствующее разнообразие возрастных индикаторов – геохронометров, которые позволяют определить абсолютный возраст их кристаллизации. На сегодняшний день наиболее широко используемым геохронометром для датирования геологических событий является U–Th–Pb изотопная система циркона. Применение локальных методов изотопного анализа (вторично-ионный зонд, лазер) при датировании циркона позволило существенно расширить границы применения данного метода геохронологии и детализировать геологическую эволюцию, как отдельных магматических тел, так и полифазных комплексов, включая и анализ источников сноса при формировании осадочных пород. Но, далеко не все геологические процессы сопровождаются новообразованием или преобразованием циркона. В частности, многие гидротермально-метасоматические и рудные процессы характеризуются полным отсутствием новообразованного циркона, тогда как унаследованный сохраняет возрастные параметры протолита, что приводит к значительным ошибкам в определении возрастных рубежей рудообразующих процессов. Неоднозначность интерпретации полученных возрастных оценок, а также принципиальная важность этих геологических образований приводит к необходимости использования наряду с цирконом и других потенциальных изотопных минеральных геохронометров.

Титанит (сфен, CaTiSiO<sub>5</sub>), минерал группы островных силикатов, имеет моноклинную сингонию и является распространенным акцессорным минералом изверженных и метаморфических пород разных формаций. Содержание урана и тория в титаните обычно варьирует от первых граммов на тонну до сотен граммов, а Th/U отношение, как правило, >1, при этом эффективная диффузия свинца в кристаллической решетке титанита реализуется при относительно высоких температурах, что обеспечивает закрытие уран-свинцовой изотопной системы при 700–750°C и более [1]. Все эти особенности химизма титанита позволяют успешно использовать его в качестве минерала-геохронометра для U–Th–Pb датирования различных геологических событий [2, 3, 4, 5]. Вместе с тем, необходимо отметить, что как любая методика анализа вещества *in situ*, локальный U–Pb анализ титанита и его качество во многом зависят от гомогенности стандарта, относительно которого производятся все инструментальные

измерения. Предлагаемый в качестве стандарта минерала-геохронометра для локального U-Pb анализа титанит из образца амфиболитизированного габбро-норита GK-6-90 (о. Кривой, Ковдинский архипелаг, Белое море, Балтийский щит [6]) охарактеризован на минералогическом и изотопном уровне: 151 анализ по 137 зернам (SHRIMP-II) позволил оценить возраст этого титанита  $1844 \pm 2.1$  млн лет при содержании урана от 90 до 200 г/т (Рис. 1). Значительная гетерогенность состава по урану и торию не позволяет использовать его как концентрационный стандарт, но конкордантный U-Pb возраст, фазовая гомогенность, отсутствие избыточной доли нерадиогенного свинца и умеренное содержание урана потенциально обеспечивают необходимые условия для использования в качестве геохронологического стандарта при локальном изотопном анализе.

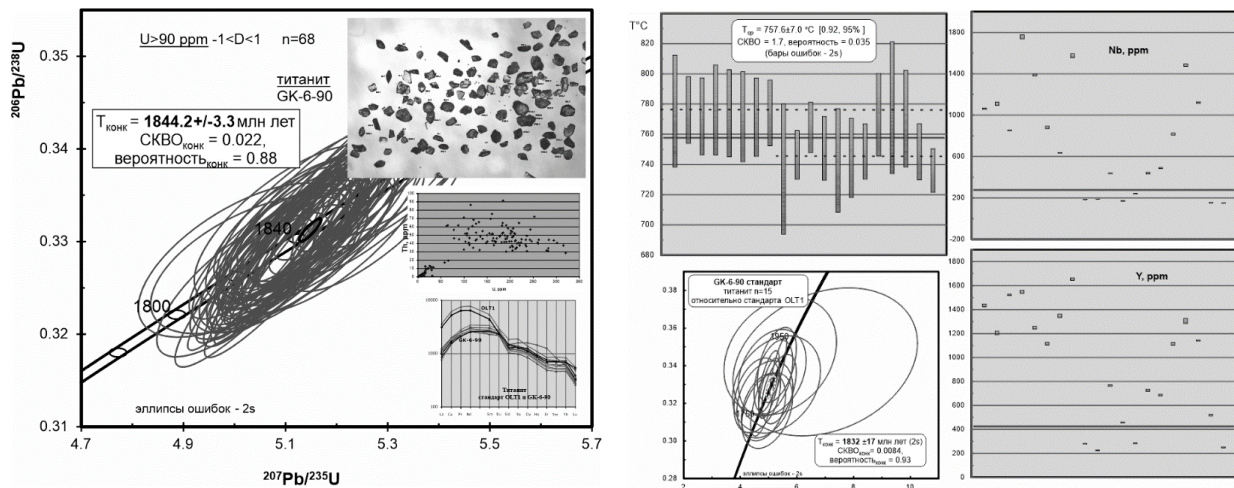


Рис. 1. Локальные геохимические характеристики U-Pb стандарта «титанит GK-6-90» из образца метагабброида. Распределение урана и тория показывает наличие двух типов зерен: с содержанием 90-200 ppm урана (коричневые) и 20-90 ppm (светлые, прозрачные). В качестве стандарта используется коричневая разновидность титанита.

Апробация применения стандарта «титанит GK-6-90» при U-Pb датировании реперных геологических объектов различного состава и генезиса показала, что получаемые оценки возраста совпадают в пределах погрешности аналитических определений (RSD не более  $\pm 2.0\%$ ) с возрастом циркона из тех же объектов. В отдельных случаях, возраст определяемый уран-свинцовой системой титанита отражает время кристаллизации первично магматического расплава с температурой кристаллизации  $800-850^\circ\text{C}$ , тогда как уран-свинцовая система циркона показывает существенное омоложение за счет потерь радиогенного свинца из высокоурановой матрицы.

[1] Cherniak D.J. Diffusion in accessory minerals: zircon, titanite, apatite, monazite and xenotime // Rev. Mineral. Geochem. –2010. –72. –P. 827–869.  
 [2] Amelin Yu.V. Sm-Nd and U-Pb systematics of single titanite grains // Chem. Geol. –2009. –261. –P. 53–61.  
 [3] Kennedy A.K., Kamo S.L., Nasdala L., et al. Grenville skarn titanite: potential reference material for SIMS U-Th-Pb analysis // Can. Mineral. –2010. –48. –P. 1423–1443.  
 [4] Kohn M.J. Corrie S.L. Preserved Zr-temperatures and U-Pb ages in high-grade metamorphic titanite: evidence for a static hot channel in the Himalayan orogen // Earth. Planet. Sci. Lett. – 2011. –311. –P. 136–143.  
 [5] Bonamici C.E., Fanning C.M., Kozdon R. et al. Combined oxygen-isotope and U-Pb zoning studies of titanite: new criteria for age preservation // Chem. Geol. –2015. –398. –P. 70–84.  
 [6] Каулина Т.В., Богданова М.Н. Новые U-Pb данные для процессов магматизма и метаморфизма северо-западного Беломорья // Доклады РАН. –1999. –366. –С. 677–679.

## Радиоогенные и нерадиоогенные изотопы свинца в перидотите

*Е.С. Богомолов<sup>1,2</sup>, Л.К. Левский<sup>1</sup>, А.В. Мезенцева<sup>1</sup>, Н.А. Сергеева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [e.bogomolov@mail.ru](mailto:e.bogomolov@mail.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, [e.bogomolov@mail.ru](mailto:e.bogomolov@mail.ru)

Применение Pb-Pb метода для верхне-мантийных перидотитов орогенного массива Хороман [1] явилось импульсом для расширения исследований с использованием абиссальных перидотитов [2–5]. Результаты исследований убедительно показали существование верхнемантийного резервуара, содержащего нерадиоогенный свинец, который бы мог уравновесить другой резервуар, представленный такими компонентами как континентальная кора, MORB, OIB, содержащие радиоогенный свинец, и тем самым разрешить так называемый “парадокс Pb” [6] и поддержать метеоритную модель Земли.

Применение ступенчатого выщелачивания для изотопного <sup>206</sup>Pb-<sup>207</sup>Pb метода в случае перидотита из Охотского массива (Восточная Сибирь) позволило расшифровать «тонкую структуру» изотопного состава свинца в верхнемантийном перидотите. Оказалось возможным определение свинец-свинцового возраста около 2 млрд лет для силикатных минералов в перидотите. Обнаружена дихотомия начального изотопного состава свинца, содержащегося в сульфидных включениях. Первая, более древняя генерация, унаследована от предыдущего источника, а вторая генетически связана с силикатной фракцией. На графике изотопный состав свинца обеих генераций расположен слева от геохроны и тем самым увеличивает число данных для нерадиоогенных верхнемантийных свинцов.

В настоящей работе предпринято исследование Pb-Pb изотопной системы перидотита 239а из пород Охотского массива (U-Pb возраст цирконов достигает 3.6 млрд лет [7]). Во всех предшествующих работах, включая приведенные выше, изотопные данные получены путем использования образцов породы в целом и реже – минералов. В нашей работе использовалось более детальное изучение Pb-Pb изотопной системы путем ступенчатого выщелачивания. В процессе применения такой методики происходит частичное или полное растворение всех минеральных фракций, включая интерстиции, т. е. таким образом исследуется «тонкая структура» Pb-Pb изотопной системы. Результаты измерения изотопного состава свинца на масс-спектрометре TRITON представлены на рисунке. Относительно большие ошибки измерения в ряде случаев объясняются низким содержанием свинца в выщелочке, поскольку оно изменяется на три порядка величины. Заметной особенностью изотопного графика является наличие двух эрохрон, отвечающих возрасту двух силикатных минералов, в которых исключительно сосредоточены радиоактивные элементы (U, Th). Различный наклон эрохрон определяется разной температурой закрытия Pb-Pb изотопной системы в минералах-геохронометрах. Возраст минерала с высокой температурой закрытия составляет 1.98±0.46 млрд лет. Оценка возраста минерала с низкой температурой закрытия составляет около 1 млрд лет.

Точка пересечения эрохроны (квадрат на рис. 1) отвечает образованию силикатных минералов и началу накопления в них радиоогенных изотопов свинца. Есть и другие детали, связанные с этой точкой. На изотопном графике наблюдается смещение измеренных значений изотопного отношения <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb от высоких совпадающих для L4 и WR последовательно к значениям L1, L2, L3. Есть единственное объяснение этому эффекту. Вместе с силикатными минералами образуется новая генерация сульфидов с низким значением изотопного отношения <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb. Таким образом, пунктирная линия отношений, связывающая две генерации, является линией смещения. Две генерации сульфидов аналогичны (или совпадают) по минералогическому составу, но различны по происхождению. Первая, древняя генерация (А) образовалась и развивалась в резервуаре, предшествовавшем образованию перидотитов > 2 млрд лет назад, вторая (Б) образовалась вместе с силикатами около 2 млрд лет назад.

На изотопном графике данные для свинцов (А) и (Б) лежат слева от геохроны, (линия на рисунке, проходящая через L5). Тем самым они помогают разрешить «парадокс Pb» [6].

Работа выполнена в институте геологии и геохронологии докембрия РАН в рамках темы НИР FMNU-2019-0002.

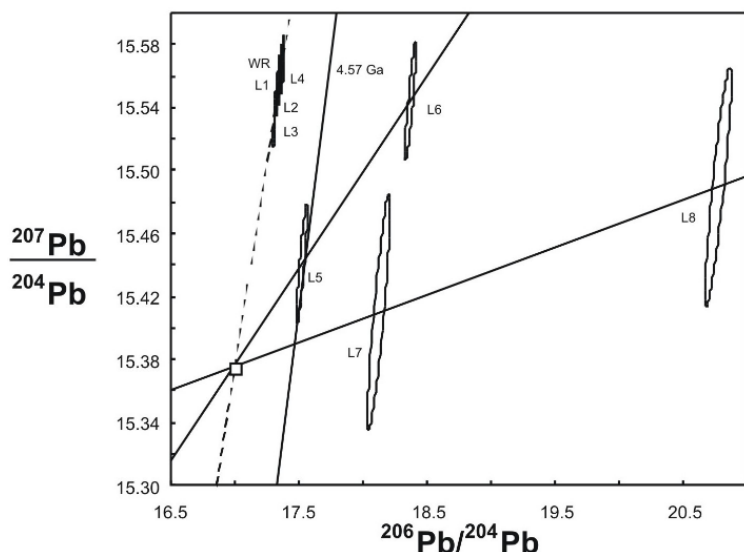


Рис. 1. Rb-Pb диаграмма ступенчатого выщелачивания перидотита 239а (Охотский массив).

- [1] Malaviarachchi S., Makishima A., Tanimoto M. e.a. // Nature geoscience letters. 2008, v. 1, p. 859-863.
- [2] Burton K., Ceuki-Tok B., Mokadem F. e.a. // Nature Geoscience. 2012, v.5, p. 570-573.
- [3] Warren J., Shirey S. // Earth Planet. Sci. Lett. 2012, v. 359-360, p. 279-293.
- [4] Blusztain J., Shimizu N., Warren J., Dick H. // Geology. 2014, v. 42, p. 159-162.
- [5] Mougél A., Aqrainier O., Hemond C. e.a. // Nature communication. 2014.
- [6] Allegre C. // Earth Planet. Sci. Lett. 1969, v. 5, p. 261-269.
- [7] Кузьмин В.К., Глебовицкий В.А., Родионов Н.В. и др. // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2009, том 17 № 4, с. 3-22.

### Rb-Pb возраст архейских пород Охотского массива

*Е.С. Богомолов<sup>1,2</sup>, Л.К. Левский<sup>1</sup>, А.В. Мезенцева<sup>1</sup>, Н.А. Сергеева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [e.bogomolov@mail.ru](mailto:e.bogomolov@mail.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им.

А.П. Карпинского, [e.bogomolov@mail.ru](mailto:e.bogomolov@mail.ru)

В работе предлагается новая методика датирования образцов породы в целом. Для определения возраста исследуемого образца применяется изотопная система <sup>206</sup>Pb-<sup>207</sup>Pb, ступенчатое выщелачивание породы в целом, т. е. породообразующих, акцессорных минералов и интерстиций, масс-спектрометрическое измерение изотопного состава свинца в каждом выщелоке, наконец, построение изохроны по выщелокам. Использование одного образца породы для анализа имеет очевидное преимущество по сравнению с использованием нескольких образцов, которые имеют по определению модальную и химическую вариабельность, что нередко приводит к потере точности и правильности полученных результатов. В настоящем исследовании были использованы образцы различных пород Охотского массива. В результате был получен широкий спектр значений возраста от 3000 млн лет до 1500 млн лет. Для ряда пород были получены не только геохронологические данные, но также начальный изотопный состав свинца.

Определение возраста пород с помощью изотопных методов представляет дилемму – исследование образцов породы в целом или изучение породообразующих и акцессорных минералов, составляющих данную породу. В настоящее время более предпочтительным представляется второе. Более того, для докембрийских пород определен и конкретный минерал, и изотопная система. Выбор в качестве минерала-геохронометра циркона или бадделеита и их U-Pb системы оказался наиболее продуктивным. Однако, следует учитывать то обстоятельство, что циркон является акцессорным минералом, генетическая идентификация

которого в ряде случаев требует дополнительных доказательств. Преимущество циркона перед другими минералами для исследования докембрийских пород обосновано его уникальной термостойкостью, обеспечивающей сохранность хронологической информации даже в условиях высокотемпературных процессов, которые испытывают породы в течение своей геологической истории.

В настоящем исследовании предлагается реализация  $^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}$  изотопной системы для образцов породы в целом с применением методики ступенчатого выщелачивания. Эта методика, учитывая мелкодисперсность изучаемых образцов и невозможность выделения из них мономинеральных фракций, позволяет строить своеобразные аналоги изохрон по породообразующим минералам, поскольку по мере усиления условий выщелачивания происходит растворение от менее- до все более устойчивых минеральных фаз.

Для плагиогнейса 10 все изотопные данные за исключением одного (R8) определяют палеопротерозойскую изохрону, отвечающую возрасту  $1921 \pm 27$  млн лет. Измеренный возраст фракции R8 равен  $2598.7 \pm 4.1$  млн лет. Это значение отвечает средней величине для всех фракций циркона, включая частично или полностью метамиктные и потерявшие частично или полностью радиогенный свинец. Ядра кристаллов циркона имеют возраст 3250 млн лет, определенный локальным методом. Полученные значения измеренных возрастов позволяют предложить следующую термофлюидную историю плагиогнейса. Во время около 2600 млн лет назад имело место перемещение гнейса на другой термофлюидный уровень, в условиях которого произошла потеря радиогенного свинца из метамиктной фазы циркона. Присутствие флюида при этом необходимо. Однако, температура была еще достаточно высокой, и породообразующие силикатные минералы-геохронометры теряли радиогенный свинец. Только при последующем этапе (около 1900 млн лет) они были перемещены на более низкий термический уровень, что обеспечило закрытие U-Pb изотопной системы и накопление радиогенных изотопов свинца. Практически полная идентичность изотопных данных для выщелоков L5 и L6 позволяет рассматривать их как параметры начального свинца для плагиогнейса 10. Измеренный возраст кристаллосланца 238 составляет  $2646 \pm 140$  млн лет. Совпадение изотопных данных для выщелоков L4 и L5 и в этом случае указывает на параметры начального свинца. Для гнейсогранита 223 получены два значения возраста:  $3133 \pm 68$  млн лет и  $2703 \pm 180$  млн лет. Более древний возраст для остатков можно объяснить присутствием в них фракции циркона. Все выщелоки для плагиогранита 214 лежат на изохроне, соответствующей возрасту  $2567 \pm 130$  млн лет. Это последний из образцов неорархейского возраста. Для кристаллосланца 401 данные для всех выщелоков размещаются на одной изохроне, отвечающей возрасту  $2037 \pm 80$  млн лет. Близким к нему по палеопротерозойскому возрасту является сланец 112:  $1873 \pm 74$  млн лет. Можно предположить, что породы образцов 10, 401 и 112 были перемещены из высокотемпературных условий нижней коры, при которых были открыты все изотопные системы и потеряны все накопленные до приблизительно 2000 млн лет радиогенные изотопы.

Работа выполнена в институте геологии и геохронологии докембрия РАН в рамках темы НИР FMNU-2019-0002.

## **Применение метода ступенчатого растворения для уточнения Pb-Pb возраста карбонатных пород камовской серии (Байкитская антеклиза Сибирской платформы)**

*И.М. Васильева, И.М. Горохов, А.Б. Кузнецов, Н.Г. Ризванова*

*Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [vasilieva@yandex.ru](mailto:vasilieva@yandex.ru)*

Камовская серия Байкитской антеклизы представляет собой мощную (200-600м) толщу карбонатных пород в основном доломитового состава, перемежающихся с терригенными (аргиллиты и песчаники) пачками и делится на 12 свит. Камовская серия состоит из (снизу вверх) зелендуконской, вздрэшевской, мадринской, юрубченской, долгоктинской, куюмбинской, копчерской, юктенской, рассолкинской, вингольдинской, токурской и ирэмэкэнской свит. Зелендуконская свита сложена кварцевыми и аркозовыми песчаниками,

конгломератами и алевролитами. Вэдрэшевская и мадринская свиты представлены аргиллитами, алевролитами, обогащенными глинами доломитами и известняками. Юрубченская свита состоит из строматолитовых и пелоидных доломитов с прослоями кварцевых песчаников и песчаных доломитов. Вышележащая долгоктинская свита представлена в основном терригенными породами – аргиллитами и алевролитами со слоями доломитов в кровле и силикокластического песчаника в основании. Куюмбинская свита представляет собой строматолитовые, пизолитовые и пелоидные доломиты с редкими известняками и редкими прослоями алевролитов и аргиллитов; копчерская свита содержит в себе аргиллиты и доломиты. Свиты юктенская, рассолкинская и вингольдинская сложены в основном строматолитовыми, пизолитовыми, пелоидными и оолитовыми доломитами с прослоями кремнисто-обломочных пород. Самые верхние образования камовской серии – токурская и ирэмэкэнская свиты – представлены аргиллитами с прослоями строматолитовых и глинистых доломитов [1].

Pb-Pb возраст камовской серии недавно был определен по валовым пробам доломитов [2]. Для нижних горизонтов серии (мадринская, юрубченская, куюмбинская и вингольдинская свиты) он равен  $1510 \pm 50$  млн лет. Это значение нуждается в подтверждении и уточнении, поскольку, хотя карбонатные породы камовской серии и не были метаморфизованы, однако в предвендское время подвергались интенсивным вторичным преобразованиям [3, 4]. С целью получения наиболее сохранного материала для Pb-Pb датирования, предварительно была проведена большая работа по выявлению наименее измененных карбонатов: петрографический отбор образцов с первичными осадочными микротекстурами без признаков вторичной перекристаллизации; определение концентраций Mn, Fe и изотопного состава углерода и кислорода в отобранных образцах; изучение Rb-Sr систематики [2]. Для изучения U-Pb систематики были выбраны пробы с минимальными отношениями Mn/Sr, Fe/Sr и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , а также с малым количеством силикокластической примеси. Чтобы убедиться в том, что результаты изучения U-Pb систематики доломитов камовской серии, полученные по валовым пробам карбонатных фракций не искажены поверхностными загрязнениями, постдиагенетическими изменениями или примесью некарбонатных фракций, было проведено последовательное ступенчатое растворение измельченных доломитов. Такая процедура, с одной стороны, обеспечивает выбор карбонатных фракций, наименее измененных в терминах U-Pb систематики, и пригодных для получения корректной геохронологической информации [5]. С другой стороны, вариации изотопного состава свинца во фракциях последовательного растворения зачастую оказываются большими, чем в валовых пробах, что способствует повышению точности определения возраста Pb-Pb изохронным методом.

Образец доломита K215-2592 юрубченской свиты растворяли шестью последовательными порциями 0.5N HBr при комнатной температуре. В каждую порцию раствора переходило от 13 до 20% вещества карбонатной составляющей породы. Во всех фракциях определяли содержания U и Pb и изотопный состав последнего.

Содержание Pb во фракциях ступенчатого растворения доломита K215-2592 (обозначенных как L1-L6) варьирует в пределах 0.090 – 0.484 мкг/г, содержание U – 0.075-0.338 мкг/г. Отношение  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  меняется от 39.8 до 101.7. Величина  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в ряду L1-L6 последовательно растёт от: 27.689 до 34.750, величина  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 16.524 до 17.188. Отношение  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  при этом плавно уменьшается от L1 (38.749) до L6 (38.021).

Фигуративные точки карбонатных фракций L1-L6 доломита K215-2592 на диаграмме в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  образуют линейный тренд с наклоном, соответствующим возрасту  $1509 \pm 51$  млн лет (СКВО = 1.1), который в пределах погрешности совпадает с Pb-Pb возрастом нижней толщи камовской свиты, полученным по валовым пробам доломитов. При этом значение СКВО, практически равное единице, даёт основания полагать, что изученный образец доломита не содержит карбонатных фаз, нарушенных в терминах U-Pb систематики. Поэтому все фазы ступенчатого растворения можно использовать для вычисления более точного возраста нижних горизонтов камовской серии.

Вычисленный по 6 точкам ступенчатого растворения образца K215-2592 юрубченской свиты и 7 точкам валовых проб карбонатных пород мадринской, юрубченской, куюмбинской и вингольдинской свит Pb-Pb возраст камовской серии составляет  $1507 \pm 18$  млн лет (СКВО = 1.3).



Таким образом, процедура ступенчатого растворения доломитов позволяет получить для целей Pb-Pb датирования наиболее сохранный материал. Полученный возраст отражает время раннего диагенеза карбонатных осадков нижних горизонтов камовской серии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00137).

- [1] Краевский Б.Г., Якшин М.С., Наговицын К.Е. Региональная стратиграфическая схема рифейских отложений западной части Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2018. – №5. – С. 4-14.
- [2] Горохов И. М., Кузнецов А. Б., Васильева И. М., Крамчанинов А. Ю., Ризванова Н. Г., Константинова Г. В. Pb–Pb-возраст карбонатных пород камовской серии, Байкитская антеклиза Сибирской платформы // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. – № 1. –С. 12–17.
- [3] Хабаров Е.М., Пономарчук В.А., Морозова И.П., Варакина И.В., Сараев С.В. Вариации уровня моря и изотопного состава карбонатного углерода в рифейском бассейне западной окраины Сибирского кратона (Байкитская антеклиза) // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 3. – С. 211–239.
- [4] Vasileva K.Y., Ershova V.B., Khudoley A.K., Khusnitdinov R.R., Kuznetsov A.B., Prokofiev V.Y., Bekker A. Diagenetic history of the proterozoic carbonates and its role in the oil field development in the Baikit Antecline, Southwestern Siberia // Precambrian Res. – 2020. – V. 342. 105690 – DOI:10.1016/j.precamres.2020.105690
- [5] Овчинникова Г.В., Семихатов М.А., Васильева И.М., Горохов И.М., Каурова О.К., Подковыров В.Н., Гороховский Б.М. Pb–Pb возраст известняков среднерифейской малгинской свиты, Учуро-Майский регион Восточной Сибири // Стратиграфия. Геол. корреляция. – 2001. – Т. 9. – № 6. – С. 3–16.

## Первые результаты U-Th-He датирования арсенопирита

*Н.А. Васильева<sup>1</sup>, О.В. Якубович<sup>1,2</sup>, М.М. Подольская<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт наук о Земле, [nadezda.vasv@gmail.com](mailto:nadezda.vasv@gmail.com)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [olya.v.yakubovich@gmail.com](mailto:olya.v.yakubovich@gmail.com)

<sup>3</sup> Москва, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

Альфа-распад урана и тория был одной из первых схем, используемых для датирования горных пород и минералов [3]. Вскоре стало ясно, что сохранность гелия в большинстве минералов достаточно низкая, и, как следствие, датировки давали неоправданно молодые U-Th-He возрасты. Поэтому позже U-Th-He систему стали использовать в области низкотемпературной термохронологии, где по доле потерянного минералом гелия судят о температурно-временной истории пород [1]. Результаты последних исследований показывают, что пирит является U-Th-He геохронометром [4]. Высокое удержание гелия в пирите позволяет предположить, что арсенопирит может быть пригодным минералом для геохронологии.

Арсенопирит является частым спутником золоторудной минерализации и, как и пирит часто содержит включения минералов урана и тория [5]. В типичных гидротермальных, жильных и метасоматически образовавшихся месторождениях арсенопирит выделяется в широком диапазоне температур стадии минералообразования [8]. Также, арсенопирит успешно применяют в качестве геотермометра [2], при возможности датирования которого, можно использовать арсенопирит для реконструкции остывания и эксгумации пород.

*Методика.* Измерение миграционных параметров и концентрации радиогенного гелия проводились в ИГГД РАН на масс-спектрометрическом комплексе МСУ-Г-01-М. Предварительный микроанализ зерен арсенопирита был выполнен на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, оснащенный детектором AzTec Energy 350 (Ресурсный центр «Геомодель», СПбГУ).

Для изучения кинетики выделения <sup>4</sup>He в арсенопирите был произведен ступенчатый отжиг с большим числом температурных ступеней (каждые 40–45°C). Время отжига на каждой

ступени было постоянным и составляло 350 секунд, использовался низкий ток эмиссии – 0.05 мА, ускоряющее напряжение – 2.5 кВ.

Для U-Th-He датирования зерна запаивались в кварцевую ампулу в условиях вакуума ( $10^{-3}$  торр). С помощью специального шлюза ампулу транспортировали в Re-цилиндр и нагревали в несколько этапов до температуры  $\sim 1260^\circ\text{C}$ . При нагреве гелий легко диффундирует через тонкие стенки ампулы, а U и Th остаются внутри. Такой подход позволяет избежать загрязнения образца веществом из экстрактора масс-спектрометра, а также сохранить образец для дальнейшего определения U и Th. После измерения He ампула была удалена из масс-спектрометра для последующего измерения U и Th.

Содержание U и Th измерялось методом изотопного разбавления. Кварцевая ампула с арсенопиритом, после выделения гелия из него, помещалась в тefлоновый бокс. В бокс добавлялась капля смешанного трассера  $^{230}\text{Th}$ - $^{235}\text{U}$ . Растворение проходило в смеси кислот (HF, HClO<sub>4</sub>, царская водка) в закрытых тefлоновых боксах в течение 24 часов при температуре  $130^\circ\text{C}$ . Отношения изотопов  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  и  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  измерялись в ГЕОХИ РАН на ELEMENT XR ICP MS. Параллельно с пробами измерялся U и Th в трех пустых кварцевых ампулах, и два полных бланка химической процедуры.

*Результаты кинетики выделения радиогенного гелия из арсенопирита.* Кинетика выделения гелия была изучена в арсенопирите из разных генетических типов пород из трех месторождений с различным возрастом минерализации: месторождение Олимпиада (n=7), Енисейский кряж, месторождение Наталка (n=1), Яно-Колымская складчатая система, и месторождение Воронцовское (n=1), Северный Урал.

Концентрация гелия в арсенопирите из месторождения Олимпиада составляет  $(2,6\text{--}8,6)\cdot 10^{17}$  ат/г; Наталкинского –  $2,0\cdot 10^{12}$  ат/г; Воронцовского –  $2,8\cdot 10^{16}$  ат/г. В ходе эксперимента существенного количества гелия, выделяющегося из арсенопирита в диапазоне температур ниже  $400^\circ\text{C}$ , не зафиксировано. Основная часть гелия выделяется взрывообразно в диапазоне температур  $\sim 700\text{--}800^\circ\text{C}$ , что соответствует температуре его термического разложения на пирротин при повышенном содержании серы в минерале и мышьяк или на пирит и леллингит [7]. В редких случаях на кривой термодесорбции появляются маленькие пики при более низких и/или высоких температурах.  $^4\text{He}$  начинает мигрировать из кристаллической решетки арсенопирита при его разложении, значит, при устойчивости минерала потерей гелия не происходит.

*Первые результаты U-Th-He датирования арсенопирита.* Для датирования U-Th-He методом был выбран арсенопирит из месторождения Олимпиада (коллекция Сильянова С.А.): из зальбанда кварцевой жилы в углеродизированном кварц-двуслюдном сланце (n=4), и дипирамидальный арсенопирит из углеродистого клиноцоизитового скарноида (n=2). Размер зерен составлял в среднем 500–1000 мкм. Предварительные результаты U-Th-He датирования дают более древний возраст, чем возраст золото-арсенопиритового парагенезиса месторождения Олимпиада [6], что может указывать на аномально высокие концентрации захваченного гелия в изученных зернах арсенопирита.

- [1] Farley K. A. (U-Th)/He Dating: Techniques, Calibrations, and Applications // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2002. – No. 1 (47). – С. 819-844.
- [2] Martins I., Mateus A., Figueiras J., Rodrigues P., Pinto F. Thermal evolution of the W-Sn(-Cu) Panasqueira ore system (Portugal): insights from pyrite-pyrrhotite and arsenopyrite geothermometers. // Comunicações Geológicas. – 2020. – Especial II (107). – С. 69-74.
- [3] Rutherford E. Present problems in radioactivity // Pop.Sci. 1905. No. Monthly May. С. 1-34.
- [4] Yakubovich O. и др. 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. – No. 7 (10). – С. 1-20.
- [5] Баранов Э. Н., Вертепов Г. И. Содержание урана в сульфидах как индикатор уранового оруденения // Атомная энергия. – 1966. – No 2 (20). – С 170-171.
- [6] Сильянов С.А. Геология и минералого-геохимические индикаторы генезиса золоторудного месторождения Олимпиада (Енисейский кряж) / Сильянов С.А., Красноярск. – 2021. – С. 1-23.

- [7] Чухров Ф.В., Бонштедт-Куплетская Э. М. Минералы. Справочник. Том 1. Самородные элементы. Интерметаллические соединения. Карбиды, нитриды, фосфиды. Арсениды, антимониды, висмутиды. Сульфиды. Селениды. / Б.-К. Э. М. Чухров Ф.В. Изд. АН СССР. – Москва. – 1960. – С. 1-312.
- [8] Якубович О. В., Гедз А. М., Викентьев И. В., Котов А. Б., Гороховский Б. М. Миграция радиогенного гелия в кристаллической структуре сульфидов и возможности их изотопного датирования // Петрология. – Т. 27. – 2019. – С. 65-86.

## U-Pb возраст и Sm-Nd изотопная систематика эндербитов и гнейсов северной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита

*В.Р. Ветрин<sup>1,2</sup>, Н.В. Родионов<sup>3</sup>, П.А. Серов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Апатиты, Геологический институт Кольского Научного Центра РАН, [serov@geoksc.apatity.ru](mailto:serov@geoksc.apatity.ru),  
[vetrin@geoksc.apatity.ru](mailto:vetrin@geoksc.apatity.ru)

<sup>2</sup> Москва, Институт минералогии, геохимии, кристаллохимии редких элементов, [vetrin.val@gmail.com](mailto:vetrin.val@gmail.com)

<sup>3</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им.  
А.П. Карпинского, [Nickolay\\_Rodionov@vsegei.ru](mailto:Nickolay_Rodionov@vsegei.ru)

К древнейшим образованиям северной части Балтийского щита большинством исследователей относятся глиноземистые гнейсы кольской серии и породы комплекса олигоклазовых гранитов–гиперстеновых диоритов, возрастные соотношения, состав и генезис которых являются предметом дискуссий. Наряду с точкой зрения о более древнем возрасте глиноземистых гнейсов имеются представления о том, что гранитоидный комплекс является фундаментом для гнейсов кольской серии, или предполагается одновозрастность гнейсов и пород гранитоидного комплекса, неоднократно подвергавшихся совместным деформациям и метаморфизму [1].

Нами изучены возрастные соотношения глиноземистых гнейсов и эндербитов в западной части Кольско-Норвежского террейна, свидетельствующие об отсутствии достоверных геологических признаков их разновозрастности, определен U-Pb возраст эндербитов и выполнена Sm-Nd изотопная систематика эндербитов и гнейсов.

По химическому составу эндербиты соответствуют породам ТТГ-ассоциации и имеют повышенные концентрации Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sr, пониженные содержания K<sub>2</sub>O, Rb и редкоземельных элементов при их существенном фракционировании (La/Yb)<sub>n</sub>=104). Указанные особенности состава свойственны породам ТТГ-состава, слагающих значительную часть фундамента Балтийского щита и представленных эндербитами в зонах метаморфизма гранулитовой фации. Кристаллы циркона из эндербитов по морфологии, внутреннему строению, составу и возрасту, определенному на ионном микроанализаторе SHRIMP-II, разделены на 4 генерации [2]. По циркону генерации II время кристаллизации эффузивных протолитов установлено в 2921±12 млн. лет, и возраст раннего (мезоархейского) гранулитового метаморфизма по циркону генерации III определен в 2851±11 млн. лет. Кристаллы циркона генерации II содержат включения реликтов зерен с T=2990±4 млн. лет (генерация I), определяющих, вероятно, возраст вулканитов более ранней фазы эндербитов, или датированные кристаллы являются захваченными из пород континентальной коры. Кристаллы с возрастом 2778±10 млн. лет (генерация IV) по времени образования соответствуют возрасту синхронных с поздним (неоархейским) гранулитовым метаморфизмом гранодиоритовых массивов региона, и нахождение этих кристаллов в эндербитах происходило, вероятно, при их инъекции гранитоидами жильной фации массивов гранодиоритов. Величина εNd<sub>(2921)</sub> в эндербитах варьирует от -0.42 до 2.77, одностадийный модельный возраст T(DM) составляет 2.99–3.2 млрд. лет. Породы с наименьшими значениями T(DM) содержат максимальное количество вещества деплетированной мантии (86–91%), что свидетельствует о короткой коровой предистории протолитов этих пород и их существенно ювенильном генезисе, тогда как повышенные значения T(DM) и пониженные εNd<sub>(2921)</sub> определяют наличие в них древнего корового компонента. Полученные данные позволяют отнести эндербиты к породам возрастной группы в 3.0–2.9 млрд. лет, образованных синхронно с древними зеленокаменными поясами Водлозерского террейна в южной Карелии [3].

Глиноземистые гнейсы по концентрациям порообразующих компонентов близки главным образом гранитоидам ТТГ-ассоциации, но имеют более высокое содержание тяжелых РЗЭ, Cr, Ni и отвечают составу архейских граувакк и аргиллитов. Нижняя возрастная граница седиментации может быть оценена, вероятно, по минимальному значению Nd-модельного возраста гнейсов в 2.92 млрд. лет, совпадающим с временем магматической кристаллизации эндрбитов. Верхняя граница осадконакопления определяется возрастом мезоархейского метаморфизма (2.86–2.83 млрд. лет [2, 5]. Для циркона из гнейсов и эндрбитов по изотопному отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  определен широкий возрастной интервал – от 2330 до 3695 млн. лет с частичным перекрытием цифр возраста (рис. 1), что наряду с изотопным составом Nd позволяет рассматривать эндрбиты и породы основного состава в качестве главных источников вещества при образовании коровых протолитов гнейсов.

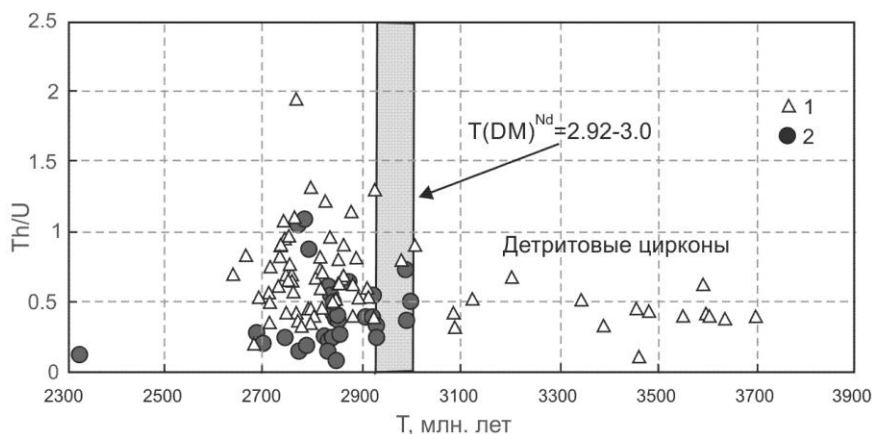


Рис. 1. Сравнение состава и возраста циркона из гнейсов кольской серии (1) [4, 6] и эндрбитов (2) [2].

Исследования выполнены по теме НИР АААА-А19-119100290148-4, FMEZ-2022-0025 ГИ КНЦ РАН при частичной поддержке госконтракта № 13/17-1 (ИМГРЭ).

- [1] Авакян К.Х. Геология и петрология Центрально-Кольской гранулитогнейсовой области архея. М.: Наука – 1992. 168 с.
- [2] Ветрин В.Р., Родионов Н.В., Серов П.А. U-Pb возраст и Sm-Nd изотопный состав эндрбитов, северная часть Балтийского (Фенноскандинавского) щита // Записки Российского минералогического общества. – 2021. ч. CL. № 6. с. 1–17.
- [3] Chekulaev V.P., Lobach-Zhuchenko S.V., Levskii L.K. Archean granites in Karelia as indicators of the composition and age of the local continental crust // Geochemistry International. – 1997. Т. 35. № 8. p. 704–715.
- [4] Мыскова Т.А., Милькевич Р.И. Глиноземистые гнейсы кольской серии Балтийского щита (геохимия, первичная природа и возраст протолита) // Труды Карельского НЦ РАН – 2016. № 10. с. 34–62.
- [5] Balashov Y.A., Mitrofanov F.P., Balagansky V.V. New geochronological data on Archean rocks of the Kola Peninsula. Correlation of Precambrian formations of the Kola-Karelian region and Finland. Apatity – 1992. p. 13-34.
- [6] Bayanova T., Kunakuzin E., Serov P. et al. The oldest grey gneisses and tonalite-trondhjemite granodiorites in the Fennoscandian Shield: ID-TIMS and SHRIMP data // Open J. Geol. – 2010. Vol. 10. p. 124–136.

## Региональные данные высоко- и низкотемпературной геохронологии магматических комплексов Таннуольского террейна Тувы

*Е.В. Ветров*

Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН, [vetrov@igm.nsc.ru](mailto:vetrov@igm.nsc.ru)

Таннуольский террейн Тувы расположен в северной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). Террейн сложен породами палеозойских комплексов, которые

являются источником информации о развитии и закрытии Палео-Азиатского океана, в процессе чего первоначальная океаническая кора преобразовалась в зрелую континентальную с дальнейшей эволюцией последней [1,2]. Кроме того, палеозойские магматические породы сохранили сведения о мезозойском и кайнозойском этапах тектонической эволюции Таннуольского террейна. Новые данные высокотемпературной геохронологии (U-Pb датирование циркона и бадделеита) и низкотемпературной термохронологии – Ar-Ar датирования полевых шпатов и трекового анализа апатита (AFT) позволили датировать основные магматические и постмагматические события в геологической истории развития Таннуольского террейна Тувы. Основные результаты этих исследований приведены ниже.

1. Уточнен возраст вулканитов, слагающих основную часть Таннуольского террейна. U-Pb датирование цирконов (SHRIMP-II) позволило выявить конкордантный кембрийский возраст  $508,2 \pm 4,7$  млн лет, что соответствует низам среднего кембрия.

2. Геохронологические, изотопно-геохимические и геохимические исследования гранитоидов Таннуольского террейна позволили выделить три этапа полихронного и полиформационного гранитоидного магматизма в раннем палеозое. Наиболее древние гранитоиды имеют ниже-среднекембрийский ( $508,2 \pm 5,6$  и  $511,0 \pm 3,0$  млн лет) возраст. Их геохимический состав типичен для гранитов I-типа, формирование которых может быть результатом плавления коровых метамагматических источников или дифференциации более мафических расплавов (более характерно для субдукционных обстановок). Другой тип гранитоидов датируется ранним ордовиком ( $481,7 \pm 3,9$  –  $475,0 \pm 3,0$  млн лет) и характеризуется геохимическим составом, типичным для гранитов S-типа, формирование которых может быть результатом плавления высокоглиноземистого источника (метаосадочного или метабазитового) в коллизионной (синтектонической) обстановке. Третий тип гранитоидов имеет средне-позднеордовикский возраст ( $461,9 \pm 2,6$  –  $450,0 \pm 3,0$  млн лет) и характеризуется составом, типичным для гранитов A2-типа, формирование которых связано с плавлением нижнекоровых тоналитовых или диоритовых источников в пост-коллизионных условиях.

3. Впервые среди каледонских структур Таннуольского террейна выделена вулканогенная толща, маркирующая средне-позднеордовикский (460-450 млн лет) этап вулканизма, связанный с одновозрастным гранитоидным магматизмом.

4. Следующий этап тектоно-магматической активности известен в Тувинском прогибе, граничащем с Таннуольским террейном в его северо-западной части, где изучены раннедевонские магматические образования и среднедевонские-раннекарбоновые базитовые интрузии. Результаты геохронологических исследований (U-Pb датирования циркона и бадделеита) позволили уточнить возраст раннедевонского (397 млн лет) и среднедевонского-раннекарбонового (390-350 млн лет) этапов магматизма. Для этих этапов магматизма в пределах Тувинского прогиба предполагается одна и та же тектоническая обстановка растяжения литосферы, связанная с поднятием глубинной астеносферы в результате действия мантийного плюма. В тоже время в пределах северо-восточной части Таннуольского террейна выявлены редкометалльные рибекитовые граниты, возраст которых определен по U-Pb датированию циркона (SHRIMP II) –  $383,8 \pm 2,4$  млн лет.

5. Ar-Ag датирование полевых шпатов из девонских базитовых интрузий позволило подтвердить этапы тектоно-магматической активизации в девон-карбоновое время и выявить возможное пермское событие. Полученные Ar-Ag датировки можно разделить на три группы. Для первой группы диапазон возрастов от 399 до 407 млн лет соответствует закрытию изотопной Ar-Ag системы калиевых полевых шпатов и плагиоклаза и, возможно, отражает постмагматическое охлаждение базитовых интрузий, что хорошо соответствует геологическим данным. В это время внедрялись рои основных штоков, силлов и даек, фиксируя вертикальное и горизонтальное растяжение кристаллического фундамента с большой амплитудой и активный подъем базитовых расплавов на поверхность. Вторая группа имеет позднедевонский – раннекарбоновый Ar-Ag возраст (340 и 365 млн лет). Эти Ar-Ag возрасты либо показывают возраст кристаллизации калиевого полевого шпата, либо возраст охлаждения, после внедрения во вмещающие породы. Третья группа проб показала раннепермский возраст ~280 млн лет. Полученный раннепермский возраст соответствует закрытию изотопной Ar-Ag системы калиевых полевых шпатов и плагиоклаза и, возможно, отражает постмагматическое

охлаждение базитовых интрузий. Не исключено проявление пермского базитового магматизма в пределах Таннуольского террейна, тем более что была получена близкая датировка  $287,5 \pm 2,1$  по U-Pb датированию циркона [3].

6. В среднепалеозойских долеритовых дайках установлены ксеногенные цирконы с среднекембрийским (505 млн лет) и раннепротерозойским (1750-1927 млн лет) возрастами. Среднекембрийские цирконы, вероятнее всего, были унаследованы от источника расплава и указывают на генетическую связь среднепалеозойских базитовых магм и кембрийских островодужных образований Таннуольского террейна с возрастом 508 млн лет. Раннепротерозойские цирконы могут свидетельствовать о наличии древнего континентального фундамента под Таннуольским островодужным террейном.

7. Трековое датирование апатитов из ранне- и среднепалеозойских гранитоидов Таннуольского террейна с моделированием термальных историй позволило выявить этапы постмагматической активизации консолидированного палеозойского фундамента в мезозое и кайнозое. В результате получен довольно широкий диапазон возрастов от  $83,4 \pm 4,7$  млн лет (поздний мел) до  $35,5 \pm 2,2$  млн лет (поздний эоцен), при вариации значений средней трековой длины от 11,4 до 12,3 мкм. Моделирование термальной истории фундамента Таннуольского террейна, основанное на данных трековой термохронологии апатита, позволило выявить три этапа тектонической активизации различной природы и интенсивности, разделенные этапами тектонического покоя, за последние ~185 млн лет: юрско-меловой (~185-135 млн лет), мел-палеогеновый (~90-35 млн лет) и неоген-четвертичный (~15-0 млн лет).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-17-00099 (датирование циркона вулканогенных толщ), гранта Президента Российской Федерации МК-3510.2022.1.5 (трековое датирование апатита) и государственного задания ИГМ СО РАН.

- [1] Монгуш А.А., Лебедев В.И., Ковач В.П. и др. Тектономагматическая эволюция структурно-вещественных комплексов Таннуольской зоны Тувы в позднем венде – раннем кембрии // Геология и геофизика. – 2011. – № 5. – С. 649-665.
- [2] Бабин Г. А., Шокальский С. П. Основные черты геологического строения Алтае-Саянской складчатой области (тектоническое районирование, стратиграфия, магматизм, история геологического развития) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2017. – № 6с. – С. 19–37.
- [3] Vetrov E.V., De Grave J., Vetrova N.I., Zhimulev F.I., Nachtergaele S., Van Ranst G., Mikhailova P.I. Tectonic history of the South Tannuol Fault Zone (Tuva Region of the Northern Central Asian Orogenic Belt, Russia): Constraints from multi-method geochronology // Minerals. – 2020. – 10, 56; doi:10.3390/min10010056

## **Корреляция раннекембрийских карбонатных отложений в южном складчатом обрамлении Сибирской платформы: данные Sr- и С-хемостратиграфии**

*Н.И. Ветрова, Е.Ф. Летникова, Е.В. Ветров*

*Новосибирск, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, [pisareva@igm.nsc.ru](mailto:pisareva@igm.nsc.ru)*

В складчатом обрамлении Сибирской платформы широко проявлены карбонатные комплексы позднерифейско-раннепалеозойского возраста. Формирование мощных карбонатных толщ шло в условиях шельфов пассивных окраин Сибирского континента наиболее интенсивно на границе протерозоя и палеозоя. Кембрийские последовательности имеют существенно меньшее распространение и как правило не являются индикаторными при палеогеодинамических реконструкциях. Оценка их возраста сделана на основе немногочисленных палеонтологических данных, оценках степени метаморфизма осадочных последовательностей, общей геологической ситуации и часто не имеет инструментального подтверждения. Метод стронциевой изотопной хемостратиграфии широко используется при оценке возраста формирования докембрийских карбонатных толщ, возраст которых имеет палеонтологического обоснования. В тоже время

кембрийские карбонатные отложения при таких исследованиях часто упускаются из виду. Дефицит данных хемотратиграфии кембрийских карбонатных последовательностей препятствует полноценной корреляции с разрезами Сибири, Азии и мира. Таким образом, при глобальных и региональных корреляциях и геодинамических реконструкциях практически выпадают осадочные бассейны, накопление карбонатных пород в которых началось в кембрии. В своей работе мы преследуем цель – оценить инструментальными методами временной интервал накопления только раннекембрийских карбонатов и установить геодинамическую природу бассейнов их седиментации.

В данной работе мы приводим результаты исследования разрезов карбонатных пород в складчатом обрамлении южной части Сибирской платформы – Северо-Муйской глыбе, Кузнецком Алатау, Салаире и Юго-Западной Туве. Изученные области представляют собой северные сегменты Центрально-Азиатского складчатого пояса и отражают кембрийский этап эволюции Палеоазиатского океана. При восстановлении первичного изотопного состава Sr и C в осадочных карбонатных породах, применяется комплексный подход, направленный на выявление образцов с наименее нарушенными Rb-Sr и C-O изотопными системами. Этот подход включает в себя полевой отбор визуально неизменных образцов, дальнейшее петрографическое изучение, набор геохимических критериев и ковариационных диаграмм [1]. Для исследования изотопного состава Sr пригодные для целей хемотратиграфии образцы проходили стандартную процедуру селективного растворения [1]. Измерение содержаний Rb и Sr выполнялось на базе ЦКП МИИ СО РАН (ИГМ СО РАН, Новосибирск) на многоколлекторном масс-спектрометре MI1201AT, в двухленточном режиме. Изотопный состав Sr измерялся на масс-спектрометре TritonPlus Thermo Fisher (Екатеринбург, ИГГ УрО РАН). Изотопный стандарт SRM987  $0,71025 \pm 1$ . Анализ  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  и  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  проводился на приборе Finnigan MAT-253 с линией пробоподготовки Gas Bench II (ИГМ СО РАН).

В результате, для янгудской свиты Северо-Муйской глыбы, представленной доломитами  $\text{Mg}/\text{Ca} > 0.5$  с редкими прослоями известковистых доломитов  $0.3 < \text{Mg}/\text{Ca} < 0.5$ , получены содержания Fe от 40 до 4260 мкг/г, Mn от 10 до 1180 мкг/г, Sr от 50 до 210 мкг/г, значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  от  $-0.4$  до  $+1.9\%$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от 0.70814 до 0.70879. Интервал карбонатонакопления янгудской свиты составляет 525-520 млн [2]. Известняки сорнинской свиты Кузнецкого Алатау характеризуются  $\text{Mg}/\text{Ca} < 0.01$ , высокими содержаниями Sr от 2530 до 3390 мкг/г, низкими содержаниями Fe и Mn, узким диапазоном значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  от  $+0.5$  до  $+3.7\%$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от 0.70848 до 0.70852, с установленным Pb-Pb возрастом по карбонатам  $523 \pm 5$  млн лет [3]. Таким образом установлено, что эти карбонатные толщи сорнинской свиты накапливались в интервале 525-517 млн лет [4]. Кинтерепская свита Салаира представлена чистыми известняками ( $\text{Mg}/\text{Ca} < 0.007$ ) с содержанием Mn от 30 до 280 мкг/г, Fe от 630 до 18000 мкг/г, значениями  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  от  $-0.7$  до  $+0.9\%$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  между 0.70851 и 0.70859. Полученная U-Pb датировка из прослоя синосадочных туффитов составляет  $516.0 \pm 0.9$  млн лет и позволяет ограничить интервал карбонатонакопления до 525-510 млн лет. Известняки ( $\text{Mg}/\text{Ca} < 0.009$ ) терегитской свиты юго-западной части Тувы, кембрийский (520-530 млн лет) возраст которых ограничен по U-Pb датированию детритовых цирконов из кварцевых гравелитов, показали низкие содержания Fe от 1190 до 2570 мкг/г и Mn от 157 до 925 мкг/г, первичное отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от 0.70769 до 0.70825 и изотопный состав  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  от  $-1.1$  до  $+2.9\%$ .

Таким образом, изученные последовательности складчатого обрамления южной части Сибирской платформы показали схожие значения изотопного состава стронция ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от 0.70769 до 0.70879) и углерода ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  от  $-1.1$  до  $+3.7\%$ ) типичные для раннекембрийских отложений Сибири, Азии и мира. Карбонатные отложения Северо-Муйской глыбы и юго-запада Тувы накапливались в обстановках континентальных окраин, а Кузнецкого Улутау и Салаира в обстановках островных дуг различной природы. Это позволяет нам предположить, что в раннем кембрии в пределах восточных и западных тектонических блока складчатого обрамления Сибирской платформы осадочные бассейны, где протекало карбонатонакопление имели различную геодинамическую природу, обусловленную общими тенденциями тектонической эволюции Палеоазиатского океана.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ №21-77-00022 (хемотратиграфия карбонатных отложений Салаира) и государственного задания ИГМ СО РАН.

- [1] Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М., Мельников Н.Н., Константинова Г.В., Кутявин Э.П. Изотопный состав Sr в карбонатных породах Каратавской серии Южного Урала и стандартная кривая вариаций отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в позднеархейском океане // Стратиграфия. Геол. корреляция. – 2003. – Т. 11. – №5. – С. 3-39.
- [2] Вишневская И.А., Летникова Е.Ф., Каныгина Н.А., Прошенкин А.И., Солошенко Н.Г., Ветров Е.В, Киселева В.Ю. Изотопная хемотратиграфия и U-Pb датирование детритовых цирконов венд-кембрийских отложений Северо-Муйской глыбы // Геология и геофизика. – 2018. – Т.59. – № 11. – С. 1795—1814.
- [3] Овчинникова Г. В., Кузнецов А. Б., Горохов И. М., Летникова Е. Ф., Каурова О. К., Гороховский Б. М. U-Pb возраст и Sr хемотратиграфия известняков сорнинской свиты, хребет Азыр-Тал Кузнецкого Алатау // ДАН. – 2011. – Т. 437. – № 2. – С. 220–223.
- [4] Летникова Е.Ф., Кузнецов А.Б., Вишневская И.А., Терлеев А.А., Константинова Г.В. Геохимические и изотопные (Sr, С, О) характеристики венд-кембрийских карбонатных отложений хр. Азыр-Тал (Кузнецкий Алатау): хемотратиграфия и обстановки седиментогенеза // Геология и геофизика. – 2011. – Т.52. – № 10. – С. 1466-1487.

### **$^{190}\text{Pt}$ – $^4\text{He}$ -возраст самородных минералов платины Баимского россыпного золотоносного узла, Западная Чукотка**

*Е.А. Власов<sup>1</sup>, Е.С. Иванова<sup>2,3</sup>, А.Г. Мочалов<sup>3</sup>, О.В. Якубович<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, [user420@geol.msu.ru](mailto:user420@geol.msu.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, [ekate.s.ivanova@gmail.com](mailto:ekate.s.ivanova@gmail.com),  
[olya.v.yakubovich@gmail.com](mailto:olya.v.yakubovich@gmail.com)

<sup>3</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [mag1950@mail.ru](mailto:mag1950@mail.ru)

Во второй половине XX века в золотоносных россыпях Западной Чукотки были обнаружены минералы платиновой группы (МПГ). Первые исследования МПГ были проведены в СВКНИИ ДВО АН СССР и ВНИИ-1 МЦМ СССР [2]. Баимский (Весеннинский) россыпной узел расположен в Билибинском р-не на западе Чукотского АО. Наиболее крупные россыпи (ныне уже отработанные) связаны с р. Баимка и ее притоками. В геологическом строении района принимают участие вулканогенно-терригенные отложения кемериджского и волжского ярусов верхней юры и айнакуртинской свиты нижнего мела. Среди пород волжского яруса доминируют туфы и туфолавы среднего состава, конгломераты и песчаники. К ранним интрузивным образованиям относятся гипербазиты Алучинского комплекса; по данным [1] возраст пород комплекса укладывается в диапазон 226–306 млн.лет. Верхнеюрские отложения прорваны интрузивными и субвулканическими телами нескольких магматических комплексов: баимского J<sub>3b</sub> (габбрового на юге района и клинопироксенит-габбрового на севере), весеннинского K<sub>1vs</sub> (гранодиоритового), егдыкычского K<sub>1e</sub> (габбро-монцит-сиенитового) и омчакского K<sub>1o</sub> (гранодиоритового). Со второй фазой егдыкычского комплекса связаны практически все известные Cu±Mo±Au-порфировые рудные объекты района, включая крупное месторождение Песчанка. По данным U-Pb датирования циркона, возраст пород егдыкычского комплекса составляет 139–143 млн лет [6 и др.], порфировая Cu-Au±Mo минерализация имеет возраст 144.1±1.5 млн лет [4]. Медно-порфировые и эпитептермальные Au-Ag объекты, связанные с егдыкычским комплексом являются источником золота россыпей.

В ряде россыпей Баимского узла были установлены МПГ [2, 5 и др.]. В работе изучена коллекция зерен «шлиховой платины» (118 зерен) из россыпей р. Баимка, руч. 1-ый Весенний и Омчак. Главными МПГ «шлиховой платины» являются минералы группы самородной платины (МГСП) – изоферроплатина и самородная платина. В них, как включения, установлены самородные иридий и осмий, лаурит, кашинит-боуит, купрородсит-купроиридсит, куперит, брэггит, миассит, ирарсит-холлингвортит, сперрилит, полкановит(?). По типу включений силикатов, оксидов и др. зерна МПГ могут быть разделены на два типа. 1-тип – с «первичными» округлой формы включениями, сложенными силикатным стеклом (иногда с боуитом), Са-клинопироксеном и Ti-магнетитом. 2-тип – с «вторичными» включениями неправильной формы, имеющими сложный минеральный состав; главные минералы – кварц,



каолинит(?), редкие – мусковит(?), хлорит(?), кислый плагиоклаз, КПШ, Са амфибол(?), барит(?), Мп-кальцит, гематит, фазы состава Ti-O, Ca-S-O, Pb-Al-P-O. Диагностика стекла и кварца включений подтверждена данными КР-спектроскопии.

Возраст МГСП определен методом  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  изотопного датирования [3]. Для этого было выбрано 10 зерен, с предварительно изученным РСМА химическим составом (ГЕОХИ РАН), без видимых включений МПГ и силикатов, а также по два зерна с включениями силикатов 1-типа и 2-типа. Измерение концентрации радиогенного гелия выполнено с использованием магнитно-секторного масс-спектрометрического комплекса МСУ-Г-01-М (ИГГД РАН). Для проведения анализа образцы с добавлением чистой меди (99.95% Cu) в соотношении 1:3 были завернуты в танталовую фольгу. Крупные зерна были предварительно разделены механическим путем на фрагменты, пригодные по массе для датирования (0.3 – 3 мг). Подготовленные пробы загружались в кювету из тугоплавкого материала, и с помощью специального устройства перемещались в рениевый цилиндр, где осуществляется постепенный нагрев образцов в условиях высокого вакуума ( $2 \times 10^{-7}$  торр) до 1400°C. При этой температуре происходит эвтектическое плавление платины с медью, что способствует полному выделению радиогенного гелия из проб. Гелий, выделяющийся при температуре менее 1000°C, не учитывается в расчете  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  возраста. В случае высоких содержаний (более 10%) подобного низкотемпературного гелия, измерения не учитываются при получении возрастных значений.

В результате проведенных исследований МГСП установлено существование двух групп зерен, имеющих различный возраст:  $148 \pm 6$  и  $188 \pm 6$  млн. лет. Причем зерна МГСП 1-типа оказались более молодыми, а зерна 2-типа – более древними. Присутствие разновозрастной МГСП позволяет предполагать существование двух коренных источников. Источником более «молодых» МГСП могут являться тела Баимского J<sub>3b</sub> комплекса; севернее района исследования известна интрузия г. Провальной, имеющая зональное строение и сложенная приблизительно в равном количестве клинопироксенитами и габбро. Коренной источник более «древних» МГСП не ясен. Появление большей части «шлиховой платины» в россыпях золота связано с разрушением конгломератов волжского яруса, которые являются промежуточными коллекторами [2, 5 и др.]. Крайне необычный минеральный состав силикатных включений в зернах МГСП 2-типа вероятно связан с процессами литофикации конгломератов волжского яруса. Не исключено, что на минеральный состав и, возможно, возраст части зерен МГСП повлияли процессы метасоматоза и регионального низкоградного метаморфизма, минералогические признаки которого распространены в районе исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-27-00342.

- [1] Ганелин А.В. Офиолитовые комплексы Западной Чукотки (строение, возраст, состав, геодинамические обстановки формирования) // Труды Геологического института. – 2017. – Вып. 613. – 178 с.
- [2] Мочалов А.Г. «Шлиховая платина» россыпей Дальнего Востока России: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ. 2001. – 296 с.
- [3] Шуколюков Ю.А., Якубович О.В., Мочалов А.Г., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Корнеев С.И., Гороховский Б.М. Новый изотопный геохронометр для прямого датирования самородных минералов платины ( $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  метод) // Петрология. 2012. Т. 20. № 6. С. 545–559.
- [4] Chitalin A.F, Baksheev I.A., Nikolaev Y.N., Djedjeva G.T., Khabibullina Y.N., Müller D. Porphyry Cu-Au±Mo mineralization 1 hosted by potassic igneous rocks: implications from the giant Peschanka porphyry deposit, Baimka Trend (North East Siberia, Russia) // Geological Society Special Publication. – 2021. – P. 513
- [5] Gornostayev S.S., Dodatko A.D., Laajoki K.V.O., Mochalov A.G. Origin of platinum-bearing placers in the Aluchin horst, Russian Far East // Economic Geology. – 2000. – Vol. 95. – P. 549–558.
- [6] Moll-Stalcup E.J., Lane L.S., Cecile M.P. Gorodinsky M.E. Geochemistry and U-Pb geochronology of arc-related magmatic rocks, Northeastern Russia // Abstr. Geol. Soc. Am. 91st Ann. Cordilleran Section. – 1995. – V. 27. – N 5. – P. 65.

## Изотопно-геохимический состав и геодинамическая природа людиковия Раахе-Ладожской зоны Фенноскандинавского щита

*А.Б. Вревский*

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [avrevsky@mail.ru](mailto:avrevsky@mail.ru)*

В северном Приладожье в юго-восточной части Раахе-Ладожской зоны сочленения эпиархейского Фенно-Карельского кратона и раннепротерозойской Свекофеннской провинции для определения возраста пород сортавальской серии и характера ее соотношения с гранитоидами куполов, возраста источников области сноса и оценки времени проявления метаморфических процессов было проведено изучение изотопного состава Nd, геохимическое и изотопно-геохронологическое исследование акцессорных цирконов из гранито-гнейсов Кирьявалахтинского выступа, базальных граувакк нижней толщи и трахитов средней толщи сортавальской серии, а также, секущих вулканогенно-осадочные толщи сортавальской серии, даек плагио- и диорит-порфиоров.

На основании полученных новых изотопно-геохимических данных для гранитоидов Кирьявалахтинского выступа установлен их неоархейский возраст  $2695 \pm 13$  млн. лет и ювенильная природа ( $\epsilon_{NdT} = +1.5$ ). Гранитоиды испытали тектоно-метаморфические преобразования (реоморфизм) раннепротерозойского (сумийского) времени (2.45-2.50 млрд. лет), запечатленные в U-Th-Pb изотопной системе оболочек древних ядер кристаллов циркона.

Заложение вулканогенно-осадочного комплекса сортавальской серии происходило на гетерогенной и полихронной (3.1 -2.46 млрд. лет) континентальной коре Фенно-Карельского эпиархейского кратона. Исследование U-Th-Pb возраста детритовых цирконов из вулканомиктовых граувакк питкьярантской свиты позволили принять с учетом ошибок определения возраста кластогенных цирконов минимальные конкордантные значения в интервале 1940- 1990 млн лет в качестве верхнего возрастного ограничения терригенных пород, что согласуется с оценкой максимального возраста пород сортавальской серии в целом по U-Th-Pb (SIMS) возрасту  $1922 \pm 11$  млн. лет диоритов «Терваоя».

Предложена тектоническая модель, согласно которой ко времени начала свекофеннской коллизии континент-островная дуга, субдукции и формирования бимодальных вулканоплутонических комплексов юных островных дуг Пюхисалми и кислых вулканитов сланцевого пояса Саво (1920-1890 млн. лет), в перикратонной части Фенно-Карельского эпиархейского кратона уже произошло накопление вулканогенно-осадочного комплекса сортавальской серии, его метаморфизм, эрозия и несогласное перекрытие турбидитами ладожской серии.

## Изотопная U-Pb и Pb-Pb систематика локальных микропроб минералов при изучении геохронологии уранового рудообразования

*В.Н. Голубев, И.В. Чернышев*

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва*

Изотопно-геохронологическое изучение урановых месторождений по настурану и ураниниту – основным рудным минералам – благодаря возможности их прямого U-Pb датирования позволяет оценить интервалы времени, разделяющие отложение разных генераций этих минералов. Однако в подавляющем большинстве случаев при датировании урановых руд приходится сталкиваться с проблемой их тонкой неоднородности, которая обусловлена либо наличием включений неурановых минералов в урановой матрице, либо многофазностью собственно урановой матрицы (рис. 1).

Неоднородность урановых минералов отражает сложность их геохимической истории. Это обстоятельство стимулировало разработку в ИГЕМ РАН методики U-Pb датирования локальных проб урановых минералов. Постоянное совершенствование методики [1-5] позволило существенно минимизировать среднюю массу исследуемых проб минералов фанерозойского возраста с первых миллиграмм до 2–5 мкг, а в случае докембрийских образований – до 0.3–0.5 мкг. Такие локальные

пробы в десятки-сотни раз меньше по своей массе единичных зерен циркона, иногда анализируемых в U-Pb «цирконометрии». Эта методика предполагает: предварительное детальное изучение образцов, целенаправленный поиск участков с определёнными минералогическими характеристиками и выделение соответствующих проб, что является обязательной предпосылкой выполнения условий для корректной интерпретации изотопных данных, в частности для изохронных построений. В комплексе с остролокальной отборкой микропроб, проводимой твердосплавными и алмазными иглами, собственно U-Pb датирование осуществляется с помощью высокоточного и высокочувствительного варианта U-Pb (ID TIMS) метода. Используются традиционные технологии низкофоновой химической подготовки микропроб и TIMS-изотопный анализ Pb и U на масс-спектрометре Micromass Sector 54.

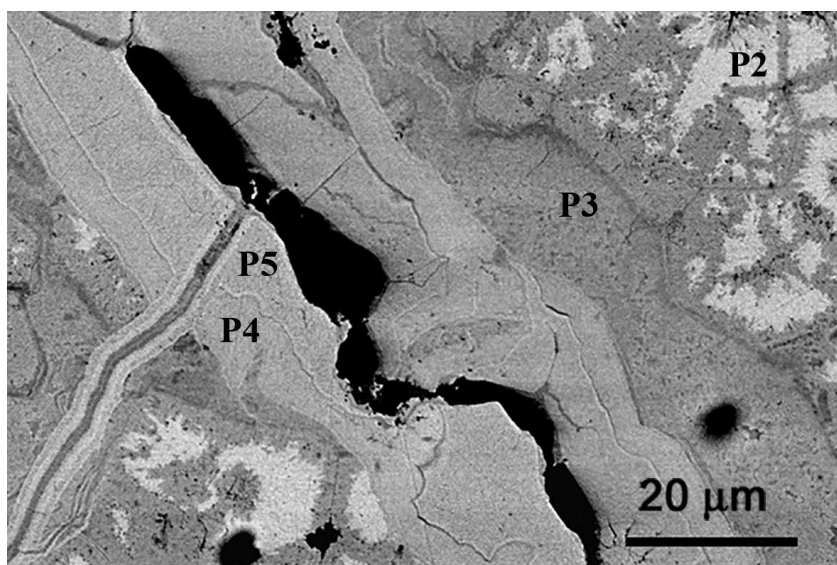


Рис. 1. Характер соотношения настурана разных генераций в рудной зоне месторождения Ши Крик (бассейн Атабаска, Канада). P2 – настуран 2, P3 – настуран 3, P4 – настуран 4, P5 – настуран 5. BSE изображение.

В докладе рассмотрены случаи датирования урановой минерализации по образцам, в которых неоднородность обусловлена многофазностью урановой матрицы и включениями неурановых минералов в урановой матрице. В качестве примера, демонстрирующего возможность получения геохронологических данных по рудам с тонкой неоднородностью собственно урановой матрицы, могут служить результаты проведенного нами изучения настурана с месторождения Ши Крик (Канада). Во всех просмотренных под микроскопом шлифах из рудных зон месторождения отмечается настуран нескольких генераций (см. рис. 1). U-Pb возраст настурана P2 и замещающего его настурана P3 был определен в результате изотопного изучения серии микропроб с различным соотношением этих фаз. По данным определения состава фаз с помощью электронного микрозонда отношение Pb/U в настуране P2 примерно в 3 раза больше, чем в настуране P3. Отбор проб проводили с таким расчетом, чтобы обеспечить широкий спектр соотношения фаз P2 и P3. Это позволило равномерно «растянуть» экспериментальные точки на дискордии и определить U-Pb возраст двух генераций настурана: P2 –  $447 \pm 7$ , а P3 –  $127 \pm 2$  млн лет соответственно.

В ряде случаев разброс изотопных дат связан с присутствием в исследуемых образцах мелких включений сульфидов, селенидов, теллуридов и некоторых других свинецсодержащих минералов, обогащённых радиогенными изотопами  $^{206}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}$ . На урановом месторождении Восток (Северный Казахстан) сульфиды (Мо-сульфид и галенит) находятся непосредственно в настурановой матрице (рис. 2), поэтому избежать их присутствия невозможно даже при локальном отборе проб.

Результаты изотопного U-Pb изучения проб настурана с различной примесью сульфидов [6] показали прямую зависимость их содержания в пробе от величины изотопного возраста. Из этого следует, что сульфиды содержат обогащенный радиогенными изотопами  $^{206}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}$  свинец. Для исключения искажения изотопного возраста настурановой фазы за счет присутствия сульфидов в пробе проводилась изохронная обработка изотопных данных в координатах  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . Это один из способов коррекции возраста на примесный свинец. Для сведения к минимуму эффекта возможного различия в

изотопном составе этого свинца в пробах их отборка проводилась из образца, характеризующего лишь небольшой участок настуранового прожилка (примерно  $1\text{см}^2$  в площади аншлифа). Образцы были отобраны из различных прожилков на разных горизонтах месторождения. Было получено три серии проб.

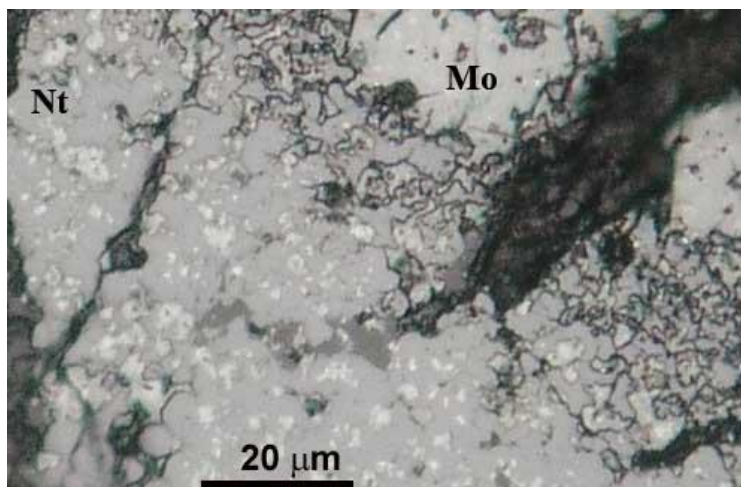


Рис. 2. Типичное строение настуранового прожилка на месторождении Восток (Северный Казахстан). Настуран (Nt) образует тесные сростания с Мо-сульфидом (Mo). Микрофото.

Разброс значений изотопного возраста, рассчитываемый по изохронам, не выходит за пределы суммы погрешностей значений  $T(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$  и  $T(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})$ . Хорошее согласие результатов по двум разным U-Pb системам – аргумент в пользу того, что полученные датировки отражают время проявления реального геологического события. Среднее значение возраста, рассчитанное с использованием данных по всем изохронам для этих образцов, составляет  $267\pm 7$  млн лет. С этим событием связаны: формирование пострудных кварц-карбонатных жил, экстракция радиогенного свинца из первичных руд (скоплений) урана и его переотложение в сульфидах, в результате которого первичные урановые руды месторождения утратили свои U-Pb геохронометрические «метки». Информация о возрасте первичных руд сохранилась в виде «замороженных» отношений  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в пострудном галените. Данные изучения изотопного состава свинца этого галенита показывают, что образование первичных руд урана проходило  $413\pm 7$  млн лет назад.

- [1] Чернышев И.В. Уран-свинцовая геохронология процессов формирования и преобразования гидротермальных урановых месторождений // Гидротермальные месторождения урана. М.: Недра. 1978. – С. 376-398.
- [2] Чернышев И.В., Голубев В.Н., Троицкий В.А., Агапова А.А., Цветкова М.В., Щербинина Н.К. Изохронные построения и локализация отбора проб // Масс-спектрометрия и изотопная геология. М.: Наука. 1983. – С. 90-108.
- [3] Чернышев И.В., Голубев В.Н. Изотопная геохронология процессов формирования месторождения Стрельцовское, Восточное Забайкалье – крупнейшего уранового месторождения России // Геохимия. – 1996. – № 10. – С. 924-937.
- [4] Голубев В.Н., Кюне М., Поти Б. Фазовый состав и U-Pb изотопные системы настурана кварц-кальцит-настурановых жил месторождения Шлема-Альберода. // Геология руд. месторождений. – 2000. – 42. – №6. – С. 513-525.
- [5] Голубев В.Н., Макарьев Л.Б., Былинская Л.В. Отложение и ремобилизация урана в Северо-Байкальском регионе по данным анализа U-Pb и Pb-Pb изотопных систем урановых руд // Геология руд. месторождений. – 2008. – 50. – №6. – С. 548-557.
- [6] Голубев В.Н., Чернышев И.В. Возраст гидротермальных образований месторождения Восток, (Северо-Казахстанская урановорудная провинция) по данным U-Pb (ID-TIMS), Pb-Pb,  $\text{Xe}_n\text{-Xe}_s$ , K-Ar и Rb-Sr изотопно-геохронологических методов // Геология руд. месторождений. – 2022. – 64. – №1. – С. 93-112.

## Метод ступенчатого растворения в хеостратиграфии и геохронологии: Sr-Pb изотопная систематика в доломитах билляхской серии Анабарского поднятия

*И.М. Горохов<sup>1</sup>, А.Б. Кузнецов<sup>1</sup>, И.М. Васильева<sup>1</sup>, Г.В. Константинова<sup>1</sup>, Е.О. Дубинина<sup>2</sup>,  
Г.В. Липенков<sup>3</sup>, Н.Г. Ризванова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН [igorokhov@inbox.ru](mailto:igorokhov@inbox.ru)

<sup>2</sup> Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

<sup>3</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им.

А.П. Карпинского

Представлены новые, совершенствующие региональную схему стратиграфической корреляции оценки возраста и результаты хеостратиграфического изучения доломитов билляхской серии (котуйканской и юсмастахской свит), которая слагает верхнюю часть рифейского разреза Анабарского поднятия Северной Сибири. Информация об условиях и времени образования доломитов получена при помощи усовершенствованных методик изучения их Rb–Sr и U–Pb систематики, включавших ступенчатое растворение [1].

В методику Rb–Sr изучения входило химическое удаление около трети измельченного образца (фракция L1) путём предварительного кислотного выщелачивания в 0.2N CH<sub>3</sub>COOH и последующее частичное растворение оставшейся части образца (фракция L2) в CH<sub>3</sub>COOH той же концентрации. Фракция L1, полученная на первой ступени растворения, вероятно, представляет поверхностные слои карбонатных зерен, в той или иной мере подвергшиеся эпигенетическим изменениям, тогда как состав фракции L2 второй ступени растворения в значительной степени характеризует первичный карбонатный материал, свойственный среде формирования доломитов.

Эпигенетические геохимические процессы приводили к привнесу Rb во внешние слои зерен билляхских доломитов и изменению в них отношения <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr. Помимо этого, в ходе эпигенеза в карбонатный материал доломитов добавлялось некоторое количество радиогенного <sup>87</sup>Sr. Вычисленные для фракций L2 значения первичных отношений <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr во всех образцах доломитов билляхской серии меньше по абсолютной величине и показывают заметно меньший разброс, чем соответствующие значения для фракций L1. Этот факт является несомненным доказательством различия геохимической истории карбонатного материала, растворяющегося на разных ступенях кислотной обработки образцов.

Pb–Pb изотопная систематика доломитов изучалась путем шестиступенчатого растворения измельченных образцов в 0.5N HBr. В полученных таким образом фракциях L3–L6, характеризующихся относительно высокими значениями <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb и низкими <sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb, изотопный состав Pb, вероятно, отвечает наименее измененному карбонатному материалу и использован для построения изохрон и вычисления Pb–Pb возраста. На графике в координатах <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb – <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb для этих фракций, представляющих котуйканскую и юсмастахскую свиты, получен Pb–Pb возраст 1519±18 млн лет при СКВО=1.8. В то же время для измененного карбонатного материала, слагающего поверхностные слои карбонатных зерен и представленного фракциями L1–L2 ступенчатого растворения, значение Pb–Pb возраста составляет 1466±54 млн лет при СКВО=0.6. Таким образом, выполненная работа подтвердила целесообразность и перспективность применения описанных методик для изучения Rb–Sr и Pb–Pb систематики доломитов.

Реконструкция C-изотопных характеристик среды седиментации с использованием геохимических критериев пригодности доломитов (Mn/Sr < 6 и δ<sup>18</sup>O ≥ –10‰) для хеостратиграфических построений определяет значение δ<sup>13</sup>C в доломитах котуйканской свиты на уровне –0.7‰, а интервал вариаций в доломитах юсмастахской свиты от –0.4 до +0.8‰ (в нижней подсвите от –0.1 до +0.4‰, в верхней – от –0.4 до +0.8‰). Таким образом, весь диапазон колебаний δ<sup>13</sup>C в карбонатных породах билляхской серии ограничен значениями от –0.7 до +0.8‰.

Полученные при помощи методики ступенчатого растворения первичные отношения <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в наименее измененном карбонатном материале доломитов билляхской серии составляют: в котуйканской свите – 0.70502 ± 0.00029, в нижней подсвите юсмастахской –

$0.70519 \pm 0.00026$  и в верхней подсвите юсмастахской свиты  $-0.70511 \pm 0.00018$ . Сопоставление интервалов вариаций первичных отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (соответственно  $0.70460-0.70499$ ,  $0.70450-0.70525$  и  $0.70462-0.70523$ ) и значений  $\delta^{13}\text{C}$  в доломитах котуйканской свиты и нижней и верхнеюсмастахской подсвит не позволяет различить эти подразделения на основе хеостратиграфических характеристик и указывает на недостаточную обоснованность предполагавшегося ранее различия их возраста.

Приведенные данные также определяют соответствие полученных в настоящей работе хеостратиграфических характеристик (значений  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-0.7$  до  $+0.8\%$  и отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в интервале  $0.70450-0.70525$ ) для доломитов билляхской серии этим величинам (соответственно от  $-1.8$  до  $+2.5\%$  и  $0.70460-0.70494$ ) в близких по возрасту карбонатных осадках, отложенных 1550–1470 млн лет назад.

Pb–Pb анализ фракций ступенчатого растворения для доломитов котуйканской и юсмастахской свит билляхской серии дает прямую изотопно-геохронологическую характеристику осадочных пород рифейского чехла Анабарского поднятия. Pb–Pb возраст  $1519 \pm 18$  млн лет, установленный по образцам двух свит, в сочетании с опубликованным ранее Rb–Sr возрастом глауконита нижележащей усть-ильинской свиты ( $1483 \pm 10$  млн лет) значительно сокращает стратиграфический объем осадочной последовательности, объединяемой под названием “билляхская серия”, и подтверждает ее принадлежность к нижнему рифею.

Из полученных данных следует, что заложение раннерифейского палеобассейна на Анабарском поднятии произошло в ходе инициализации внутриплитного растяжения Сибирского кратона в начале мезопротерозоя около 1.52 млрд лет назад. Заполнение этого палеобассейна, объединяющего отложения терригенной мукунской и карбонатной билляхской серий, завершилось до внедрения габбро-долеритовых даек и силлов котуйканского комплекса и становления Куонамской магматической провинции [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-17-00247-П).

- [1] Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Константинова Г.В., Дубинина Е.О., Липенков Г.В., Ризванова Н.Г. Изотопные составы Sr и Pb в доломитах билляхской серии Анабарского поднятия: метод ступенчатого растворения в хеостратиграфии и геохронологии // Стратиграфия. Геол. корреляция. – 2022. – 30 (4).
- [2] Эрнст Р.Е., Округин А.В., Веселовский Р.В., Камо С.Л., Гамильтон М.А., Павлов В.Э., Седерлунд У., Чемберлейн К.Р., Роджерс К. Куонамская крупная изверженная провинция (север Сибири, 1501 млн. лет): U–Pb геохронология, геохимия и корреляция с синхронным магматизмом других кратонов // Геология и геофизика. – 2016. – 57 (5). С. 833-855.

## **Неопротерозойский гидротермальный циркон в метасоматизированных гарцбургитах эклогитовой ассоциации Салма, Беломорская эклогитовая провинция**

*К.А. Докукина<sup>1</sup>, О.И. Окина<sup>1</sup>, В.С. Шешуков<sup>1</sup>, Т.Б. Баянова<sup>2</sup>, П.А. Серов<sup>2</sup>, В.И. Пожиленко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Геологический институт РАН, г. Москва, e-mail: [dokukina@mail.ru](mailto:dokukina@mail.ru)

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

Тела мезо-неоархейских эклогитов Беломорской эклогитовой провинции пространственно и структурно приурочены к активной окраине Кольского палеоконтинента и размещены в мигматизированных ТТГ гнейсах. Протолит эклогитов Салмы представлял собой расслоенный комплекс переслаивающихся габбро, Fe–Ti габбро и габброноритов и был сформирован 2.9 млрд лет назад в процессе эволюции медленно-спредингового хребта [1].

В процессе геологического картирования Енского сегмента Беломорской эклогитовой провинции среди гнейсов ТТГ состава было выявлено широкое распространение (около 80 участков) в разной степени регрессивно измененных реликтов архейских субдукционных эклогитов ассоциации Салмы; а также несколько десятков тел метаморфизованных ультрабазитов, залегающих среди протяженных пластовых тел амфиболитов, сформированным

по эклогитам. Гипербазиты и эклогиты часто присутствуют в одних и тех же обнажениях и, судя по всему, генетически связаны. Был изучен циркон из ультраосновных пород входящих в состав разреза эклогитизированных пород на участке Узкая Салма и представлены хлоритизированными и карбонтизированными (доломит и кальцит) гарцбургитами.

Гарцбургиты имеют в своем составе оливин, ортопироксен, хромистая шпинель, доломит, серпентин с магнетитом, хлорит. В линейных областях проработки флюидом по породе развивается дендровидный агрегат клинопироксена и кальцит. Гарцбургиты характеризуются высокой магнезиальностью ( $\#Mg$  0.84-0.89), высокими содержаниями  $MgO$  (до 34 вес. %),  $Cr$  (до 2300 ppm),  $Ni$  (до 2000 ppm), низкими содержаниями кремнезема ( $SiO_2$  35-46 вес. %),  $CaO$  (до 4 вес. %),  $TiO_2$  (до 0.2 вес. %). В составе гарцбургитов присутствуют большие содержания  $H_2O+$  (до 7 вес. %) и  $CO_2$  (до 10 вес. %). По содержанию малых и рассеянных элементов гарцбургиты характеризуются деплетированными составами с низкими содержаниями РЗЭ и обогащением в  $Rb$ ,  $Ba$ ,  $Sr$ , низкими содержаниями  $Zr$  и  $Hf$ , наличием положительной  $Sr$  аномалии, отрицательной  $Eu$  аномалией.

Из метагарцбургитов (проба s204y3-11) были выделены цирконы двух типов. Циркон первого типа представлен мелкими (20-150 мкм) округлыми бесцветными зернами однородными серыми или зональными в катодолюминесценции (CL): серые зональные ядра окружены светло-серыми оторочками. Цирконы содержат включения апатита, хлорита, доломита, корунда, ортопироксена. Ядра цирконов очень мелкие, поэтому методом LA-ICPMS удалось получить только одно раннепалеопротерозойское значение  $^{207}Pb/^{206}Pb$  возраста 2460 млн лет. Датирование единичного циркона методом ID-TIMS дало близкое конкордантное палеопротерозойское значение возраста  $2320 \pm 3$  млн лет. Остальные измерения методом LA-ICPMS циркона данного типа дали возрасты  $\sim 1.8$ -1.9 млрд лет.

Коричневато-розовые угловатые обломки или зерна циркона второго типа, размером до 150-200 мкм в CL демонстрируют необычные структуры пламенеvidного типа и содержит включения корунда (или диаспора), апатита, альбита, калиевого полевого шпата, биотита и кварца. Цирконы были датированы методом LA-ICPMS и дали субконкордантные значения неопалеопротерозойского возраста  $\sim 900$  млн лет. Циркон характеризуется широкими вариациями по содержанию  $Th$  (57-1000 ppm),  $U$  (179-727 ppm), величины  $Th/U$  отношения (0.16-1.45) с преобладанием высоких значений  $>1$ . Циркон содержит большое количество РЗЭ (340-995) с высоким содержанием легких ( $Lu_N/La_N = 19$ -1117,  $Lu_N/Sm_N = 5$ -52), редкоземельные спектры имеют отрицательную европиевую и слабовыраженную, вплоть до полного исчезновения цериевую аномалии ( $Ce/Ce^* = 0.9$ -8.2). В цирконе присутствуют заметные содержания несовместимых элементов, петрогенных  $Fe$ ,  $Ca$  и литофильных  $Ba$ ,  $Rb$ ,  $Sr$ . Точки составов циркона на дискриминационной диаграммах (Hoskin, 2005) тяготеют или лежат в поле цирконов гидротермального типа.

Неопротерозойского циркон имеет неоднородный состав, с обогащением в легких редкоземельных элементах и значительным колебанием по содержанию, меняющимися характеристиками цериевой и европиевой аномалий и величине  $Th/U$  отношения, значительной примесью несовместимых элементов ( $Fe$ ,  $Ca$ ,  $Ba$ ,  $Rb$ ,  $Sr$  и др.), свидетельствует о росте такого циркона при участии флюида. Точки составов циркона на дискриминационной диаграммах [2] тяготеют или лежат в поле цирконов гидротермального типа. Минимальные значения температуры, рассчитанные по содержанию  $Ti$  в цирконе по методу [3]  $\sim 800^\circ C$  и выше позволяют предполагать локальное высокотемпературное воздействие на породы горячих гидротермальных растворов в неопротерозойское время  $\sim 900$  млн лет назад.

Полученные Sm-Nd данные об омоложенном возрасте гарцбургитов – около 780 млн лет – могут свидетельствовать о перестройке изотопной самарий-неодимовой системы на уровне минералов в условиях изотопно-открытой системы под воздействием гидротермальных процессов, природа которых требует дальнейшего исследования.

[1] Mints, M.V., Dokukina, K.A. & Konilov, A.N., 2014. The Meso-Neoproterozoic Belomorian eclogite province: tectonic position and geodynamic evolution // Gondwana Research. – 25. – P. 561–584.

- [2] Hoskin, P.W.O., 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 69. – P. 637–648.
- [3] Ferry, J.M., & Watson, E.B., 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* – 154. – P. 429-437.

## Первый опыт U-Pb изотопного датирования титанита методом LA-ICP-MS в Геологическом институте РАН

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

<sup>1</sup> Геологический институт РАН, г. Москва, e-mail: [dokukina@mail.ru](mailto:dokukina@mail.ru)

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

В Геологическом институте РАН методом LA-ICP-MS было проведено U-Pb датирование коллекции титанитов, извлеченных из пород разного состава. Пробы титанита были отобраны в пяти локациях, представленных на рис. 1.

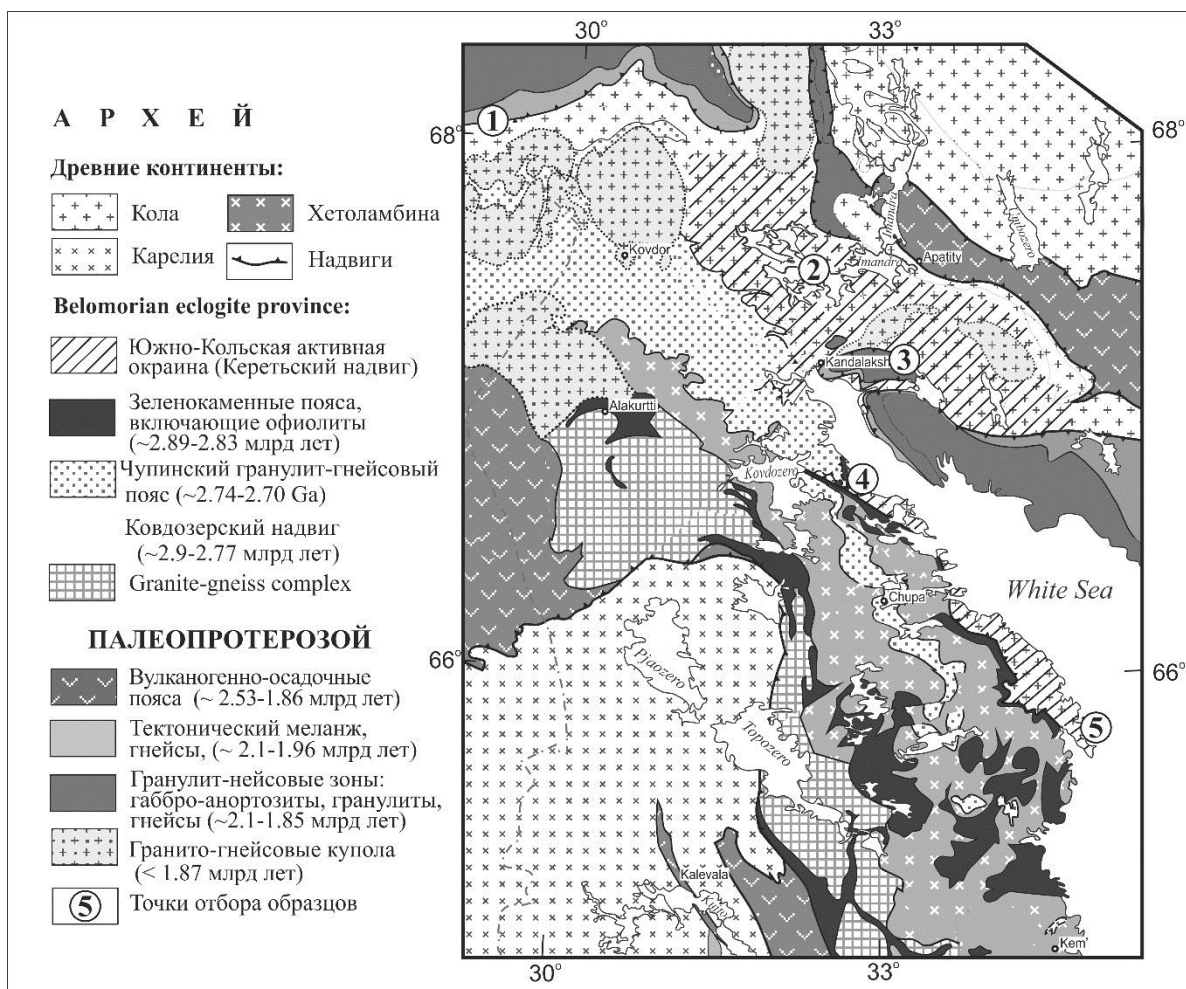


Рис. 1. Упрощенная тектоническая схема северо-западного Беломорья. Цифрами обозначены локация, где были отобраны пробы титанита: 1 – Корватундра, 2 – Узкая Салма, 3 – оз. Малое Глубокое, 4 – мыс Толстик и остров Кривой, 5 – остров Столбиха.

LA-ICP-MS изотопный анализ проводился с использованием метода калибровки с внешним стандартом, который основан на предположении о совместимости матриц неизвестных и стандартных образцов, вследствие чего для одинаковых условий процессы лазерной абляции в них происходят идентичным образом. В качестве калибровочного первичного стандарта



использовался титанит MKED ( $1521.02 \pm 0.55$  млн лет) [1]. Для проверки качества анализа использовались контрольные стандарты титанита Khan ( $522.2 \pm 2.2$  млн лет) [2] и OLT ( $1014.8 \pm 2.0$  млн лет) [3], измеряемые как неизвестные образцы в рамках текущей аналитической серии.

1. Корватундра, амфиболит, проба В-3687. Возраст титанита по нижнему пересечению с конкордией составляет  $1863 \pm 73$ , MSWD = 3.1, N = 16, что неплохо соответствует результатам U-Pb датирования титанита из этой же пробы, ранее полученным Е.А. Ниткиной с коллегами (личное сообщение) –  $1863 \pm 44$  Ма.

2. Узкая Салма, железо-титанистый эцлогит, проба S204-2b. Возраст титанита по нижнему пересечению конкордии составил  $1864 \pm 75$ , MSWB = 4, N = 12. Эта проба оказалась достаточно проблематичной: много анализов пришлось отбросить – они выходят выше линии конкордии, остальные (использованные при расчетах) анализы равномерно распределяются по линии дискордии от конкордантных палеопротерозойских значений (~1.9 млрд лет) до конкордантных значений в районе 4.8 млрд лет, что является бессмысленным результатом и, по-видимому, требует корректировки изотопных данных на обыкновенный свинец.

3. Озеро Малое Глубокое, гранат-клинопироксеновый гранулит основного состава, проба GL3-4. По нижнему пересечению конкордии возраст титанита составил  $1995 \pm 19$  млн лет, MSWD = 1.7, N = 13.

4.1. Мыс Толстик, микроклиновый порфировидный гранит, проба 742-40. По верхнему пересечению с конкордией возраст титанита составил  $2069 \pm 99$  млн лет, MSWD = 8.4, N = 13. U-Pb возраст титанита по литературным данным [4] составляет  $1940 \pm 15$  млн лет.

4.2. Мыс Толстик, микроклиновые жилки в тоналитовых гнейсах, проба 953К. По пересечениям с конкордией были получены значения возраста  $1630 \pm 110$  &  $2745 \pm 120$  млн лет, MSWD = 8.3, N = 23.

4.3. Остров Кривой, габбронорит, проба ГК-6-90. По верхнему пересечению с конкордией возраст титанита составил  $1927.7 \pm 8.1$  Ма, MSWD = 0.63, N = 15, что 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 ГК-14-90. По нижнему пересечению с конкордией возраст титанита составил  $1925 \pm 39$  млн лет, MSWB = 2, N = 11.

5. Остров Столбиха, амфиболитизированный эцлогит, проба D21-2. По нижнему пересечению с конкордией возраст титанита составил  $1880 \pm 30$  млн лет, MSWB = 0.89, N = 10.

Несмотря на в целом неплохие результаты измерения возраста аттестованных стандартов титанита, при обработке результатов датирования неизвестных образцов возникают проблемы, такие как отклонение от возраста, полученного в других лабораториях, или даже бессмысленные значения (например конкордантные значения возраста в районе 4.8 млрд лет, как в пробе из железо-титанистого эцлогита S204-2b). Таким образом методика U-Pb изотопного датирования неизвестных образцов требует дальнейшей разработки, прежде всего для учета влияния на результат обыкновенного свинца необходимо вводить поправочный коэффициент при обработке аналитических данных.

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Кудряшов Н.М. U-Pb геохронология друзитового массива Жемчужный // Беломорский подвижный пояс: геология, геодинамика, геохронология. – Петрозаводск, 1997. – 39 с.

## Позднепалеозойско-раннемезозойские коллизионные гранитоиды Восточного Забайкалья: геохронология и источники вещества по изотопным данным

С.И. Дриль<sup>1</sup>, В.П. Ковач<sup>2</sup>, А.М. Ларин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутск, ИГХ СО РАН, [sdril@igc.irk.ru](mailto:sdril@igc.irk.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [v.p.kovach@gmail.com](mailto:v.p.kovach@gmail.com)

В настоящее время разработаны многочисленные геодинамические модели развития Монголо-Охотского орогенного пояса (МОП), предполагающие существование палеозойского Монголо-Охотского палеоокеана, в пределах которого в разное время существовали зоны спрединга, островные дуги и активные континентальные окраины [1]. Субдукционные процессы, а также процессы аккреции и коллизии сопровождалось формированием различных по своей геохимической специфике серий гранитоидов. В палеозойское-раннемезозойское время были сформированы два протяженных пояса крупных массивов и батолитов известково-щелочных гранитоидов, обрамляющих с юга и севера сутурную зону МОП в районе Восточного Забайкалья. Южный пояс представлен гранитоидами ундинского комплекса, обрамляющими северную окраину Аргунского супертеррейна. С севера сутура окаймлена гранитоидами олекминского комплекса, локализованными в пределах Западно-Станового террейна.

В составе ундинского комплекса исследованы породы Усть-Теленгуйского массива и Верхнеундинского батолита, расположенных в пределах аккреционного клина Ононского террейна в восточном междуречье рек Шилка и Онон. Массивы олекминского комплекса исследованы по широтному профилю вдоль южной окраины Западно-Станового террейна в районах южных отрогов Нерчинского хребта (гг. Вершино-Дарасунский – Шилка) и Алеурского хребта в междуречье рек Куэнга – Шилка. Для получения информации о возрасте гранитоидов выполнены «скрининговые» Rb-Sr по породе в целом и U-Th-Pb LA-ICP-MS по циркону геохронологические исследования.

Установлено, что гранитоиды Усть-Теленгуйский массива имеют возраст  $257 \pm 3$  млн лет (Rb-Sr, TIMS), а Верхнеундинского батолита –  $249 \pm 4$  млн лет (U-Th-Pb LA-ICP-MS, здесь и далее средневзвешенное значение возраста по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ; СКВО = 0.75).

Для гранодиоритов и диоритов олекминского комплекса получены новые U-Th-Pb LA-ICP-MS геохронологические данные. Результаты датирования порфиридных гранодиоритов Маректинско-Береинского и Ямнинского массивов третьей интрузивной фазы этого комплекса уверенно указывают на их позднекарбонный возраст:  $371 \pm 5$  млн лет (СКВО = 1.3) и  $363 \pm 5$  млн лет (СКВО = 0.55) соответственно. Полученные значения возраста полностью соответствуют геохронологическим данным, полученным ранее –  $358 \pm 2$  и  $355 \pm 2$  млн лет [2, 3]. Широкий ареал распространения пород этого возрастного диапазона свидетельствует о масштабном эпизоде позднепалеозойского гранитоидного магматизма по всей площади Западно-Станового террейна. Диориты и кварцевые диориты, относимые ранее ко второй фазе комплекса и проявленные локально в пределах Нижнеингодинского батолита и Холонгатуйского массива, имеют раннеюрский возраст  $192 \pm 3$  млн лет (СКВО = 1.5), что исключает их отнесение ко второй интрузивной фазе комплекса. Эти образования синхронны с лейкократовыми гранитоидами, относимыми ранее к завершающей четвертой интрузивной фазе комплекса, и имеющими раннемезозойский возраст в интервале 237-186 млн лет [3, 4]. Вероятно, эти гранитоиды формировались на завершающем этапе закрытия Монголо-Охотского палеоокеана вдоль северного фланга сутурной зоны.

Гранитоиды Верхнеундинского батолита ундинского комплекса характеризуются величинами  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  от  $-2.2$  до  $-5.5$  и значениями  $t_{\text{Nd(DM-2)}} = 1.2-1.5$  млрд лет, что указывает на гетерогенность источника расплавов гранитоидов. Для гранитоидов Усть-Теленгуйского массива характерны более выдержанные изотопные характеристики:  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  от  $-2.1$  до  $-2.6$  и  $t_{\text{Nd(DM-2)}} = 1.2-1.3$  млрд лет. Аналогичными Nd изотопными характеристиками обладают метаосадочные породы аккреционного клина Ононского террейна МОП, что позволяет

рассматривать их как возможный источник расплавов гранитоидов в процессах аккреции/коллизии островная дуга – континент в позднепермское – раннетриасовое время.

По Nd изотопным характеристикам гранитоиды олекминского комплекса разделяются на две контрастные группы. Гранитоиды Алеурского хребта характеризуются величинами  $\epsilon_{Nd}(t)$  от  $-6.6$  до  $-7.5$  и  $t_{Nd(DM-2)} = 1.5-1.6$  млрд лет, что свидетельствуют о присутствии в источнике этих пород материала несколько более древнего по сравнению с гранитоидами ундинского комплекса. Это может быть связано с ассимиляцией расплавами олекминских гранитоидов изотопно более «древнего» вещества вмещающих метаосадочных пород иргаинской свиты. В южных отрогах Нерчинского хребта (Маректинско-Береинский и Яминский массивы) породы комплекса имеют существенно более «молодые» изотопные характеристики  $\epsilon_{Nd}(t)$  от  $+0.4$  до  $-0.2$  и  $t_{Nd(DM-2)} = 1.1-1.2$  млрд лет, что свидетельствует о значительной изотопной гетерогенности источника расплавов для олекминских гранитоидов.

Таким образом, позднепалеозойские гранитоиды ундинского и олекминского комплексов, обрамляющие сутуру МОП с юга и севера, формировались в позднем палеозое – раннем мезозое в обстановке аккреции/коллизии островная дуга – континент. Изменчивость их Nd изотопных характеристик может быть в значительной мере связана с неоднородностью состава корового субстрата, вовлекавшегося в процесс генерации кислых расплавов.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 22-27-00775).

- [1] Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртоого О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. – 2003. – № 6. – С. 7–41.
- [2] Ларин А.М., Котов А.Б., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Ярмолук В.В., Великославинский С.Д., Яковлева С.З., Плоткина Ю.В. Гранитоиды олекминского комплекса селенгино-станового супертеррейна Центрально-Азиатского подвижного пояса: возраст и тектоническое положение // Доклады Академии Наук. – 2015. – 464. – С. 194–198.
- [3] Ковач В.П., Котов А.Б., Ларин А.М., Сальникова Е.Б., Великославинский С.Д., Яковлева С.З., Плоткина Ю.В. Возраст и границы Олекминского магматического пояса Селенгино-Станового супертеррейна Центрально-Азиатского подвижного пояса // Доклады Академии Наук. – 2018. – 483. – С. 64–69.
- [4] Дриль С.И., Носкова Ю.В., Ковач В.П., Сасим С.А. Гранит-лейкогранитная серия пород олекминского комплекса Восточного Забайкалья: U-Pb LA-ICP-MS геохронология по цирконам и Sm-Nd изотопная систематика пород // Известия Иркутского государственного университета. – Серия «Науки о Земле». – 2020. – 32. – С. 32–41.

### **Проблема дискордантности в U-Pb систематике и избыточного $^{207}\text{Pb}$ (LA-ICP-MS данные по $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ ) в бадделеите палеозойских месторождений (арктический регион Фенноскандинавского щита)**

*С.В. Дрогобужская<sup>1</sup>, Т.Б. Баянова<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, г. Апатиты, [drogo\\_sv@chemy.kolasc.net.ru](mailto:drogo_sv@chemy.kolasc.net.ru)

<sup>2</sup> Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, [tamara@geoksc.apatity.ru](mailto:tamara@geoksc.apatity.ru)

<sup>3</sup> Институт динамики геосфер ИГД РАН, г. Москва

Проблема дискордантности в U-Pb системе, где положение точек выше конкордии была предметом долгих дискуссий [1]. Впервые дискордантность в бадделеите из Палаборы (месторождение в Южной Африке) была изучена [2] и было сделано предположение о выносе урана. Разработана новая методика определения изотопных соотношений  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  в образцах бадделеита методом LA-ICP-MS. Образцы – кристаллы и фрагменты бадделеита выделены из карбонатитов месторождений Вуориярви (Bd-400) и Ковдора (Bd-300). Для измерений использовали квадрупольный масс-спектрометр ELAN 9000 DRC-e, абляцию проводили с

помощью установки UP-266 MACRO в атмосфере аргона при 10 Hz, мощность излучения от 14-15 J/cm<sup>2</sup>, диаметр 100-240 μm. В качестве стандартного образца использовали международный образец BCR-2, данные по соотношению <sup>231</sup>Pa/<sup>235</sup>U взяты из работы [3]. Так как кристаллы стандартного образца BCR-2 меньше 50 μm, его предварительно прессовали с помощью пресс-формы в виде куба с небольшим количеством пластификатора.

Таблица 1. Результаты измерения <sup>231</sup>Pa/<sup>235</sup>U в стандартном образце BCR-2 и бадделеита.

Образец	U, ppm	Pa	<sup>231</sup> Pa/ <sup>235</sup> U			Elkins et all. [3]		
BCR-2	1,67	-	1,007	0,951	1,035			
			1,000	0,963	1,002			
			1,036	1,030	1,015			
			0,956	1,019	1,010			
			1,043	1,041	1,047			
			0,957	1,039	1,008			
			1,007	1,040	0,992			
0,975	1,000							
среднее			1,008			1,00		
СКО			0,0302082			-		
±Δ			0,012			0,013		
±Δ, %			1,2			1,3		
Образец	Возраст	<sup>231</sup> Pa/ <sup>235</sup> U						
		Месторождение Вуориярви 380 млн.лет (бадделеит)						циркон
Bd 400	380 млн. лет	<b>8-1</b>	<b>8-2</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>Zr</b>
		0,278	0,533	0,358	0,142	0,440	0,326	0,023
		0,353	0,647	0,410	0,118	0,591	0,589	0,047
		0,231	0,510	0,522	0,111	0,612	0,415	0,024
		0,302	0,490	0,430	0,124	0,548	0,443	0,026
		0,384	0,595	0,389	0,155	0,479	0,355	0,052
		0,251	0,469	0,446	0,128	0,643	0,641	0,027
		0,287		0,568	0,120	0,666	0,451	0,012
		0,312		0,468	0,134	0,596	0,482	0,029
		0,322				0,463		0,014
0,350				0,587		0,013		
Среднее		<b>0,307</b>	<b>0,541</b>	<b>0,449</b>	<b>0,129</b>	<b>0,600</b>	<b>0,463</b>	<b>0,026</b>
СКО		0,0475184	0,0677663	0,0693056	0,0142528	0,1022813	0,1077043	0,0128122
±Δ		0,028	0,050	0,045	0,009	0,049	0,070	0,007
Образец	Возраст	<sup>231</sup> Pa/ <sup>235</sup> U						
		Месторождение Ковдор 380 млн.лет (бадделеит)						
Bd 300	380 млн. лет	<b>2-1</b>	<b>2-2</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>11</b>
		0,204	0,353	0,112	0,284	0,597	0,381	0,359
		0,260	0,407	0,148	0,295	0,743	0,345	0,431
		0,293	0,395	0,220	0,321	0,593	0,268	0,452
		0,252	0,385	0,160	0,300	0,476	0,331	0,414
		0,222	0,384	0,122	0,185	0,650	0,414	0,272
		0,283	0,442	0,161	0,255	0,808	0,375	0,473
		0,318	0,430	0,240	0,183	0,645	0,375	0,481
		0,274	0,419	0,174	0,208		0,360	0,409
			0,309			0,391		
Среднее		<b>0,263</b>	<b>0,402</b>	<b>0,167</b>	<b>0,265</b>	<b>0,645</b>	<b>0,356</b>	<b>0,429</b>
СКО		0,0372971	0,0286877	0,0442119	0,0565443	0,1078314	0,0434526	0,0715774
±Δ		0,024	0,019	0,029	0,027	0,070	0,028	0,033

Стандартный образец BCR-2 использовали для расчета коэффициента фракционирования при определении <sup>231</sup>Pa/<sup>235</sup>U. Измерения проводились в программе «Isotope Ratio», обработка

результатов – в автоматическом режиме в данной программе и с помощью расчетной программы Excel. В табл. 1 приведены результаты определения  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  в образце BCR-2. Новые исследования отношений  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  в бадделеите палеозойских Норильских ЭПГ интрузий [4] и месторождений Ковдора и Vuoriaarvi [5] позволяют предположить, что дискордантность бадделеита в U-Pb систематике связана с избыточным  $^{207}\text{Pb}$ .

Все исследования проводятся в рамках программ НИР 0226-2019-0053, 0226-ИХ-2018-0002 и частично по гранту РФФИ № 21-17-00161.

- [1] Бибилова Е.В. U-Pb геохронология ранних этапов развития древних щитов. М.: Наука. 1989. 180 с.
- [2] Reishmann T, Brüggemann GE, Jochum KP, Todt WA (1995) Trace element and isotopic composition of baddeleyite. *Mineral Petrol* 53:155-164.
- [3] Elkins, L. J., Sims, K. W. W., Prytulak, J., Elliott, T., Mattielli, N., Blichert-Toft, J., Blusztajn, J., Dunbar, N., Devey, C., Mertz, D. F., Schilling, J. -G. & Murrell, M. Understanding melt generation beneath the slow-spreading Kolbeinsey Ridge using U-238, Th-230, and Pa-231 excesses // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011.- 75 (21): 6300-6329.
- [4] Ivanov A.V., Corfu F., Kamenetsky V.S., Marfin A.E., Vladykin N.V.  $^{207}\text{Pb}$ -excess in carbonatitic baddeleyite as the result of Pa scavenging from the melt // *Geochem. Persp. Lett.* (2021) 18, 11–15 | doi: 10.7185/geochemlet.2117
- [5] Amelin Y., Zaitsev A. Precise geochronology of phoscorites and carbonatites: The critical role of U-series disequilibrium in age interpretations // *Geochimica et Cosmochimica Acta* – 2002. – V. 66. No. 13. P. 2399–2419.

### **Оценка возраста детритовых цирконов как инструмент в разделении сильно дислоцированных метаморфических толщ (на примере харгитуйской свиты Байкальского выступа фундамента Сибирской платформы)**

*У.С. Ефремова, Т.В. Донская, Д.П. Гладкочуб, А.М. Мазукабзов, А.В. Иванов, Н.В. Брянский*

*Иркутск, Институт земной коры СО РАН, [uefremova@crust.irk.ru](mailto:uefremova@crust.irk.ru)*

Харгитуйская свита традиционно рассматривается как основание раннепротерозойской сарминской серии, породы которой принадлежат Аkitканскому складчатому поясу и обнажаются в пределах Байкальского краевого выступа фундамента Сибирской платформы. Породы харгитуйской свиты приурочены к узкому тектоническому блоку СВ простирания, который протягивается вдоль зоны разлома, отделяющего фундамент Сибирской платформы от раннепалеозойского Ольхонского террейна Центрально-Азиатского складчатого пояса. Согласно данным геологического картирования, харгитуйская свита представлена кварцитами, кварцево-сланцевыми сланцами, роговообманково-биотитовыми или двуслюдяными гнейсами и метариолитами, которые были подвержены метаморфизму и/или динамометаморфизму. Считается, что породы харгитуйской свиты прорываются гранитоидами приморского комплекса с возрастом 1.86 млрд лет, дайками карбонатитов ( $\approx 1$  млрд лет) и долеритов (720 млн лет). Для пород свиты характерны тектонические контакты как с более древними образованиями, так и с вышележащей иликтинской свитой. Раннепротерозойский возраст харгитуйской свиты устанавливался по прорыванию ее пород гранитоидами приморского комплекса, которые, в свою очередь, в области развития пород свиты также подвержены интенсивным динамометаморфическим преобразованиям и имеют преимущественно тектонические контакты со свитой.

Полученные нами ранее данные о возрасте пород харгитуйской свиты из обнажения к югу от пос. Онгурен показали, что породы свиты формировались позднее магматических пород Южно-Сибирского постколлизийного магматического пояса с возрастом 1.88 – 1.85 млрд лет, в том числе и гранитоидов приморского комплекса. В то же время данные, опубликованные В.Б. Савельевой с

соавторами [2] по Ar/Ar датированию мусковита из слюдистого сланца харгитуйской свиты, отобранного к северу от пос. Онгурен, свидетельствуют о том, что породы свиты претерпели метаморфизм на временном рубеже 1.95 млрд лет. Такие противоречивые данные показали необходимость более детального изучения возраста пород харгитуйской свиты, в связи с чем нами были проанализированы 5 образцов, отобранных из нескольких обнажений, расположенных на разных участках в полосе распространения пород свиты. U-Pb изотопный анализ зерен детритового циркона из этих образцов был выполнен методом LA-ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900 с системой лазерной абляции Analyte Excite в Центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.

Лейкократовый гнейс (обр. 2109) был отобран в правом борту руч. Элигей севернее пос. Онгурен. В этом образце было проанализировано 116 зерен детритового циркона, конкордантные значения были получены для 65 зерен. Большая часть полученных значений (62 %) формируют основной пик на отметке 2985 млн лет, а оставшаяся часть (38 %) формирует второй значимый пик на отметке 3091 млн лет.

В слюдисто-кварцевом сланце (обр. 2115), отобранном также в правом борту руч. Элигей, но южнее обр. 2109, было проанализировано 147 зерен детритового циркона, из которых для 137 зерен были получены конкордантные значения возраста. Основной возрастной пик формируется на отметке 2331 млн лет, также отмечаются более мелкие пики на отметках 2869 и 2973 млн лет.

Из слюдисто-кварцевого сланца мыса Ядор (обр. 2147) было отобрано 111 зерен детритового циркона, 92 из которых показали конкордантные значения. Наиболее значимый возрастной пик формируется на отметке 2461 млн лет, менее значимые пики отмечены в промежутке 2903 – 3037 млн лет.

Из 108 зерен детритового циркона, проанализированных в метапесчанике, отобранном между пос. Онгурен и р. Курмой (обр. 2160), конкордантные значения были получены для 81 зерна, которые формируют возрастной пик на 1851 млн лет.

К югу от пос. Еланцы в правом борту р. Анги был отобран слюдистый кварцит (обр. 21108), в котором были проанализированы 100 зерен детритового циркона, для 77 из которых были получены конкордантные значения возраста. Основной возрастной пик (90 % зерен) формируется на отметке 1835 млн лет, также менее значимые пики (по 3-6 зернам) отмечаются на 2691 и 2875 млн лет.

Полученные данные по возрасту детритовых цирконов из пород, относимых к харгитуйской свите, позволяют выделить две группы пород. В первую группу объединяются образцы 2109, 2115 и 2147, которые были отобраны к северу от пос. Онгурен, недалеко от разреза, для пород которого, согласно работе [2] был получен возраст метаморфизма 1.95 млрд лет, что хорошо согласуется и с полученными в настоящей работе данными. Детритовые цирконы с возрастом около 2.9 млрд лет, присутствующие во всех 3-х образцах, позволяют предположить, что тоналиты с возрастом  $2884 \pm 12$  млн лет [3], известные в Сарминском блоке, были поставщиками терригенного материала при формировании пород харгитуйской свиты, развитых вблизи пос. Онгурен. Возрастные пики, зафиксированные на отметках 2331 и 2461 млн лет, являются нетипичными для Сибирского кратона, и в пределах Байкальского выступа фундамента кратона магматические породы близкого возраста в настоящее время неизвестны, поэтому их расшифровка требует дальнейшей доработки. Вторую группу формируют образцы 2160 и 21108 с основными пиками возраста детритовых цирконов на отметках 1835 и 1851 млн лет, которые близки с результатами, опубликованными в работе [1]. В совокупности, полученные данные свидетельствуют о том, что породы, относимые к харгитуйской свите в южной части полосы их развития (южнее пос. Онгурен), формировались позднее пород Южно-Сибирского постколлизийного магматического пояса, а гранитоиды и вулканиты этого пояса являлись основными поставщиками детритовых цирконов в бассейны их седиментации.

Таким образом, полученные нами данные позволяют сделать вывод, что в единую харгитуйскую свиту были объединены разновозрастные породы только на основании степени их метаморфической переработки, и их нельзя выделять в единое стратоподразделение.

[1] Ефремова У.С., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Ван К.-Л., Ли Х.-Я. Особенности состава и возраста метаморфических пород харгитуйской свиты (Западное

- Прибайкалье) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 19. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. с. 86-88.
- [2] 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.
- [3] Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Poller U., Mazukabzov A.M., Bayanova T.B. Discovery of Archaean crust within the Akitkan orogenic belt of the Siberian craton: New insight into its architecture and history // Precambrian Research. – 2009. – V. 170. – P. 61–72.

## Неоднозначность интерпретации дискордантных значений бадделеита

*А.Н. Жиличева, В.А. Иванов*

*Иркутск, Институт земной коры СО РАН, [a.zhili@mail.ru](mailto:a.zhili@mail.ru)*

Бадделеит – наиболее важный и надежный U-Pb минерал-геохронометр, применяющийся для оценки возраста пород, преимущественно, базитового состава. Однако, на диаграммах с конкордией бадделеит часто не ложится на нее, а показывает незначительную степень дискордантности. Возникновение дискордантности может быть обусловлено рядом факторов – потерями радиогенного свинца, перекристаллизацией бадделеита в циркон при более молодых геологических событиях, наличием избыточного  $^{207}\text{Pb}$ . Правильный учет причины дискордантности может существенно влиять на корректную оценку возраста. В работах [1-2] показано, что бадделеит, кристаллизующийся в карбонатитовых магмах, захватывает существенную часть  $^{231}\text{Pa}$ , имеющего период полураспада ~32.5 тыс лет и являющегося промежуточным продуктом цепи  $^{235}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}$ , что приводит к накоплению избытка  $^{207}\text{Pb}$ . Является ли такой механизм дискордантности существенным только для богатых ураном карбонатитовых магм или он также важен для бедных ураном базитовых магм? Мы рассматриваем этот вопрос на примере опубликованных данных, полученных по бадделеиту трех рифейских базитовых даек Северо-Китайского кратона [3].

В работе [3] по данным U-Pb датирования бадделеита методом ID-TIMS возраст этих даек, оцененный по средним значениям  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  около 920 млн лет. При этом, для образца 08LC20 расчет возраста по дискордии дает более древнее значение  $932.08 \pm 3.53$  млн лет (рис. 1). Как видно, все индивидуальные значения по бадделеиту дискордантны. В работе [3] предполагается, что дискордантность вызвана потерями радиогенного свинца и возраст рассчитан из средних значений  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  индивидуальных определений. Предположим, что дискордантность связана с захватом  $^{231}\text{Pa}$  при кристаллизации бадделеита в магме, рассчитаем возраст, применяя такие значения  $(^{231}\text{Pa})/(^{235}\text{U})$ , чтобы самое древнее зерно бадделеита становилось конкордантным [4]. В этом случае все три дайки показывают близкие значения возрастов в интервале 909-912 млн лет (рис. 1). Эти пересчитанные значения моложе опубликованных примерно на 10 млн лет. Какая модель дискордантности правильная – потери радиогенного свинца или избыток  $^{207}\text{Pb}$  – только из этих данных определить нельзя. Однако в более ранней работе [5] датировались дайки, относящиеся предположительно к тому же магматическому событию по бадделеиту при помощи ионного зонда и для них были получены значения возраста  $899 \pm 7$  млн лет. Видно, что скорректированные на  $^{231}\text{Pa}$ - $^{235}\text{U}$  неравновесие значения в используемом нами примере по бадделеиту (рис. 1) ближе к значениям возраста, полученным по циркону. Таким образом, показано, что дискордантность связанная с избытком  $^{207}\text{Pb}$  может присутствовать не только в бадделеите кристаллизовавшемся из богатых ураном, но и из бедных ураном базитовых магм.

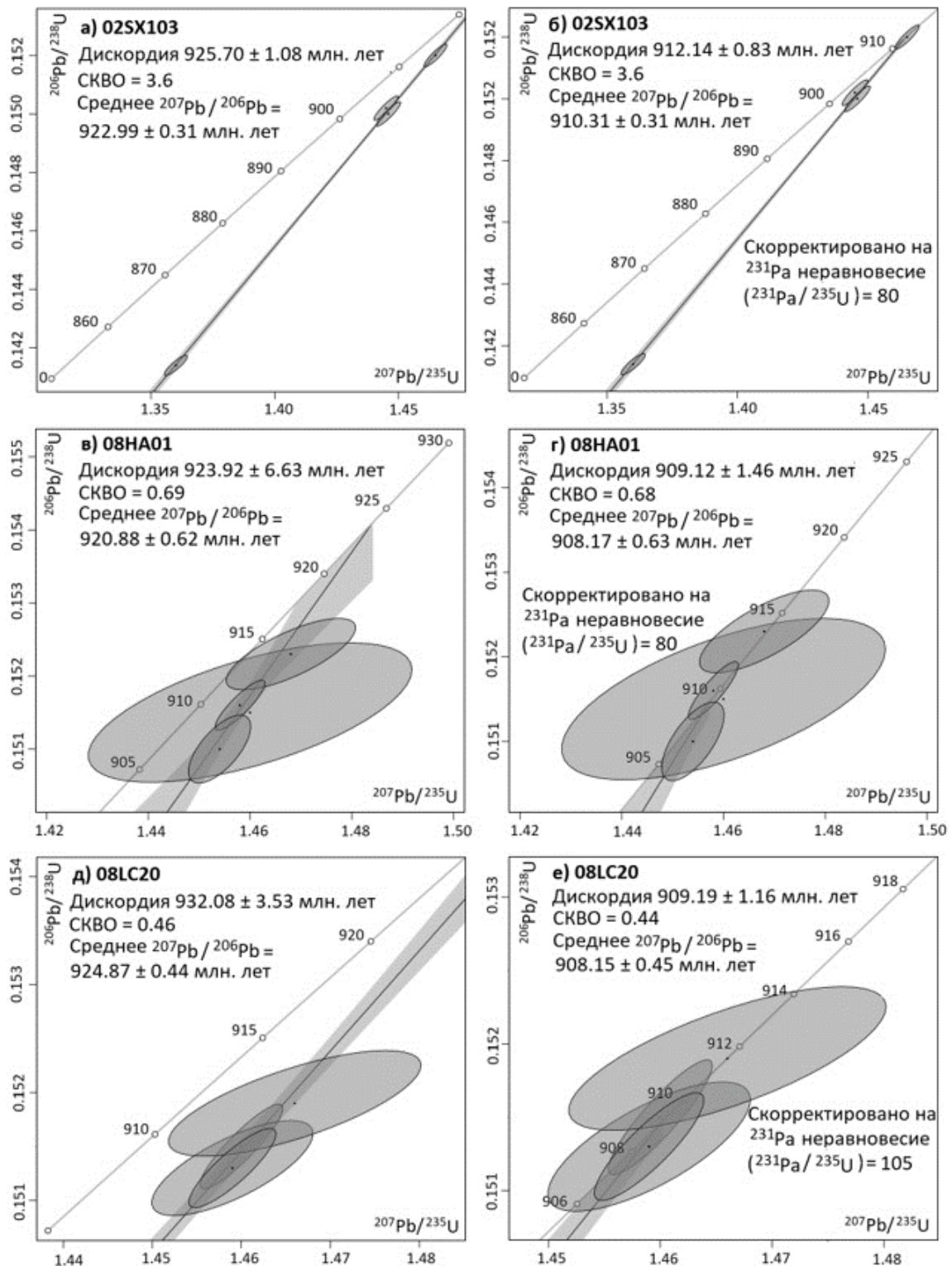


Рис 1. Диаграмма с конкордией. Левые диаграммы по опубликованным данным [3], правые – пересчитанные значения с учетом  $^{231}\text{Pa}$ - $^{235}\text{U}$  неравновесия. Диаграммы построены в IsoplotR. Ошибки  $1\sigma$ .

- [1] Amelin, Y., Zaitsev, A.N. (2002) Precise geochronology of phosphorites and carbonatites: The critical role of U-series disequilibrium in age interpretations // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 66. – P. 2399–2419.
- [2] Ivanov A.V. et al.  $^{207}\text{Pb}$ -excess in carbonatitic baddeleyite as the result of Pa scavenging from the melt // *Geochemical Perspect. Lett.* – 2021. – 18. – P. 11–15



- [3] Peng P. et al. U–Pb baddeleyite ages, distribution and geochemistry of 925 Ma mafic dykes and 900 Ma sills in the North China craton: Evidence for a Neoproterozoic mantle plume // *Lithos. Elsevier B.V.* – 2011. – 127. – P. 210–221.
- [4] Vermeesch, P. (2018) IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology // *Geoscience Frontiers.* – 9. – P 1479–1493
- [5] Peng P. et al. Neoproterozoic (~900Ma) Sariwon sills in North Korea: Geochronology, geochemistry and implications for the evolution of the south-eastern margin of the North China Craton // *Gondwana Res. International Association for Gondwana Research.* – 2011. –20. – P. 243–254.

### U-Th-Pb возраст детритовых цирконов из рифейских отложений камовской серии, Байkitская антеклизa Сибирской платформы

*Т.С. Зайцева, И.М. Горохов, Н.С. Прияткина, В.П. Ковач, Е.В. Адамская, Б.М. Гороховский,  
Ю.В. Плоткина*

*Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [z-t-s@mail.ru](mailto:z-t-s@mail.ru)*

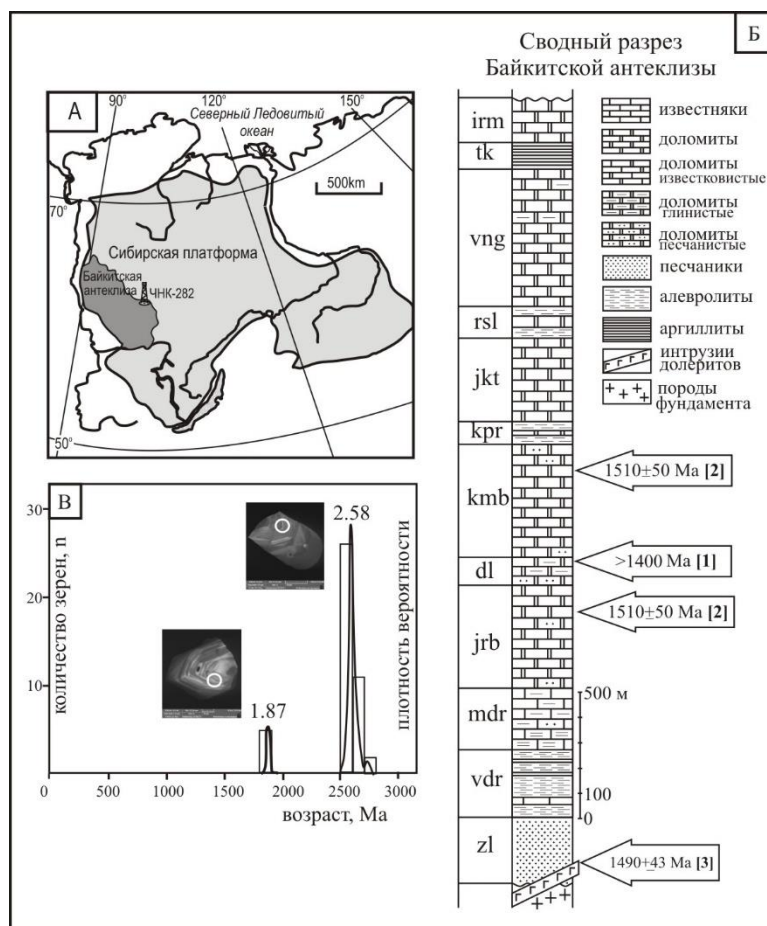


Рис.1. Положение скважины Чункинская-282 в пределах Байkitской антеклизы (врезка А); строение сводного разреза докембрийской камовской серии (врезка Б) (свиты: зелендуконская (zl), вэдрэшевская (vdr), мадринская (mdr), юрубченская (jrb), долгоктинская (dl), куюмбинская (kmb), копчерская (kpr), юктенская (jkt), рассолкинская (rsl), вингольднская (vng), токурская (tk) и ирэмэкэнская (irm)), указанные на рисунке датировки: >1400 млн лет – модельный Rb-Sr возраст глауконитов [1], 1510 ± 50 млн лет – Pb-Pb-возраст карбонатных пород [2], 1499 ± 43 млн лет –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возрасты долеритов, прорывающих гранитоиды фундамента [3]; гистограмма распределения и график относительной вероятности для возрастов детритовых цирконов из рифейских отложений камовской серии, кружками обозначены точки, где проводились U-Th-Pb измерения.

Проведены изотопно-геохронологические исследования детритовых цирконов, выделенных из рифейских песчаников камовской серии, распространенной в пределах Байkitской антеклизы юго-западной части Сибирской платформы (рис.1А). Образцы отобраны из керна скважины Чункинская-282 (интервал 4096.08–4097.21 м) из глауконитовых песчаников долгоктинской свиты, возраст раннего диагенеза которой оценивается по результатам Rb-Sr датирования глауконитов древнее 1400 млн лет [1]. Pb-Pb возраст карбонатов вышележащей куюмбинской и нижележащей юрубченской свит составляет 1510 ± 50 млн лет [2] и указывает на то, что возраст долгоктинской свиты имеет такое же значение (рис. 1Б).

С целью определения возможных источников терригенного материала в песчаниках камовской серии было проведено датирование детритовых цирконов U-Th-Pb LA-ICP-MS методом в ИГГД РАН по методике [4]. Из образца песчаника выделено и проанализировано 68 зерен циркона и получено 44 конкордантных оценок возраста. Конкордантные возрасты находятся преимущественно в интервалах 2668–2540 и 1885–1860 млн лет с пиками на кривой относительной вероятности возрастов около 2.58 ( $n = 37$ ) и 1.87 ( $n = 5$ ) млрд лет (рис. 1В). Возрасты единичных зерен составляют 2739 и 2714 млн лет.

Полученные данные свидетельствуют о том, что возможными источниками сноса цирконов для рифейских отложений камовской серии являлись палеопротерозойские и архейские породы фундамента Сибирской платформы. Популяция более древних цирконов камовской серии (2668–2540 млн лет) может быть связана как с гранитоидами Юрубченского массива, U-Pb возраст которого составляет  $2562 \pm 16$  млн лет [5], так и с гранулитами Иркутного блока Шарьжалгайского выступа, возраст которых попадает в интервал 2541–2595 млн лет [6]. Палеопротерозойская популяция циркона из отложений камовской серии (1885–1860 млн лет), вероятно, связана с гранитоидами Ангарского пояса, возраст которых в области Бирюсинского блока составляет  $1874 \pm 14$  млн лет [7]. Для уточнения источника сноса нужны более детальные геохимические исследования цирконов из пород камовской серии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00137).

- [1] Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Иванова Н.А., Масленников М.А., Пустыльников В.В., Турченко Т.Л., Наговицин К.Е. Rb-Sr возраст рифейских глауконитов камовской серии, Байкитская антеклиза Сибирской платформы // Доклады АН. – 2019. – Т.488. – №.1. – С. 595–600.
- [2] Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Крамчанинов А.Ю., Ризванова Н.Г., Константинова Г.В. Pb-Pb-возраст карбонатных пород камовской серии, Байкитская антеклиза Сибирской платформы // ДАН. Науки о Земле. – 2021. – Т. 500. – № 1. – С. 12–17.
- [3] Хабаров Е.М., Пономарчук В.А., Морозова И.П., Вараксина И.В., Сараев С.В. // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 3. – С. 211–239.
- [4] Ковач В.П., Котов А.Б., Гладкочуб Д.П., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Гороховский Б.М., Подковыров В.Н., Загорная Н.Ю., Плоткина Ю.В. Возраст и источники метапесчаников чинейской подсерии (Удоканская серия, Алданский щит): результаты U-Th-Pb геохронологического (LA-ICP-MS) и Nd изотопного изучения // ДАН. – 2018. – Т. 482. – № 2. – С. 1138–1141.
- [5] Самсонов А.В., Постников А.В., Спиридонов В.А., Ларионова Ю.О., Ларионов А.Н., Травин А.В., Постникова О.В., Соловьева Н.В., Сабиров И.А., Спиридонов И.В. Неоархейские гранитоиды на западе Тунгусского супертеррейна, фундамент Сибирской платформы: геохронология, петрология, тектоническое значение // Петрология. – 2021 – Т. 29. – № 5. – С. 451 – 477.
- [6] Turkina O.M., Berezhnaya N.G., Lepekhina E.N., Kapitonov I.N. U-Pb (SHRIMP II), Lu-Hf isotope and trace element geochemistry of zircons from high-grade metamorphic rocks of the Irkut terrane, Sharyzhalgay Uplift: Implications for the Neoproterozoic evolution of the Siberian Craton // Gondwana Res. – 2012. – 21. – P. 801–817.
- [7] Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Вингейт М.Т.Д. Раннепротерозойские постколлизийные гранитоиды Бирюсинского блока Сибирского кратона // Геология и геофизика. – 2014. – Т.55. – № 7. – С.1028–1043.

## Возраст раннепалеозойских осадочно-вулканогенных комплексов юга Тувы: данные U-Pb датирования цирконов и Sr-хемотратиграфии

*А.В. Иванов, Е.Ф. Летникова, А.И. Прошенкин*

Новосибирск, Институт геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН, [ivanovav@igm.nsc.ru](mailto:ivanovav@igm.nsc.ru)

В настоящий момент одной из проблем геологии Тувинского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса является обоснование возраста раннепалеозойских осадочных последовательностей и синхронного с их седиментацией вулканизма. Это связано с тем, что информация о возрасте многих стратиграфических комплексов отсутствует или она принята условно. В данной работе мы рассмотрим результаты Sr-хемотратиграфии карбонатных пород терегтигской свиты и U-Pb датирования цирконов из осадочно-вулканогенных пород терегтигской, шурмакской и адырташской свит раннего палеозоя юга Тувы.

Химическое разложение проб карбонатных пород и измерение содержаний в них Rb и Sr выполнялись на базе ЦКП МИИ СО РАН (ИГМ СО РАН, Новосибирск) на многоколлекторном масс-спектрометре МИ1201АТ, в двухленточном режиме. Изотопное отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  измерены на масс-спектрометре TritonPlus Thermo Fisher (Екатеринбург, ИГТ УрО РАН).

Выделение цирконов для U-Pb датирования проводилось в ЦКП МИИ ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) по стандартной методике. Изучение морфологии и внутреннего строения кристаллов цирконов проводилось в проходящем и отраженном свете. Внутреннее строение цирконов было изучено на сканирующих катодолуминесцентных микроскопах JEOL JSM 6510LV и LEO 1430VP с приставкой Detector Centaurus (ЦКП МИИ ИГМ СО РАН, Новосибирск). Определение U-Pb возраста цирконов проводилось методом LA-ICP-MS в двух лабораториях. В ГЕОХИ РАН на масс-спектрометре Element XR (Thermo Finnigan) с системой лазерной абляции UP-213 (New Wave Research) и ИГМ СО РАН на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific) с системой пробоотбора лазерной абляцией UP-213 (New Wave Research) (ЦКП МИИ СО РАН, Новосибирск).

*Терегтигская свита.* Возраст отложений терегтигской свиты в настоящий момент условно определен как позднекембрийский. Наблюдается следующая осадочная последовательность в междуречье рр. Тес-Хем и Терегтиг-саир: аргиллиты, галечные конгломераты, карбонатные породы, в нижней части которых встречаются линзы кварцевых гравелитов. Наиболее молодая популяция цирконов из кварцевых гравелитов и матрикса конгломератов этой свиты имеет возраст в диапазоне 529-540 млн лет, что позволяет ограничить нижнюю границу накопления этой свиты не древнее раннего кембрия. Данные Sr-хемотратиграфия позволяют существенно конкретизировать временной интервал накопления отложений этой свиты. Карбонатные породы в разрезе представлены известняками ( $\text{Mg}/\text{Ca}$  0,003-0,009), доля нерастворимого остатка не превышает 5%, содержания Sr варьирует от 283 до 496 ppm. Изотопный состав углерода  $\delta^{13}\text{C}$  в известняках терегтигской свиты изменяется в диапазоне от -1,1 до +2,9. Изотопный состав Sr образцов показывает диапазон значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  отношения – от 0,70769 до 0,70826. Вариации изотопного отношения Sr позволяют нам оценить временной интервал седиментации от 520 до 530 млн лет, что согласуется с полученными нами данными U-Pb датирования цирконов. При этом, основная популяция цирконов (80 зерен) в изученных двух пробах имеет возраст в диапазоне 558-614 млн лет с пиком на 580 млн лет. В обеих пробах данной свиты присутствуют единичные зерна неопротерозойского (654, 883 млн лет), мезопротерозойского (1078, 1364, 1490 млн лет), палеопротерозойского (1780, 1848, 1860, 1871, 1888, 2466 млн лет) и неархейского (2683, 2781 млн лет) и мезоархейского (2802, 2806, 2880 млн лет) возраста, что указывает на их накопление в пределах континентального блока с длительной историей развития.

*Шурмакская свита.* Практически в километровом разрезе шурмакской свиты по р. Шурмак преобладают валунные туфоконгломераты, которые переслаиваются с вулканитами, туфами и вулканокластическими песчаниками. Возраст свиты был условен. Нами проведено геохронологическое обоснование возраста этой свиты на основе датирования цирконов из туффов в ее разрезе. Вулканическое событие синхронное с формированием пород шурмакской

свиты имеет возраст  $500 \pm 3.9$  млн лет. В матриксе туфоконгломератов и вулканомиктового песчаника основная популяция цирконов варьирует в узком интервале и так же имеет пик на 500 млн лет. Это позволило оценить время накопления отложений шурмакской свиты на рубеже 500 млн лет. Во всех трех изученных пробах так же хорошо проявлена популяция цирконов с пиком на 800 млн лет, возраст которых соответствует возрасту гранитных валунов и возрасту валуна кислого вулканита из конгломератов. Здесь так же присутствуют единичные зерна цирконов с возрастными: мезопротерозоя (1128, 1588 млн лет), палеопротерозоя (1884, 1981, 1987, 1989, 2072, 2031, 2046, 2207, 2097, 2101 млн лет) и неоархея (2643, 2724 млн лет), что указывает на их образование в пределах континентального блока с длительной историей развития

*Адырташская свита.* В стратотипической местности по р. Ирбитей эта свита представлена позднеордовикскими осадочными породами – песчаниками и конгломератами. Нами изучен разрез этой свиты в междуречье Деспен и Холу, который резко отличается от разреза в стратотипической местности. В его разрезе господствуют вылканические породы – вулканиты, туфы, туфоконгломераты. Результаты U-Pb датирования позволяют нам выделить вулканическое событие в интервале 444-463 млн лет. На основе детального изучения результатов U-Pb датирования цирконов стало возможным выделить три эпизода вулканической активности. В центральной части этой структуры находятся наиболее древние вулканиты с возрастом 460 млн лет, которые так же представлены в виде обломков риолитов в более молодых туфоконгломератах. Второй эпизод проявлен 455-457 млн лет назад и маркируется горизонтами туфов и туфопесчаников. С этим эпизодом вулканической активности сопряжено формирование гранодиоритов, широко представленных в обломочной части более молодых туфоконгломератах этой вулканической последовательности. Завершающим эпизодом на границе ордовика и силура (444-445 млн лет) стало образование мощных толщ туфоконгломератов и туфопесчаников. Обширная популяция более древних неопротерозойских цирконов в изученных вулканических породах адырташской свиты указывает на образование этих пород в пределах тектонического блока с активной историей развития на протяжении более 500 млн лет.

Таким образом, на основе проведенных исследований нами установлено, что на юге Тувы в раннем кембрии (520-530 млн лет) в прибрежно-морских обстановках континентальной окраины накапливались терригенные и карбонатные породы берегитской свиты, на рубеже 500 млн лет в пределах этого континентального блока в результате его активизации формируется вулканогенно-осадочная шурмакская свита, в обломочной части которой преобладают вулканиты и граниты с возрастом 780-800 млн лет. Еще один импульс вулканизма зафиксирован нами на основе изотопных данных по изучению пород адырташской свиты на границе ордовика и силура.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-35-90050.

## **DEZIRTEER – программа для расчета U-Pb данных для детритового циркона: примеры применения**

*А.В. Иванов, В.И. Паверман*

*Иркутск, Институт земной коры СО РАН, [aivanov@crust.irk.ru](mailto:aivanov@crust.irk.ru)*

U-Pb датирование детритового циркона из осадочных последовательностей является мощным инструментом для определения нижней возрастной границы осадконакопления и корреляции немых осадочных толщ, для палеогеографических и палеотектонических реконструкций, а при наличии большого количества данных – для выявления пиков магматической активности в пределах крупных региональных структур или даже для оценки эволюции магматизма Земли в целом. Особую роль в детритовой геохронологии играет масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСПМС), позволяющая получать многие десятки – первые сотни кондиционных датировок за одну смену. Для редукции данных ЛА-ИСПМС обычно используется одна из трех программ – Glitter [1], Iolite [2] или LADR [3]. Однако, построение графиков с конкордией, графиков распределения

возрастов и т.п. для последующей интерпретации обычно осуществляется либо в программе Isoplot [4], либо Isoplot R [5]. Ни одна из этих программ не приспособлена для обработки больших массивов данных. Кроме того, ни одна из них не позволяет использовать алгоритмы выбора предпочтительного возраста, автоматической фильтрации данных, корректировки на обыкновенный свинец, оценки статистических параметров. Это делается или вручную, или при помощи макросов или каких-то дополнительных специализированных программ. Для решения большинства существующих проблем в обработке и визуализации редуцированных данных U-Pb датирования разработана программа DEZIRTEER (DE – detrital, ZIR – zircon, TE – trace elements) [6]. Веб версия программы доступна по адресу <https://dezirteer.crust.irk.ru/>, а установочный пакет для работы в Windows – <http://dezirteer.com>. В этом докладе на примере реальных данных будет показан функционал этой программы.

- [1] Griffin W.L. GLITTER: data reduction software for laser ablation ICP-MS // Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: current practices and outstanding issues – 2008 – P. 308-311.
- [2] Paton C., Hellstrom J.C., Paul B., Woodhead J.D., Hergt J.M. Iolite: Freeware for the Visualisation and processing of mass spectrometric data // J. Anal. At. Spectrom. – 2011 – DOI:10.1039/c1ja10172b.
- [3] Norris C.A., Danyushevsky L., Olin P., West N.R. Elimination of aliasing in LA-ICP-MS by alignment of laser and mass spectrometer // J. Anal. At. Spectrom. – 2021 – V. 36. – P. 733-739.
- [4] Ludwig K.R. User's manual for Isoplot 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center special publication – 2003 – no.4.
- [5] Vermeesch P. IsoplotR: A Free and Open Toolbox for Geochronology // Geoscience Frontiers. – 2018. – DOI:10.1016/j.gsf.2018.04.00.
- [6] Powerman V.I., Buyantuev M.D., Ivanov A.V. A review of detrital zircon data treatment, and launch of a new tool 'Dezirteer' along with the suggested universal workflow // Chem. Geol. – 2021. – V. 583. – 120437.

## **Результаты U-Pb геохронологических исследований (ID-TIMS) метамиктного циркона из щелочных пород Арысканского REE-Nb-Ta-Zr-Th-U месторождения**

*А.А. Иванова<sup>1</sup>, Е.Б. Сальникова<sup>1</sup>, А.М. Козловский<sup>2</sup>, А.В. Никифоров<sup>2</sup>, В.В. Ярмолук<sup>2</sup>,  
А.Б. Котов<sup>1</sup>, Ю.В. Плоткина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, ИГГД РАН, [anna\\_al\\_ivanova@mail.ru](mailto:anna_al_ivanova@mail.ru)  
<sup>2</sup> Москва, ИГЕМ РАН

Арысканское (H)REE-Nb-Ta-Zr-Th-U месторождение локализовано в пределах раннекаледонской Хамсаринской зоны центральной части Восточного Саяна и связано с мелко-среднезернистыми рибекит-арфведсонитовыми щелочнополевошпатовыми гранитами с вкрапленной редкометальной минерализацией. Они слагают дайкообразное тело протяженностью 375 м при ширине от 20 до 70 м, прослеженное до глубины 120 м. В апикальной части этого тела локализованы жилоподобные пегматоидные тела рибекит-малаконового состава. Вмещающими породами для редкометальных гранитов являются диориты, биотитовые граниты и амфиболовые сиениты. На расстоянии около 1 км от выходов редкометальных гранитов располагается более крупный (0.45 км<sup>2</sup>) Астыгский массив мелко-среднезернистых рибекитовых гранитов с бедной Nb-REE-Zr минерализацией. Согласно результатам Rb-Sr изотопных исследований, рудные процессы в пределах Арысканского района были проявлены непосредственно вслед за магматическим событием с возрастом около 455 млн лет [1].

К сожалению, надежные оценки возраста редкометальных гранитов Арысканского и Астыгского массивов и вмещающих их сиенитов отсутствуют. В связи с этим была предпринята попытка их датирования U-Pb методом (ID-TIMS) по циркону. Следует отметить, что циркон из редкометальных гранитов метамиктизирован, содержит большое количество минеральных включений и не использовался ранее для геохронологических исследований. Однако на

примере циркона из редкометальных гранитов Тургинского массива Западного Забайкалья [2], была продемонстрирована принципиальная возможность получения надежных U-Pb геохронологических данных (ID-TIMS) для высокоуранового циркона с высокой степенью радиационных повреждений с использованием методик предварительного высокотемпературного отжига и последующей кислотной обработки.

Циркон из гранита Арысканского массива (проба Ар-1/25) содержит значительное число мелких включений Th-, U-, Nb- и REE-минералов. Содержание  $UO_2$  и  $ThO_2$  составляет 0.1–0.2 масс %. В цирконе из гранита Астыгского массива (проба Ар-1/7) присутствуют очень крупные (до 200 мкм) включения альбита, КПШ, флюорита и минералов Fe, Th, Nb, REE. Содержание в нем  $UO_2$  составляет 0.5–0.7 масс %,  $ThO_2$  до 0.5 масс %,  $Y_2O_3$  иттрия до 2.3 масс %. Как мы видим, изученный циркон характеризуется повышенными содержаниями U и Th. Для циркона из гранита Арысканского массива доза накопленного авторадационного облучения ( $D_a$ ) составляет  $1-2 \times 10^{18}$   $\alpha$ -расп/г, а для циркона из гранита Астыгского массива  $D_a = 2-13 \times 10^{18}$   $\alpha$ -расп/г. Исследования с использованием рамановской спектроскопии указывают на большую кристалличность циркона гранита Арысканского массива по сравнению с цирконом из гранита Астыгского массива, что коррелируется с содержаниями в них редких элементов. Вероятно, такие различия связаны с тем, что в гранитах Арысканского массива U и Th образуют «собственную» минерализацию или входят в состав других минералов, а в гранитах Астыгского массива эти элементы обогащают преимущественно циркон. На рамановских спектрах в цирконе из гранитов рассматриваемых массивов четко выделяется пик в области  $810 \text{ см}^{-1}$ , который обычно связывают с присутствием уранильных группировок. Высокотемпературный отжиг ( $220^\circ\text{C}$ ) в течение 48 ч позволил увеличить степень кристалличности циркона из гранитов обоих массивов, что проявилось в сдвиге пика моды  $\nu_3$  ( $SiO_4$ ) (около  $1000 \text{ см}^{-1}$ ) в более высокочастотную область. Дальнейшие исследования циркона были проведены с помощью высокотемпературного отжига и «химической абразии» [3].

Для циркона из гранита Арысканского массива использована как «мягкая» (4 ч при  $180^\circ\text{C}$ ), так и «стандартная» (2 ч при  $220^\circ\text{C}$ ) кислотная обработка, что привело к сильному протравливанию кристаллов. Однако фрагментация кристаллов циркона оказалась незначительной – они сохранили дипирамидальный облик. Для циркона из гранита Астыгского массива была проведена «мягкая» кислотная обработки (4 ч при  $180^\circ\text{C}$ ), в результате которой кристаллы циркона были сильно фрагментированы. После описанных процедур были выполнены U-Pb геохронологические исследования циркона по стандартной методике. Для циркона из редкометального гранита Арысканского массива получена конкордантная оценка возраста  $448 \pm 1$  млн лет (СКВО = 0.031, вероятность – 0.86), а для циркона из редкометального гранита Астыгского массива –  $446 \pm 1$  млн лет (СКВО = 0.41, вероятность – 0.52).

Циркон из вмещающих рассматриваемые массивы сиенитов (проба Ар-1/5) представлен прозрачными короткопризматическими кристаллами с высоким двупреломлением. Точки изотопного состава «необработанных» единичных зёрен циркона образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией отвечает возрасту  $472 \pm 2$  млн лет (СКВО = 0.47), а нижнее пересечение соответствует нулю.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют, что использование методики высокотемпературного отжига в сочетании с методикой химической абразии позволяет успешно проводить U-Pb (ID-TIMS) датирование высокоуранового метамиктизированного циркона из щелочных гранитов с рудной минерализацией.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (№ 20-05-00437).

- [1] Костицын Ю.А., Алтухов Е.Н. Хайламинский и Арысканский массивы щелочных гранитоидов В. Саян: время и условия формирования по данным Rb-Sr изотопных и геохимических исследований // Геохимия. – 2004. – С. 243-253.
- [2] Иванова А.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Плоткина Ю.В., Толмачева Е.В., Сырицо Л.Ф., Бочаров В.Н. U-Pb (ID-TIMS) датирование высокоурановых метамиктизированных цирконов: новые возможности известных подходов // Петрология. – 2021. – 29. – С. 656-667.

- [3] Mattinson J.M. Zircon U-Pb chemical abrasion «CA-TIMS» method: combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved and accuracy of zircon ages // Chem. Geology. – 2005. – 220. – P. 47-66.

## Изучение сохранности радиогенного гелия в минералах платиновой группы при длительном нагреве до 850°C в присутствии атмосферы

*Е.С. Иванова<sup>1,2</sup>, О.В. Якубович<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, [ekate.s.ivanova@gmail.com](mailto:ekate.s.ivanova@gmail.com)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [olya.v.yakubovich@gmail.com](mailto:olya.v.yakubovich@gmail.com)

Одним из доступных способов определения возраста минералов платиновой группы является  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  метод изотопного датирования. Сохранность радиогенного гелия в ходе геологической истории, образованного в результате  $\alpha$ -распада изотопа платины  $^{190}\text{Pt}$ , непосредственно влияет на результаты исследований. Как известно, за счет прочной металлической связи в самородных металлах миграция инертного соединения гелия в вязкой среде свободных электронов сводится к минимуму. Кристаллическая решетка самородных минералов платины ограничивает диффузию гелия, удерживая атомы в энергетически выгодных положениях, как дефекты структуры различного рода и границы зерен, где формируются гелиевые пузырьки [2]. Существенная часть гелия мигрирует из образовавшихся кластеров при достижении высокой температуры, сопоставимой с температурой плавления металла. Тем не менее, прочность удерживания гелия в условиях продолжительного (более часа) повышенного температурного режима экспериментально не изучалась.

Цель работы заключается в оценке сохранности радиогенного гелия при длительном температурном воздействии в условиях атмосферы на основе отклонения результатов  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  датирования образца до и после нагрева.

Для проведения эксперимента были выбраны гомогенные образцы изоферроплатины без включений из россыпного проявления р. Кубанак (Республика Алтай). Россыпь приурочена к Малоаталыкскому базит-ультрабазитовому массиву, сложенному (снизу вверх) дунитами и близкими по составу серпентинизированными породами, верлитами и оливиновыми клинопироксенитами. По возрасту массив соответствует раннему кембрийскому периоду и граничит с гранитами садринского комплекса ( $\text{Є}_3\text{-O}_1\text{s}$ ) [1].

Исследование выполнено по фрагментам единичных зерен для отслеживания потери радиогенного гелия в каждом образце. Соответственно подготовка проб включает предварительное разделение образцов механическим путем с использованием инструмента из твердых сплавов на пригодные по массе пробы для датирования (0.5 – 4 мг). Часть проб была отправлена в термостат на 48 часов при температуре 850 °C градусов. Определение концентрации радиогенного гелия выполнено с использованием масс-спектрометрического комплекса МСУ-Г-01-М в ИГГД РАН. Исследуемое зерно платины совместно с чистой медью (99,95% Cu) в пропорциях 1:3 было завернуто в танталовую фольгу. Затем кювета из тугоплавкого материала с подготовленной пробой внутри поступает в рениевый цилиндр с помощью специального устройства. Здесь осуществляется постепенный нагрев образца в условиях высокого вакуума ( $2 \cdot 10^{-7}$  торр) до температуры эвтектического плавления платины с медью (1400 °C). Продолжительность воздействия 800 °C на образец составляет 40 минут, 1100 °C – около 2 минут, 1300 °C – 10 минут, и пиковые 1400 °C оказывают влияние на пробу в течение 20 минут. В ходе ступенчатого нагрева минимизируется риск преждевременного испарения меди. Калибровка масс-спектрометра выполнена по метеоритному эталону Княгиня с известной концентрацией гелия ( $1.24 \pm 0.02 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 \text{ STP/g } ^4\text{He}$ ) [3]. Высокий уровень вакуума поддерживается в течение всего измерения при помощи геттерных насосов (SAES NP 10), сорбирующих выделяющиеся активные газы. Возраст образцов рассчитывается по тангенсу угла изохроны.

По результатам проведенного эксперимента полученные значения возраста зерен до и после термического отжига на 850°C отличаются несущественно.

- [1] Богнибов В.И., Поляков Г.В. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов юга Сибири. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН. – 1995. – 151 с.
- [2] Шуколюков Ю.А., Якубович О.В., Мочалов А.Г., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Корнеев С.И., Гороховский Б.М. Новый изотопный геохронометр для прямого датирования самородных минералов платины ( $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  метод) // Петрология. – 2012. – Т. 20. № 6. – С. 545-559.
- [3] Schultz L, Franke L. Helium, neon, and argon in meteorites: a data collection // Meteoritic & Planetary Science. – 2004. – 39. № 11. – P. 1889-1890.

## Возраст основных даек по данным U-Pb и Ar-Ar датирования (Каахемский магматический ареал, Восточная Тува)

*И.В. Кармышева, В.А. Яковлев, Д.С. Юдин, Д.В. Семенова*

*Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН, [iri@igm.nsc.ru](mailto:iri@igm.nsc.ru)*

Каахемский магматический ареал (~ 30 000 км<sup>2</sup>) (Восточная Тува) сложен габброидными и гранитоидными комплексами, чье формирование происходило в длительный период времени – 570-300 млн лет и на разных стадиях развития региона – островодужного (560-530 млн лет), аккреционно-коллизийного (512-474 млн лет), постколлизийного (450-445 млн лет), внутриплитного (300-280 млн лет назад) [1, 2]. Наряду с крупными массивами в пределах ареала широко распространены многочисленные дайковые комплексы кислого и основного составов.

Одним из неисследованных на настоящий момент подобных объектов является комплекс основных даек в среднем течении р. Каа-Хем. Он представляет собой серию наклонных даек с четко выдержанным северо-восточным простиранием. Выходы даек прослеживаются на участке примерно 10 км. Мощность даек варьирует от 1,5 м до 3 м. Вмещающими породами даек является таннуольский диорит-тоналит-плагиогранитный комплекс (O<sub>1</sub>-O<sub>3</sub>) [3]. Базитовые дайки имеют четкие секущие контакты по отношению к вмещающим породам.

По составу породы даек отвечают умеренно-щелочным роговообманковым мезогаббро (Pl – 45%, Hbl – 40%, Crx – 5%, Vt – 10%) с мелкозернистой структурой. При содержании SiO<sub>2</sub> 46.82-53.09 мас % они являются низкокалиевыми, нормально-щелочными, толеитовыми разновидностями. На спектрах распределения РЗЭ отмечается повышенное содержание LREE ((La/Yb)<sub>n</sub> = 5.51-9.45) с отсутствием европиевого минимума ((Eu/Eu\*)<sub>n</sub> = 0.84-0.99). На мультиэлементных спектрах наблюдаются обогащение LILE и слабо проявленные Nb-Ta, Hf и Ti минимумы.

По петрогеохимическим характеристикам габбро соответствуют внутриплитным базальтам континентальных областей со значительным вкладом в состав материала континентальной коры.

Для определения возраста даек в «ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» (г. Новосибирск) были проведены исследования цирконов (U-Pb метод) и амфиболов (Ar-Ar) из роговообманковых габбро. Все геохронологические исследования проводились из одной пробы.

U-Pb изотопно-геохронологические исследования цирконов выполнены методом LA-SF-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific) с эксимерной системой лазерной абляции Analyte Excite (Teledyne Cetac), оснащенной двухкамерной ячейкой HeEx II. Монофракция циркона представлена 3 полупрозрачными идиоморфными призматическими кристаллами с бледно-желтой окраской, четкими ребрами и ровной поверхностью граней. Размер зерен – 100-150 μm по удлинению и 30-50 μm по ширине. В режиме катодоллюминесценции (CL) исследуемые цирконы характеризуются тонкой осцилляторной магматической зональностью. Аналитические исследования, проведенные по 3 локальным точкам магматического циркона, указывают на конкордантное значение возраста, равное 454±10 млн лет (СКВО = 0.0016).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  геохронологические исследования выполнены методом ступенчатого прогрева по методике описанной в [4]. Для амфибола из габбро получен спектр, в котором наблюдается относительно низкотемпературная лестница и выделяется плато, характеризующееся значением



возраста  $450 \pm 6.3$  млн лет, Са/К отношение равно 10.9 – 25.9. Для низкотемпературной ступенчатой части фиксируются пониженные значения Са/К отношения (0.8-11.3).

Таким образом, полученные по двум методам оценки возраста даек однозначно указывают на верхнеордовикский возраст становления комплекса даек.

Аналогичные значения возраста и близкие петрогеохимические характеристики описаны в Шуйском и Майском габброидных массивах [5]. Их формирование связывается с постколлизийным этапом развития региона, когда произошло масштабное (сотни квадратных километров) внедрение гранитов, слагающих основную часть Каахемского ареала [3, 2]. Базитовые расплавы предшествовали кислоте магматизму, создавая тепловой поток, необходимый для гранитообразования. Таким образом, новые данные о возрасте и составе дайкового комплекса позволяют существенно расширить ареал распространения верхнеордовикского основного магматизма и уточнить характер взаимодействия мафических и салических расплавов.

Исследование выполнено по государственному заданию ИГМ СО РАН.

- [1] Руднев С.Н. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны Западной Монголии // Новосибирск: Издательство СО РАН. – 2013. – 300 с.
- [2] Сугоракова А.М. Роль габброидного магматизма в формировании Каахемского магматического ареала (Восточная Тува) // «Петрология магматических и метаморфических комплексов»: Материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием. – Томск. – 2017. – С. 395-398.
- [3] Руднев С.Н., Владимиров А.Г., Пономарчук В.А., Бибилова Е.В., Сергеев С.А., Матуков Д.И., Плоткина Ю.В., Баянова Т.Б. Каахемский полихронный гранитоидный батолит (Восточная Тува): состав, возраст, источники и геодинамическая позиция // Литосфера. – 2006. – № 2. – С. 3-33.
- [4] Yudin D., Murzintsev N., Travin A., Alifirova T., Zhimulev E., Novikova S. Studying the Stability of the K/Ar Isotopic System of Phlogopites in Conditions of High T, P:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating, Laboratory Experiment, Numerical Simulation // Minerals. – 2021. – 11(2). – 192.
- [5] Монгуш А.А., Сугоракова А.М. Возраст и источники магм постколлизийных габброидов Каахемского магматического ареала, Восточная Тува: результаты первых  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  и Sm-Nd исследований // Геохимия. – 2013. – №11. – 1042-1047 с.

### **Возраст и источники метатерригенных отложений Нижнеханнинской грабен-синклинали западной части Алданского щита: результаты U-Th-Pb (LA-ICP-MS) геохронологических и Nd изотопных исследований**

*В.П. Ковач<sup>1</sup>, Е.В. Адамская<sup>1</sup>, А.Б. Котов<sup>1</sup>, В.И. Березкин<sup>2</sup>, В.Ф. Тимофеев<sup>2</sup>, Н.В. Попов<sup>3</sup>, Ю.В. Плоткина<sup>1</sup>, А.М. Федосеев<sup>1</sup>, Н.Ю. Загорная<sup>1</sup>, Б.М. Гороховский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [v.p.kovach@gmail.com](mailto:v.p.kovach@gmail.com)

<sup>2</sup> Якутск, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, [igabm@bk.ru](mailto:igabm@bk.ru)

<sup>3</sup> Новосибирск, Институт геологии нефти и газа СО РАН, [popovnv@ipgg.sbras.ru](mailto:popovnv@ipgg.sbras.ru)

Палеопротерозойские метаосадочные породы удоканского комплекса выполняют обширный Кодаро-Удоканский прогиб и целый ряд грабен-синклиналей (Нижнеханнинскую, Олдонгсинскую, Угуйскую), расположенных в западной части Алданского щита. Эти отложения являются гипостратотипом нижнего протерозоя Восточной Сибири, служат возрастным репером в региональной стратиграфической шкале и вмещают крупнейшее месторождение медистых песчаников [1, 2]. Геохронологические и Nd изотопные данные [3-5] свидетельствуют о том, что накопление отложений кодарской серии удоканского комплекса Кодаро-Удоканской зоны происходило в интервале около 2.3–2.1 млрд лет, а чинейской и кеменской серий около 1.90–1.87 млрд лет. Данные, позволяющие судить о возрасте и источниках “немых” метаосадочных отложений других структур удоканского комплекса в

настоящее время крайне ограничены. В настоящем сообщении в этом плане обсуждаются результаты исследований метатерригенных пород Нижнеханнинской грабен-синклинали.

Нижнеханнинская структура представляет собой асимметричную брахисинклиналь (30 x 20 км) с пологими залеганиями крыльев, ограниченную разрывными нарушениями. Она сложена метаморфизованными в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фации песчаниками, алевролитами, гравелитами, конгломератами и карбонатными породами, которые относят к ханинской серии [6, 7]. Мощность серии составляет 1400–2100 м. Возраст метаморфизма составляет  $1.95 \pm 0.11$  млрд лет (Rb-Sr метод по породам в целом) [8]. Метадиабазы куранахского комплекса, прорывающие ханинскую серию, имеют возраст  $1863 \pm 9$  млн лет назад [9].

U-Th-Pb LA-ICP-MS геохронологические исследования цирконов из метапесчаников и метаконгломератов ханинской серии выполнены в ИГГД РАН по методике [4]. Цирконы представлены как слабо окатанными и неокатанными субидиоморфными коротко- и длиннопризматическими кристаллами, так и хорошо окатанными округлыми и овальными зернами. Для большинства цирконов характерна тонкая и грубая осцилляторная зональность, что свидетельствует об их магматическом генезисе. Реже встречаются незональные или с плохо выраженной зональностью зерна, скорее всего, метаморфического происхождения.

В общей сложности получено 458 оценок возраста циркона, 185 из которых являются конкордантными. Конкордантные оценки возраста находятся преимущественно в интервалах 2581–3005 и 3071–3256 млн лет с максимумами на кривой относительной вероятности возрастов около 2.65, 2.71, 2.82, 2.86, 2.99, 3.10 и 3.21 млрд лет. Три зерна циркона имеют палеоархейские конкордантные возрасты (3324, 3372 и 3416 млн лет), а три – палеопротерозойские – неархейские (2437, 2524 и 2528 млн лет).

Породы ханинской серии характеризуются отрицательными величинами  $\epsilon_{Nd}(1.9)$  от  $-11.3$  до  $-7.5$  и мезоархейскими значениями Nd модельных возрастов  $t_{Nd(DM)} = 3.1-2.8$  млрд лет ( $t_{Nd(C)} = 3.3-3.0$  млрд лет). На диаграмме « $\epsilon_{Nd}(t)$  – Возраст» фигуративные точки изотопных составов пород ханинской серии находятся в поле эволюции изотопного состава Nd тоналит-трондjemитовых гнейсов и гранитоидов Чаро-Олекминского геоблока Алданского щита и вне поля эволюции изотопного состава Nd метатерригенных пород удоканского комплекса Кодаро-Удоканского прогиба.

Полученные геохронологические и Nd изотопные данные свидетельствуют о том, что источниками сноса осадочных пород Нижнеханнинской грабен-синклинали являлись преимущественно мезо- и неархейские гнейсы и гранитоиды Чаро-Олекминского и Курультинского геоблоков при подчиненной роли палеоархейского и, возможно, палеопротерозойского – неархейского материала. Возраст осадочных пород Нижнеханнинской грабен-синклинали находится в интервале 2.65–1.95 млрд лет. Существенные различия источников сноса терригенных отложений Нижнеханнинской грабен-синклинали и Кодаро-Удоканского прогиба позволяют предполагать, что их накопление происходило в изолированных бассейнах.

Исследования выполнены при поддержке РФФ (проект № 21-17-00164).

- [1] Федоровский В.С. Стратиграфия нижнего протерозоя хребтов Кодар и Удокан. – М.: Наука. 1972. – 130 с.
- [2] Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000, новая серия, лист О-(50) 51 и объяснительная записка. Отв. ред. Е. П. Миронюк. – СПб.: ВСЕГЕИ. 1998. – 428 с.
- [3] Подковыров В.Н., Котов А.Б., Ларин А.М., Котова Л.Н., Ковач В.П., Загорная Н.Ю. Источники и области сноса раннепротерозойских терригенных пород удоканской серии южной части Кодаро-удоканского прогиба: результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований // ДАН. – 2006. – 408. – С. 223–227.
- [4] Ковач В.П., Котов А.Б., Гладкочуб Д.П., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Гороховский Б.М., Подковыров В.Н., Загорная Н.Ю., Плоткина Ю.В. Возраст и источники метапесчаников чинейской подсерии (Удоканская серия, Алданский щит): результаты U-

- Th-Pb геохронологического (LA-ICP-MS) и Nd изотопного изучения // ДАН. 2018. Т. 482. № 2. С. 1138-1141
- [5] Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Великославинский С.Д., Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Ларин А.М., Толмачева Е.В., Федосеенко А.М., Плоткина Ю.В. Верхняя возрастная граница формирования протолитов метаосадочных пород нижней части разреза удоканской серии (Алданский щит) // ДАН. 2018. Т. 479. № 4. С. 412-416.
- [6] Сочава А.В. Петрохимия верхнего архея и протерозоя запада Витимо-Алданского щита. – Л.: Наука. 1986. – 142 с.
- [7] Березкин В.И., Тимофеев В.Ф., Смелов А.П., Постников А.А., Тимошина И.Д., Зедгенизов А.Н., Попов Н.В. Геология и петрология палеопротерозойской Нижнеханнинской грабен-синклинали (Алдано-Становой щит): к проблеме поисков следов древней жизни на Земле // Отечественная геология. – 2007. – 5. – С. 62–71.
- [8] Горохов И.М., Тимофеев В.Ф., Бизунок М.В., Березкин В.И., Дук В.Л., Крылов И.Н., Кутявин Э.П., Мельников Н.Н., Смелов А.П. Rb-Sr системы в метаосадочных породах Ханнинского грабена (Олекминская гранит-зеленокаменная область) // Изотопная геохронология докембрия. – Л.: Наука. 1989. С. 110–126.
- [9] Попов Н.В., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Постников А.А., Тимофеев В.Ф., Березкин В.И., Ларин А.М., Федосеенко А.М., Яковлева С.З. Диабазы куранахского комплекса западной части Алдано-Станового щита: возраст и тектоническое положение // ДАН. – 2012. – 442. – С. 365–368.

## Возрастные рубежи формирования метаморфических комплексов Центральной Азии

*И.К. Козаков, Е.Б. Сальникова, В.П. Ковач, А.Б. Котов, Ю.В. Плоткина*

*Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [ivan-kozakov@yandex.ru](mailto:ivan-kozakov@yandex.ru)*

Среди кристаллических комплексов Центральной Азии, ранее относимых к аналогам фундамента древних платформ, преобладают неопротерозойские и фанерозойские образования. Установлено, к раннему докембрию относятся только фрагменты Байдарикского, Тарбагатайского и Гарганского террейнов. Ранее Байдарикский террейн включался в состав фундамента Дзобханского микроконтинента, рассматриваемого как раннедокембрийский. Позднее было показано, что раннедокембрийским является только Бумбугерский блок северо-западной части Байдарикского террейна. В Бумбугерском блоке был выделен архейский (~2650 млн лет) байдарагинский комплекс и бумбугерский – раннепротерозойский. Формирование тоналит-трондьемитовых гнейсов байдарагинского комплекса и метаморфизм гранулитовой фации происходили около 2650 и 2500 млн лет назад [1]. В бумбугерском комплексе проявлено два эпизода регионального метаморфизма, достигающих уровня гранулитовой фации в интервалах около 2410-2360 и 1850-1860 млн лет [1, 3] Сходные с байдарагинским комплексом возрастные рубежи метаморфизма были проявлены в породах идерского комплекса Тарбагатайского террейна –  $2542 \pm 1$  и  $1857 \pm$  млн лет.

Метаморфические комплексы раннего неопротерозоя широко представлены в террейнах Хангайской группы, которые представляют собой структуры, сложенные тектоническими пластинами и блоками пород разного возраста, состава и происхождения. Оценка возраста высокотемпературного метаморфизма пород Дзобхан-Мандалского блока составляет  $860 \pm 3$  млн лет –  $856 \pm 2$  млн лет [2]. Породы баяннурского комплекса Сонгинского блока испытали структурно-метаморфические преобразования в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации на рубеже  $802 \pm 6$  –  $790 \pm 3$  млн лет.

Южно-Хангайский метаморфический пояс (ЮХМП) позднего венда (570–545 млн лет) выделен между Бумбугерским блоком Байдарикского террейна и офиолитами Баян-Хонгорской зоны (665-577 млн лет); его породы не вовлекались в метаморфические преобразования раннего палеозоя. Завершение раннего эпизода метаморфизма (повышенного давления) в нем определяют дистенсодержащие пегматоидные граниты с возрастными  $561 \pm 12$  и  $562 \pm 2$  млн лет

и граниты с возрастом  $571 \pm 9$  млн лет; поздний эпизод метаморфизма (пониженного давления) происходил в интервале 550–540 млн лет.

В герцинском Южно-Алтайском метаморфическом поясе представлены тектонические пластины, развитые вдоль склона Гобийского, Монгольского и Китайского Алтая и Восточном Казахстане. В них уровень метаморфизма достигал условий амфиболитовой и, местами, гранулитовой фации. Ранний эпизод метаморфизма пониженного давления, и поздний – повышенного, происходили в интервалах  $\sim 395\text{--}385$  и  $375\text{--}360$  млн лет и были связаны с закрытием Южно-Монгольского океана. В структурах Китайского Алтая и Восточного Казахстана установлена сходная последовательность процессов метаморфизма. С погружением спредингового хребта под активную окраину обрамления каледонского палеоконтинента связан перерыв в развитии субдукционной зоны в интервале около 380–375 млн лет и метаморфизма раннего эпизода, что фиксируется внедрением роев даек базитов. Поздний эпизод метаморфизма ( $374 \pm 2\text{--}360 \pm 5$  млн лет) проявлен только в тектонических пластинах Алтая.

Раннемезозойский Южно-Гобийский метаморфический пояс был сформирован 230-220 млн лет в результате закрытия Внутренне-Монгольского бассейна с океанической корой тетического ряда [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-00297).

- [1] Козаков И.К., Сальникова Е.Б. Вонг Т., Диденко А.Н. и др. Кристаллические комплексы нижнего докембрия Дзобханского микроконтинента Центральной Азии: возраст, источники, тектоническая позиция // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2007. Т. 15. № 2. С. 3–24.
- [2] Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Ковач В.П. Диденко А.Н., и др. Формирование неопротерозойской континентальной коры в структурах центрального сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология. 2021. Т. 29. № 2. С. 55–65.
- [3] Козаков И.К., Ковач В.П., Сальникова Е.Б. и др. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования метаморфических комплексов юго-западной части Тувино-Монгольского террейна, Центрально-Азиатский складчатый пояс // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2021. Т. 29. № 4. С. 3–26.
- [4] Козаков И. К., Диденко А. Н., Азимов П. Я. и др. Геодинамические обстановки и условия формирования кристаллических комплексов Южно-Алтайского и Южно-Гобийского метаморфических поясов // Геотектоника. 2011. №3. С.7-30.

## Субсинхронный позднепалеозойский салический магматизм I- и A-типа Заалтайской Гоби: изменение геодинамического режима или разные условия магмогенерации?

*А.М. Козловский<sup>1</sup>, В.В. Ярмолюк<sup>1</sup>, Е.Б. Сальникова<sup>2</sup>, В.М. Саватенков<sup>2</sup>, А.В. Травин<sup>3</sup>,  
Ц. Оюунчимэг<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
[amk@igem.ru](mailto:amk@igem.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН

<sup>3</sup> Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН

<sup>4</sup> Улан-Батор, Институт палеонтологии и геологии МАН

Реконструкция геодинамических обстановок по составу салических магматических пород является очень заманчивым направлением геологических исследований. Это связано с тем, что определение возраста этих пород становится более доступно различными современными методами и остается только выяснить, какому геодинамическому событию соответствует полученный возраст. Однако геохимические характеристики кислых магматических пород далеко не всегда дают однозначный ответ на этот вопрос. Более того, в единых магматических комплексах нередко встречаются субсинхронные салические породы с контрастными геохимическими характеристиками. Формируются ли такие ассоциации в период смены или

наложения геодинамических режимом, или геохимические характеристики этих пород несут информацию только об их источнике или условиях плавления?

Юг Центрально-Азиатского складчатого пояса изобилует позднепалеозойскими гранитоидами и кислыми вулканическими породами, которые относятся к I-, A- и реже S-типу и, согласно геодинамическим классификациям, формировались в надсубдукционной, внутриплитной или постколлизивной обстановках. Выполненные геохронологические исследования для ряда объектов показали, что возраст этих пород в пределах аналитических ошибок неразличим. Наиболее яркими примерами являются гранитоидные массивы Отгон-Ула, Улан-Хайрхан и Адж-Богд в Заалтайской Гоби.

Массив эгирин-арфведсонитовых гранитов Отгон-Ула располагается в осевой части Заалтайской Гоби и прорывает вулканическую толщу дацитовых туфов. Геохимически щелочные граниты соответствуют A-типу, а дациты – I-типу. Геохронологические исследования цирконов показали возраст щелочных гранитов  $347 \pm 9$  млн лет (U-Pb ID-TIMS), а дацитовых туфов –  $340 \pm 2$  млн лет (SIMS). В пределах аналитических ошибок эти значения пересекаются. Массив арфведсонитовых гранитов Улан-Хайрхан прорывает зону меланжа между комплексами Заалтайской Гоби и Монгольского Алтая вблизи р. Бодончин. Аналогичное структурное положение занимает массив Bt-Amph гранитоидов в долине р. Барлыг, изученный [1] в 25 км к востоку. Первый массив имеет типичные характеристики пород A-типа, тогда как второй – I-типа. Исследования циркона U-Pb ID-TIMS методом из щелочных гранитов показали возраст  $358 \pm 1$  млн лет, тогда как Bt-Amph граниты были датированы по циркону LA-ICPMS методом  $354 \pm 4$  и  $360 \pm 6$  млн лет. Таким образом, в Заалтайской Гоби и в шовной зоне со структурами Монгольского Алтая в самом начале карбона субсинхронно протекал салический магматизм I- и A-типа.

Крупный многофазный массив Адж-Богд располагается в осевой части Заалтайской Гоби. Главная фаза массива представлена амфиболовыми двуполевошпатовыми гранитами I-типа. Поздняя фаза локально обнажена по периферии массива и представлена щелочнополевошпатовыми амфиболовыми гранитами A-типа. U-Pb ID-TIMS методом по циркону был определен возраст двуполевошпатовых пород главной фазы –  $295 \pm 1$  млн лет и щелочнополевошпатовых пород поздней фазы –  $294 \pm 5$  млн лет. Также поздняя фаза была датирована  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом по амфиболу –  $290 \pm 3$  млн лет. Все полученные значения возраста говорят о субсинхронном становлении гранитоидов I- и A-типа в массиве Адж-Богд.

Изотопные характеристики Nd изученных нами раннекарбонных и раннепермских пород показывают сходные значения  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$   $+6.6$  –  $+6.9$ , свидетельствующие о ювенильно-коровом источнике салических расплавов I- и A-типа. Породы массива р. Барлыг в соответствие с изотопным составом Hf цирконов [1] также имеют ювенильно-коровый источник, т.е. изотопный состав Nd и Hf геохимически разных гранитоидов показывает общность их источника, соответствующего среднепалеозойской континентальной коре Заалтайской Гоби.

Магматическая активность в девоне – раннем карбоне в Заалтайской Гоби была непрерывной, связанной с субдукционными процессами [2]. Салические магмы этого временного интервала преимущественно имели характеристики I-типа. Однако рассмотренный магматический импульс начала карбона приходится на смену характера вулканизма с доминирующего в девоне подводного базитового на субаэральный андезит-риолитовый в раннем карбоне. Эта смена была вызвана аккрецией Заалтайской островной дуги к Алтайской окраине Сибири [2] с утолщением континентальной коры и продолжением вулканизма более зрелого характера на аккретированной дуге. Таким образом, раннекарбонные гранитоиды A-типа фиксируют эпизод геодинамической перестройки, происходящей на фоне продолжающегося надсубдукционного салического магматизма I-типа.

Становление раннепермского массива Адж-Богд связано с масштабным магматическим импульсом, охватившим весь Центрально-Азиатский складчатый пояс от Тарима до Забайкалья. При этом в Заалтайской Гоби этот импульс пришелся спустя ~20 млн лет после завершения раннекарбонного надсубдукционного магматизма и связанного с ним орогенеза. В других регионах пояса раннепермский магматизм также не имеет связи с предшествующей

геологической историей и может рассматриваться как анорогенный. В связи с этим, синхронные гранитоиды I- и А-типа здесь связаны с единым анорогенным геодинамическим режимом.

Таким образом, в Заалтайской Гоби разные по геохимическому типу салические породы не всегда фиксируют разные геодинамические условия их формирования. При этом изотопная общность их источников говорит о том, что геохимические различия обусловлены в большей мере условиями магмогенерации, нежели неоднородностью протолита.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ, гранты 20-55-44001 и 20-05-00437.

- [1] Cai, K., Sun, M., Jahn, B.M. et al. A synthesis of zircon U–Pb ages and Hf isotopic compositions of granitoids from Southwest Mongolia: Implications for crustal nature and tectonic evolution of the Altai Superterrane. *Lithos*. 2015. V. 232. P. 131–142.
- [2] Козаков И.К., Козловский А.М., Ярмолюк В.В. и др. Геодинамические обстановки формирования поли- и монометаморфических комплексов Южно-Алтайского метаморфического пояса, Центрально-Азиатский складчатый пояс // *Петрология*. 2019. Т. 27. С. 233–257.

## **Возраст и корреляции позднедокембрийских осадочных и осадочно-вулканогенных комплексов Большого Каратау, Южный Казахстан: данные U–Pb датирования цирконов и Sr-хемотратиграфии**

*К.К. Колесов, Е.Ф. Летникова, А.В. Иванов, О.А. Спичак*

*Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, [konstkolosov@igm.nsc.ru](mailto:konstkolosov@igm.nsc.ru)*

В пределах Большого Каратау широко распространены позднедокембрийские осадочные и вулканогенно-осадочные породы. Наиболее древними считают осадочно-вулканогенные отложения кайнарской свиты. Выше с несогласием залегают карбонатные отложения бакырлинской свиты. Породы этих двух свит прорываются сиенитами Каратау-Джебаглинского массива. На основе U–Pb датирования цирконов из сиенитов этого комплекса был установлен их возраст –  $717 \pm 4$  млн лет [1]. С размывом на них залегают терригенные породы ранской свиты. Затем в осадочном бассейне Большого Каратау накапливались песчаные и глинистые породы карагурской аксумбинской и курумсакской свиты.

В качестве объекта исследования были выбраны отложения бакырлинской и курумсакской свиты. Бакырлинская свита имеет преимущественно карбонатный состав. Она представлена доломитизированными известняками, чаще доломитами. Во время полевых работ в разрезе бакырлинской свиты был впервые установлен горизонт вулканомиктовых песчаников и туфов мощностью около 60 м. Для U–Pb датирования из этого горизонта были отобраны две пробы: К 285/19 и К 286/19 (N  $44^{\circ}18'55,3''$ , E  $067^{\circ}43'36,0''$ ).

В настоящий момент для карбонатных пород бакырлинской свиты имеется пилотная коллекция (110 проб). Все образцы представлены доломитами ( $Mg/Ca = 0,48-0,56$ ), для большинства из них установлены высокие концентрации Fe (от 1140 до 14800 ppm) и низкие Sr (от 42 до 117 ppm). Подобные геохимические характеристики указывают на постседиментационные преобразования карбонатных пород бакырлинской свиты. Лишь два образца из этой коллекции оказались пригодными для целей Sr-хемотратиграфии. Отношение  $^{87}Sr/^{86}Sr$  в них имеет значения 0.7062 и 0.7065. Подобные изотопные отношения были установлены для карбонатных пород, накапливающихся 700–750 млн лет назад. Полученные нами данные мы рассматриваем как изотопные метки, не позволяющие ввиду их малочисленности использовать в полной мере при хемотратиграфических построениях. Исследования в этом направлении будут продолжены.

При этом, наличие вулканического горизонта в разрезе бакырлинской свиты позволяет установить время ее образования. Средневзвешенное значение возраста наиболее молодой популяции цирконов из двух проб К 285/19 и К 286/19 составляет возраст  $756 \pm 13$  млн лет. Полученные результаты позволяют нам на основе данных о возрасте синхронного с

карбонатной седиментацией вулканизма и прорывающих их гранитоидов Каратау-Джебаглинского массива ограничить время седиментации пород бакырлинской свиты в интервале 720-760 млн лет, что согласуется с данными Sr-хемостратиграфии.

Важную информацию представляют собой данные о более древних возрастных популяциях цирконов в изученных пробах вулканомиктовых породах. Основная популяция цирконов имеет возраст 2,0-2,1 млрд лет и связана с метафорическим событием в этом интервале времени. Второй менее проявленный этап метаморфизма фиксируется в популяции цирконов на границе палеопротерозоя и неоархея (2,5 млрд лет). Представительной является группа цирконов на уровне 775 млн лет с четко выраженной осцилляторной зональностью. Возрастная популяция цирконов в интервале 1,0-1,1 млрд лет имеет различные структурные особенности и отражает этап тектоно-магматической активизации. В целом, полученные данные позволяют нам утверждать, что накопление пород бакырлинской свиты происходило в пределах древнего континентального блока с длительной историей развития.

Выше по разрезу были изучены породы курумсакской свиты, которая представлена валунно-щебнистыми конгломератами, доломитами, кремнистыми и углисто-глинистыми ванадиевыми сланцами. Для U-Pb датирования из матрикса конгломератов была отобрана проба К 44/18. Наиболее молодой является популяция из 4 зерен со средневзвешенным значением возраста 670 млн лет. Данная популяция цирконов позволяет установить нижнюю возрастную границу накопления курумсакской свиты и указывает, что накопление этих пород происходило не древнее 670 млн лет. Наиболее многочисленной является популяция неопротерозойского возраста из 55 зерен, с пиком на 780 млн лет. Популяция с аналогичным возрастом наблюдается в бакырлинской свите, что еще раз свидетельствует о широком распространении в позднем докембрии среди источников сноса пород, образованных в результате магматического события в вышеуказанное время. Небольшая популяция представлена 5 зернами с пиком на 830 млн лет. Следующая популяция цирконов состоит из 12 зерен с возрастным пиком 900 млн лет. Встречаются единичные зерна мезопротерозойского возраста 1.4 млрд лет и палеопротерозойского возраста 1.7 млрд лет. Имеется популяция из 6 зерен палеопротерозойского возраста с пиком 2.04 млрд лет. Популяция с аналогичным возрастом наблюдается в бакырлинской свите. Имеется порядка 10 зерен на границе палеопротерозоя и неоархея среди которых можно выделить популяцию из 3 зерен с пиком на 2.47 млрд лет. Наиболее древним является зерно мезоархейского возраста 2.97 млрд лет.

Проведенные исследования позволили нам установить временной интервал седиментации и синхронного с ней вулканизма бакырлинской свиты в интервале 720-750 млн лет и получить возрастную границу накопления курумсакской свиты, накопление которой происходило не древнее 670 млн лет. Возрастные популяции цирконов в вулканомиктовых породах бакырлинской и курумсакской свит указывают на постоянство источников сноса в позднем докембрии в осадочные бассейны при накоплении этих свит в обстановках окраины древнего континентального блока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 19-17-00099.

- [1] Дягтерев К.Е., Третьяков А.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б. Кумыстинский граносиенитовый комплекс позднего криогения в Большом Каратау (Южный Казахстан), обоснование возраста // Доклады Академии наук, 2019, том 484, №5, с. 579-583.

## U-Pb возраст циркона, рутила и титанита в ксенолитах из трубки Нюрбинская, Якутия

*М.Ю. Корешкова<sup>1</sup>, Х. Даунс<sup>2</sup>, М.В. Стифеева<sup>3</sup>, Е.Ю. Акимова<sup>1</sup>,  
И. Пейчева<sup>4</sup>, Д. Димитрова<sup>4</sup>, Л. Мачева<sup>5</sup>, А.Н. Ларионов<sup>6</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, [m.koreshkova@spbu.ru](mailto:m.koreshkova@spbu.ru)

<sup>2</sup> London, UK, Birkbeck University of London, [h.downes@ucl.ac.uk](mailto:h.downes@ucl.ac.uk)

<sup>3</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [stifeeva.maria@yandex.ru](mailto:stifeeva.maria@yandex.ru)

<sup>4</sup> Sofia, Bulgaria, Geological Institute "Strashimir Dimitrov", Bulgarian Academy of Sciences

<sup>5</sup> Sofia, Bulgaria, Institute of Mineralogy and Crystallography "Acad. Ivan Kostov", Bulgarian Academy of Sciences

<sup>6</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, [a.larionov@vsegei.ru](mailto:a.larionov@vsegei.ru)

Ксенолиты мафических гранатовых гранулитов из трубки Нюрбинская содержат циркон, рутил и титанит, являющиеся минералами-геохронометрами с разными температурами «закрытия» U-Pb изотопной системы. Датирование этих минералов может позволить восстановить термальную историю нижнекоровых пород. Это открывает новые перспективы для реконструкции тектонической истории Мархинского террейна Сибирского кратона и оценки времени стабилизации континентальной коры данной области, когда температура понизилась до значений, характерных для докембрийских кратонов в настоящее время.

Ряд особенностей свидетельствует о неравновесности минеральной ассоциации в ксенолитах. К-паргасит, скаполит и титанит появились в породах позже минералов гранулитовой ассоциации (альмандин, Na-Al-диопсид, рутил, ильменит, апатит, циркон, олигоклаз и кварц). Рутил присутствует в основной массе и во включениях в гранате, часто имеет каймы ильменита. К-паргасит окаймляет зерна граната, но отсутствует во включениях в гранате. Титанит обнаружен в двух образцах (Nur1, Nur30) в виде самостоятельных зерен в основной массе и кайм вокруг зерен рутила и ильменита. Во включениях в гранате титанит не встречается. Зерна граната зональны, характеризуются уменьшением магнезиальности и содержания Са от центра к краю. При этом состав меняется в пределах кайм 200-300 мкм шириной, тогда как состав центральных частей зерен остается постоянным. Такая зональность обусловлена диффузионным обменом с диопсидом в ходе декомпрессии и понижении температуры.

Оценка температуры и давления с помощью Grt-Cpx термометра [1] и Grt-Cpx-Pl-Qtz барометра [2] и моделирование фазовых равновесий показали, что гранулитовая ассоциация устойчива при  $T > 600$  °C и  $P > 0.8$  ГПа (650-710 °C, 1.0-1.2 ГПа по данным термобарометрии). Оценка температуры по содержанию Zr в рутиле [3] составляет 810-850 °C и отражает максимальные параметры стадии гранулитового метаморфизма.

Появление амфибола и скаполита свидетельствуют о наложенном метаморфизме при температуре  $< 620$  °C и давлении  $< 1.0$  ГПа, сопровождавшемся привнесением флюида. Условия амфиболитовой фации метаморфизма также установлены для ксенолитов амфибол- и скаполитсодержащих гранатовых гранулитов из трубки Удачная [4]. Скаполитсодержащий гранулит Nur30 отличается от остальных большим содержанием Са в гранате и в плагиоклазе и характером зональности граната. В этом образце содержание Са в гранате постепенно увеличивается от центра к краю при уменьшении магнезиальности. В данном случае мы предполагаем продолжение роста граната при понижении температуры в присутствии флюида.

Появление титанита связано с новой стадией метаморфических преобразований в присутствии флюида при  $T < 600$  °C и  $P < 0.7$  ГПа, вне области устойчивости граната.

U-Pb (SHRIMP II, ВСЕГЕИ) возраст метаморфогенных цирконов из образцов Nur21 и Nur27 составляет  $1848 \pm 30$  и  $1876 \pm 15$  млн лет, соответственно. Цирконы имеют низкие концентрации тяжелых редкоземельных элементов ( $Yb_N/Dy_N = 0.9-3.2$ ) и, следовательно, росли в равновесии с гранатом. Для циркона из образца Nur27 на основе данных по редкоземельным элементам можно предполагать равновесную кристаллизацию с периферическими (поздними) зонами граната. Следовательно, образование циркона отвечает не пиковым условиям гранулитового метаморфизма, а последовавшему наложенному метаморфизму амфиболитовой фации. В



ксенолите Nur21 составы циркона и граната, вероятно, неравновесны. Для этих ксенолитов можно предположить появление циркона при замещении рутила ильменитом, то есть, при понижении давления. Метаморфические цирконы из ксенолитов из трубки Нюрбинская, изученные В.С. Шацким с соавторами [5], древнее 1835 млн лет, и распределение возрастных значений указывает на события около 1.93 и 2.1 млрд лет назад. Эти данные могут отражать разные метаморфические события. Таким образом, возраст последнего гранулитового метаморфизма остается неопределенным.

U-Pb (ID-TIMS, ИГГД РАН) конкордантный возраст титанита составляет  $1850 \pm 5$  млн лет (СКВО = 1.6). Рутилы из образцов Nur 1, Nur 30, Nur 21 и Nur 27 характеризуются дискордантными U-Pb возрастными, а средняя величина возраста ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) составляет  $1481 \pm 27$  млн лет. Принимая во внимание достаточно «низкую» (450-500 °C) температуру закрытия U-Pb изотопной системы рутила, данная оценка возраста, скорее всего, отражает этап остывания пород до 400 °C. Но нельзя исключить такое термальное событие, которое затронуло U-Pb систему рутила, но никак не отразилось на остальных минералах.

Таким образом, мафические гранулиты испытали ретроградный метаморфизм в условиях амфиболитовой фации 1.85 млрд лет назад. P-T-параметры этого процесса близки к условиям стабильной континентальной нижней коры. Следует отметить, что метаморфическое событие не привело к полному изменению минеральной ассоциации, и гранулитовая минеральная ассоциация сохранилась в реликтовом виде.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-55-18017.

- [1] Ravna, E.K. The garnet–clinopyroxene  $\text{Fe}^{2+}$ -Mg geothermometer: an updated calibration // Journal of Metamorphic Geology. – 2000. – 18. – P. 211-219.
- [2] Newton R.C., Perkins D. III. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblage garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz // Amer. Miner. – 1982. – 67. – P. 203-222.
- [3] Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contrib. Mineral. Petrol. – 2006. – 151. – P. 413–433.
- [4] Perchuk A.L., Sapagina A.V., Safonov O.G., Yapaskurt V.O., Shatsky V.S., Malkovets V.G. Reduced amphibolite facies conditions in the Precambrian continental crust of the Siberian craton recorded by mafic granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia // Precambrian Research. – 2021. – 357. – 106122.
- [5] Shatsky V.S., Ragozin, A.L., Qin Wang, Meiqian Wu. Evidence of Eoarchean crust beneath the Yakutian kimberlite province in the Siberian craton // Precambrian Research. – 2022. – 369. – 106512.

### **Ar-Ar датирование среднепалеозойского базитового магматизма Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции, восток Сибирской платформы**

*О.В. Королева<sup>1</sup>, А.В. Прокопьев<sup>1</sup>, О.П. Полянский<sup>2</sup>, Д.А. Васильев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Якутск, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, [o.v.koroleva@diamond.ysn.ru](mailto:o.v.koroleva@diamond.ysn.ru),  
[prokopiev@diamond.ysn.ru](mailto:prokopiev@diamond.ysn.ru)

<sup>2</sup> Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН, [pol@igm.nsc.ru](mailto:pol@igm.nsc.ru)

Среднепалеозойский Вилуйский палеорифтовый бассейн в восточной части Сибирской платформы и сопряженная с ним Якутско-Вилуйская крупная изверженная провинция (ЯВ КИП) (объем основных магматических пород около 200000 км<sup>3</sup>), охватывающая всю ее территорию — один из масштабных примеров совместного проявления рифтогенной и магматической активности [10 и ссылки там]. Нами было проведено определение возраста внедрения даек и силлов на основе метода  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопных отношений в плагиоклазе и клинопироксене (ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, г. Новосибирск). Проанализированы образцы габбро-долеритов и кварцевых монзонит-порфиров из даек трех основных дайковых поясов,

расположенных на бортах Виллойского палеорифта (с северо-запада на юго-восток вкострости простирается бассейн): Виллойско-Мархинского, Контайско-Джербинского, Чаро-Синского [10]. Поля распространения силлов, установленные по данным средне- и крупномасштабных аэромагнитных и гравиметрических съемок и глубокого бурения, находятся в основном в центральной области бассейна. Впервые проведено  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование долеритовых силлов по керновому материалу глубоких скважин: трех скважин, пробуренных в пределах Виллойско-Мархинского дайкового пояса, шести – Чаро-Синской зоны разломов [5]. Датировки относятся к девонскому этапу магматизма (360–380 млн лет) с проявлением двух импульсов дайкового магматизма в ЯВ КИП – 374,1±3,5 млн лет (фран/фамен) и 363,4±0,7 млн лет (поздний девон), установленных нами [10], или 380–370 и 365–360 млн лет по данным [3].

Полученные геохронологические данные позволили провести корреляцию между временем формирования даек, этапами растяжения литосферы и быстрого опускания фундамента в различных прогибах осадочного бассейна и скоростью осадконакопления (до 120–130 м/млн лет при фоновом 10–20 м/млн лет) в нем, предложить термомеханическую модель образования рифта при совмещении внутриплитного растяжения и подъема мантийного плюма, обосновать плюмовую природу теплового источника магматизма [4].

Точные данные по возрасту магматических событий важны также для палеогеографических и палеоклиматических реконструкций и понимания абиотических факторов биотических кризисов. В последнее время все чаще устанавливается причинно-следственная связь между формированием КИП и массовыми вымираниями (ордовик, девон, пермь-триас и др.) [6, 8, 9 и др.]. Так, формирование ЯВ КИП (Сибирский кратон) относится к фран-фаменскому событию – 380–360 млн лет (импульсы 374 и 363 млн лет) и рассматривается как одна из причин девонского массового вымирания. Магматические события примерно этого возраста известны и в других частях земного шара. Кедонское событие (Омолонский кратон) – ~400–345 млн лет [1, 2], возможно связанное с ЯВ КИП, Кольско-Днепровская КИП (Восточно-Европейский кратон) – 380–360 млн [7], условно имеют один и тот же возрастной диапазон, могли быть связаны с одним и тем же суперплюмом и способствовать девонскому массовому вымиранию [4]. Для подтверждения и уточнения этих гипотез необходимы точные геохронологические данные.

Работа выполнена по плану НИР ИГАБМ СО РАН и ИГМ СО РАН.

- [1] Акинин В.В., Миллер Е.Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // *Петрология*. – 2011. – № 3. – С. 249–290.
- [2] Гагиева А.М. Вулканы кедонской серии среднего палеозоя в составе крупной изверженной провинции (LIP) Омолонского массива // *Геология, география, биологическое разнообразие и национальные ресурсы Северо-Востока России: III Всероссийская конференция памяти А.П. Васильковского*. – Магадан, 2016. – С.118–120.
- [3] Масайтис В.Л. Девонский вулканизм Патомско-Виллойского авлокогена: многократное плавление неоднородных мантийных источников // *Региональная геология и металлогения*. – 2006. – № 29. – С. 27–49.
- [4] Полянский О.П., Прокопьев А.В., Королева О.В., Томшин М.Д., Ревердатто В.В., Бабичев В.В., Свердлов В.Г., Васильев Д.А. Природа теплового источника базитового магматизма при формировании Виллойского рифта на основе данных о возрасте дайковых поясов и численного моделирования // *Геология и геофизика*. – 2018. – Т. 59. – № 10. – С. 1519–1541.
- [5] Прокопьев А.В., Полянский О.П., Королева О.В., Васильев Д.А., Томшин М.Д., Ревердатто В.В., Новикова С.А. Среднепалеозойский и среднетриасовый импульсы траппового магматизма на востоке Сибирской платформы: результаты первых  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датировок долеритовых силлов // *Докл. РАН*. – 2020. – Т. 490. № 1. – С. 7–11.
- [6] Burgess S.D., Bowring S.A., Fleming T.H., Elliot D.H. High-precision geochronology links the Ferrar Large igneous province with early-Jurassic ocean anoxia and biotic crisis // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2015. – Vol. 415. – P. 90–99.
- [7] Ernst R.E. *Large Igneous Provinces*. – Cambridge University Press, 2014. – 653 p.
- [8] Ernst R.E., Rodygin S.A., Grinev O.M. Age correlation of Large Igneous Provinces with Devonian biotic crises // *Global and Planetary Change*. – 2020. – Iss 185. – Art. 103097.

- [9] Khudoley A.K., Prokopiev A.V., Chamberlain K.R., Savelev A.D., Ernst R.E., Malyshev S.V., Moskalenko A.N., Lebedeva O.Yu. Late Ordovician Mafic Magmatic Event, Southeast Siberia: Tectonic Implications, LIP Interpretation, and Potential Link with a Mass Extinction // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – Iss. 12. – Art. 1108.
- [10] Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Selyatitsky A.Yu., Travin A.V., Vasiliev D.A. Temporal correlation between dyke swarms and crustal extension in the Middle Palaeozoic Vilyui rift basin, Siberian platform // *Lithos*. – 2017. – Vol. 282/283. – P. 45–64.

## Структурные соотношения в фундаменте СВ Свальбарда: U-Pb возраста детритовых цирконов из пород серии Моссель (СВ Шпицберген) и псаммитов Северо-Восточной Земли

*Н.В. Костева<sup>1</sup>, А.Н. Ларионов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, ФГБУ «ВНИИОкеангеология», [natnt2001@mail.ru](mailto:natnt2001@mail.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, ФГБУ ВСЕГЕИ, [alexander\\_larionov@vsegei.ru](mailto:alexander_larionov@vsegei.ru)

Восточный террейн фундамента Свальбарда включает п-в Нью Фрисланд (НФ), о-в Северо-Восточная Земля (СВЗ) и окружающие малые острова до о-ва Белый на востоке [1]. На западе НФ породы комплекса Атомфьелла сгружены в серию надвигов, сложенных мезопротерозойскими метаосадками, чередующихся с позднепалеопротерозойскими (ок.1.75 млрд. лет) гранитоидами [2]. Формирование комплекса произошло в условиях амфиболитовой фации метаморфизма в каледонское время [3]. Фундамент СВЗ слагают (снизу вверх) кластические осадки Бренневинсфьорд (<1050 млн. лет, направление транспорта не определено), несогласно перекрытые вулканитами Кап-Ханстен с активно-окраинными характеристиками (950-960 млн. лет) [1]. Последние несогласно перекрыты обломочно-карбонатной серией Мёрчисонфьорд (направление транспорта с В-ЮВ), породы которой омолаживаются в западном направлении к синклинали пролива Хинлопен, где они венчаются кембрийско-раннеордовикскими карбонатами [4]. На западном берегу прол. Хинлопен также обнажены раннеордовикскими карбонаты, переходящие к западу в неопротерозойские осадки: в направлении к контакту с комплексом Атомфьелла степень деформации и метаморфизма нарастает и базальные части разреза (серия Моссель) слагают гнейсы и кварциты с пластовыми телами метаперидотитов.

Для анализа цирконов были отобраны пробы из: 1 (СВЗ) псаммиты нижней – средней (но не базальной) свит серии Мёрчисонфьорд (снизу вверх: Вестманбухта, Кап-Лорд и Флора), псаммиты Бренневинсфьорд (на СВЗ и в центре СВЗ) а также мигматиты Дамфлюа; 2 (север НФ) – гнейсы и кварциты из базальной части серии Моссель. U-Pb анализ выполнялся средствами LA-ICP-MS и SIMS.

Наибольшая часть датировок детрита Бренневинсфьорд примерно равномерно распределена в диапазоне 1050-1825 млн. лет с типичным северо-атлантическим отсутствием цирконов в диапазоне 2.1-2.4 млрд. лет. Примечательно, что с 1.75 млрд. лет возрасты, характерные для комплекса Атомфьелла (западный НФ) нисколько не преобладают, а умеренные пики 1.25, 1.47, 1.70 и 1.82 млрд. лет сходны с импульсами магматизма в южной-центральной Скандинавии. Максимальные (неоархейские, ок.2.75 млрд. лет) возрасты – весьма редки.

Из мигматитов Дамфлюа сделано лишь небольшое число анализов: результаты варьируют от 1.08 до 1.90 млрд. лет.

Возрасты цирконов из песчаников Вестманбухта образуют s.l. два широких кластера: 0.93 – 1.48 и 1.60 – 2.10 млрд. лет, лишь 3 циркона имеют неоархейский возраст. Зёрна свекопорожского возраста присутствуют, но не доминируют. Возрасты распределены сравнительно равномерно.

Большинство цирконов из псаммитов Кап-Лорд демонстрируют Мезопротерозойские возрасты (1.05 – 1.20 т.ж. имеется заметный пик ок. 1.47 млрд. лет.), число свекопорожских цирконов (ок. 950 млн. лет) – незначительно, палеопротерозойские и архейские индивиды – единичные.

Детритовые цирконы из песчаников Флора дали спектр возрастов сходный с таковым для св. Кап-Лорд, однако количество свеко норвежских датировок (ок. 950 млн. лет) несколько больше, как и число палеопротерозойских (пик ок. 1.84 млрд. лет) цирконов.

В популяции цирконов из базальных гнейсов Моссель резко доминируют свеко норвежские неокатаные зёрна с магматической зональностью роста. Нео- и мезопротерозойские цирконы (1.06-1.40 и 1.50-1.80 млрд лет) составляют незначительную часть, нео-мезоархейские – единичные. Слабо развитые метаморфические КЛ-яркие каймы указывают на их рост во время каледонской орогении. Незначительный рост кайм предполагает дефицит флюида.

Возрасты цирконов из базальных кварцитов Моссель можно сгруппировать в 3 кластера: 1.20-1.30, 1.35-1.55 и 1.60-1.75 млрд лет с единичными палеопротерозойскими и нео-мезоархейскими датировками.

Кварциты Моссель хорошо коррелируют с осадками Бренневинсфьорд (K-S Test  $P=0.216$ ) как и детрит из мигматитов Дамфлюа (хотя, статистически не вполне надёжно). Возрасты и морфология/структура цирконов из гнейсов Моссель наиболее вероятно предполагает корреляцию с вулканитами Кап-Ханстен. Популяции из песчаников Флора и Кап-Лорд, видимо, имеют сходные источники детрита, тогда как детрит Вестманбукта происходит из иных источников. Незначительность в осадках серии Мёрчисонфьорд свеко норвежской компоненты указывает на ограниченную обнажённость этих последних в палеорельефе.

Отсутствие свеко норвежских датировок в комплексе Атомфьелла и их значительное наличие в гнейсах Моссель (наряду с отсутствием характерных для первого 1.75 млрд. -летних цирконов) указывает на необходимость разделения Восточного Террейна фундамента Свальбарда на две части, совмещённые по сдвигу каледонской орогенией. Спектр возрастов детритовых цирконов в породах Мёрчисонфьорд не противоречит их сносу из Скандинавии. Различие возрастов детрита из псаммитов Вестманбукта и перекрывающих Кап-Лорд – Флора указывает на некую перестройку в области источников сноса.

Наличие цирконов с возрастом 1.37 млрд лет, синхронных базитовым дайкам западного НФ, СВ Гренландии [5] и СВ Таймыра требует проверки на соответствие упомянутых цирконов характеристикам таковых их базитов (высокий U,  $Th/U > 1$ ), однако, указывает на вероятность принадлежности западного НФ, СВ Гренландии и СВ Таймыра единой провинции с базитовым магматизмом (с. 1.37 Ga LIP?).

- [1] Gee, D.G. and Tebenkov, A.M., 2004. Svalbard: a fragment of the Laurentian Caledonian margin. In: The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica. (D.G. Gee and V. Pease, eds). // Geol. Soc. London Mem., -2004. -30. P. 191– 206.
- [2] Witt-Nilsson, P. The West Ny Friesland Terrane. An Exhumed Mid-Crustal Obliquely Convergent Orogen. // Acta Universitatis Upsaliensis. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology -1998. -415. P.1-28.
- [3] Gee, D. G. & Page, L. M. Caledonian Terrane Assembly on Svalbard: New Evidence from Ar/Ar Dating in Ny Friesland. Am. J. of Science, -1994. -294, P.1166-1186.
- [4] Johansson Å., Gee D. G., Larionov A. N., Ohta Y and Tebenkov A. M. Grenvillian and Caledonian evolution of eastern Svalbard – a tale of two orogenies. // Terra Nova. -2005. -17 No.4. P.317-325.
- [5] Bazarnik J, Majka J, McClelland WC, Strauss J.V., Kościńska K., Piepjohn K., Elvevold S., Czaput Z., Mikuš T. U-Pb zircon dating of metaigneous rocks from the Nordbreen Nappe of Svalbard's Ny-Friesland suggests their affinity to Northeast Greenland. // Terra Nova. 2019; -00. P.1-9. DOI:10.1111/ter.12422

## Изотопно-геохимические критерии рудоносности интрузивных пород Норильского региона

*Ю.А. Костицын, Н.А. Криволицкая, А.В. Сомсикова, М.О. Аносова*

Москва, ГЕОХИ РАН, [kostitsyn@geokhi.ru](mailto:kostitsyn@geokhi.ru)

В докладе обобщены ранее опубликованные и вновь полученные изотопно-геохимические данные (Sr-Nd-Pb-S, главные и примесные элементы) для магматических пород Норильского региона, включая промышленные Cu-Ni-PGE рудоносные гиганты Норильск-1, Талнах, Хараелах, непромышленные рудоносные (Черногорский, Зуб, Вологочанский, Южнопясинский, Имангдинский и Норильск-II), безрудные, а также вулканогенные свиты пермо-триасового возраста. Полный список литературных источников будет представлен в докладе. По ряду геохимических параметров рудоносные породы существенно отличаются от безрудных и слабо-рудоносных. Наиболее яркие различия наблюдаются в изотопном составе неодима (рис. 1), который для 139 образцов пород рудоносных тел колеблется в очень узком диапазоне,  $\epsilon_{Nd}(T) = +1.0 \pm 1.0$  (2s), тогда как для безрудных интрузивных пород  $\epsilon_{Nd}(T)$  варьирует в широком диапазоне от -12.3 до +4.7. Столь же широки вариации изотопного состава неодима и в вулканитах.

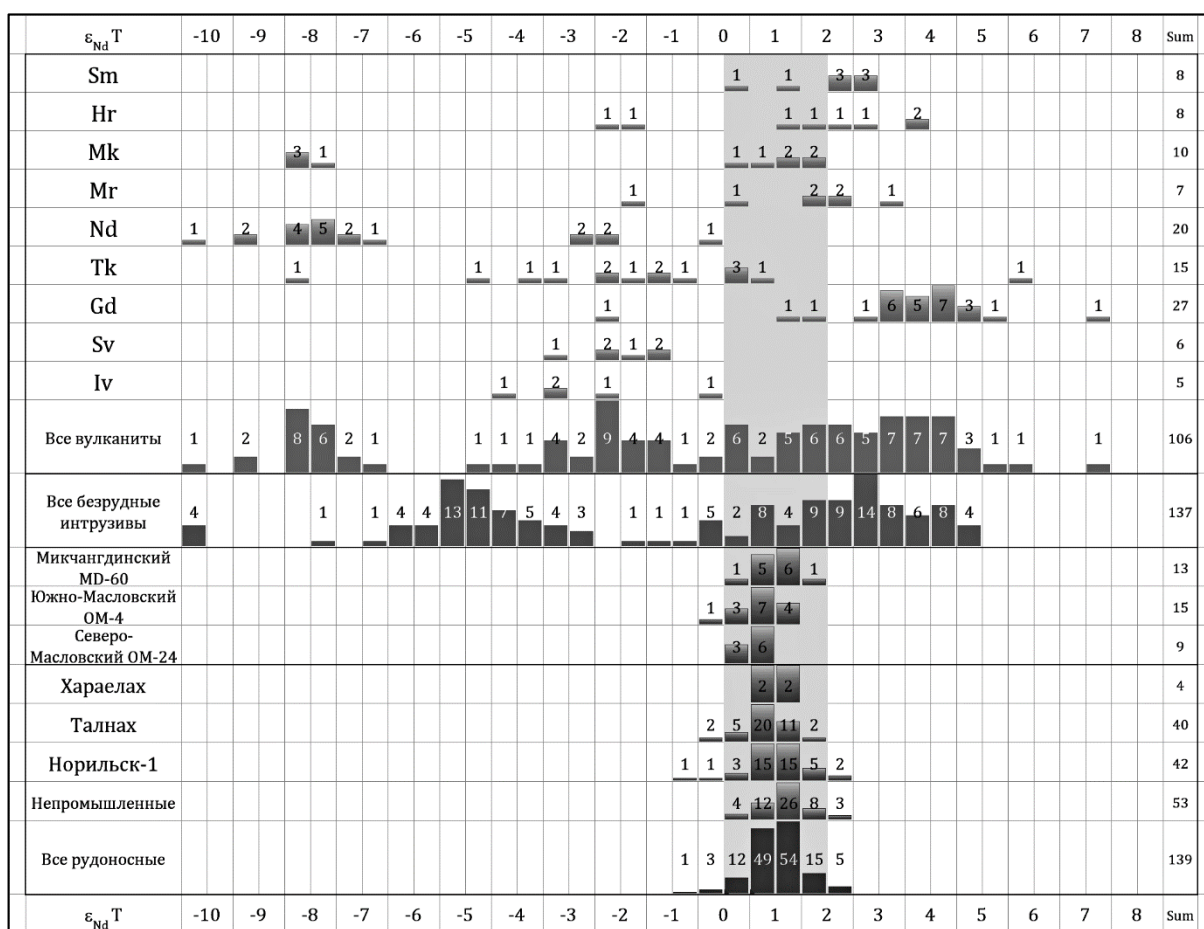


Рис. 1. Гистограммы  $\epsilon_{Nd}(T)$  для интрузивных и вулканогенных пород Норильского региона.

Мы провели изотопно-геохимические исследования ряда интрузивных тел Норильского региона, которые потенциально могут представлять поисковый интерес в отношении их рудоносности. Изучены интрузивные породы Микчангдинской площади, вскрытые скважиной MD-60, Южно-Масловского (скв. ОМ-4) и Северо-Масловского (скв. ОМ-24) интрузивных тел. Изотопные отношения неодима в породах всех трёх интрузивных тел попадают в «рудоносный» интервал  $\epsilon_{Nd}(T) = +1.0 \pm 1.0$ , установленный для промышленных гигантов и непромышленных

рудоносных интрузивов. Мы полагаем, что эти тела заслуживают пристального изучения в отношении их рудоносности.

Изотопные отношения стронция, свинца и серы также демонстрируют систематические различия для рудоносных и нерудоносных пород, хотя и менее яркие. Также в породах рудоносных интрузивов очень компактны парные отношения редкоземельных элементов и, в частности, La/Lu отношения в сравнении с нерудоносными интрузивными породами и вулканитами.

В докладе обсуждаются причины широких вариаций изотопных отношений Sr-Nd-Pb-S в безрудных и слабо-рудоносных магматических породах, а также причины изотопно-геохимических различий между рудоносными и нерудоносными магматическими породами.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант 22-27-00387.

## Геохронология редкометалльных (Li, Cs) пегматитов пояса Колмозеро-Воронья (Кольский регион)

*Н.М. Кудряшов<sup>1</sup>, О.В. Удоротина<sup>2</sup>, А.А. Калинин<sup>1</sup>, Е.В. Галеева<sup>1</sup>, М. Гроув<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Апатиты, Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, [nik@geoksc.apatity.ru](mailto:nik@geoksc.apatity.ru)

<sup>2</sup> Сыктывкар, Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,

<sup>3</sup> Стэнфордский Университет, США

Важной задачей при изучении редкометалльных пегматитов является установление их генетической связи с гранитами, если таковая имеется, и определение времени рудной минерализации. Ответы на эти вопросы связаны с изотопно-геохронологическими исследованиями как родоначальных для пегматитов гранитов, так и непосредственно самих пегматитов. Архейский зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья представлен осадочно-вулканогенными породами позднеархейского возраста (2.9-2.5 млрд. лет). В его пределах сконцентрированы месторождения редкометалльных пегматитов (Li, Cs с попутными Nb, Ta, Be). В северо-западной части пояса расположены месторождения лития и цезия Охмыльк, Васин-Мыльк, Оленинское и Полмостундра, в юго-восточной части – крупнейшее месторождение сподуменовых пегматитов Колмозерское. Пегматитовые поля северо-западных месторождений размещены среди амфиболитов пояса, Колмозерские сподуменовые пегматиты прорывают интрузивное тело габбро-анортозитов Патчемварекского массива с возрастом 2.93 млрд. лет. Возрасты пегматитов, выделяемых в пределах пояса, по имеющимся изотопно-геохронологическим определениям разными методами и по разным минералам отражают довольно широкий временной диапазон 2.7-1.8 млрд. лет. Определения возрастных данных для гранитоидов как возможных источников вещества редкометалльных пегматитов северо-западного поля оценивается ~ 2.5 млрд. лет [1], для юго-восточной части пояса, в районе размещения сподуменовых пегматитов Колмозерского месторождения, определен возраст турмалин-мусковитовых гранитов 2.8-2.7 млрд. лет [2].

*Месторождение Охмыльк.* Пегматитовое поле месторождения занимает площадь около 600 м<sup>2</sup>, прослеживается по простиранию на 1.25 км и характеризуется высокой насыщенностью пегматитовыми жилами. Для изотопно-геохронологического U-Pb (SHRIMP-RG) изучения была взята проба из жилы лепидолит-турмалин-сподуменовой состава. Циркон, выделенный из пробы, представлен идиоморфными, изометричными и близкими к изометричным дипирамидальными и дипирамидально-призматическими полупрозрачными трещиноватыми кристаллами, реже ксеноморфными зернами серого, серо-коричневого цвета. Размеры не превышают 1 мм и наиболее часто составляют 0.3-0.5 мм. Индивиды циркона развиты преимущественно с альбитом и кварцем, присутствуют сростания циркона с минералами группы колумбита. Внутреннее строение циркона характеризуется центральными участками в виде пятнистой текстуры с включениями урановых оксидов, во внешних частях некоторых кристаллов отчетливо выделяются узкие участки с признаками поздней перекристаллизации. Для 4 проанализированных точек циркона из центральных зон получен дискордантный возраст 2607±9 млн. лет, СКВО=0.87, который отражает время формирования пегматитов месторождения Охмыльк. Аналитические данные 2-х точек из перекристаллизованных зон

составили  $1719 \pm 65$  млн. лет и  $1666 \pm 23$  млн. лет, что указывает на более поздние, вероятно, метасоматически-гидротермальные процессы.

*Месторождение Васин-Мыльк.* Пегматитовое поле месторождения Васин-Мыльк с продуктивной ассоциацией лепидолит-альбит-микроклин-сподумен-поллуцит расположено среди амфиболитов. Незначительные по размеру участки выходов пегматитов на поверхность прослежены на глубину при прохождении шурфов и скважин. Месторождение представляет собой субпараллельные пологие зональные жилы протяженностью до 220 м при мощности 5 м. Среди разнообразных минералов, часто представленных в пегматитовых жилах несколькими генерациями, к наиболее ранним относятся минералы группы колумбита-танталита, микролит, симпсонит, торолит, циркон [3, 4]. Ранее был проанализирован микролит ранней генерации U-Pb (ID TIMS) методом, возраст которого составил  $2454 \pm 8$  млн. лет [5]. Циркон из пегматитовых жил здесь представлен двумя резко отличающимися по составу генерациями: высокоурановые единичные кристаллы ранней генерации, а также основная масса практически безуранового высокогафниевого циркона поздней генерации. Для циркона поздней генерации, в котором содержания урана составляли всего 0.2-0.3 ppm, не представлялось возможным определение U-Pb возраста [6]. U-Pb методом (SHRIMP-RG) были проанализированы несколько кристаллов циркона ранней генерации. Циркон этой генерации представлен идиоморфными, изометричными дипирамидально-призматическими полупрозрачными трещиноватыми кристаллами темно-коричневого и серого цвета. Внутреннее строение циркона характеризуется фазовой неоднородностью, где выделяются центральные и краевые зоны. Центральные зоны обогащены ураном, P3Э и иттрием,  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 0.01-0.02$ . Краевые участки содержат значительно меньшие концентрации урана, иттрия и P3Э,  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 0.3-0.8$ . Для 4 проанализированных точек циркона из центральных зон получен близконкордантный возраст  $2619 \pm 29$  млн. лет, СКВО=2.2, который отражает время формирования пегматитов месторождения Васин-Мыльк. Аналитические данные 3-х точек из краевых зон по отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  составили 1.9-1.6 млрд. лет, что указывает на более поздние события.

Таким образом, месторождения редкометалльных пегматитов Охмыльк и Васин-Мыльк, расположенные в северо-западной части пояса Колмозеро-Воронья формировались в неоархейское время на рубеже 2.60-2.65 млрд. лет.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №22-27-00589.

- [1] Кудряшов Н.М., Удоратина О.В., Кобл М.А., Стешенко Е.Н. Оценка времени формирования редкометалльных пегматитов зоны Колмозеро-Воронья на основе изотопно-геохронологического исследования циркона (SHRIMP RG) из турмалин-мусковитовых гранитов // Мат. VII Российской конф. по изотопной геохронологии. Москва. 2018. С. 161-163.
- [2] N.M. Kudryashov, O.V. Udoratina, M. Coble, E.N. Steshenko. Geochronological and Geochemical Study of Zircon from Tourmaline-Muscovite Granites of the Archaean Kolmzero-Voronya Greenstone Belt: Insights into Sources of the Rare-Metal Pegmatites // Minerals. – 2020. – 10(9). – 760.
- [3] Соседко А.Ф. Материалы по минералогии и геохимии гранитных пегматитов. – М.: Госгеолтехиздат. 1961. – 154 с.
- [4] Волошин А.В., Пахомовский Я.А. Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах. – Л.: Наука. 1988. – 240 с.
- [5] N.M. Kudryashov, S.G. Skublov, O.L. Galankina, O.V. Udoratina, A.V. Voloshin. Abnormally high-hafnium zircon from rare-metal pegmatites of the Vasin-Mylk deposit (the northeastern part of the Kola Peninsula) // Chemie der Erde. Geochemistry. – 2019. – 80. – 3.
- [6] Кудряшов Н.М., Лялина Л.М., Апанасевич Е.А. Возраст редкометалльных пегматитов месторождения Васин-Мыльк (Кольский регион): результаты геохронологического U-Pb-исследования микролита // ДАН. – 2015. – 461. – 4. – С. 437-441.

## Верхнее ограничение возраста офиолитовой ассоциации мыса Фиолент (запад Горного Крыма) по результатам U-Pb изотопного датирования плагиориолитов (скала Монах)

*Н.Б. Кузнецов<sup>1</sup>, Т.В. Романюк<sup>2</sup>, А.В. Страшко<sup>1</sup>, А.С. Новикова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Геологический институт РАН, [kouznikbor@mail.ru](mailto:kouznikbor@mail.ru)

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

В работе представлены U-Pb изотопная датировка (SHRIMP-II, ВСЕГЕИ) кристаллов акцессорного магматогенного циркона, извлеченных из плагиориолитов скалы Монах района м. Фиолент (южная часть п-ова Гераклея) на западе Горного Крыма (ГК). Получена конкордантная возрастная оценка –  $168.3 \pm 1.3$  млн лет, точно соответствующая рубежу байосского и батского веков средней юры.

Впервые офиолиты в Крыму упомянуты в [1]. Изверженные образования района м. Фиолент также относят к офиолитам [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Они обнажены в нижних частях высоких (до 200 м на востоке района м. Фиолент) береговых обрывах южной части п-ова Гераклея, а также вскрыты скважинами на плато Гераклея [8, 9]. Это – серпентиниты, габброиды, базальты, долериты и плагиориолиты. Среди них залегают эдафогенные брекчии и яшмоиды. С плагиориолитами, входящими в эту ассоциацию пород, пространственно, а скорее всего и парагенетически, связаны околорудные (м. Виноградный) и рудные (плато Гераклея) колчеданные образования [8].

По поводу возраста и понимания геодинамической природы магматитов Фиолента, как и других магматических ареалов ГК, до сих пор нет консенсуса. Так, ранее разнородные и разнотипные магматиты Фиолента были интерпретированы как реликт щитового вулкана, перекрывающего верхнетриасово-нижнеюрскую таврическую серию. Учитывая это, магматиты Фиолента были сопоставлены с магматитами Карадага (восток ГК) [10] и отнесены к средней юре (байосу). В работе [11] область распространения изверженных образований Фиолента проинтерпретирована как зона меланжа, состоящего из хаотически расположенных бескорневых глыб магматического материала. В работе [9] обнаженная в прибрежной полосе часть поля распространения этих образований разделена на серию участков, в которых развиты магматиты, сформированные во время отдельных этапов магматической активности. В работах [2, 3, 4, 5, 6] магматиты м. Фиолент вместе с ассоциирующими породами, интерпретированы как офиолитовая ассоциация.

Ранее уже были предприняты попытки датировать магматиты Фиолента. Так, U-Pb изотопный возраст по 3 кристаллам циркона одной из даек долеритов этого района на установке SHRIMP-II оценен как  $1771 \pm 28$  млн [9]. Это значение интерпретировано либо как возраст мантийного субстрата, из которого выплавлены базитовые магмы, либо как возраст циркона из докембрийских пород, захваченного при движении магмы к поверхности. Для плагиориолитов K-Ar методом определен возраст в 174 млн лет.

Полученные нами новые данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Новая U-Pb изотопная датировка ( $168.3 \pm 1.3$  млн лет) циркона из риолитов скалы Монах в настоящее время является самой надежной в методическом и метрологическом смысле геохронологической датировкой магматических образований Крыма.

2. Полученная датировка является верхним ограничением возраста всей офиолитовой ассоциации мыса Фиолент.

3. Современные высокоточные и надежные изотопные датировки магматитов ГК существенно уточняют, а в некоторых случаях и ставят под сомнение надежность большинства полученных ранее калий-аргоновых и аргон-аргоновых датировок магматитов ГК. Так, для вулканитов Карадага недавно получен Ag-Ag изотопный возраст  $172.8 \pm 4.5$  млн лет [12] и, таким образом, результаты датирования магматитов Карадага, выполненные ранее тем же самым методом [13] и давшие более молодые возрасты (142-151 млн лет), не подтвердились. То есть, в настоящее время нет надежных геохронологических данных, обосновывающих длительный интервал магматической активности или существование различных этапов магматизма в ГК.



4. Накопленные надежные геохронологические данные [12, 14], вместе с нашей новой датировкой, указывают на узкий (аален-байосский) интервал проявления магматической активности в интервале 175–168 млн лет по всему ГК. Вместе с другими данными это позволяет интерпретировать ее как индикатор раскрытия в средней юре единого Крымско-Западно-Кавказского задугового бассейна.

Исследования выполнены по темам гос. заданий ГИН РАН и ИФЗ РАН.

- [1] Шнюков Е.Ф., Рябенко В.А., Сиденко О.Г. и др. Первая находка ультрамафитов в Крыму // ДАН АН УССР. Сер. Б. 1979. №1. С.18-20.
- [2] Демина Л.И., Промыслова М.Ю., Короновский Н.В. и др. Первая находка серпентинитов в коренных обнажениях Горного Крыма // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2015. №5. С.12-20.
- [3] Демина Л.И., Промыслова М.Ю., Короновский Н.В. и др. Первая находка серпентинитов в береговых обрывах Гераклейского полуострова юго-западного Крыма // ДАН. 2017. Т.475. №1. С.57-59.
- [4] Промыслова М.Ю., Демина Л.И., Бычков А.Ю. и др. Офиолитовая ассоциация района мыса Фиолент (юго-западный Крым) // Геотектоника. 2016. №1. С.25-40.
- [5] Промыслова М.Ю., Демина Л.И., А.И. Гушин А.И. и др. Типы брекчий офиолитовой ассоциации юго-западного Крыма и их значение для палеогеодинамики региона // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2017. №3. С.35-40.
- [6] Промыслова М.Ю., Демина Л.И., Бычков А.Ю. и др. Природа магматизма района мыса Фиолент (юго-западный Крым) // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2014. №6. С.14-22.
- [7] Шаталов Н.Н., Борисенко Л.С., Пивоваров С.В. и др. Дайки Гераклейской вулканотектонической структуры Крыма // ДАН УССР. 1990. №9. С.19-23.
- [8] Шнюков Е.Ф., Лысенко В.И., Кутний В.А., Шнюкова Е.Е. Золото-серебрянная и сульфидная минерализация в породах Гераклейского плато (Крым) // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2008. №2. С.68-86.
- [9] Шнюкова Е.Е. Магматизм зоны сочленения Западно-Черноморской впадины, горного Крыма и Скифской плиты. Киев: Наукова Думка. 2016. 234с.
- [10] Лебединский В.И., Соловьев И.В. Байосские вулканоструктуры Горного Крыма // Геологический журнал. 1988. №4. С.85-93.
- [11] Юдин В.В. Магматизм Крымско-Черноморского региона с позиций актуалистической геодинамики // Мінеральні ресурси України. 2003. №3. С.18-21.
- [12] Popov D.V., Brovchenk V.D., Nekrylov N.A. et al. Removing a mask of alteration: geochemistry and age of the Karadag volcanic sequence in SE Crimea // Lithos. 2019. V.324. P.371-384.
- [13] Meijers M.J.M, Vrouwe B., van Hinsbergen D.J.J. Jurassic arc volcanism on Crimea (Ukraine): Implications for the paleo-subduction zone configuration of the Black Sea region // Lithos. 2010. V.119. P.412-426.
- [14] Морозова Е.Б., Сергеев С.А., Савельев А.Д. Меловые и юрские интрузии Горного Крыма: первые данные U–Pb (SIMS SHRIMP)-датирования // ДАН. 2017. Т.474. №1. С.66-72.

### **Мелкие жильные тела гранитоидов зоны ГУР (Полярный Урал): геохронологические данные**

*К.В. Куликова<sup>1</sup>, О.В. Удоротина<sup>1</sup>, А.С. Шуйский<sup>1</sup>, А.Л. Травин<sup>2</sup>, И.Д. Соболев<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Сыктывкар, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, [fopolina1@yandex.ru](mailto:fopolina1@yandex.ru)

<sup>2</sup> Новосибирск, ИГМ СО РАН, [travin@igm.nsc.ru](mailto:travin@igm.nsc.ru)

<sup>3</sup> Москва, ИГЕМ РАН, [sobolev\\_id@mail.ru](mailto:sobolev_id@mail.ru)

Магматические комплексы, фиксирующие коллизионные процессы зоны ГУР на Полярном Урале, не так многочисленны. В их составе выделяют мелкие и жильные тела, сложенные породами кислого состава в подошве офиолитовых массивов Сыумкеу и Войкаро-Сынинского. Поскольку подобные жильные плагиограниты прорывают не только Войкаро-

Сынинский офиолитовый аллохтон, но и залегающие к западу от офиолитов тектонические пластины в составе Уральского орогена, то возраст этих образований на данный момент условно принимается как позднекаменноугольно-раннепермский [1].

Объектом исследования являлись плагиограниты к западу от Войкаро-Сынинского офиолитового аллохтона. Жильные тела таких плагиогранитов развиты в габброидах в верхнем течении р. Средняя Лагорта, представляют собой светлые бежево-белые полевошпат-кварцевые породы с хлоритом или амфиболом. Имеют мелкозернистую структуру и директивную (линейную) текстуру без видимых рудных включений. Был изучен циркон (U-Pb возраст, геохимия, температура кристаллизации) и плагиоклаз (Ar-Ar возраст).

Цирконы анализировались в центре SUMAC Стэнфордского университета и Геологической службы США на ионном мультиколлекторном микрозонде SHRIMP-RG по методике, описанной на сайте <http://shrimprg.stanford.edu>. Цирконы, присутствующие в выборке, мелкие, имеют размер до 100 мкм с КУ 1:2, 1:3., светло-желтого цвета, прозрачные, короткопризматического габитуса. В цирконах в катодолуминесцентных изображениях отмечается четкая тонкая осцилляционная зональность в краевых зернах и широкая однородная центральная зона. В некоторых зернах видны копьевидные окончания.

Возраст цирконов, рассчитанный по величине отношения  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , был определен в 4 точках (таблица). Получился широкий диапазон возрастов от  $390.2 \pm 17.6$  млн лет,  $451,8 \pm 14,5$  млн лет до  $1894 \pm 114,2$  млн лет.

Таблица. Результаты U-Pb изотопных исследований цирконов.

Зерно, кратер	Содержания, мкг			$^{2232}\text{Th}/$	Возраст млн лет		Изотопные отношения		
	$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th	$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
2.2ц	5,8	108	68	0,65	$390,2 \pm 17,6$	$367,1 \pm 68,5$	$0,0539 \pm 3,0$	$0,46 \pm 5,5$	$0,062 \pm 4,6$
2.1к	4,7	76	55	0,75	$451,8 \pm 14,5$	$311,9 \pm 129,4$	$0,526 \pm 5,7$	$0,52 \pm 6,6$	$0,072 \pm 3,3$
1.2к	116,0	465	35	0,08	$1644,4 \pm 70,9$	$1983,4 \pm 26,9$	$0,1219 \pm 1,5$	$5,00 \pm 4,7$	$0,298 \pm 4,4$
1.1ц	96,8	330	33	0,10	$1894 \pm 114,2$	$2001,2 \pm 6,8$	$0,1231 \pm 0,4$	$5,85 \pm 6,1$	$0,344 \pm 6,1$

Примечания: 1) ошибка в калибровке стандарта составляет 0.49 %.  $^{206}\text{Pb}_c$  и  $^{206}\text{Pb}^*$  – обыкновенный и радиогенный свинец; 2) изотопные отношения и содержания  $^{206}\text{Pb}$  скорректированы по измеренному  $^{204}\text{Pb}$ .

Содержания элементов-примесей в изученных кристаллах сильно варьируют (Y (858-3802 г/т), Ce (6-24 г/т), Hf (7189-10936 г/т)) и видно, что анализировались цирконы разных генераций. Температура их формирования, оцененная по содержанию Ti в цирконе [2] варьирует в интервале 753 (центр) до 753°C (край) для одной генерации и 832 в центре до 712°C в краевой зоне для циркона другой генерации (при  $a_{\text{SiO}_2}=1$  и  $a_{\text{TiO}_2}=0.7$ ).

Изученные плагиограниты метаморфизованы, имеют бластопорфировую структуру с лепидогранобастовой основной массой. Сложены кварцем и альбитом, в меньшей степени эпидотом, хлоритом и гранатом. Зерна альбита были изучены методом рентгеновской порошковой дифрактометрии, возраст их определен  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом ступенчатого прогрева датирования пород и минералов (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Возраст плато составляет  $413.0 \pm 4.3$  млн. лет. Этот рубеж коррелируется с временем образования фенгита в бластомилонитах эклогит-гнейсового комплекса Марункеу Полярного Урала, фиксирующего начальные этапы формирования Уральского орогена [3].

Докембрийские датировки по исследованному образцу получены по ксеногенным цирконам, которые накапливались в породах пассивной окраины (в том числе и при размыве докембрийского фундамента), и впоследствии участвовали в частичном плавлении аккреционной призмы при образовании аккреционных мелких плагиогранитных жил. Аккреционные события отражают цифры возраста на уровне 451, 413 и 390 млн. лет.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-55-26009) «Урал: уникальная природная лаборатория роста земной коры и сборки суперконтинента».

[1] Шишкин М. А. Криночкин В.Г. Легенда геологической карты донеогеновых образований Полярно-Уральской серии листов Госгеолкарты-200 – СПб., 1999. – 182 с.

- [2] Watson, E. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile / E.B. Watson, D. A. Wark, and J. B. Thomas // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2006. – 151/4. – P. 413-433.
- [3] Куликова К.В., Варламов Д.А., Травин А.Л., Буслов М.М., Селятицкий А.Ю. Гранат-клинопироксен-фенгитовые бластомилониты Марункеу (Полярный Урал): В кильватере большого корабля: современные проблемы магматизма, метаморфизма и геодинамики. Материалы III конференции, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного профессора МГУ Л.Л. Перчука. – 2018. – С.35-36.

## **О возрасте полимиктовых конгломератов Центрально-Карельского домена Карельской провинции**

*Г.А. Кучеровский, В.П. Чекулаев, Ю.С. Егорова, Н.А. Арестова, Т.С. Зайцева,  
Б.М. Гороховский, Ю.В. Плоткина*

*Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [gleb.kuchеровский@yandex.ru](mailto:gleb.kuchеровский@yandex.ru)*

Изучение полимиктовых конгломератов имеет важное значение, т.к. их образование как правило отражает стратиграфические границы между формированием разновозрастных комплексов пород. Особое значение приобретает определение времени образования раннедокембрийских конгломератов. Однако несмотря на достаточно широкое в пределах Фенноскандинавского щита распространение конгломератов, до настоящего времени не имеется достоверных данных об их возрасте. Настоящая работа представляет попытку определения с помощью изотопных данных времени образования полимиктовых конгломератов района оз. Суккозеро – оз. Воттомукс в Центральной Карелии.

Район представляет более молодой Центрально-Карельский домен с возрастом коры менее 2,8 млрд лет. Основные черты геологического строения района определяются наличием субмеридиональной линейной зоны, сложенной вулканогенно-осадочными породами гимольской серии – одного из стратотипов неоархея Фенноскандинавского щита и окруженной гранитоидами, и гранит-мигматитами ТТГ ассоциации, рассматривающимися в качестве переработанного фундамента. В северной части зоны к северу от пос. Суккозеро обнажена толща полимиктовых преимущественно плагиогранитных конгломератов, перемежающихся со сланцами и туфобрекчиями. Мощность толщи составляет 250-300м. Часть исследователей рассматривают конгломераты в качестве базальных образований гимольской серии, т.е. архейскими. На востоке архейские образования перекрыты породами палеопротерозоя, представленными metabазальтами и полимиктовыми конгломератами района оз. Воттомукс, слагающими толщу с общей видимой мощностью около 190 метров, в которой наряду с преобладающими валунно-галечными конгломератами присутствуют конгломерато-брекчии и галечно-гравийные конгломераты.

В районе пос. Суккозеро полимиктовые конгломераты местами сильно деформированы, размер галек варьирует от 0,5\*3 до 50\*15 см с преобладающим размером в пределах 5-10 см. Обломочный материал обычно составляет от 30 до 60-70%, но иногда его количество достигает почти 90%. В обломочном материале резко преобладают плагиогранитоиды – гнейсо-тоналит-трондьемиты и гнейсо-гранодиориты, составляющие до 90% обломочного материала. Кроме них, в гальках присутствуют биотит-амфиболовые и хлоритсодержащие сланцы, метавулканиты с отчетливыми вкрапленниками плагиоклаза. Для геохронологических исследований отобран циркон из цемента, проба С2013. В конгломерате данного обнажения наряду с преобладающими гальками тоналит-трондьемитов имеются единичные гальки меланократовых плагиопорфиров длиной 10-15 и шириной около 3 см. Цемент представлен кварц-биотитовым сланцем с вкрапленниками плагиоклаза.

Конгломераты района оз. Воттомукс относятся к палеопротерозою [1]. Они менее деформированы, содержат гальки округлые, часто угловатые, но со сглаженными углами. Размер галек от 0,5 см до 15-20 см, преобладают гальки 3-5 см. Гальки составляют более 50% объема породы. Преобладают гальки плотных м/з темно-серых базальтов, иногда с миндалекаменной текстурой, есть породы габброидного облика, редко у/о состава, м/з диорита или вулканита, м-с/з лейкогранита, кварца. Сланцеватость в гальках ориентирована в разных направлениях. Цемент –

грубозернистый метапесчаник, преимущественно кварц-биотитовый, с амфиболом, турмалином, гранатом. Для геохронологических исследований отобран циркон из цемента, проба С2012.

Анализ химического состава показал, что в цементе обоих конгломератов значительную роль играет магматический материал, что объясняет низкие значения индекса зрелости CIA и отрицательные значения функции DF(x). Он показал также, что при определенном сходстве в содержании главных элементов цемент архейского конгломерата (Пр. С2013) существенно отличается более высокими содержаниями Sr, Ba, LREE с соответственными отличиями отношений Sr/Y, Zr/Y, (La/Yb)<sub>n</sub>, характерными для пород ТТГ ассоциации Центрально-Карельского домена.

Циркон из пробы С2013 представлен преимущественно идиоморфными зёрнами, часто содержащими ядра. Размер зёрен преимущественно 150-200 мкм. В проходящем свете зёрна непрозрачные, на СИ-изображениях в большинстве случаев наблюдается осцилляторная зональность. Из 94 изученных зёрен для 67 были получены конкордантные значения возраста. Распределения возрастов отражены на рис. 1а

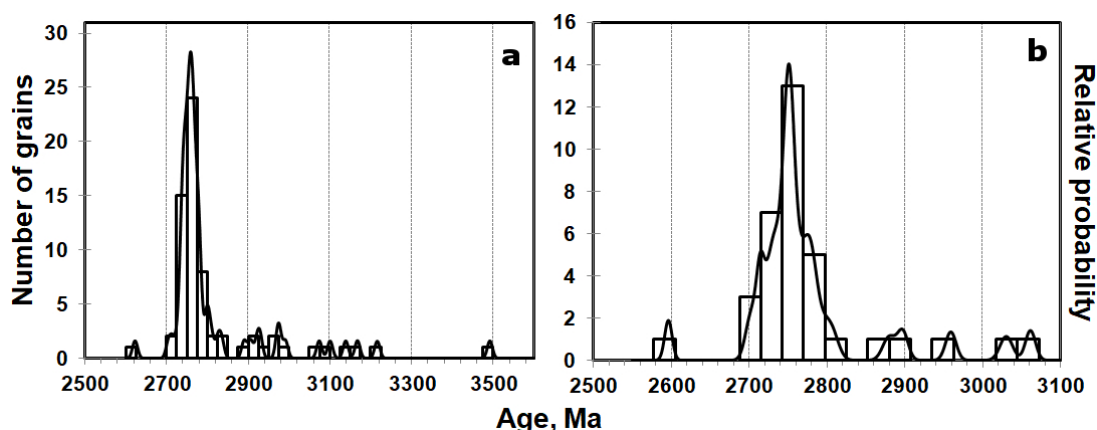


Рис.1. Распределение возрастов детритового циркона. (LA-ICP-MS, ИГГД РАН)

Циркон из пробы С2012 представлен преимущественно идиоморфными зёрнами различного габитуса. Размер зёрен преимущественно 50-150 мкм. В СИ-изображениях часто наблюдаются осцилляторная зональность, трещиноватость, включения. Из 88 изученных зёрен для 35 были получены конкордантные значения возраста. Распределения возрастов отражены на рис. 1б.

Как видно из графиков, подавляющее большинство зёрен циркона в обеих пробах имеют архейский возраст в районе 2750 млн лет. Отсюда вытекают следующие выводы: (1) Возраст цемента отражает не время его образования, а возраст разрушаемых пород; (2) конгломераты обоих районов независимо от времени образования имеют одинаковые источники сноса; (3) основным источником сноса являлись породы ТТГ ассоциации, слагающие основную часть неоархейской коры Центрально-Карельского домена; (4) Присутствующие в цементе зёрна циркона более древнего возраста могут указывать на присутствие в источнике ТТГ пород соседнего Водлозерского домена, где установлены этапы их образования с возрастом около 3150 и 2900 млн лет [2].

[1] Хейсканен К.И., Голубев А.И., Бондарь Л.Ф. Орогенный вулканизм Карелии. Труды Ин-та геологии Кар.ФАН СССР. 1977. Вып. 36. 216 с

[2] Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Егорова Ю.С., Кучеровский Г.А. Стратиграфия. Геол. корреляция. 2022. № 4.

## Новые геохронологические ограничения возраста для северной части Охотско-Чукотского вулканического пояса

*И.Е. Лебедев, П.Л. Тихомиров*

*Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, [lebedev232@ya.ru](mailto:lebedev232@ya.ru)*

До последних десятилетий в стратиграфии Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП) господствовали традиционные методы корреляций, которые в первую очередь основываются на палеоботанических данных. Однако на сегодняшний день растет число работ с использованием прецизионных методов изотопного датирования (U-Pb и Ar-Ar), надежность и достоверность которых ощутимо выше, чем у традиционно используемых. Новые данные позволили ревизировать возрастные рамки формирования выделенных ранее стратонов, тем не менее на данный момент таких данных явно недостаточно [1].

В рамках данной работы получены новые U-Pb и Ar-Ar определения для окрестностей двух эпитермальных золото-серебряных месторождений на Чукотке: Купол и Валунистое. В большинстве случаев полученные возраста заметно отличаются от принятых последним стратиграфическим совещанием.

Для окрестностей месторождения Купол, новые определения в совокупности с предыдущими работами [2,3] соответствуют двум интервалам 98-93 млн лет (сеноман) и 90-84 млн лет (поздний турон-сантон), что наиболее вероятно соответствует двум основным вулканическим импульсам на данной территории. Причем отобранные вулканы не соотносятся с существующими стратиграфическими подразделениями, либо по принятому возрасту, либо по петрографическому составу пород. Кроме того, выделенные возрастные рубежи также не характеризуются однообразным составом, что не позволяет провести между ними четкую границу. Тем не менее нами была составлена геологическая карта окрестностей месторождения Купол, по стратиграфической схеме, предложенной в [1], которая поддерживается нашими новыми данными.

В районе месторождения Валунистое некоторые из новых полученных изотопных дат не вписываются даже в общепринятые временные рамки формирования ОЧВП (106-74 млн лет) [напр. 1,4]. Согласно новым данным значительная часть «верхних базальтов» сформировалась на рубеже кампана-маастрихта (72-71 млн лет), а с учетом данных [5] возможный верхний рубеж доходит до 67 млн лет. В работах [5,6] уже предлагалась модель более позднего формирования Восточно-Чукотского сектора относительно остальной части ОЧВП, его продольной миграции активности, и наши данные скорее подтверждают данную гипотезу. Однако мы не можем исключать и второй вариант интерпретации подобных молодых возрастов, по которому на вулканиках ОЧВП Восточно-Чукотского сектора наложены вулканы схожего с ним состава, но которые генетически связаны уже с более молодым, сравнительно слабо изученным Анадырско-Бристольским поясом (кампан-палеоценовым) [7], который распространен южнее изученного района.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-47-04110.

- [1] Тихомиров П.Л. Меловой окраинно-континентальный магматизм Северо-Востока Азии и вопросы генезиса крупнейших фанерозойских провинций кремнекислого вулканизма. – М.: ГЕОС. 2020. – 376 с.
- [2] Акинин В.В., Томсон Б., Ползуненков Г.О. U-Pb и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование магматизма и минерализации на золоторудных месторождениях Купол и Двойное / Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы. Мат. VI Российской конф. по изотопной геохронологии. Санкт-Петербург: ИГГД РАН. 2015. С. 19–21.
- [3] Тихомиров П.Л., Акинин В.В., Исполатов В.О., Александр П., Черепанова И.Ю., Загоскин В.В. Возраст северной части Охотско-Чукотского вулканогенного пояса: новые данные Ar-Ar и U-Pb геохронологии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т. 14. № 5. С. 67–281.

- [4] Акинин В.В., Миллер Э.Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 1–42.
- [5] Сахно В.Г., Полин В.Ф., Акинин В.В., Аленичева А.А., Тихомиров П.Л., Молл-Столкап Э.Дж. Разновременность формирования Амгуэмо-Канчаланского и Энмываамского вулканических полей ОЧВП по данным изотопного датирования // Докл. РАН. Науки о Земле. 2010. Т. 434. № 3. С. 365–371.
- [6] Полин В. Ф., Тихомиров П. Л., Ханчук А. И., Травин А. В. Первые данные U/Pb- и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования Преддзугджурских вулканитов – новое свидетельство разновременности формирования отдельных звеньев Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 497. – № 2. – С. 107-115.
- [7] Akinin V.V., Miller E.L., Wooden J.L. Petrology and geochronology of crustal xenoliths from the Bering Strait region: Linking deep and shallow processes in extending continental crust // in Miller, R.B., and Snoke, A.W., eds., Crustal Cross Sections from the Western North American Cordillera and Elsewhere: Implications for Tectonic and Petrologic Processes: Geological Society of America Special Paper -456. P. 39–68.

### Влияние коровой контаминации на определение возраста даек лампрофиров

*Н.М. Лебедева, А.А. Носова, Ю.О. Ларионова, А.А. Возняк*

*Москва, Институт геологии рудных месторождений ИГЕМ РАН, [namil@mail.ru](mailto:namil@mail.ru)*

Изотопный состав массивов и даек Кольской щелочной провинции показали, что мантийные источники магматизма были гетерогенными (например, [1]), и определенный вклад в изотопную неоднородность магматизма вносит коровая контаминация (например, [2]). Наши исследования были ориентированы на выявление гетерогенности минералов ультрамафических и щелочных лампрофиров в породах массива и дайках районе Турьего Мыса (Терский берег Белого моря). Породы характеризуются порфировой структурой. Наблюдается несколько генераций крупных кристаллов (макрокристов), которые имеют различное происхождение. Многие макрокристы несут явные признаки растворения и реакционного взаимодействия с захватившим их расплавом, часть кристаллизовалась из расплава, совместно с минералами основной массы, в составе которой в разных породах диагностированы Cr-шпинель, диопсид-авгит, амфибол, флогопит, апатит, Ti-магнетит, перовскит, мелилит, КППШ, нефелин и карбонат и более поздние сфен, гранат, анальцит, эгирин, биотит.

Несмотря на такую сложную петрографию изотопный состав пород, из которых были отобраны минералы, варьирует в узком диапазоне изотопных значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.703560–0.703890 и  $\epsilon\text{Nd}$  +4.3—+4.8. Мы отдельно изучили изотопный состав перовскита, так как он кристаллизуется одним из первых на магматической стадии и имеет высокие концентрации Sr (до 12 422 ppm) и Nd (до 8319 ppm). Перовскиты характеризуются очень низкими  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ : 0.0007–0.0077 и  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  отношениями и низко радиогенным изотопным отношением Sr 0.70342–0.70367. Также был изучен изотопный состав граната, который по петрографии кристаллизуется на поздней магматической стадии [3]. Гранаты из лампрофиров имеют высокие концентрации Sr=626 ppm и Nd=115 ppm и изотопный состав  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ =0.705906 и  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ =0.28828,  $\epsilon\text{Nd}$ =4.5. Изотопный состав граната более радиогенный, чем порода в целом. Противоположные соотношения составов перовскита и граната Sr-Nd по отношению к составам пород соответствуют последовательности кристаллизации: ранней кристаллизации перовскита и поздней кристаллизации граната. Различие в изотопном составе Sr и Nd от граната к породе в целом и гранату подразумевает открытую систему в процессе кристаллизации и внедрения пород. Добавление изотопно обогащенного вещества в промежуток времени между ликвидусом и солидусом можно объяснить ассимиляцией коры во время фракционирования кристаллов.

Перовскиты, гранат и лампрофиры в целом определяют Sm-Nd изохрону с возрастом  $368 \pm 19$  млн лет (СКВО = 0.79), что близко к ранее определенному возрасту Кольской провинции лампрофиров [4] и возрасту пород массива Турий мыс [5]. Контаминация коровым материалом,

наблюдаемая в гранате и валовом анализе породы, может привести к ошибочно молодому возрасту. Сдвиг возраста зависит от минерала с самым высоким  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  (или  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  для Rb-Sr системы), который используется для построения изохроны [6]. Мы рассчитали какой бы был изотопный состав  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  в гранате, из которого исключено влияние коровой ассимиляции. При расчете изохроны с рассчитанным изотопным составом граната, возраст сдвигается на 12 млн, что меньше, чем ошибка изохроны. Новая изохрона соответствует возрасту  $381 \pm 19$  млн лет (СКВО=0.56). Сохраняется изохронная связь между перовскитами, гранатом и цельной породой несмотря на гранат и перовскит, полученные из разных пород, которые встречаются в дайках или массиве. Это предполагает, что 1) дайки и породы массива образовались в результате единого события, и 2) обе фазы находились в изотопном равновесии по Nd на момент внедрения. И Sm-Nd изотопная система не была нарушена постмагматическими событиями.

- [1] Lee et al. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the Kovdor phoscorite-carbonatite complex, Kola Peninsula, NW Russia. *Lithos.* – 2006. – V. 91. – P. 250– 261.
- [2] Арзамасцев А. А. и др. U-Pb геохронология и изотопная (Sr, Nd) систематика минералов щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции //Петрология. – 2014. – Т. 22. – №. 5. – С. 496-496.
- [3] Voznyak et al, Compositional evolution of igneous garnets: Calcic garnets from alkaline rocks of the Kola Alkaline Carbonatite Province // *Mineralogy and Petrology.* -2022.
- [4] Арзамасцев А. А., Федотов Ж. А., Арзамасцева Л.В. Дайковый магматизм северо-восточной части Балтийского щита. – 2009.
- [5] Dunworth E. A., Bell K. The Turiy massif, Kola Peninsula, Russia: isotopic and geochemical evidence for multi-source evolution // *Journal of Petrology.* – 2001. – Т. 42. – №. 2. – С. 377-405.
- [6] Malarkey J. et al. From source to crust: tracing magmatic evolution in a kimberlite and a melilitite using microsample geochemistry // *Earth and Planetary Science Letters.* – 2010. – Т. 299. – №. 1-2. – P. 80-90.

### **Геохронология и Sr-хемостратиграфия осадочно-вулканогенных последовательностей Сибирской платформы и ее складчатого обрамления: новые данные о вулканизме и карбонатонакоплении в позднем докембрии**

*Е.Ф. Летникова<sup>1</sup>, А.А. Жданов<sup>1</sup>, С.И. Школьник<sup>2</sup>, Н.И. Ветрова<sup>1</sup>, А.Ф. Летникова<sup>3</sup>,  
Г.А. Докукина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия, [efletnik@igm.nsc.ru](mailto:efletnik@igm.nsc.ru)*

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

<sup>3</sup> *Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

Привлечение современных изотопных методов исследований – хемостратиграфии, U-Pb датирования цирконов и их Lu-Hf систематики открывают новые возможности получения, как прямой геохронологической характеристики, так и дополнительной Sr-хемостратиграфической информации о времени формирования осадочных и вулканомиктовых пород. Использование этих методов при изучении осадочных и осадочно-вулканогенных последовательностей Сибирской платформы и ее складчатого обрамления позволили установить новые, ранее неизвестные, импульсы вулканизма и периоды карбонатной седиментации в позднем докембрии.

Получены данные Sr-хемостратиграфии для карбонатных пород нижнетунгусской свиты, в верхней части которой нами установлены и изучены в разрезе синхронные с осадконакоплением трахиты с возрастом 964 млн лет (U-Pb датирование цирконов). Это позволило нам изучить изотопный состав Sr в карбонатных породах с установленным геохронологическим возрастом. Химическое разложение проб карбонатных пород и измерение содержаний в них Rb и Sr выполнялись на базе ЦКП МИИ СО РАН (ИГМ СО РАН, Новосибирск) на многоколлекторном масс-спектрометре MI1201AT, в двухленточном

режиме. Изотопное отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  измерены на масс-спектрометре TritonPlus Thermo Fisher (Екатеринбург, ИГГ УрО РАН). Изотопный стандарт SRM987  $0,71025 \pm 1$ . На основе проведенных исследований установлено, что в разрезе преобладают известняки (Mg/Ca 0.003-0.6) с содержаниями Sr от 132 до 936 ppm. Для изотопных исследований было отобрано 11 проб нижнетунгуской свиты и две пробы из основания вышележащей шорихинской свиты с минимальными содержаниями железа и марганца и долей нерастворимого осадка менее 10%. В изученной верхней части разреза нижнетунгуской свиты в 150 м от ее кровли установлены первичные отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  на уровне 0,70531-0.70538, выше по разрезу наблюдается его увеличение до 0,70541-0.70544. На уровне, где было обнаружено присутствие продуктов синхронного вулканизма значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  поднимаются до 0,70572-0.70573. Далее 50 м до кровли нижнетунгуской свиты повсеместно в разрезе присутствуют известняки с высоким содержанием глинистого материала и железа, что не позволило провести для них изотопные исследования Sr. В основании вышележащей шорихинской свиты первичные отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  установлены в двух пробах известняков 0,70581-0.70582. Таким образом, для Сибирской платформы впервые получены изотопные характеристики Sr для карбонатных пород с геохронологически обоснованным возрастом 960 млн лет.

Другим значимым результатом при изучении осадочных последовательностей позднего докембрия Сибирской платформы стала диагностика высококалийной пирокластике широко распространенной на юго-западе Сибирской платформы в Бирюсинском Присянье. Возраст высококалийного вулканизма определен на основе U-Pb-датирования цирконов – 640 млн лет. Определение U-Pb возраста цирконов проводилось методом LA-ICP-MS в ГЕОХИ РАН на масс-спектрометре Element XR (Thermo Finnigan) с системой лазерной абляции UP-213 (New Wave Research). В качестве стандарта использовался стандарт GJ-1, а независимая проверка корректности измерений проводилась по стандарту 91500. О связи высококалийных пород Бирюсинского Присянья с производными мантийных расплавов указывают Lu-Hf-изотопные данные для популяции позднерифейских цирконов (44 зерна). Исследование Lu-Hf изотопного состава цирконов из высококалийных пород Бирюсинского Присянья были проведены на масс-спектрометре Nu Plasma HR multi-collector с системой лазерной абляции NewWave LUV 213, в изотопной лаборатории Университета г. Осло (Норвегия). Первичное отношение изотопов гафния в наиболее молодой популяции цирконов высококалийных пород Бирюсинского Присянья варьирует в диапазоне от 0.282883 до 0.282591 при  $\epsilon_{\text{Hf}}$  от +18 до +2.3, указывая на участие различных источников вещества – корового и мантийного, в их образовании. В данном случае, можно судить о изотопно-гетерогенной природе источника поступления обломочного материала при формировании высококалийной пирокластике, в результате ассимиляции мантийных расплавов с коровым веществом при проявлении эксплозивного вулканизма. Ранее эти породы ошибочно относили к терригенным породам карагасской серии.

На основе геологического изучения, изотопных и геохимических данных выделены новые, ранее не установленные, импульсы вулканизма и периоды карбонатной седиментации в позднем докембрии складчатого обрамления Сибирской платформы. Химическое разложение карбонатных проб и измерение содержаний в них Rb и Sr выполнялись на базе ЦКП МИИ СО РАН (ИГМ СО РАН, Новосибирск) на многоколлекторном масс-спектрометре МИ1201АТ, в двухленточном режиме. Изотопное отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  измерены на масс-спектрометре TritonPlus Thermo Fisher (Екатеринбург, ИГГ УрО РАН). Изотопный стандарт SRM987  $0,71025 \pm 1$ . Внутреннее строение цирконов было изучено на сканирующих катодолюминесцентных микроскопах LEO 1430 VP приставкой Detectoe Centaurus, датирование проводилось методом LA-SF-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific) с системой пробоотбора лазерной абляцией UP-213 (New Wave Research) (ЦКП МИИ СО РАН, Новосибирск).

Изотопные исследования позволили нам выделить несколько позднерифейских и вендский этапов развития тектонических блоков Тувинского сегмента ЦАСП, в том числе, для которых установлена только палеозойская история их геологического развития. Активный вулканизм, накопление карбонатных пород и кварцевых песчаников в окраинных обстановках древнего континентального блока 720-740 млн лет назад в его восточной части (харальская серия). В центральной части этого сегмента установлено два позднерифейских вулканических



события – кислого (610-640 млн лет назад) и более древнего базитового вулканизма. Накопление здесь карбонатных пород (в настоящий момент нижнеондумская серия, кембрия) происходило синхронно с проявлением кислого вулканизма в позднем рифее. В раннем венде 580-600 млн лет назад на юге Тувинского сегмента в осадочном бассейне вне связи с Тувино-Монгольским микроконтинентом накапливались карбонаты нарынской свиты. Свидетельством этого являются геохимические и С-изотопные данные.

Таким образом, комплекс изотопных методов, применяемых при изучении осадочных, терригенных и вулканогенных пород позднего докембрия Сибирской платформы и ее обрамления, позволил получить нам принципиально новые данные о вулканизме и карбонатонакоплении в позднем докембрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 19-17-00099.

## Циркон как индикатор геологических событий в гранулитогнейсовых областях (на примере тектоно-магматической брекчии Бугского комплекса Сарматского кратона)

*С.Б. Лобач-Жученко<sup>1</sup>, Ю.С. Егорова<sup>1</sup>, Т.В. Каулина<sup>2</sup>, А.В. Юрченко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [slobach\\_zhuchenko@mail.ru](mailto:slobach_zhuchenko@mail.ru)

<sup>2</sup> Апатиты, Геологический институт КНЦ РАН, [kaulina@geoksc.apatity.ru](mailto:kaulina@geoksc.apatity.ru)

Тектоно-магматическая брекчия (ТМБ UR82) Бугской гранулитогнейсовой области (БГГО) сложена эндербитами (матрица), содержащими включения метаортопироксенитов и мафических гранулитов. Состав минералов определен в ИГГД РАН на микроскопе JSM-6510 с приставкой EDS JED-2200, содержание REE в цирконе – в ЯФ ФТИАН, исследования U-Pb (SHRIMP II) и Lu-Hf изотопных систем циркона выполнены в ЦИИ ВСЕГЕИ.

Эндербиты матрицы изучены в трех образцах, расположенных в первых десятках см друг от друга. Эндербит **UR82/1a** имеет массивную структуру, содержит реликты древнего циркона с возрастом по дискордии **3622±14** млн лет. Зерна с высоким содержанием урана и тория имеют возраст по дискордии **3573±9** млн лет. Также в пробе отмечены зерна циркона разных генераций с конкордантными возрастными **3064±6** млн лет, **2947±4** млн лет и каймы с возрастом **2338±89** и **2090±120** млн лет.

Образец **UR82/15** – из участка с тонкой (1–1.5 см) мигматизацией. Самый древний возраст – **3425±22** млн лет получен по дискордии для высокоурановых (U>1000 ppm) центральных частей зерен циркона с реликтами осцилляторной зональности и многочисленными включениями KFsр, Pl, Qtz, Vt и Ap. Низкие отношения  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28047\text{--}0.28055$  и значения  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.43) = -2.6 \div -4.8$  согласуются с формированием обр. **UR82/15** при мигматизации более древних эндербитов. Краевые части древних зерен образуют дискордию с верхним пересечением **3034±37** млн лет, имеют более высокие отношения  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28060\text{--}0.28071$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.034) = -7.1 \div -9.6$  (рис. 1). Рост изотопного отношения  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  от **0.28047** до **0.28071** в краевых зонах отмечает захват радиогенного Hf из породы при обрастании каймами древнего циркона. С поздними этапами связано образование светлых кайм циркона (точки на дискордии **2.73–1.8** млрд лет) с низкими концентрациями REE, U и Th (<100 ppm, Th/U >1), характерными для гранулитовых цирконов. Изотопный состав Hf ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28052\text{--}0.28062$ ) и значения  $\epsilon_{\text{Hf}}(2.73) = -16.7 \div -17.7$  указывают, что эти каймы росли за счет растворения древних цирконов (рис. 1).

Эндербит **UR82/1** сильно деформирован, имеет полосчатую текстуру – чередование лейко- и меланократовых минералов, содержит гетерогенную популяцию циркона. Две группы циркона с возрастом **3104±9** и **3103±52** млн лет различаются содержанием U, Th, Y, P, Hf: высоко-U зерна (U=1973 ppm, Th/U=0.05) имеют  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28058$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.1) = -8.3$ ; вторая группа: U=302 ppm, Th/U=0.45,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28063\text{--}0.28065$  и  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.1) = -5.3 \div -6$  (рис. 1). Значение  $\epsilon_{\text{Nd}}(3.1) = -7.1$  лейкоэндербита UR82/1a соответствует  $\epsilon_{\text{Nd}}(3.1) = -6.9$  мезоэндербита UR82/1, что согласуется с образованием гнейсоэндербита UR82/1 за счет лейкоэндербита UR82/1a. Возраст части зерен по  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  находится в диапазоне **2.87–2.82** млн лет;  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28057\text{--}0.28063$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -13.6 \div -12.5$ . Часть из них содержит включения KFsр и Qtz

характеризуется высоким содержанием Th и высоким Th/U=1. Три зерна имеют низкое отношение Th/U=0.14–0.04, высокое –  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28082$  и аппроксимируются дискордией  $2754 \pm 11$  млн лет. Краевые части некоторых зерен и каймы имеют низкое содержание U (25 ppm) и Th (28 ppm),  $T^\circ$  кристаллизации  $\sim 710\text{--}760^\circ\text{C}$ , характерные для гранулитовых цирконов. Их возраст по  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  варьирует от **2596** до **2306** млн лет; отношение  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28078$ . Преобразование циркона и рост кайм привело к уменьшению количества REE, Lu, Lu/Hf (0.001–0.002), P (<100 ppm), что, по-видимому, отражает условия более высокого давления [1].

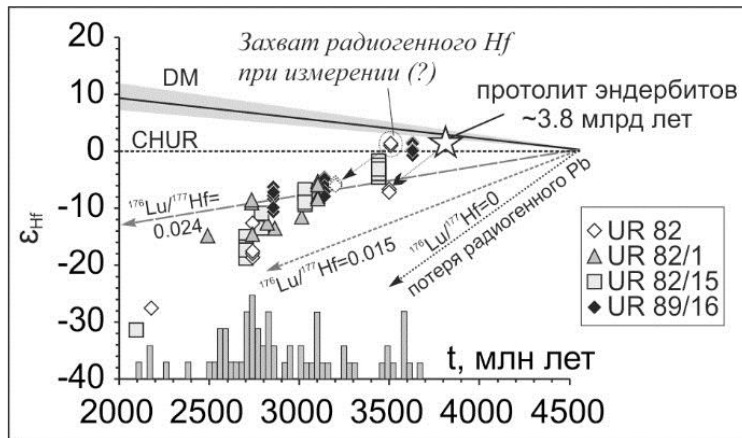


Рис. 1. Диаграмма «возраст –  $\epsilon_{\text{Hf}}$ » для циркона пород ТМЗ UR82. Линии эволюции изотопного состава гафния мафического ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.024$ ) и фельзического ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ ) источников по [2]. Внизу представлена гистограмма наименее дискордантных ( $\text{Dis}<10\%$ ) возрастов циркона по  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ .

Включение **метаортопироксена UR82** имеет округлую форму, размеры  $25 \times 30$  см, сложено крупными кристаллами бронзита, содержит Pl, Срх, Phl. Цирконы варьируют по размеру, строению и возрасту. Самые древние зерна имеют возраст около **3.5** млрд лет (конкордантное значение  $3487.3 \pm 4.3$  млн лет). Низкие отношения  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28033\text{--}0.28035$  и  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.5) = -7.1 \div -7.5$  в двух зернах указывают на древний возраст ( $\square 3.8$  млрд лет) их материнской породы и, очевидно, их ксеногенную природу. Другие зерна с отношением  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28059\text{--}0.28060$  ( $\epsilon_{\text{Hf}}(3.5) = +1.1 \div +1.3$ ) обогащены REE, LREE, Lu, Hf, что говорит об их метасоматическом преобразовании. Изотопный состав гафния близок таковому в цирконах других образцов этапа  $\sim 3.1$  млрд лет (рис. 1). Около **2.7** млрд лет (близконкордантное значение  $2710 \pm 19$  млн лет) произошло образование зерен со сложным внутренним строением, в том числе кайм замещения, с низким содержанием U (до 50 ppm) и Th (до 55 ppm), P и LREE, отношениями  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28050\text{--}0.28053$  и  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -17.5 \div -18.6$  (рис. 1).

Включение **метаортопироксена UR82/3** – одно из многочисленных мелких включений ( $8\text{--}10 \times 5$  см), мелко-среднезернистого сложения с массивной гранобластовой структурой. Ранняя ассоциация – Орх (Mg# 65), Pl (An<sub>35–42</sub>), Срх; поздняя: Bt, Amph, CrMgt. U82/3 отчетливо отличается от UR 82 повышенным содержанием Al, Ca, Na, REE, LREE, Y, Zr, Rb, Ba, Nb. Большая часть зерен циркона с высоким содержанием Th ( $>265$  ppm, Th/U=3.39–5.93) имеет возраст по верхнему пересечению –  $3224 \pm 98$  млн лет, сохраняет зональность и содержит сростки Pl (An<sub>31</sub>) с Kfsp+Qtz, Ap, Bt. Присутствует ксеногенное зерно циркона с включениями Qtz и Pl с возрастом  $3670 \pm 5$  млн лет. Высоко-U зерна (Th/U=0.25–0.42) с возрастом по  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$   $\square 2.74\text{--}2.79$  млн лет содержат наряду с Kfsp+Qtz включения Орх (Mg# 64) и Pl (An<sub>37</sub>). Светлые гранулитовые каймы с низким содержанием U и Th имеют возраст  $\square 2.5$  млн лет. С поздним гидротермальным процессом, вероятно,  $\square 2$  млн лет назад связано нижнее пересечение дискордии, развитие в цирконе неправильной формы заливов и жилок с увеличением содержания Na, Mg, Ca, Fe; замещение Орх антофиллитом.

Включение **мафического гранулита UR89/16** сложено мелкозернистой сланцеватой, смятой в складки породой, состоящей из Орх, Срх, Pl (An<sub>40–44</sub>), Amph. Порода содержит 2 группы циркона:  $3628 \pm 58$  и  $2845 \pm 65$  млн лет [3]. Первая группа гомогенна по составу и характеризуется низкими концентрациями REE, Y, P, LILE, Th/U=0.3–0.6 и сходным изотопным составом Hf:  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28047\text{--}0.28050$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.63) = +0.4 \div +1.5$  (рис. 1). Зерна с возрастом  $\square 2.85$  гетерогенны по составу (Th/U=0.13–1.18);  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28067\text{--}0.28079$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.63) = -10.7 \div -6.2$  (рис. 1). Два зерна с субконкордантным возрастом с низким содержанием

REE, Y, P, Lu, Hf, имеют более низкую  $T^\circ$  кристаллизации (в среднем  $730^\circ\text{C}$ ) по сравнению с древним цирконом. Часть зерен с промежуточным отношением  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28056\text{--}0.28069$ , вероятно, отражает процесс около 3.1–3.3 млрд лет, некоторые из них содержат включения Орх, Вт, Рl (An<sub>48</sub>). Многие зерна имеют тонкие светлые каймы обрастания, вероятно, палеопротерозойского возраста.

На основе проведенного анализа циркона образцов ТМЗ UR82 выстраивается последовательность событий: **~3.8 млрд лет** назад – сформирован протолит эндербитов (тоналит). **~3.63 млрд лет** – размещение протолита мафических гранулитов UR89/16 и метаморфизм тоналита UR82/1a. **~3.5 млрд лет** – сильная тектоно-метаморфическая переработка пород в условиях гранулитовой фации. **~3.2–3.1 млрд лет** – деформация, фрагментация ортопироксенитов, дробление и смешение эндербита и мафического материала, мигматизация и ультраметаморфизм. Последующие этапы  $\square 2.85$ ,  $\square 2.75$ ,  $\square 2.5$  и  $\square 2$  млрд лет тектоно-метаморфических процессов фиксируются цирконами всех изученных образцов ТМЗ UR82 и широко проявлены в других районах БГО.

Таким образом, преобладающая часть циркона из зоны тектонической брекчии UR82 образована за счет преобразования более древнего вещества, в том числе, перекристаллизации древнего циркона с захватом радиогенного гафния из вмещающей породы. Аналогичный вывод о разновозрастных цирконах как продуктах перекристаллизации первичного древнего циркона получен для цирконов Джек Хилс Австралии [4]. Сохранение реликтовой осцилляторной зональности указывает на перекристаллизацию циркона в твердом состоянии [5]. Импульс ювенильного материала в ТМЗ UR82 имел место  $\square 3.63$  млрд лет назад, а формирование самой брекчии произошло  $\square 3.1$  млрд лет назад.

Работа выполнена в рамках Госзадания (тема FMUW -2022-0004).

- [1] Liu X., Gao S., Diwu C. et al. Simultaneous in-situ determination of U–Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20  $\mu\text{m}$  spot size // Chinese Science Bulletin. – 2007. – 52. – P. 1257-1264.
- [2] Griffin W.L., Belousova E.A., O'Neill C. et al. The world turns over: Hadean–Archean crust–mantle evolution // Lithos. – 2014. – 189. – P. 2-15.
- [3] Лобач-Жученко С.Б., Балтыбаев Ш.К., Егорова Ю.С., Сергеев С.А., Т.В. Каулина, Салтыкова Т.Е. Базит-ультрабазитовый магматизм Сарматии от палеоархея до палеопротерозоя // Геология и геофизика. – 2022. – 63(3). – С. 267-290.
- [4] Hoskin P.W.O., Black L.P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon // Journal of Metamorphic Geology. – 2021. – 18 (4). – P. 423-439.
- [5] Kirkland C.L., Hartnady M.I., Barham M. et al. Widespread reworking of Hadean-to Eoarchean continents during Earth's thermal peak // Nature Communication. – 2021. – 12. Number paper 331.

## **Новые данные о времени формирования щелочных гранитов Огнитского комплекса на Снежном месторождении (Восточный Саян)**

*Д.А. Лыхин<sup>1</sup>, А.А. Иванова<sup>2</sup>, Е.Б. Сальникова<sup>2</sup>, А.Б. Котов<sup>2</sup>, В.В. Ярмолук<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, [lykhind@rambler.ru](mailto:lykhind@rambler.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [katesalnikova@yandex.ru](mailto:katesalnikova@yandex.ru)

В пределах Алтае-Саянской складчатой области расположены крупные редкометальные месторождения, возникшие в разные металлогенические эпохи, в разных геотектонических обстановках и имеющие разный возраст. Это Гольцовое, Вишняковское месторождения, связанные с формированием пегматитов (1838–1739 млн. лет), группа Белозиминских карбонатитовых месторождений (655–630 млн. лет) и группа палеозойских месторождений связанных с внедрением щелочных гранитов и сиенитов – Арыскан, Улуг-Танзек, Тастыг, Соль-Бельдыр, Карасук, Улан-Тологое, Снежное и др. [1,2,3].

Снежное биотит-фенакит-берилловое месторождение расположено в Восточном Саяне в Хойто-Окинской зоне каледонид и входит в состав позднепалеозойской Восточно-Саянской редкометальной щелочногранитной металлогенической зоны, специализированной на Nb, Ta, Be, Li, Zr, Th, REE оруденение [4]. Месторождение локализуется в позднепротерозойских известняках и сланцах монгошинской свиты, прорванных сиенитами и щелочными гранитами огнитского комплекса [1]. Так же в пределах месторождения отмечаются габброиды, диориты и плагиограниты тануольского комплекса и дайки диабазов и диабазовых порфириров дарлинского комплекса. Бериллиевая минерализация сопряжена с зоной дробления – 550 x 220 м, с характерным неоднородным прожилково-гнездовым распределением бериллиевых минералов, наибольшее распространение последних характерно среди мелкообломочных брекчий, примыкающих непосредственно к зонам тектонических нарушений. Бериллиевые минералы распределены неравномерно и представлены в равной степени фенакитом и бериллом, отмечаются так же бертрандит и бавенит. Руды состоят так же из флюорита, кварца, микроклина биотита, кальцита, амфибола и др. содержание Be в рудах доходит до 90000 г/т. В восточной части месторождения выявлено Ta-Nb оруденение, связанное с теми же огнитскими щелочными гранитами и локализующееся в тонко-мелкозернистых кварц-микроклин-альбитовых гранитоидах с пироксеном и колумбитом, содержание Nb доходит до 1500 г/т.

По содержанию редких и РЗЭ бериллиевые руды обогащены Rb, Th, U, Pb, Ta, Nb, Zr, Hf и имеют пониженные содержания Ba, Eu, Y. Граниты огнитского комплекса соответствуют щелочным лейкогранитам и характеризуются относительно примитивной мантии повышенными концентрациями Rb, Th, U, Pb, Ta, Nb, Zr, Hf и пониженными Sr, Ba, Eu с небольшим преобладанием легких редких земель над тяжелыми  $(La/Yb)_n = 2.7$ . Граниты с Ta-Nb минерализацией имеют еще более повышенные содержания Rb, Th, U, Pb, Ta, Nb, Zr, Hf и пониженные Sr, Ba, Eu. На дискриминационных петрохимических диаграммах гранитоиды попадают в поле внутриплитных образований (WRG).

Нами были проведены геохронологические U-Pb (ID-TIMS) исследования единичных зерен циркона из щелочных гранитов огнитского комплекса с Ta-Nb минерализацией на Снежном месторождении. Изученный циркон характеризуется высокой степенью метамиктности, и для его геохронологических исследований была использована модифицированная методика предварительного высокотемпературного отжига и предварительной кислотной обработки [5].

Конкордантный возраст циркона соответствует –  $311 \pm 1$  млн. лет (СКВО=0.019). Морфологические особенности изученного циркона позволяют говорить об его магматическом происхождении, что дает основание рассматривать полученную оценку возраста, в качестве возраста становления щелочных гранитов огнитского комплекса. Полученная оценка возраста согласуется с возрастом бериллиевых руд на Снежном месторождении (306 млн. лет, Rb-Sr метод, [4]), а также близка к датировке, полученной по габброидам – 297 млн. лет [6]. Полученный нами возраст по щелочным гранитам огнитского комплекса с Ta-Nb минерализацией, близок к возрасту бериллиевого оруденения и габброидам, что говорит о единой, разновозрастной базит-щелочно-гранитной ассоциации.

Полученные данные свидетельствуют, что время становления Снежного месторождения совпадает с формированием таких редкометальных месторождений в Алтае-Саянской складчатой области, как Улуг-Танзек, Зашихинское, Улан-Тологое [2,7,8]. Они связаны с образованием редкометальных гранитов, слагающих ряд массивов-месторождений, протянувшихся на 500 км из Северо-Западной Монголии, вдоль восточной границы Тувы и далее вдоль Восточного Саяна. С этим этапом в Восточном Саяне так же связано распространение щелочных даек и сиенитов, а также субщелочных габбро и габбро-монзонитов с возрастом 304 млн. лет [4,9]. Полученные новые геохронологические данные о возрасте щелочных гранитов огнитского комплекса на Снежном месторождении подтверждают правильность выделенной нами ранее на этой территории позднепалеозойской Восточно-Саянской редкометальной щелочногранитной металлогенической зоны, специализированной на Nb, Ta, Be, Li, Zr, Th, REE. Формирование Восточно-Саянской зоны щелочного магматизма было связано с рифтогенными процессами, вызванными взаимодействием Таримского и Баргузинского мантийных плюмов [7,8].

Исследование проводилось в рамках проекта РФФ № 22-17-00033.

- [1] Шурига Т.Н. Биотит-флюорит-фенакит-берилловый тип // Генетические типы гидротермальных месторождений бериллия. – М.: Недра. – 1975. – С. 112-118.
- [2] Ярмолук В.В., А.В. Никифоров, Е.Б. Сальникова, В.А. и др. Редкометальные гранитоиды месторождения Улуг-Танзек (Восточная Тува): возраст и тектоническое положение // Докл. РАН. – 2010. Т. 430. № – 2. – С. 248-253.
- [3] Куприянова И.И., Шпанов Е.П. Бериллиевые месторождения России. – М.: ВИМС. 2011. – 353 с.
- [4] Ярмолук В.В., Лыхин Д.А., Шурига Т.Н. и др. Возраст, состав пород, руд и геологическое положение бериллиевого месторождения Снежное: к обоснованию позднепалеозойской Восточно-Саянской редкометальной зоны (Россия) // ГРМ. – 2011. Т. 53. № – 4. – С. 390-400.
- [5] Иванова А.А., Сальникова Е.Б. Котов А.Б. и др. U-Pb (ID-TIMS) датирование высокоурановых метамиктизированных цирконов: новые возможности известных подходов // Петрология. – 2021. Т. 29. № – 6. – С.656-667.
- [6] Хубанов В.Б., Долгобородова К.Д., Врублевская Т.Т. и др. Возраст базитовых даек бериллиевого месторождения Снежное (Восточный Саян) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса. – Иркутск. – 2021. – С. 250-251.
- [7] Ярмолук В.В., Кузьмин М.И. Позднепалеозойский и раннемезозойский редкометальный магматизм Центральной Азии: этапы, области и обстановки формирования // ГРМ. – 2012. – Т. 54. – № 5. – С. 375-399.
- [8] Ярмолук В. В., Лыхин Д. А., Козловский А. М. и др. Состав, источники и механизмы формирования редкометальных гранитоидов позднепалеозойской Восточно-Саянской зоны щелочного магматизма (на примере массива Улан-Тологой) // Петрология. – 2016. – Т. 24. – № 5 – С. 515-536.
- [9] Рассказов С.В., Масловская М.Н., Скопинцев В.Г. и др. Позднепалеозойские субщелочные и редкометальные гранитоиды юго-восточной части Восточного Саяна (геохимические характеристики и Rb-Sr-изотопная систематика) // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 11. – С. 1133-1144.

## **Возраст гранитов Белокурихинского массива (Горный Алтай): U-Pb данные**

*М.Е. Мамыкина*

*Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, [emamikina@mail.ru](mailto:emamikina@mail.ru)*

Белокурихинский массив, расположенный в северной части Горного Алтая, по составу гранодиорит-гранит-лейкогранитовый. Массив имеет редкометальную специализацию на Li, Be, Ta, Nb и другие редкие металлы, которая связана с жильными образованиями и лейкогранитами массива [1]. Исследованием массива занимался и продолжает заниматься широкий круг лиц, однако, данных в области геохронологии представлено в недостаточном количестве. Первые данные о возрасте массива были получены в 2001 году при исследовании четырех проб гранитов Rb-Sr методом и навески зерен циркона U-Pb методом (TIMS). По полученным данным возрастной диапазон формирования массива составил 245-232 млн лет [4]. Следующие данные, касающиеся возраста Белокурихинского массива, были получены в 2017 году. Определение возраста происходило по слюдам из пород массива Ar-Ar методом. В результате был получен возраст формирования массива около 250 млн лет [3]. В 2021 году нами был изучен титанит из гранодиоритов массива, а также установлен его возраст U-Pb методом (ID-TIMS), который составляет около 255 млн лет [2]. По полученным результатам диапазон формирования массива соответствует интервалу 255-232 млн лет. Поэтому оценка времени формирования массива требует более точных методов.

Для определения возраста были выделены зерна циркона из гранодиорита, гранита и лейкогранита. Исследуемые зерна циркона бесцветные, некоторые светло-коричневого

оттенка, имеют удлинённую и округлую форму. В некоторых зернах циркона присутствуют включения апатита и монацита, а также отмечено зерно в сростание с ксенотимом. Измерение изотопных отношений проводилось в центральных и краевых зонах зерен. Геохронологическое исследование U-Pb методом проводилось на ионном микрозонде SHRIMP-II (ЦИИ ВСЕГЕИ) по стандартной методике [5].

Данные, полученные в ходе исследования краевой и центральной зоны циркона из гранодиорита, следующие: в центральных зонах содержание U составило 440 ppm, Th – 226 ppm, а в краевых содержание U составило 518 ppm, Th – 259 ppm. Th/U отношение составило 0.53 в центральной части и 0.52 в краевой. В результате U-Pb датирования циркона было получено два возраста: для центральной зоны циркона возраст –  $249 \pm 7$  млн лет (MSWD = 0.037), для краевой зоны возраст –  $118 \pm 4$  млн лет (MSWD = 0.047). Интерпретировать значение возраста около 118 млн лет на данный момент затруднительно. Для циркона из гранитов измерение изотопных отношений проводилось в центральных зонах минерала. Для них содержание U варьирует в пределах от 137 ppm до 498 ppm, Th – от 106 ppm до 446 ppm, а Th/U отношение в среднем составило 0.87. По результатам U-Pb датирования циркона был рассчитан конкордантный возраст  $247 \pm 2$  млн лет (MSWD = 1.12). Для циркона из лейкогранитов было проведено измерение изотопных отношений в центральных зонах минерала. В результате было получено, что содержание U варьирует в пределах от 805 ppm до 6617 ppm, Th – от 273 ppm до 1354 ppm. Среднее значение Th/U отношения составило 0.42. Для циркона из лейкогранита рассчитан конкордантный возраст –  $255 \pm 4$  млн лет (MSWD = 0.48).

Таким образом, полученные данные возраста позволяют сократить временной диапазон формирования массива до значений 250-245 млн лет (с учетом погрешности метода). Полученный результат согласуется с данными анализа слюды Ar-Ar методом (250 млн лет) и данными по U-Pb исследованию титанита (255 млн лет) из гранодиоритов массива.

- [1] Гусев, А.И., Гусев Н.И., Табакаева Е.М. Петрология и рудоносность Белокурихинского комплекса Алтая: монография / Бийск: БПГУ им. В.М.Шукшина, 2008. – 195 с.
- [2] Скублов С. Г., Мамыкина М. Е., Ризванова Н. Г. U-Pb возраст и редкоэлементный состав титанита из гранитов Белокурихинского массива, Горный Алтай // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2021. – Т. 24. – №. 2. – С. 168-177.
- [3] Gavgryushkina O.A., Travin A.V., Kruk N.N. Duration of granitoid magmatism in peripheral parts of large igneous provinces (based on Ar/ Ar isotopic studies of Altai Permian-Triassic granitoids) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. Vol. 8. P. 1035–1047.
- [4] Vladimirov A.G., Babin G.A., Rudnev S.N., Kruk N.N., Annikova I.Y., Borisov S.M., Buslov M.M., Vladimirov V.G., Vystavnoi S.A., Gavrilov V.I., Gusev N.I., Geology, magmatism and metamorphism of the western part of Altai-Sayan Fold Region. In: The field excursion guide for geological of the Third International Workshop of the IGCP-420 Project. Continental growth in the Phanerozoic: evidence from Central Asia. Novosibirsk, 2001. 140p.
- [5] Williams I.S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe // *Rev. Econ. Geol.* 1998. V. 7. P. 1-35.

## Возможности $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$ метода датирования минералов платины и платинометального рудообразования

*А.Г. Мочалов<sup>1</sup>, О.В. Якубович<sup>2,1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН; [mag1950@mail.ru](mailto:mag1950@mail.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет; [olya.v.yakubovich@gmail.com](mailto:olya.v.yakubovich@gmail.com)

Оценка возраста, периодичности (цикличности) и длительности минералообразующих процессов – ключевой вопрос в учении о происхождении рудных месторождений. Его решение имеет не только фундаментальное значение, но и играет важную практическую роль, т. к. сведения о возрасте месторождений позволяют установить связи между рудообразующими процессами и геологическими событиями, а, следовательно, улучшить критерии прогноза перспективных территорий. Представления о последовательности платинометального рудообразования пород ультрамафитовых формаций основаны на результатах изучения

агрегатов минералов платиновой группы (МПП) с силикатами, оксидами и сульфидами. Установленная последовательность развития МПП в агрегатах, как правило, соответствовала времени образования и преобразования вмещающих руды и породы. Важный шаг в решении проблемы датирования МПП был сделан в ИГГД РАН Ю. А. Шуколюковым с коллегами, благодаря разработке метода  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  изотопного датирования. Предварительные точечные измерения  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  возраста минералов группы самородной платины (МГСП) достаточно точно совпадали с известным возрастом продуцирующих их ультраосновных массивов [1, 2].

Для разработки возможностей  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  метода датирования, среди хорошо изученных МПП объектов ультрамафитовых формаций (мантийных перидотитов и их магматических комплексов офиолитов; островодужных габбро-пироксенит-дунитовых сооружений) выбраны зонально-кольцевой щелочно-ультраосновной массив Кондёр и продуцируемое им уникальное россыпное месторождение платиновых металлов рек Кондёр – Уоргалан на Алданском щите. Массив Кондёр сохранил целостную последовательность формирования, как пород, так и их генетических минералого-геохимических типов МПП. 1) Pt – магматогенного типа в мелкозернистых дунитах и пироксенитах; 2) Pt – магматогенно-флюидно-метасоматического типа в крупнозернистых дунитах с микровключениями хромшпинелида, магнетита и клинопироксена; 3) Pt>Os – магматогенно-флюидно-метасоматического типа в шлирах и линзовидных жилах клинопироксенитов в дунитах; 4) Pt>Ir – флюидно-метаморфогенного типа в дунитах, клинопироксенитах и хромититах; 5) Pt>Pd – магматогенно-флюидно-метасоматического типа в метасоматитах по дунитам [3].

В ходе исследований возможностей  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  метода было проведено обоснование новых  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  геохронометров и методов расчётов  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  возраста. В первую очередь МГСП [4-6]. Исследованы особенности миграции гелия в сперрилите ( $\text{PtAs}_2$ ) с полупроводниковыми – полуметаллическими свойствами [7]. На примере минерала палладия – звягинцевита ( $\text{Pd}_3\text{Pb}$ ), с примесями Pt до 7 мас.%, так же определена возможность использования подобных ему МПП как геохронометры [8].

Установлено, что результаты измерений  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  не только определяют возраст самих МГСП и их генетических минералого-геохимических типов МПП, но и датируют рудообразующие процессы массива Кондёр ( $143\pm 7$ ;  $128\pm 6$  и  $115\pm 6$  млн. лет), чем подтвердили ранее развиваемую модель полициклического образования россыпеобразующих формаций МПП [3]. Тем же самым проливают свет о длительности становления самого щелочно-ультраосновного массива [7].

Сравнение  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  возраста формирования платинометалльного рудообразования массива Кондёр – 30 млн лет, и щелочно-ультраосновного массива Чад (который продуцирует среднее по запасам россыпное месторождение платиновых металлов руч. Моховой) – 16 млн лет ( $123\pm 6$ ,  $113\pm 6$ ,  $107\pm 6$  млн. лет), свидетельствуют о временных нюансах в развитии мезозойской тектоно-магматической активизации Алданского щита. На основании этого  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  датирования МГСП проявляется новый типоморфный фактор – временной диапазон образования россыпеобразующих формаций минералого-геохимических типов и их месторождений различных щелочно-ультраосновных плутонов. Таким образом,  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  датированием разработан критерий прогноза перспективных территорий на платиновые металлы [8].

Работа выполнена по темам ИГГД РАН FMUW-2022-0003,-0004; РНФ № 22-27-00342.

- [1] Шуколюков Ю.А., Якубович О.В., Мочалов А.Г., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Яковлева С. З., Корнеев С.И., Гороховский Б.М. Новый изотопный геохронометр для прямого датирования самородных минералов платины ( $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  метод) // Петрология. 2012. Т. 20 № 6. С. 545–559.
- [2] Shukolyukov Yu.A., Yakubovich O.V., Mochalov A.G. Dating platinum mineralization by the novel  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  method of isotope geochronology // 12th International Platinum Symposium. Yekaterinburg: IGG UB RAS. 2014. P. 218-200.
- [3] Мочалов А.Г. Замечательные минералы платины массива Кондёр (Хабаровский край) // Минералогический Альманах. Серия: Знаменитые минералогические объекты России. 2019. Т. 23. Вып. 3. 128 с.

- [4] Мочалов А.Г., Якубович О.В., Бортников Н.С.  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  возраст платинометалльных рудопроявлений щелочно-ультраосновного массива Кондёр (Хабаровский край, Россия) // ДАН. 2016. Т. 469. № 5. С. 602-606.
- [5] Мочалов А.Г., Якубович О.В.  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  возраст самородков платины щелочно-ультраосновного массива Кондёр (Хабаровский край, Россия) // Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов. СПб: Изд-во СПГУ – ФГУП НТЦ «Информрегистр». 2016. С. 91-99.
- [6] Мочалов А.Г., Якубович О.В., Золотарев А.А. Структурные изменения и сохранность радиогенного  $^4\text{He}$  в минералах платины при механических деформациях // ДАН. 2018, Т. 480. № 1. С. 85–89.
- [7] Якубович О. В., Мочалов А. Г., Служеникин С. Ф. Сперрилит ( $\text{PtAs}_2$ ) как  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  геохронометр // ДАН. 2015. Т. 462. № 1. С. 1-4.
- [8] Мочалов А.Г., Якубович О.В. Звягинцевит  $\text{Pd}_3\text{Pb}$  как новый  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  геохронометр. Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. VII Российская конференция по изотопной геохронологии. Москва, 5-7 июня 2018. Материалы конференции. 2018. С. 221-224.
- [9] Мочалов А.Г., Якубович О.В., Стюарт Ф.М., Бортников Н.С. Новые свидетельства полицикличности платинометалльных россыпеобразующих формаций щелочно-ультраосновного массива Кондёр: результаты  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$ -датирования // ДАН. 2021. Т. 498. № 1. С. 23–30.
- [10] Мочалов А.Г., Якубович О.В., Бортников Н.С.  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$ -датирование россыпеобразующих минералов платины щелочно-ультраосновного массива Чад: новое подтверждение полицикличности платинометалльного рудообразования // ДАН. 2022. Т. 504. № 1. С. 13–21.

## **Гранитная магмогенерация как результат термического взаимодействия плюма на примере модели формирования гранитных магм Калбо-Нарымского батолита Таримским плюмом**

*Н.Г. Мурзинцев, А.В. Травин*

*Новосибирск, ИГМ СО РАН*

Ранее в наших работах [1] была предложена двухуровневая модель гранитного батолита. В котором нижний каскад-уровень афилирован с источником расплава, а верхняя камера является интрузивом из нижней. В дальнейшем происходит длительная тектономагматическая эволюция модели, в ходе которой предполагается длительная дифференциация родоначального расплава. При этом данный подход работает только в пределах одного магматического комплекса с протолитом и единым трендом дифференциации расплава. Но крупные формации, как правило, состоят из множества комплексов, обладающих как различным возрастом, так и составом протолита. Таким образом, можно сделать вывод, что таких нижних каскадов было несколько. Но по каким-то причинам они либо начинают выплавляться в разное время, либо отрыв магмы от источника происходит в разное время. А также они имеют различный объем по той или иной причине. Исходя из разницы в исходном составе протолита можно предположить и разную температуру ликвидуса. Что в условиях андерплейтинга для модели магмогенерации связанной с термическим воздействием Таримского плюма может привести к выплавке гранитной магмы в различные промежутки времени. Как показывает в своей статье Трубицын [2], плюмовое воздействие является импульсно периодическим явлением. Когда после основного внедрения гриба плюма происходит его застывание и перемораживание подводящей ножки, что в свою очередь приводит к образованию из основного столба в горячей точке новой «шляпы» гриба плюма и вторичному термическому импульсу, но тогда периодичность была бы равна периоду пульсации ~20 млн лет. Как показывают оценки мощности глубинной камеры эти параметры сопоставимы между собой для различных



объектов [1]. Тогда, можно предположить, что существует некоторая критическая мощность (а не только степень плавления), при которой происходит отрыв магмы от источника и внедрение оной на верхний уровень. Но достигается она в различные моменты времени.

Калба-Нарымский гранитоидный батолит расположен на территории восточного Казахстана. Его формирование связывают с термическим влиянием Таримского плюма [3]. На основании геологических данных и результатов изотопного датирования установлена последовательность формирования гранитоидных комплексов: гранодиорит-граниты калгутинского (303-308 млн лет), плагиограниты кунушского (299-307 млн лет) комплексов, формирующие небольшие тела и дайки северо-западного простирания; гранодиорит-граниты калбинского (286-297 млн лет), гранит-лейкограниты монастырского (283-285 млн лет) комплексов, формирующие собственно Калба-Нарымский батолит [3].

Чтобы оценить время и масштабы магмообразования воспользуемся алгоритмом, описанным в [1]. Разность состава для простоты будем регулировать содержанием воды. Геометрию расчетной области примем планарной с несколькими зонами с различным содержанием воды что даст начальные условия для температуры ликвидуса влажного гранита. Для модели плюмового воздействия расположим на границе Мохо (45 км) базитовую камеру с температурой солидуса 1300 С и начальной температурой, превышающей равновесную на данной глубине на 440 С [4], мощностью 15 км и поперечным размером 500 км. Положим содержание воды в общей раме равным нулю, но при этом в коре (выше границы Мохо) выделим два участка с содержанием воды 3% и 6%. Чтобы избежать их взаимного влияния разнесем их пространственно, но симметрично относительно центра базитовой пластины, чтобы они располагались в равных условиях. Результаты будем рассматривать как среднюю мощность магматической камеры для пород каждого состава и площадь сечения оной в вертикальном разрезе.

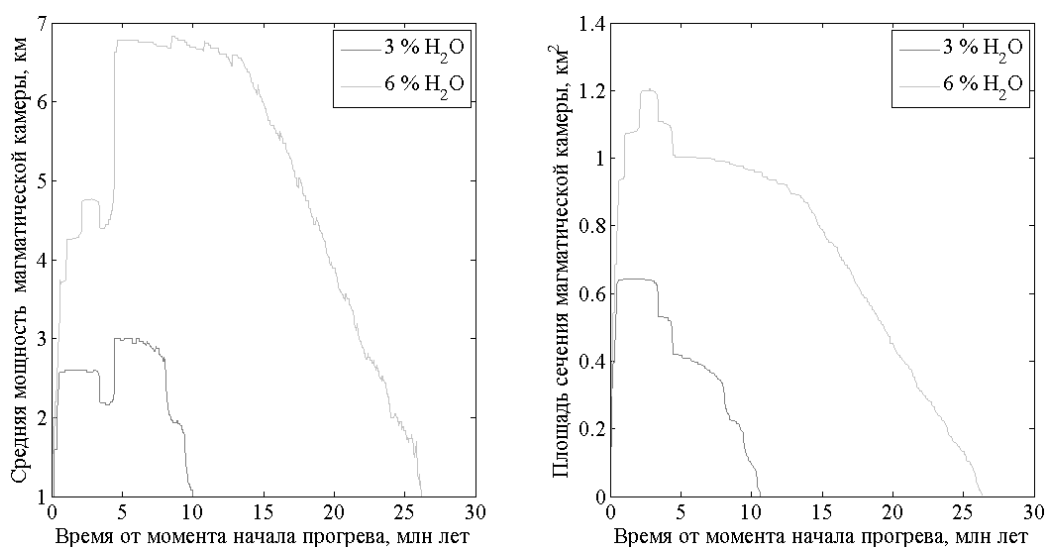


Рис. 1. Результаты расчета. Зависимость мощности и объема гранитной выплавки в зависимости от времени и содержания воды.

Как видно из результатов моделирования (рис. 1), содержание в протолите легирующего соединения, как в данном случае воды, может существенно влиять как на максимальную мощность и объем выплавки, так и на время достижения некой заданной величины.

Таким образом, содержание соединений и элементов, меняющих температуру ликвидуса протолита может определять разницу во времени внедрения различных комплексов одного и того же батолита от одного и того же термического воздействия при равных РТ условиях формирования расплавов.

- [1] Murzintsev N.G., Annikova I.Yu., Travin A.V., Vladimirov A.G., Dyachkov B.A., Maslov V.I., Oitseva T.A., Gavryushkina O.A., 2019. Thermochronology and mathematical modeling of the formation dynamics of rare-metal-granite deposits of the Altai collision system. // *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (2), 375–404. doi:10.5800/GT-2019-10-2-0419.
- [2] В.П. Трубицын, М.Н. Евсеев Плюмовый режим тепловой конвекции в мантии земли // *Физика Земли*, 2018, №6 с. 37 – 47.
- [3] Хромых С.В. и др. // *Геология и геофизика*, 2016. Т. 57, № 5. С.983-1004.
- [4] А.Г. Кирдяшкин, А.А. Кирдяшкин Параметры плюмов Северной Азии // *Геология и геофизика*, 2016, т. 57, №11, с.1949 – 1968.

## Состав и возраст пород Кукасозерской структуры Балтийского щита в свете новых геохимических и изотопно-геохронологических данных

*Т.А. Мыскова<sup>1</sup>, А.С. Никонова<sup>2</sup>, К.А. Никонов<sup>2</sup>, И.А. Житникова<sup>2</sup>, П.А. Львов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [tmyskova@gmail.com](mailto:tmyskova@gmail.com)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им.

*А.П. Карпинского*

Кукасозерская структура находится в зоне сочленения двух крупных провинций Фенноскандинавского щита: Карельской и Беломорской. Принято считать, что она имеет рифтогенную природу и сложена палеопротерозойскими вулканогенно-осадочными образованиями сумия, ятулия и людиковия [1]. Структуру обрамляют архейские комплексы: с юго-запада – гранитоиды Карельского кратона, с северо-востока – супракрустальные образования Тикшозерского зеленокаменного пояса, которые сопоставляются с вулканитами современных островодужных серий и офиолитовых комплексов [2].

При детальном изучении разрезов палеопротерозоя Кукасозерской структуры нами получены новые данные по геохимии и возрасту пород, не подтверждающие присутствия в них типичных для сумия, ятулия и людиковия образований.

Сумийские вулканиты выделялись на северном и восточном побережьях Кукас-озера. По нашим данным разрезы в этих местах сложены гнейсами, сопоставимыми с архейскими образованиями Тикшозерского зеленокаменного пояса, обрамляющими Кукасозерскую структуру с севера и северо-запада. Между сравниваемыми разновозрастными комплексами не выявлено видимых границ и они идентичны по минеральному и химическому составу, в одинаковой степени метаморфизованы (в условиях амфиболитовой фации) и по полученным новым геохронологическим данным имеют неоархейский возраст. И те и другие представлены Amp, Bt и Bt-Amp гнейсами, большей частью полосчатыми. На бинарных диаграммах SiO<sub>2</sub> – петрогенные оксиды и редкие элементы их составы попадают в одни и те же поля с широкими вариациями по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O. По химическому составу вулканиты варьируют от андезибазальтов до риолитов и имеют натровую, реже калиевую специализацию с отношениями K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O от 0.07 до 2.64. Они принадлежат известково-щелочной серии, характеризуются умеренно и высоко глиноземистым характером и относятся к магнезиальным. Супракрустальные образования обоих комплексов имеют сходный дифференцированный характер распределения РЗЭ без заметных европиевых аномалий, близкий к спектрам андезитов II и дацитов FI архейских зеленокаменных поясов, сопоставляемым с вулканитами современных островодужных систем. На мультиэлементных спайдерграммах они демонстрируют отчетливые Nb-минимумы, характерные для пород надсубдукционных обстановок. На геодинамических дискриминационных диаграммах Y–Nb и Yb–Ta [3], составы метавулканитов изученных комплексов попадают в поля островных дуг. Возраст кристаллизации (U–Pb по циркону) метадацитов Кукасозерской структуры (считавшихся сумийскими) отвечает 2715±8 млн лет, а метаандезидацитов из зеленокаменных образований обрамления – 2777±8 млн лет. Sm–Nd модельный возраст в обоих случаях составил 2.9 млрд лет, а εNd равен +1.63 (для +дацитов) и +2.24 (для андезидацитов), что свидетельствует о разном вкладе мантийного и корового (субдукционного) компонента в составе первичных расплавов.

На южном побережье оз. Кукас ассоциация пород, представленная карбонатами и сильно бластокатаклазированными и милонитизированными образованиями, напоминающими гравелиты и параамфиболиты, сопоставлялась с разрезами ятулийских осадков. Природа этих пород до сих пор не была изучена. Между тем, в гравелитоподобных образованиях и параамфиболитах нами встречены реликты габбровых структур и установлены переходы от массивных, слабо изменённых основных и ультраосновных магматических пород к бластокатаклазитам и амфиболовым сланцам, по которым в свою очередь развиваются породы Qz-Ms-Bt-Cb состава. В зоне непосредственного контакта метагабброидов с карбонатсодержащими породами, прослеженного в береговых обнажениях от мыса Хирвинаволок на восток на протяжении 8 км, присутствуют как полосчатые, так и брекчиевые структуры. Обломки разного размера (от 10 см до первых метров) представлены переработанными габброидами (Amf сланцами, в разной степени карбонатизированными и часто содержащими пылевидный углерод). Цементирующая масса имеет Qz-Ms-Bt-Cb состав. Массивные метагаббро сложены Hb и Pl, из вторичных минералов иногда присутствуют Chl и Cb. На диаграмме TAS они попадают в поле габбро нормальной щелочности. Габброиды относятся к толеитовой серии, имеют горизонтальные нефракционированные распределения редкоземельных элементов с  $La_N/Lu_N=1$  и характеризуются отсутствием Nb/Nb\* аномалий, что сближает их с вулканитами N-MORB современных тектонических обстановок. На дискриминационной диаграмме Zr/Y-Nb/Y [4] они попадают в поле базальтов океанических плато, имеющих плюмовый источник. Бластокатаклазированные и окварцованные габброиды приобретают составы кварцевых диоритов. Они заметно обогащены легкими лантаноидами ( $La_N/Lu_N = 8-41$ ), имеют значительные вариации в содержаниях тяжелых РЗЭ и отчетливые ниобиевые минимумы. Для бластокатаклазированного габбро (частично сохранившего реликтовую магматическую структуру) были получены два значения возраста (U-Pb по циркону): возраст кристаллизации пород, составивший  $2686 \pm 11$  млн лет и возраст наложенного гидротермально-метасоматического процесса –  $2019 \pm 21$  млн лет.

Метасоматоз, которому подверглась значительная часть пород Кукасозерской структуры, представлен несколькими типами, каждый из которых требует самостоятельного детального изучения. Наиболее широкое распространение получили зоны окварцевания, карбонатизации и углеродизации. Предварительно можно отметить, что вторичные кварциты развиваются по гранитам, а Qz-Ms-Bt-двукарбонатные (доломит и кальцит) метасоматиты – по габброидам.

Приведенные данные позволяют считать Кукасозерскую структуру западным фрагментом Челозерской структуры, входящей в состав Тикшозерского архейского зеленокаменного пояса. Последний считается эволюционировавшей во времени (от стадии юной островной дуги до этапа аккреции) субдукционно-аккреционной системой [2]. Базитовый магматизм, представленный многочисленными телами габбро и ультрабазитов южного побережья оз. Кукас и островов осевой зоны Кукасозерской структуры, вероятнее всего, связан с заключительным этапом формирования островодужной постройки и проявился в тыловой области дуги в задуговом бассейне. Можно предположить, что габброиды были тектонизированы во время присоединения островной дуги к краю Карельского кратона на этапе коллизии этих двух структур.

- [1] Алексеев Н. Л., Балаганский В. В., Зингер Т. Ф. и др. Позднеархейская история зоны сочленения Беломорского подвижного пояса и Карельского кратона, Балтийский щит: новые изотопные данные // ДАН. 2004. Т. 397, № 3. С. 369–373.
- [2] Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 298 с.
- [3] Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // J. Petrol. 1984. V. 25. P. 956–983.
- [4] Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. V. 79. P. 491-504.

## Возраст магматитов и метасоматитов золоторудного месторождения Кекура (Западная Чукотка, Россия): U/Pb и Rb/Sr изотопные данные

Е.В. Нагорная<sup>1,2</sup>, М.О. Аносова<sup>1</sup>, И.А. Бакшеев<sup>2</sup>, Ю.А. Костицын<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Москва, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, [chp312@gmail.com](mailto:chp312@gmail.com), [masha\\_anosova@mail.ru](mailto:masha_anosova@mail.ru), [kostitsyn@geokhi.ru](mailto:kostitsyn@geokhi.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, [baksheev@geol.msu.ru](mailto:baksheev@geol.msu.ru)

Одной из задач при изучении гидротермальных рудных месторождений является выяснения возрастных взаимоотношений магматических пород и минерализации. И если датирование магматических пород в общем не вызывает проблем, то определение времени образования руд бывает весьма затруднительно из-за отсутствия подходящих для изучения минералов. В настоящей работе представлены результаты U-Pb изотопного датирования реликтового циркона гранодиоритов и Rb-Sr изотопного датирования серицита золотоносных метасоматитов, образованных по этим гранодиоритам из Au месторождения Кекура, расположенного в 120 км юго-западнее г. Билибино, Чукотский АО. Месторождение локализовано в пределах K<sub>1</sub> гранодиоритового массива, который прорывает T<sub>3</sub> осадочную толщу. Информация о стадийности метасоматоза и рудообразования на месторождении есть в работах [1, 2].

Основной объем золотого оруднения связан с кварц-серицит-доломитовыми метасоматитами (березитами), поэтому знание возраста этих пород позволит судить о времени формирования оруднения и временном соотношении метасоматоза и магматических пород, по которым они развиваются. Для проведения геохронологических исследований отобраны березиты по гранодиоритам из центральной части месторождения. Метасоматиты светлые зеленоватые мелкозернистые неравномернозернистые массивные и пятнистые из-за неравномерного распределением кварца и серицита. В них сохранились следы первичной магматической структуры. Порода сложена серицитом (65 %), кварцем (30 %) и доломитом, пиритом и арсенопиритом (5%). Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом, рутилом и турмалином. Очень редко встречаются реликты калиевого полевого шпата и биотита.

Кристаллы реликтового циркона бесцветные или с желтоватым оттенком прозрачные, идиоморфные до субидиоморфных, удлинённые практически без видимых дефектов. В них наблюдается тонкая осцилляционная зональность характерная для магматического циркона. Изотопное датирование циркона проведено методом масс-спектрометрии вторичных ионов с использованием SHRIMP-II в Центре Изотопных Исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ». Концентрации U и Th в зернах циркона составляют 165-643 ppm и 73-252 ppm соответственно. Отношение Th/U – 0.37-0.65. По U-Pb изотопным данным построена диаграмма с конкордией в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  –  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ; конкордантный возраст  $110.7 \pm 1.2$  млн лет (СКВО = 0.024, 2 $\sigma$ , N=9) (рис. 1а) соответствует раннему альбу и считается временем формирования гранодиоритов.

Rb-Sr изотопные исследования проводились в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН. Получение материала для датирования вызвало трудности, так как основной объем слюды представлен чешуйками разного размера (~20-70 мкм) в сростании с другими минералами или гнездами. Учитывая тесное сростание серицита с другими минералами и размер чешуек, которые могли использоваться для датирования, применение стандартной Rb-Sr изотопной методики невозможно. Было принято решение выделить их как отдельные фракции, удалив карбонатную составляющую из пород химическими методами, так чтобы остались только силикатные минералы, пригодные для Rb-Sr датирования. Для этого была применена следующая методика. Образец дробили до крупности зерен 100 мкм, чтобы разделить сростки на отдельные минералы, и отмывали в 15% уксусной кислотой, для удаления карбонатной составляющей из породы, после чего, проба многократно промывалась дистиллированной водой. Не растворившаяся в кислоте часть пробы была разделена по плотности в смеси бромформа и изопропилового спирта на 3 фракции: >2.89 г/см<sup>3</sup>, >2.59 г/см<sup>3</sup>, <2.59 г/см<sup>3</sup>. Каждая из полученных фракций и исходная проба детально изучена при помощи сканирующего электронного микроскопа, с целью контроля минерального состава. В подготовленных таким образом пробах методом изотопного разбавления на многоколлекторном масс-спектрометре Triton измерены концентрации Rb и Sr и изотопные

отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ , что позволило построить изохрону, наклон которой отвечает возрасту  $109.6 \pm 1.1$  млн. лет (СКВО = 2.4) (рис. 1б), что так же соответствует раннему альбу.

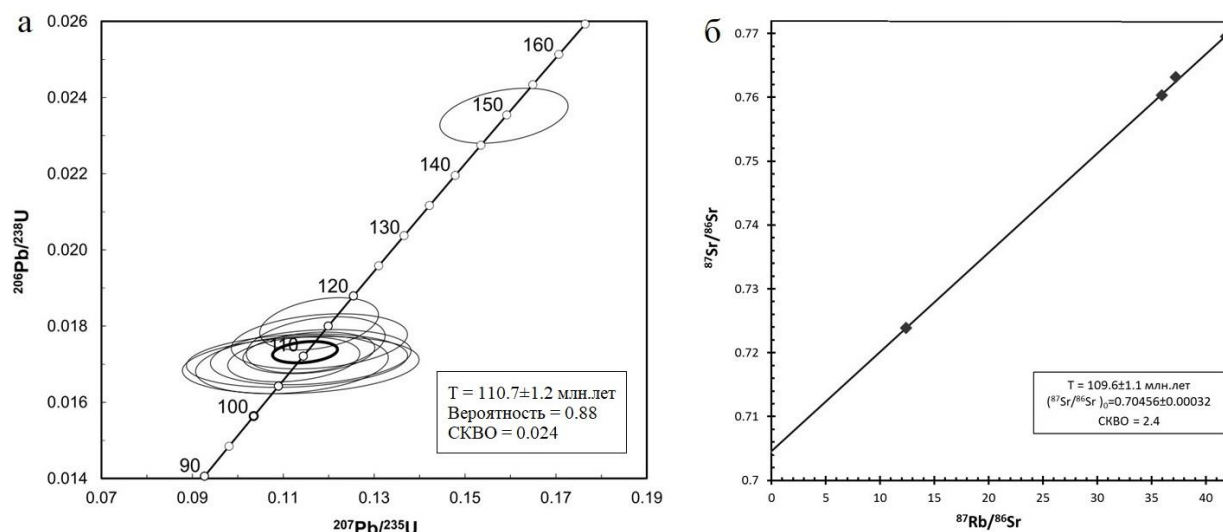


Рис. 1. Результаты геохронологических исследований березитов золоторудного месторождения Кекура: а) диаграмма с конкордией для реликтового магматического циркона; б) Rb-Sr изохронная диаграмма для фракций разной плотности, выделенных из березитов.

Полученные значения возраста реликтового магматического циркона U/Pb изотопным методом и золотоносных метасоматитов Rb/Sr изотопным методом указывают на отсутствие значительного перерыва между становлением интрузива и процессами метасоматоза на месторождении Кекура и предполагают связь оруденения с альбским магматизмом.

Настоящее исследование осуществлялось за счет средств, выделяемых из бюджета на исследования, ведущиеся по теме 0137-2019-0012 «Петрология, геохимия и геодинамика процессов образования и эволюции литосферы океанов и континентов».

- [1] Nagornaya E.V., Baksheev I.A., Nikolaev Yu. N., Apletalin A. V., Yapaskurt V.O. Tetrahedrite group minerals of the Kekura reduced intrusion-related gold deposit, Western Chukotka, Russia // *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 139, part A, 104498 <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104498>
- [2] Нагорная Е.В., Волкова М.М., Калько И.А., Джеджева Г.Т., Кошлякова Н.Н., Комарова М.М. Полиформационные метасоматиты золоторудного месторождения Кекура, Западная Чукотка // *Материалы девятой Российской молодежной научно-практической школы "Новое в познании процессов рудообразования"* – М. ИГЕМ РАН, 2019, с. 273-275

## О возрасте карбонатитов, миаскит-пегматитов и Nb-Zr минерализации Ильмено-Вишневогорского комплекса, Ю. Урал, Россия (Sm-Nd, Rb-Sr, U-Pb изотопные данные)

*И.Л. Недосекова<sup>1</sup>, Т.Б. Баянова<sup>2</sup>, П.А. Серов<sup>2</sup>, М.В. Червяковская<sup>1</sup>, В. Червяковский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Екатеринбург, Институт геологии и геохимии УрО РАН, [vladi49@yandex.ru](mailto:vladi49@yandex.ru)

<sup>2</sup> Апатиты, Институт геологии КНЦ РАН, [tamara@geoksc.apatity.ru](mailto:tamara@geoksc.apatity.ru); [serov@geoksc.apatity.ru](mailto:serov@geoksc.apatity.ru)

Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс (ИВК), расположенный в Уральской складчатой области, является представителем линейного типа карбонатитов, связанных с нефелин-сиенитовым магматизмом и линейными зонами щелочного метасоматоза [6]. Происхождение карбонатитовых комплексов линейного типа и связанной с ними Nb-Zr-REE минерализации дискуссионно. Так как породы линейных карбонатитовых комплексов

деформированы, предполагается, что они являются рифтогенными карбонатитовыми комплексами, которые позднее были вовлечены в зону коллизии [2]. Однако, некоторые исследователи предполагают, что эти комплексы образовались позднее, на орогенном этапе становления складчатых областей [8]. Происхождение ИВК также остается предметом дискуссий [1, 3, 6], что, в значительной мере, определяется большим диапазоном возрастных датировок (от 446 до 244 млн лет), полученных для щелочных пород и карбонатитов различными изотопными методами [1, 3-5, 7]. Вопросы генезиса и эволюции рудной Nb-Zr-REE минерализации, а также возраста и длительности этапов рудообразования в ИВК также нуждаются в дальнейших исследованиях и корректной интерпретации геохронологических данных.

Результаты ранее проведенного датирования пород и минералов свидетельствуют о двухэтапном формировании ИВК. Так, возраста двух этапов формирования получены по циркону миаскитов и карбонатитов ИВК (417-432 млн лет,  $S_{1-2}$ ) и (250-280 млн лет,  $P_{1-3}$ ) [3-4, 5, 7]. Бинарный возраст миаскитов также получен на основе Rb-Sr изохронного датирования: ордовик-силурийский (440-446 млн лет) по валовым пробам и пермский (244-255 млн лет) – по минеральным изохронам. Возраст  $425 \pm 44$  млн лет ( $S_1$ ) [5] и  $388 \pm 52$  млн лет ( $D_2$ ) [1] для вишневогорских карбонатитов показала Sm-Nd-изотопная система.

Для оценки возраста и длительности формирования ИВК и связанной с ним редкометалльной минерализации нами проведено изотопное U-Pb-датирование циркона из миаскит-пегматитов и карбонатитов (LA-ICP MS, ЦКП «Геоаналитик», ИГГ УрО РАН); выполнены исследования Sm-Nd- и Rb-Sr изотопных составов минералов и пород пироклоровых карбонатитов и миаскит-пегматитов с построением Sm-Nd- и Rb-Sr-изохрон (TRITON, ICP-MS NEPTUNE Plus, Finnigan MAT-262; ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты и ЦКП Геоаналитик, ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург).

U-Pb LA-ICP MS датирование было проведено для 12 кристаллов циркона из миаскит-пегматитов (обр. Солн-1) Увильдинского Nb-рудопроявления ИВК. Изученные кристаллы цирконов имеют крупноосцилляторную ростовую зональность и содержат включения калишпата, биотита, нефелина, альбита, уранпироклор, ильменит. В центральной части кристаллов циркона иногда сохраняются реликтовые затравки циркона (размером до 50 мкм), которые обрастают новообразованным цирконом с ростовой зональностью. Почти во всех кристаллах циркона в CL видны осветленные каймы твердофазовой рекристаллизации.

Конкордантный U-Pb-возраст основной генерации циркона с крупноосцилляторной зональностью:  $280.5 \pm 8.3$  млн лет ( $P_1$ ), СКВО=0.0014, при вероятности конкордантности 0.97,  $n=13$ . Датирование внешних осветленных кайм твердофазовой рекристаллизации цирконов показало наиболее молодой возраст  $249.1 \pm 7.8$  млн лет, при СКВО=0.029,  $n = 5$ . Реликтовые затравки циркона пегматитов, сохраняющиеся в центральной части кристаллов циркона, показывают более древний возраст  $374 \pm 17$  млн лет, близкий возрасту ранних генераций цирконов миаскитов и карбонатитов [3, 4].

Rb-Sr-изохрона, построенная для этого образца миаскит-пегматита (обр. Солн-1) по 6 точкам, пять из которых соответствуют изотопным составам минералов (нефелин, калишпат, биотит, канкринит, циркон) и одна – валовой пробе, показала возраст  $274 \pm 12$  млн лет ( $P_1$ ), СКВО=2.5, что подтверждает результаты датирования циркона из этого образца U-Pb-методом.

Sm-Nd-изохрона, построенная для пироклоровых карбонатитов (обр. 140-39) Вишневогорского месторождения, по 5 точкам (кальцит, апатит, биотит, пироклор валовая проба), показала возраст  $229 \pm 16$  млн лет ( $T_2$ ), СКВО=0.4. Rb-Sr-изотопные составы минералов (кальцит, апатит, биотит и пироклор) и валового состава пробы 140-39 образуют изохрону с близким возрастом  $250.5 \pm 1.8$  млн лет ( $P_3$ ), СКВО=0.59.

Полученные данные не соответствуют метаморфической концепции формирования ИВК [3], предполагающей различные температуры закрытия для различных изотопных систем, и могут интерпретироваться как новый процесс кристаллизации миаскит-пегматитов и карбонатитов на коллизионном этапе развития Уральской складчатой области. Результаты U-Pb датирования цирконов из миаскит-пегматитов, также, как Sm-Nd и Rb-Sr-датирования пироклорсодержащих миаскит-пегматитов и карбонатитов ИВК свидетельствуют о новом процессе рудообразования (в частности, кристаллизации поздних генераций циркона) в период

от нижней перми до раннего триаса, на коллизионной и постколлизионной стадии развития Уральской складчатой области.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № АААА-А18-118052590028-9.

- [1] Иванов К.С. О природе карбонатитов Урала // Литосфера. 2011. №1. С. 20-33.
- [2] Burke K., Ashwal L.D., Webb S.J. New way to map old sutures using deformed alkaline rocks and carbonatites // Geology. – 2003. – 31(5) – P. 391-394.
- [3] Kramm U., Blaxland A.B., Kononova V.A., Grauert B.J. Origin of the Ilmenogorsk–Vishnevogorsk nepheline syenites, Urals, USSR, and their time of emplacement during the history of the Ural fold belt: A Rb–Sr study // Geology. –1983. – 91. – P. 427-435.
- [4] Krasnobaev A.A., Busharina S., Valizer P.M., Medvedeva E.V. Zirconology of miaskites of the Ilmeny Mountains, South Ural // Geochem. Intern. – 2016. – 54. – P. 765–780.
- [5] Nedosekova I.L., Belyatsky B.V. Age and substance sources of the Ilmeno–Vishnevogorsky Alkaline Complex (South Urals): Rb–Sr, Sm–Nd, U–Pb, and Lu–Hf isotope data // Dokl. Earth Sci. – 2012. – 446. – P. 1071-1076.
- [6] Nedosekova I., Vladykin N., Udoratina O., Belyatsky B. Ore and Geochemical Specialization and Substance Sources of the Urals and Timan Carbonatite Complexes (Russia): Insights from Trace Element, Rb–Sr, and Sm–Nd Isotope Data // Minerals. – 2021. – 11. P. 711.
- [7] Nedosekova I.L., Belyatsky B.V., Belousova E.A. Trace elements and Hf isotope composition as indicators of zircon genesis in the evolution of the alkaline-carbonatite magmatic system (Ilmeno–Vishnevogorsky complex, Urals, Russia) // Rus. Geol. and Geoph. – 2016. – 57(6). – P. 891-906.
- [8] Valentin E., Botelho N.F., Dantas E.L. Monte Santo suite, an example of Ediacaran-Cambrian deformed alkaline rocks in the Araguaia Belt, Central Brazil. Implications for Western Gondwana evolution // Lithos. – 2020. – 366. – 105552.

## **Ar-Ar и U-Pb исследования пород щелочных комплексов – необходимость заверки первых результатов**

*А.В. Никифоров<sup>1</sup>, А.М. Козловский<sup>1</sup>, А.К. Хертек<sup>2</sup>, В.В. Ярмолюк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Институт рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии РАН, [nikav@igem.ru](mailto:nikav@igem.ru)

<sup>2</sup> Кызыл, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, [ajlan@mail.ru](mailto:ajlan@mail.ru)

Одним из широко используемых для датирования магматических пород геохронологическим методом является Ar-Ar метод. Позитивной практикой для применения этого метода является использование пороодообразующего амфибола, т.к. этот минерал характеризуется наиболее высокой температурой закрытия K-Ar системы. Амфибол хотя и относится к довольно распространенным минералам, однако не всегда его качество подходит для Ar-Ar определения возраста. Вторичные изменения или размеры кристаллов резко ограничивают количество пригодных для датирования образцов.

В нашей практике мы столкнулись с тем, что оцененное значение возраста по, казалось бы, хорошим по качеству монофракциям амфибола заставляли усомниться в их корректности, так как не совпадали с геологическими реалиями. Параллельные однотипные пробы или U-Pb исследования по цирконам подтверждали первоначальные сомнения.

В настоящем сообщении рассмотрим два примера датирования сиенитовых пород восточной части Тувы (Чавачский комплекс и Дугдинский массив), когда результаты Ar-Ar исследования амфибола показали отчетливо заниженные оценки возраста. С еще одним примером соотношения результатов Ar-Ar и U-Pb датирования можно ознакомиться в работе, посвященной исследованию щелочных гранитов Арысканского комплекса из настоящего сборника тезисов (**Сальникова и др.**).

Чавачский комплекс представлен невыдержанными по составу и зернистости щелочными и нефелиновыми сиенитами в сопровождении пегматитов и альбититов, развитых на площади более 20 км<sup>2</sup>. Породы слагают серию небольших субпластовых тел с крутыми углами падения, мощность которых достигает десятков метров, а по простиранию они прослеживаются на сотни

метров. Все тела ориентированы согласно общему субмеридиональному структурному плану вмещающих толщ сланцев, кварцитов и мраморов. Средне- и крупнозернистые сиениты рассматриваются как основная фаза комплекса, а изолированные тела пегматоидных щелочных сиенитов и мелкозернистых альбититов, как дополнительные (поздние) фазы.

Ar-Ar исследования амфибола из ср-к/зернистых биотит-амфиболовых сиенитов (проба Me-9/5) показали значение возраста  $407.5 \pm 5$  млн лет, а из мелко- среднезернистых директивных сиенитов (Me-9/11) –  $427.5 \pm 7$  млн лет. Эти оценки значительно различаются между собой и противоречат данным о возрастных соотношениях между породами. Поэтому были выполнены дополнительные U-Pb геохронологические исследования циркона (SHRIMP-II, ВСЕГЕИ) из пробы Me-9/11. Полученная оценка возраста  $455 \pm 4$  млн лет согласуется с ранее установленными геологическими событиями в районе – с возрастом однотипных щелочных сиенитов Кадыраутского массива и формированием гранитов Каахемского баталита [1].

Дугдинский массив сложен ассоциациями пород трех основных типов. Главное тело, площадью около  $35 \text{ км}^2$ , сложено трахитоидными амфиболовыми, амфибол-биотитовыми и пироксен-биотитовыми нефелиновыми сиенитами. На северном замыкании массива среди нефелиновых сиенитов появляются шпировые обособления агпаитовых пегматитов с эвдиалитом. К востоку среди обширных участков кварцевых сиенитов и нордмаркитов, которые рассматриваются как вторая фаза Дугдинского массива, развита серия сравнительно небольших тел, сложенных весьма разнообразными по составу щелочными породами – от кварцсодержащих сиенитов (вплоть до гранитов) до фельдшпатоидных сиенитов. Характерны многочисленные пегматоидные обособления и участки альбититов. Отдельные жилы пегматитов и сопровождающих их альбититов наблюдаются и вне связи с материнскими интрузиями.

На первом этапе геохронологических исследований пород массива получены следующие оценки возраста [2]: нефелиновых сиенитов главной фазы ( $291 \pm 5$  млн лет, Ar-Ar, проба Дг-3/3); щелочных сиенитов и гранитов с пегматитами ( $285 \pm 4$ , SHRIMP-II, проба Дг-1/5); и нордмаркитов ( $272 \pm 4$ , Ar-Ar, проба Дг-1/18). Согласующиеся результаты по щелочным породам, полученные разными методами не оставляют сомнения в правильности этих оценок возраста, тогда как данные для нордмаркитов противоречат геологическим наблюдениям – жилы щелочных пегматитов пересекают нордмаркиты. Дальнейшие исследования циркона (SRIMP-II, ВСЕГЕИ) из пробы нордмаркитов Дг-1/18, показало возраст  $284 \pm 2$  млн лет, который в пределах ошибки согласуется с возрастом других разновидностей пород Дугдинского массива.

Приведенные в настоящем сообщении примеры расхождения оценок возраста, полученных при Ar-Ar исследовании амфиболов с другими геохронологическими данными не могут быть результатом длительного остывания пород и, как следствие, значительно более позднего закрытия K-Ar изотопной системы амфибола: в Чавачском комплексе это сближенные сравнительно небольшие тела, имеющие очевидно единую термальную историю, а в Дугдинском массиве фаза нордмаркитов сравнительно небольшая по отношению к главной фазе нефелиновых сиенитов, по которым получен более древний Ar-Ar возраст, согласующийся с U-Pb. Таким образом приведенные данные показывают, что необходимо критически относиться к единичным определениям возраста даже по петрографически надежному для Ar-Ar исследований амфиболу. Несмотря на тщательный отбор материала, начиная с выбора проб, исследований в шлифах и на электронном микроскопе, и окончательного отбора материала под бинокуляром, тем не менее, сложно было предполагать, что для некоторых проб мы получим значения возраста, не соответствующие датируемому геологическому событию.

- [1] Руднев С.Н., Серов П.А., Киселева В.Ю. Венд-раннепалеозойский гранитоидный магматизм восточной Тувы // Геология и геофизика. – 2015. – т.56. – № 9. – с.1572-1600
- [2] Ярмолюк В. В., Козловский А. М., Никифоров А. В., Кудряшова Е. А., Хертек А. К. Возраст и состав Дугдинского массива щелочных пород (Восточный Саян): к оценке закономерностей проявления позднепалеозойского редкометального магматизма в юго-западном обрамлении Сибирской платформы // Доклады РАН. Науки о Земле. – 2021. – т. 499. – № 1. – с. 33-41



## Sm-Nd изотопно-геохимические особенности условно неархейских метаморфических пород Сынчугинского блока Буреинского континентального массива восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса

*Р.О. Овчинников<sup>1</sup>, В.П. Ковач<sup>2</sup>, W.L. Ху<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Благовещенск, Институт геологии и природопользования ДВО РАН, [ovchinnikov@ignm.ru](mailto:ovchinnikov@ignm.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [v.p.kovach@gmail.com](mailto:v.p.kovach@gmail.com)

<sup>3</sup> Changchun, China, College of Earth Sciences, Jilin University, [xuwl@jlu.edu.cn](mailto:xuwl@jlu.edu.cn)

Буреинский континентальный массив относится к числу наиболее крупных континентальных массивов восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса и обычно рассматривается в качестве составной части Буреинско-Цзямусинского супертеррейна [3]. Согласно существующим представлениям [2; 4], к наиболее древним образованиям этого массива относятся условно позднеархейские метаморфические комплексы, P-T условия формирования которых соответствуют амфиболитовой фации, а также магматические породы амурского и древнебуреинского комплексов, которым также приписывается архейский возраст.

В настоящее время, наименее изученными элементами в строении Буреинского континентального массива являются условно раннедокембрийские метаморфические и магматические породы, слагающие Сынчугинский, Гуджальский и Чегдомынский блоки, расположенные на восточной окраине Буреинского массива, традиционно рассматривающиеся в качестве “выступов” его фундамента [1]. В связи с этим, нами были проведены Sm-Nd изотопно-геохимические исследования гранат-биотит-серицит-кварцевых сланцев уральской свиты Сынчугинского блока Буреинского континентального массива.

Sm-Nd изотопно-геохимические исследования выполнены в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (г. Санкт-Петербург). Изотопные составы Sm и Nd были измерены на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON TI в статическом режиме. Измеренные отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  нормализованы к отношению  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ , и приведены к отношению  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512115$  в Nd стандарте JNdi-1 [10]. Средневзвешенное значение  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в Nd стандарте JNdi-1 за период измерений составило  $0.512108 \pm 7$  ( $n=10$ ). Точность определения концентраций Sm и Nd составляет  $\pm 0.5\%$ , изотопных отношений  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} - \pm 0.5\%$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - \pm 0.005\%$  ( $2\sigma$ ). Уровень холостого опыта не превышал 0.2 нг Sm и 0.5 нг Nd. При расчете величин  $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$  и модельных возрастов  $t_{\text{Nd}(DM)}$  использованы современные значения однородного хондритового резервуара (CHUR) по [6] ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512638$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1967$ ) и DM по [5] ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.513151$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.21365$ ). Для учета возможного фракционирования Sm и Nd во внутрикоровых процессах рассчитаны двустадийные Nd модельные возрасты  $t_{\text{Nd}(C)}$  [7] используя среднекорое отношение  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.12$  [11].

В результате проведенных Sm-Nd изотопно-геохимических исследований установлено, что гранат-биотит-серицит-кварцевые сланцы уральской свиты Сынчугинского блока характеризуются отрицательными значениями  $\epsilon_{\text{Nd}(t)} = -13.6 \dots -13.9$  (в качестве величины  $t$  использован возраст метаморфизма изученных пород  $-321.6 \pm 5.4$  млн лет и  $303.3 \pm 4.1$  млн лет), и палеопротерозойскими значениями Nd модельных возрастов  $t_{\text{Nd}(DM)} = 2.0$  млрд лет ( $t_{\text{Nd}(C)} = 2.2$  млрд лет).

Результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований свидетельствуют о том, что рассматриваемые метаморфические породы Сынчугинского блока имеют возраст не древнее палеопротерозоя, что не соответствует традиционно принятым представлениям об их неархейском возрасте [1; 2; 4 и др.]. Кроме того, Sm-Nd изотопно-геохимические особенности исследуемых сланцев уральской свиты указывают на то, что источниками для их протолита могли являться породы, характеризующиеся палеопротерозойскими модельными возрастными. В качестве возможного субстрата для них могут рассматриваться метаморфиты туловчихинской свиты ( $t_{\text{Nd}(DM)} = 2.2-1.5$  млрд лет,  $t_{\text{Nd}(C)} = 2.0-1.6$  млрд лет) [9], магматические

породы габбро-гранитной ассоциации нятыгранского комплекса ( $t_{Nd(DM)}=1.8-1.6$  млрд лет,  $t_{Nd(C)}=1.9-1.7$  млрд лет) [8].

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 21-55-53002 ГФЕН\_а).

- [1] Васькин А.Ф., Дымович В.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист М-53 (Хабаровск). СПб.: ВСЕГЕИ, 2009.
- [2] Красный Л.И., Пэн Юньбяо Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. Масштаб 1:2500000. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999.
- [3] Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И. и др. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеан. геология. – 2003. – 22. – 6. – С. 7-41.
- [4] Петрук Н.Н., Волкова Ю.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000000. Серия Дальневосточная. Лист М-52. Третье поколение. С-Пб.: ВСЕГЕИ, 2006.
- [5] Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematics of rivers water suspended material: implications for crustal evolution // Earth Planet. Sci. Lett. – 1988. – 87. – P. 249-265.
- [6] Jacobsen S.B., Wasserburg G.J. Sm-Nd evolution of chondrites and achondrites // Earth Planet. Sci. Lett. – 1984. – 67. – P. 137–150.
- [7] Keto L.S., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic variations of Early Paleozoic oceans // Earth Planet. Sci. Lett. – 1987. – 84. – P. 27-41.
- [8] Sorokin A.A., Ovchinnikov R.O., Kudryashov N.M., Kotov A.B., Kovach V.P. Two stages of Neoproterozoic magmatism in the evolution of the Bureya continental massif of the Central Asian Fold Belt // Russ. Geol. Geophys. – 2017. – 58. – 10. – P. 1171– 1187.
- [9] Sorokin A.A., Ovchinnikov R.O., Xu W., Kovach V.P., Yang H., Kotov A.B., Ponomarchuk V.A., Travin A.V., Plotkina Yu. V. Ages and nature of the protolith of the Tulovchikha metamorphic complex in the Bureya Massif, Central Asian Orogenic Belt, Russia: Evidence from U-Th-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd and  $^{40}Ar/^{39}Ar$  data // Lithos. – 2019. – 332–333. – P. 340–354.
- [10] Tanaka T., Togashi S., Kamioka H., Amakawa H., Kagami H., Hamamoto T., Yuhara M., Orihashi Y., Yoneda S., Shimizu H., Kunimaru T., Takahashi K., Yanagi T., Nakano T., Fujimaki H., Shinjo R., Asahara Y., Tanimizu M., Dragusanu C. JNdi-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium // Chem. Geol. – 2000. – 168. – P. 279-281.
- [11] Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: Its evolution and composition. London: Blackwell. 1985. 312 p.

## **Петрографические особенности, оценка возраста метаморфизма высокобарных бластолитов Гонжинского блока Аргунского супертеррейна восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса**

*Р.О. Овчинников<sup>1</sup>, В.М. Козловский<sup>2</sup>, И.К. Козаков<sup>3</sup>, Т.И. Курнозова<sup>4</sup>, М.М. Фугзан<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Благовещенск, Институт геологии и природопользования ДВО РАН, [ovchinnikov@ignm.ru](mailto:ovchinnikov@ignm.ru)

<sup>2</sup> Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии, РАН

<sup>3</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,

[ivan-kozakov@yandex.ru](mailto:ivan-kozakov@yandex.ru)

<sup>4</sup> Москва, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

Гонжинский, Инимский и Путацкий тектонические блоки, традиционно рассматривались в качестве раннедокембрийского фундамента Аргунского супертеррейна восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) [5] (рис. 1). Предполагалось, что в строении Гонжинского блока преобладают метаморфические породы амфиболитовой фации гонжинской серии, условно архейского возраста [2, 5], а также вулканогенно-осадочные отложения зеленосланцевой, эпидот-амфиболитовой фации чаловской серии условно палеопротерозойского возраста [5]. Позднее было показано, что протолиты метаморфических

пород гонжинской серии Гонжинского блока имеют не раннедокембрийский, как считалось ранее, а более молодой – мезозойский возраст [6]. В результате геохронологических исследований метапесчаников чаловской серии Гонжинского блока было показано, что возраст наиболее молодых детритовых цирконов в них соответствует ордовику [7]. Эти данные, позволили сопоставить Гонжинский блок с позднемезозойскими метаморфическими ядрами кордильерского типа Западного Забайкалья [3]. Наименее изученным аспектом Гонжинского блока, остается выделение возрастных этапов проявления структурно-метаморфических преобразований, наложенных на метаморфические породы.

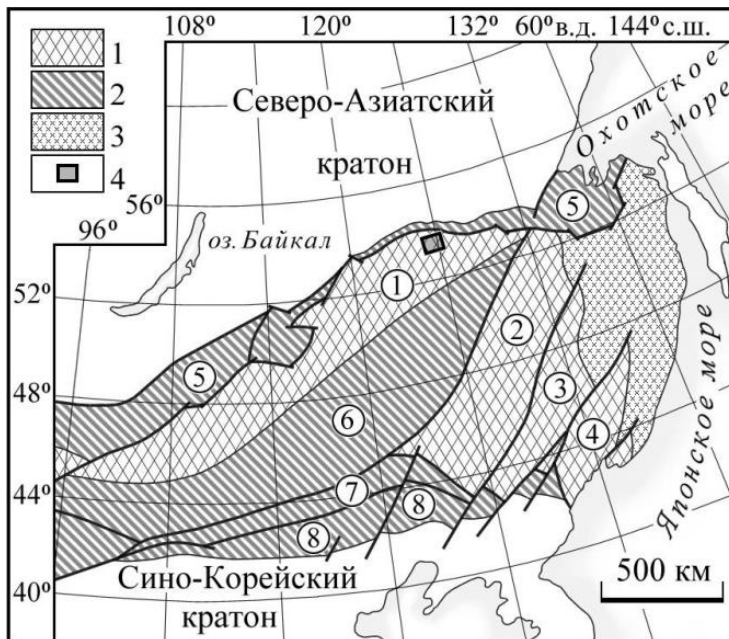


Рис. 1. Основные тектонические элементы восточной части ЦАСП (по [4] с изменениями авторов).

1 – супертеррейны: 1 – Аргунский, 2-4 – Буреинско-Цзямусинский (2 – Буреинский террейн 3 – Цзямусинский террейн, 4 – Ханкайский террейн); 2 – палеозойские-раннемезозойские складчатые пояса (5 – Монголо-охотский, 6 – Южномонгольский, 7 – Солонкерский, 8 – Вундурмиао); 3 – позднеюрско-раннемеловые орогенные пояса; 4 – район исследования.

Нами были выполнены петрографические и Sm-Nd изотопно-геохимические исследования омфацилсодержащих парагонит-цоизит-паргасит-глаукофан-альбит-гранатовых бластолитов гонжинской серии Гонжинского блока.

Омфацилсодержащие парагонит-цоизит-паргасит-глаукофан-альбит-гранатовые бластолиты – массивные гетеробластовые породы, залегающие в виде линз в рассланцованных хлорит-серицит-кварцевых сланцах с хлоритоидом. Во вмещающих породах наблюдаются отчетливые деформационные текстуры, характерные для бластомилонитов, сформированных в пластических зонах деформаций. Бластолиты, содержащие гранат, плагиоклаз и амфибол, предположительно паргаситового состава, составляют крупнозернистый каркас породы, а глаукофан, хлорит и редкий парагонит формируют более мелкозернистый агрегат, развивающийся по трещинам и границам зерен паргасита и граната. Цоизит пространственно приурочен к срастаниям зерен плагиоклаза. Зерна амфибола в бластолитах зональны: в центральных частях зерен выделяются светлые и слабо плеохроирующие участки, отвечающие по составу, предположительно, актинолиту. В средней части и ближе к краям амфибол приобретает буро-зеленый плеохроизм, характерный для глинозёмистой роговой обманки или паргасита. Глаукофаном сложены внешние каймы зональных зерен. Также глаукофан формирует агрегаты мелких (около 0,1 мм и менее) игольчатых кристаллов, развивающихся по трещинам в гранате. В бластолитах присутствует характерный апоомфациловый клинопироксен-плагиоклазовый симплектитовый агрегат. Реликтовые фрагменты паргасита, окружены этим клинопироксен-плагиоклазовым симплектитом. Кроме того, в бластолитах выделяется отчетливо более поздний минеральный агрегат, состоящий из тонких срастаний мелкочешуйчатого биотита и кислого плагиоклаза.

Таким образом, в бластолитах можно выделить несколько минеральных ассоциаций, что указывает на богатую петрогенетическую историю этих пород:

1. Реликтовая ассоциация – низкоглинозёмистый амфибол, предположительно, близкий по составу к актинолиту, и плагиоклаз.

2. Главная ассоциация, слагающая наибольшую часть породы – паргасит, гранат и плагиоклаз. Появление паргасита, вероятно, проходило по схеме  $Act+Ab+An=Prg$ . При этом существенного изменения состава плагиоклаза, вероятно, не происходило.

3. Ассоциация пика метаморфизма – глаукофан, гранат, цоизит, кислый плагиоклаз, парагонит. Цоизит появляется за счет анортитового минала плагиоклаза; при этом плагиоклаз кислеет. Эта ассоциация согласно сетке фаций [1] отвечает цоизит-глаукофановой субфации метаморфизма. Появление омфацита в глаукофановой ассоциации, вероятно, говорит о повышении температуры на пике метаморфизма и постепенном переходе к парагонит-кианит-цоизитовой субфации эклогитовой фации.

4. Декомпрессионная ассоциация представлена апоомфацитовым клинопироксен-плагиоклазовым симплектитом. Декомпрессия в процессе поднятия, предположительно, происходила не быстро, так как омфацит заместился клинопироксен-плагиоклазовым симплектитом полностью и равномерно. Выдвижение будин бластолитов, вероятно, происходило при весьма невысоких температурах. На это указывает наличие во вмещающих сланцах-бластомилонитах низкотемпературного минерала – хлоритоида и хорошая сохранность реликтовых минералов – актинолита, паргасита и плагиоклаза.

5. Наложенная биотит-плагиоклазовая ассоциация – отражает самый поздний из геологических процессов, затронувших бластолиты. Опираясь на морфологию биотит-плагиоклазовых агрегатов в породе можно предположить, что эта ассоциация имеет метасоматическую природу.

Sm-Nd изотопно-геохимические исследования проводились по методике, принятой в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН. Величина холостого загрязнения в лаборатории составила 0.02 ppb для Sm, и 0.04 ppb для Nd. Изотопный состав неодима и самария измерен на многоколлекторном масс-спектрометре Triton с точностью 0.1% для  $^{147}Sm/^{144}Nd$  и 0.005% для  $^{143}Nd/^{144}Nd$ . Минеральная Sm-Nd изохрона построена по 4 значениям: для породы, гранату и двум амфиболам – глаукофану и паргаситу. Возраст по изохроне  $171.5 \pm 2.7$  млн лет. Этот возраст интерпретируется как кристаллизация минералов – возраст минерализации.

Таким образом, результаты Sm-Nd изотопных исследований рассматриваемых бластолитов гонжинской серии позволяют выделить в формировании Гонжинского блока метаморфическое событие, отвечающее средней юре ( $171.5 \pm 2.7$  млн лет). Ранее, был установлен раннеюрский возраст (около 190 млн лет) для популяции ультраметагенных цирконов в раннемезозойских парагнайсах Гонжинского блока [6]. Обозначенные метаморфические события удалены друг от друга более чем на 10 млн лет, что в совокупности с результатами минералогических исследований свидетельствует о полиметаморфизме метаморфических пород Гонжинского блока. В первом приближении, мы можем связать выделенное проявление метаморфических процессов с коллизионными событиями, связанными с закрытием Монголо-Охотского океана, произошедшего на рубеже ранней-средней юры [8].

- [1] Бушмин С.А., Глебовицкий В.А. Схема минеральных фаций метаморфических пород // Зап. РМО. 2008. Ч. СXXXVII. № 2. С. 1-13.
- [2] Геодинамика, магматизм и металлогения востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с
- [3] Котов А. Б., Мазукабзов А. М., Сквитина Т. М. и др. Структурная эволюция и геодинамическая позиция Гонжинского блока (Верхнее Приамурье) // Геотектоника. – 2013. – 5. – С. 48-60.
- [4] Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И. и др. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеан. геология. – 2003. – 22. – 6. – С. 7-41.
- [5] Петрук Н.Н., Козлов С.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаб 1: 1 000 000. Лист N-51 (Сковородино). / Под ред. А.С. Вольского. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009.
- [6] Сальникова Е. Б., Котов А. Б., Ковач В. П. и др. О возрасте гонжинской серии (Аргунский террейн Центрально-Азиатского складчатого пояса): результаты U-Pb и Lu-Hf- изотопных исследований детритовых цирконов // ДАН. – 2012. – 444. – 5. – С. 519-522.

- [7] Смирнова Ю.Н. Возраст и источники метатерригенных пород чаловской серии Аргунского континентального массива восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Т.1. Материалы Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2018. С. 202-205.
- [8] Sorokin A.A., Zaika V.A., Kovach V.P., Kotov A.B., Xu W., Yang H. Timing of closure of the eastern Mongol-Okhotsk Ocean: Constraints from U-Pb and Hf isotopic data of detrital zircons from metasediments along the Dzhagdy Transect // Gondwana Research. – 2020. – 81. – P. 58-78.

## Новые данные о проявлениях N-Q щелочного базальтового магматизма в пределах клина Аравийской плиты

*А.В. Парфенов<sup>1</sup>, В.А. Лебедев<sup>1</sup>, V. Oyan<sup>2</sup>, Y. Özdemir<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Москва, ИГЕМ РАН, [kvarcz@yandex.ru](mailto:kvarcz@yandex.ru)

<sup>2</sup> Van, Yüzüncü Yıl University

<sup>3</sup> Turkey, Department of Geological Engineering

Позднекайнозойский континентальный магматизм в пределах Аравийско-Евразийской коллизионной зоны проявился на обширной территории, включающей плато северной части клина Аравийской плиты на юге, Восточно-Анатолийское и Эрзурум-Карсское нагорья в ее центральном секторе, а также складчатые сооружения Малого и Большого Кавказа на севере. Вулканическая активность началась здесь сразу после завершения коллизии литосферных плит в середине миоцена в южной части зоны и впоследствии постепенно мигрировала в северном направлении, достигнув максимальных масштабов в плиоцене с последующим некоторым затуханием к концу четвертичного периода. Формирование в этом регионе вулканических пород в неоген-четвертичный период связывают, главным образом, с исходными мафическими щелочными и умеренно-щелочными расплавами мантийного происхождения [2].

В докладе представлены результаты К-Аг изотопного датирования базальтовых лав, распространенных в пределах северо-восточной части клина Аравийской плиты (к югу от сутурной зоны Битлис, рис. 1), полученные авторами в рамках первого года работы по российско-турецкому проекту РФФИ № 21-55-46006. Актуальность настоящей работы обусловлена в первую очередь отсутствием достоверных системных геохронологических данных в опубликованных источниках, что затрудняет понимание как закономерностей развития вулканизма в этом регионе, так и его места в общей эволюции внутриплитного неоген-четвертичного магматизма Аравийской плиты.

Изотопное К-Аг датирование выполнено с помощью высокочувствительной низкофоновой методики, разработанной в ИГЕМ РАН. Ее подробное описание, включающее геохимическое обоснование, характеристики применяемой аппаратуры, алгоритм проведения анализа и оценки точности результатов, приведены в статье [1]. В качестве К-Аг геохронометра использована основная масса лав. Для определения концентрации радиогенного <sup>40</sup>Аг применена методика изотопного разбавления (трассер – моноизотоп <sup>38</sup>Аг). Содержание калия определено методом пламенной спектрофотометрии на приборе ФПА-01 с точностью 1-2% отн. (σ). При расчетах возраста использованы международные значения констант распада [3].

К настоящему моменту получены К-Аг датировки для 20 образцов базальтов, в том числе, для плато Алем-Даг изучено 14 образцов, а для двух небольших лавовых проявлений к северу от него, Батман и Курталан, по 3 образца (рис. 1). Изученные вулканы образовались в общем интервале от 5.9 до 1.3 млн л.н. Наиболее древними из них являются гавайиты, слагающие лавовый поток Батман – 5.9-5.2 млн л.н., а наиболее молодыми – лавы покрова Курталан с возрастом 1.5-1.3 млн лет. Лавы плато Алем-Даг формировались в течение более длительного временного отрезка (от 3.0 до 1.3 млн лет назад), в пределах которого намечается несколько дискретных фаз щелочного базальтового вулканизма: I – 3.0-2.8, II – 2.0-1.9, III – 1.5-1.3 млн л.н. Следует отметить, что полученные нами датировки лав плато Алем-Даг согласуются с ранее опубликованными данными для сирийской части этого района [4].

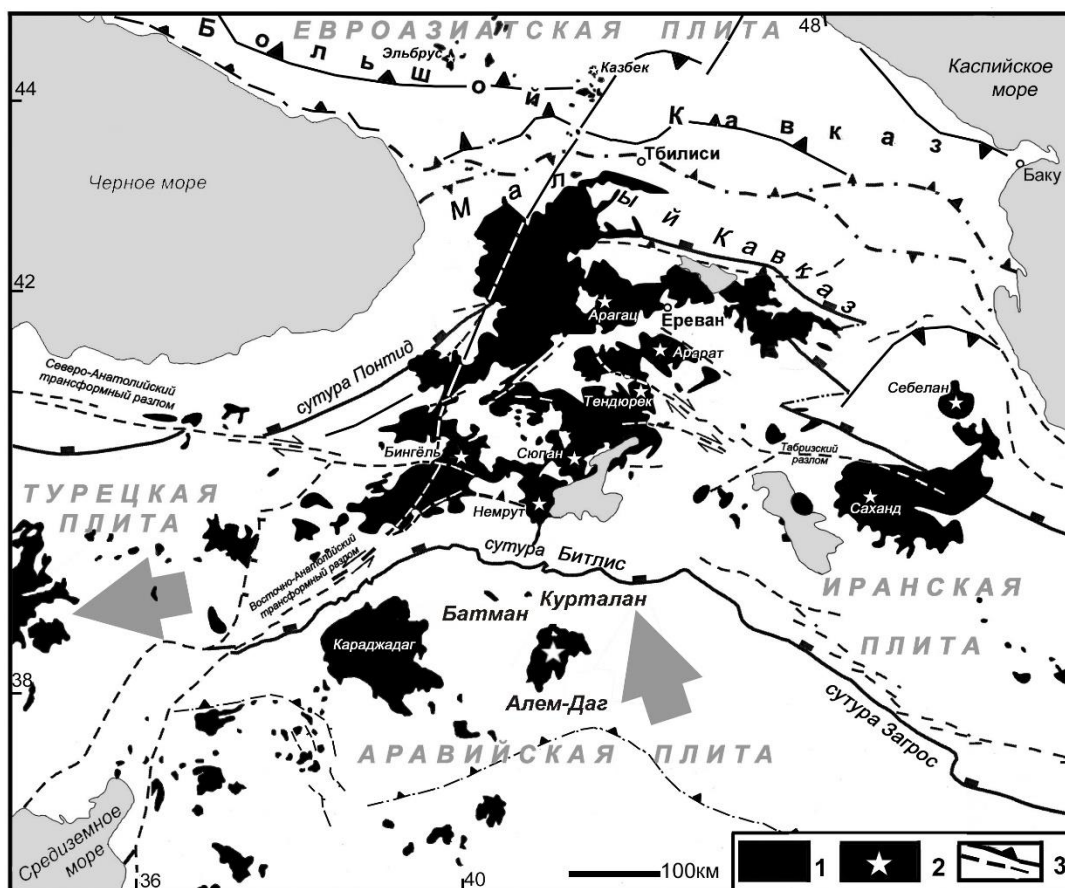


Рис. 1. Тектоническая схема Аравийско-Евразийской коллизонной зоны. 1 – неоген-четвертичные вулканиты, 2 – крупнейшие четвертичные вулканы, 3 – крупнейшие тектонические нарушения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что щелочной базальтовый магматизм развивался на территории северной части клина Аравийской плиты в позднемiocен-четвертичное время на протяжении длительного интервала около 4.6 млн лет в пределах как минимум четырех дискретных фаз вулканической активности.

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант №21-55-46006).

- [1] Чернышев И.В., Лебедев В.А., Аркелянц М.М. К-Аг датирование четвертичных вулканитов: методология и интерпретация результатов // Петрология. 2006. Т. 14. № 1. С. 69–89.
- [2] Keskin M., Чугаев А.В., Лебедев В.А. и др. Геохронология и природа мантийных источников позднекайнозойского внутриплитного магматизма фронтальной части Аравийской плиты (неовулканическая область Караджадаг, Турция). Сообщение 2. Результаты геохимических и изотопных (Sr-Nd-Pb) исследований // Вулканология и сейсмология. 2012. № 6. С. 43–70.
- [3] Steiger R.H., Jager E. Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // Earth Planet. Sci. Lett. 1977. № 36. P. 359–362.
- [4] Trifonov V.G., Dodonov A.E., Sharkov E.V. et al. New data on the Late Cenozoic basaltic volcanism in Syria, applied to its origin // J. Volcanol. Geotherm Res. 2011. V. 199. P. 177–192.

## Миграция позднеплиоцен-четвертичной вулканической и сейсмической активности (Срединный хребет, Камчатка)

*М.М. Певзнер<sup>1</sup>, М.Л. Толстых<sup>2</sup>, А.О. Вольнец<sup>3</sup>, Н.В. Горбач<sup>3</sup>, В.А. Лебедев<sup>4</sup>, Г.Н. Овсянников<sup>3</sup>,  
А.Д. Бабанский<sup>4</sup>, А.В. Парфенов<sup>4</sup>, Т.Д. Каримов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Геологический институт РАН, [m\\_pevzner@mail.ru](mailto:m_pevzner@mail.ru), [karimovt@mail.ru](mailto:karimovt@mail.ru)

<sup>2</sup> Москва, ГЕОХИ РАН, [mashtol@mail.ru](mailto:mashtol@mail.ru)

<sup>3</sup> Петропавловск-Камчатский, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, [a.volynets@gmail.com](mailto:a.volynets@gmail.com),  
[n\\_gorbach@mail.ru](mailto:n_gorbach@mail.ru), [george2098@mail.ru](mailto:george2098@mail.ru)

<sup>4</sup> Москва, ИГЕМ РАН, [leb@igem.ru](mailto:leb@igem.ru), [baban@igem.ru](mailto:baban@igem.ru), [kvarcz@yandex.ru](mailto:kvarcz@yandex.ru)

Район исследований расположен в центральной части Срединного хребта (СХ) Камчатки (рис. 1, врезка) и включает Тигильский Дол и массив г. Окси. Здесь проходит крупная разломная зона (длина не менее 50 км, ширина до 15 км) преимущественно СВ простирания. Морфологически выраженные эруптивные центры в обоих массивах группируются в цепочки СВ простирания и пространственно соответствуют ярко выраженным разрывным нарушениям, что позволяет предполагать сейсмогенную природу образования магмоподводящих трещин и, следовательно, одновозрастность вулканизма и сейсмичности. Цель исследований – оценить возраст вулканизма и палеосейсмической активности. Для этого был определен изотопный К-Аг возраст лав, сингенетичных сейсмонарушениям. Датирование выполнено по основной массе пород в ИГЕМ РАН.

По морфологическим признакам все вулканические постройки района исследований четко делятся на две группы: (I) щитовые вулканы, шлаковые конусы и лавовые потоки, на поверхности которых сохранились следы первично-вулканического рельефа, в т.ч. кратерные воронки; (II) преимущественно плосковершинные останцы сильно разрушенных вулканов. Результаты К-Аг датирования (рис. 1А) свидетельствуют о том, что все породы II группы образовались в плиоцене (4.5-3.3 млн л.н.). Морфологически сохранные вулканические центры I группы формировались, начиная с 3 млн л.н. Хронологически Q извержения на Тигильском Долу (ТД) группируются в два этапа (рис. 1Б), более ранний из них (Q<sub>E</sub>) имел продолжительность около полумиллиона лет. Примечательно, что начальные события обоих этапов представлены наиболее примитивными породами: пикробазальтами и высокомагнезиальными базальтами с #Mg от 65 до 75. Лавы аналогичного состава изливались и в позднем плиоцене (г. Плечо). В массиве г. Окси наиболее магнезиальные разности характерны для пород г. Лагерной, конуса Ср. Копкан и лавового потока Молодого. С учетом особенностей распределения дат и вещественного состава изверженных пород в массиве г. Окси также можно выделить два этапа активизации вулканизма в Q время. Q<sub>E</sub> этап, как и на ТД, имеет продолжительность около полумиллиона лет и начинается с излияния наиболее магнезиальных пород (конус Ср. Копкан). По аналогии с Q временем, можно предполагать, что наиболее магнезиальные породы N<sub>2</sub> (г. Лагерная) также маркируют локальный этап активизации вулканизма и сейсмичности (рис. 1А, Б).

На рис. 1 видно, что начальные извержения этапов активизации в массиве г. Окси во всех случаях происходят несколько позже, чем таковые на ТД. Это подразумевает более позднее заложение магмоподводящих трещин в районе г. Окси и, следовательно, более поздние сейсмические события. Такая ситуация может быть интерпретирована как результат направленной миграции очагов высокомагнитудных землетрясений [1 и ссылки в этой работе]. Стрелки на рис. 1А показывают направление миграции вулканической активности. Цепочку миграции  $\gamma$  мы выделяем с учетом пространственного расположения объектов – они приурочены к единому разлому.

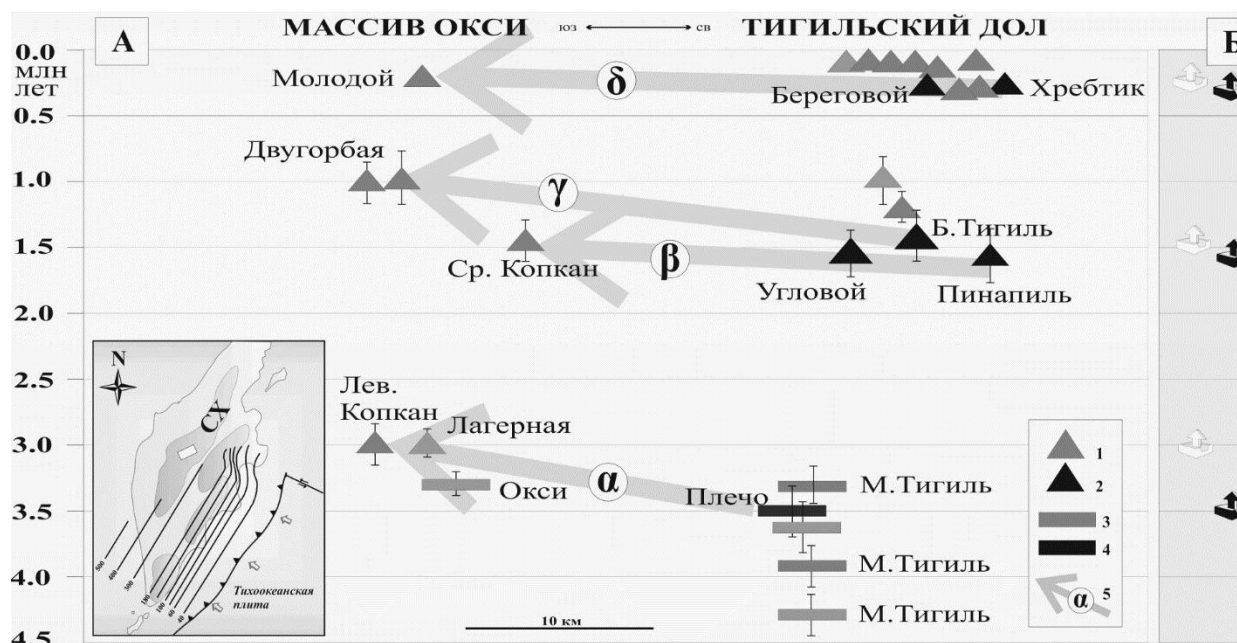


Рис. 1. А: Хронология извержений на Тигильском Долу и в массиве г. Оксид на комбинированном профиле вдоль разломной зоны СВ простирания. Породы: 1-2 – I; 3-4 – II группы, в т.ч.: 1, 3 – #MgO 40-65; 2, 4 – #MgO 65-75; 5 – направление миграции сейсмической и вулканической активности. Б: Начало этапов активизации вулканизма на ТД (черные) и в массиве Оксид (белые знаки). На врезке: СХ – вулканическая зона Срединного хребта Камчатки; белый прямоугольник – район работ; линиями показана глубина сейсмофокальной зоны (км). Пояснения см. в тексте.

Наклон стрелок на рис. 1А характеризует скорость миграции. Можно выделить две «медленные» ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ) и две «быстрые» ( $\beta$ ,  $\delta$ ) цепочки миграции. Для цепочки  $\beta$  скорость составляет около 30 см в год, а для цепочек  $\alpha$  и  $\gamma$  5-10 мм в год. При этом все они могли генерироваться сверхмедленными деформационными волнами, что подразумевает землетрясения с магнитудой  $>7.2$  [1, 2]. Установлено, что скорость миграции обратно пропорциональна магнитуде землетрясения и мощности извержения [2]. Тогда наиболее значимые (мощные) события на ТД произошли около 3.5 и 1.5 млн л.н., они маркируются извержениями г. Плечо и конуса Большой Тигиль.

Выводы. В Срединном хребте Камчатки впервые для  $N_2-Q$  времени выявлен эффект направленной миграции вулканической активности. Заложение всей рассматриваемой разломной структуры СВ простирания могло произойти в позднем плиоцене (3.5-3.0 млн л.н.); около 1.5 млн л.н. начался этап повторного оживления зоны, насчитывающий не менее трех крупных сейсмических событий около 1.5, 1.0 и 0.3 млн л.н. Землетрясения сопровождалось извержениями, начало этапов активизации вулканизма маркируются породами примитивных составов. Хорошая морфологическая сохранность вулканических центров, формировавшихся на протяжении последних 3 млн лет, противоречит представлениям о многочисленных четвертичных оледенениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 20-05-00085.

- [1] Быков В.Г. Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 721–754.
- [2] Викулин А.В. и др. Миграция сейсмической и вулканической активности в зонах напряженного состояния вещества наиболее геодинамически активных мегаструктур Земли // Вестник КамчатГТУ. 2011. Вып. 17. С. 5–15.



## Возраст автономных анортозитов Каларского массива (Юго-Запад Алдано-Станового щита)

*Н.В. Попов<sup>1</sup>, В.Г. Мальковец<sup>2,3</sup>, И.И. Лиханов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Новосибирск, ИНГГ СО РАН, [popovnv@ipgg.sbras.ru](mailto:popovnv@ipgg.sbras.ru)

<sup>2</sup> Мирный, НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО)

<sup>3</sup> Новосибирск, ИГМ СО РАН

Как справедливо отметили уважаемые авторы статьи [1], что несмотря на длительное (80, сейчас уже более 90 лет) изучение каларского комплекса анортозитов, после опубликования «более ста работ, рассматривавших различные аспекты проблемы анортозитов этого региона. Однако до сих пор остаются дискуссионными вопросы о возрасте (архей или протерозой) и о геодинамических условиях его формирования (в режиме тектоники плит или плюм-тектоники)» (с. 651). В этой работе U-Pb изотопные исследования трёх ксеногенных зёрен циркона из анортозитов  $2670 \pm 8$  млн. лет (пересечение дискордии) и  $2620 \pm 10$  млн. лет (конкордантное значение) интерпретируются как возраст вмещающих пород, а образование собственно анортозитов датируется Sm-Nd изохроной  $1926 \pm 64$  млн. лет со ссылкой на предыдущие исследования [2]. Недавние U-Pb датировки возраста для Куронахского массива по цирконам из ассоциирующих с анортозитами чарнокитов и метагаббро краевой зоны дали близкие значения  $2611 \pm 38$  и  $2623 \pm 23$  млн. лет, соответственно [3]. В этой же работе для цирконов из анортозита получена датировка  $1849 \pm 15$  млн. лет (нижнее пересечение дискордии), которое интерпретируется как возраст кристаллизации анортозитов. Позднее, несколько небольших массивов эндербитов, объединённых в джеульский комплекс и крупный массив чарнокитов алтуальского комплекса, расположенных около 10 и 20 км западнее Куронахского массива на его продолжении, оценены как образовавшиеся  $2627 \pm 16$  и  $2612 \pm 16$  млн. лет тому назад [4]. Возраст этих гранитоидов, по мнению авторов «соответствует возрасту пород каларского комплекса» (с. 19), а их образование, с синхронным гранулитовым метаморфизмом непосредственно предшествовало внедрению массивов каларского комплекса. Sm-Nd изотопный возраст каларского чарнокит-анортозитового комплекса [5] по минеральной изохроне неизменённых (неметаморфизованных) анортозитов равен 1913-1926 млн. лет с погрешностями определений – 64 и 123 млн. лет, соответственно. Возраст протолита оценивается в диапазоне от 2,90 до 3,33 млрд. лет. Минеральная изохрона, для экзоконтактовых чарнокитоидов показала более молодой возраст –  $1698 \pm 42$  млн. лет с модельным возрастом 3,9 млрд. лет. Раннепротерозойский возраст определён для мафитовых комплексов, прорывающих удоканские осадочные толщи Чинейского расслоенного массива [6] и куранахского комплекса диабазов [7] –  $1867 \pm 3$  и  $1863 \pm 9$  млн. лет, соответственно, а также гранитов кодарского комплекса [8] в диапазоне:  $1876 \pm 4$  –  $1873 \pm 3$  млн. лет.

Для изотопного исследования было выделены акцессорные цирконы из андезинита (проба 9612) в центральной части Куронахского массива (координаты  $56^{\circ}42'35''\text{Сш}$ ,  $120^{\circ}42'10''\text{Вд}$ ), в истоках руч. Сайбалах. Датирование цирконов проводилось методом LAM-ICPMS (Agilent 7900cs с лазерным пробоотборником NewWave 193nm) в “National Key Centre GEMOC/CCFS” в Университете Маккуори (Сидней, Австралия). Одновременно с U-Pb датирование проводился анализ редких и рассеянных элементов в цирконах.

Всего было проанализировано 8 зёрен цирконов. Для одного зерна были проанализированы ядро и край. По результатам U-Pb датирования выделяется две популяции цирконов: архейская 2,6 млрд. лет ( $n = 4$ ) и палеопротерозойская 1,8 ( $n = 4$ ) млрд лет. Содержания Th, U и Th/U отношения в цирконах архейской популяции варьируют в следующих пределах (г/т): 83-141, 109-385 и 0,2-1,1 соответственно. Содержания Th, U и Th/U отношения в цирконах палеопротерозойской популяции варьируют в следующих пределах (г/т): 213-250, 255-367 и 0,6-0,96 соответственно. Количество проанализированных зёрен недостаточно для построения надёжной диаграммы с конкордией. Для уточнения возрастных этапов для рассчитанных возрастов были построены графики средневзвешенных  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  значений возрастов. При анализе этих графиков выделяются следующие возрастные этапы:  $1847 \pm 29$  млн. лет, 95 % дов.

инт., СКВО = 0,032, вероятность 0,52 ( $n = 3$ ) и  $2649 \pm 29$  млн. лет, 95 % дов. инт., СКВО = 0,99, вероятность 0,37 ( $n = 3$ ).

Архейская популяция цирконов интерпретируется нами как ксеногенная, захваченная из вмещающих архейских пород при образовании анортозитов каларского комплекса. Палеопротерозойская популяция цирконов соответствует возрасту формирования Курунахского анортозитового массива. Наши новые данные по возрасту Курунахского массива ( $1847 \pm 29$  млн. лет) хорошо совпадают с возрастом анортозитов каларского комплекса ( $1849 \pm 15$  млн. лет) полученные в работе [3] по нижнему пересечению дискордии. Происхождения двух цирконов с другими  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  датировками  $1979 \pm 15$  млн. лет и  $2558 \pm 62$  млн. лет в настоящий момент трудно интерпретировать и для более корректной интерпретации требуется проведение дополнительных исследований.

Геологические особенности и тектоническое положение анортозитов выходит за рамки данного сообщения и претендует в особой аргументации, что подразумевает обсуждение этих вопросов в докладе.

Таким образом, в дискуссии о неоднозначной интерпретации времени формирования каларских анортозитов представлены дополнительные данные в пользу их раннепротерозойского ( $1847 \pm 29$  млн. лет) возраста. Позднеархейские датировки ( $2649 \pm 29$  млн. лет), получены для ксеногенных цирконов, захваченных из вмещающих пород, с близкими оценками возраста метаморфизма.

- [1] Глуховский М.З. и др. Автономные анортозиты Алданского щита и связанные с ними породы: возраст, геохимия и механизм образования (на примере Каларского массива) // ДАН. 2011. Т. 439. № 5. С. 651-659.
- [2] Глуховский М.З., Моралев В.М., Суханов М.К. Тектоническое положение раннепротерозойских анортозитов и гранитоидов Алданского щита и зональность процессов термотектогенеза // Геотектоника. 1993. № 3. С. 69-81.
- [3] Сальникова Е.Б. и др. Каларский анортозит-чарнокитовый комплекс (Алдано-Становой щит): возраст и тектоническое положение // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2004. Т. 12. № 3. С. 3-11.
- [4] Ларин А.М. и др. Каларский комплекс (Алдано-Становой щит) – древнейший представитель анортозит-мангерит-чарнокит-гранитной магматической ассоциации // Петрология. 2006. Т. 14. № 1. С. 4-24.
- [5] Суханов М.К., Журавлев Д.З. Sm-Nd изотопный возраст каларского чарнокит-анортозитового комплекса (Восточное Забайкалье) // Геохимия. 2002. № 8. С. 898-902.
- [6] Попов Н.В. и др. Возраст и тектоническое положение Чинейского расслоенного массива // ДАН. 2009. Т. 424. № 4. С. 517-521
- [7] Попов Н.В. и др. Диабазы курунахского комплекса западной части Алдано-Станового щита: возраст и тектоническое положение // ДАН. 2012. Т. 442. № 3. С. 365-368
- [8] Ларин А.М. и др. Новые данные о возрасте кодарского и тукурингского комплексов, Восточная Сибирь: геодинамические следствия // Петрология. 2000. Т. 8. № 3. С. 267-279.

## **Реконструкция надвиговой структуры Южно-Верхоянского орогенного пояса (СВ Азии) по данным U-Pb датирования детритовых и ксеногенных цирконов**

*А.В. Прокопьев<sup>1</sup>, Д.Ф. Стокли<sup>2</sup>, Д.А. Васильев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Якутск, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, [prokopiev@diamond.ysn.ru](mailto:prokopiev@diamond.ysn.ru)

<sup>2</sup> Остин, Университет Техаса

Южно-Верхоянский орогенный пояс протягивается на 700 км в меридиональном направлении на юге Верхояно-Колымской складчатой области (СВ Азии). Он сложен интенсивно деформированными в позднем мезозое мезопротерозойско-юрскими осадочными и вулканогенно-осадочными породами. На западе по фронтальным надвигам пояса мезо-неопротерозойские толщи

перекрывают слабо деформированные юрско-меловые отложения Приверхоянского краевого прогиба на севере пояса, а на юге – породы юры и кембрия Алдано-Майского прогиба. Породы орогенного пояса прорваны дайками различного возраста, наиболее многочисленными из которых являются считающиеся среднепалеозойскими дайки долеритов сетте-дабанского комплекса, имеющие преимущественно субмеридиональное простирание [1, 2]. Исследования были проведены на севере орогенного пояса вдоль автомобильной трассы «Колыма», пересекающей практически вкрест простирания все структуры Южного Верхоянья. Были изучены юрско-меловые континентальные отложения северной части Приверхоянского краевого прогиба, на которые по Окраинному разлому надвинуты неопротерозойские терригенно-карбонатные породы фронта орогенного пояса, а также дайки долеритов на западном крыле Кемьской антиклинали восточной части Сетте-Дабанской тектонической зоны орогенного пояса.

U-Pb датирование обломочных цирконов из юрско-меловых песчаников Приверхоянского краевого прогиба и ксеногенных цирконов из дайки долеритов проводилось методом LA-ICP MS в аналитическом центре Университета Техаса в Остине, США.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датирование плагиоклаза из долеритов было выполнено в Центре коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, Новосибирск).

В одной из семи даек долеритов, прорывающих карбонатные отложения среднего ордовика на западном крыле Кемьской антиклинали на удалении около 40 км от фронта Южно-Верхоянского орогенного пояса, были обнаружены и продатированы 49 зерен ксеногенных цирконов. Получены следующие возрастные пики 150, 280, 488, 620, 795 и 1850 млн лет.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возраст дайки по плагиоклазу составил ~93 млн лет.

Из юрско-меловых песчаников Приверхоянского краевого прогиба были продатированы около 1800 зерен детритовых цирконов и получены возрастные пики 147, 260–280, 497, 638, 795 и 1850–1900 Ма.

Выводы:

1) Долеритовая дайка мощностью около 10 м, считавшаяся ранее относящейся к среднепалеозойскому сетте-дабанскому комплексу, как и подавляющее большинство даек субмеридионального простирания этого региона, имеет позднемеловой возраст. Дайка будинирована и это позволяет предполагать, что интенсивные деформации имели место либо в позднем мелу, либо в кайнозое. Вероятно, позднемезозойский базитовый магматизм развит в Южном Верхоянье значительно шире, чем это считалось ранее.

2) Изученная позднемеловая дайка, прорывающая отложения ордовика и локализованная на удалении около 40 км к востоку от фронта Южно-Верхоянского орогенного пояса, содержит ксеногенные цирконы, возрастной спектр которых такой же, как и в юрско-меловых песчаниках Приверхоянского краевого прогиба. Это позволяет предполагать, что под нижнепалеозойскими породами Сетте-Дабанской тектонической зоны находятся юрско-меловые отложения, из которых дайка могла захватить цирконы.

3) Используя глубинный сейсмический разрез МОВ-ОГТ ЗДВ построен сбалансированный геологический разрез, реконструирована глубинная надвиговая структура и рассчитана минимальная амплитуда перемещения по надвиговому detachment около 45 км.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 20-17-00169.

[1] Прокопьев А.В. Кинематика мезозойской складчатости западной части Южного Верхоянья. – Якутск: ЯНЦ СО АН СССР. 1989. – 128 с.

[2] Ян-жин-шин В.А. Тектоника Сетте-Дабанского горст-антиклинория. – Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1983. – 156 с.

**Верхний возрастной предел формирования  
Омутнинского платиноносного массива на Среднем Урале  
по данным U-Pb и  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датирования  
жильных габброидов и горнблендитов**

*Е.В. Пушкарев<sup>1</sup>, И.А. Готтман<sup>1</sup>, Н.В. Родионов<sup>2</sup>, Д.С. Юдин<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Екатеринбург, Институт геологии и геохимии УрО РАН, [pushkarev@igg.uran.ru](mailto:pushkarev@igg.uran.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ

<sup>3</sup> Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН,

Омутнинский дунит-клинопироксенитовый массив расположен на южном окончании Платиноносного пояса Урала (ППУ), примерно в 70 км к юго-западу от Екатеринбурга. Краткая информация о геологическом положении и строении Омутнинского массива содержится в монографии О.К.Иванова [1]. Однако он до сих пор остается одним из наименее изученных массивов Платиноносного пояса Урала несмотря на то, что с ним были связаны платиновые россыпи, разрабатываемые в прошлом. Омутнинский массив имеет овальную форму, вытянутую в северо-западном направлении и размеры около 6\*2.6 км. Центральное ядро (1\*2.9 км) сложено средне-, крупнозернистыми дунитами, вмещающими платиноносные хромититы. Дуниты прорваны многочисленными жилами и дайками крупнозернистых и пегматоидных амфиболовых габбро и мелкозернистых горнблендитов (иситов). По химическому составу и геохимическим особенностям, в частности, по высокому содержанию стронция (до 2000 г/т Sr) габброиды близки к жильным породам из других массивов ППУ. Горнблендиты также идентичны иситам и горнблендитам, широко развитым в ультраосновных массивах пояса. Дуниты со всех сторон окружены клинопироксенитами, видимая мощность которых составляет до полукилометра. По внешней периферии массива залегают среднезернистые амфибол-клинопироксеновые габбро, часто сильно деформированные. Геологические взаимоотношения между габброидами и ультрамафитами не установлены. Вмещающими породами для массива служат мелкозернистые, часто полосчатые, динамотермальные амфибол-плагиоклазовые породы аповулканогенной природы (кытлымиты), предположительно, ордовикского или нижнесилурийского возраста [1]. Достоверной информации о возрасте ультраосновных и основных пород массива до последнего времени не было.

$^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  методом был определен позднесилурийский возраст (429-427 млн. лет) амфибола из жильных пород. Габброиды содержат акцессорный короткопризматический прозрачный циркон размером 100-300 мкм, светло-желтого цвета, видимый в шлифах. Внутреннее строение и зональность цирконов соответствует их магматической природе. U-Pb возраст цирконов был определен на SHRIMP-II (ЦИИ ВСЕГЕИ) по 20 точкам. Полученный возраст  $437 \pm 4$  млн. лет (СКВО=0.027, Конкордантность=0.87) соответствует раннему силуру, который мы принимаем за верхнее возрастное ограничение формирования ультраосновных пород Омутнинского массива. Различие в 10 млн лет по данным  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  и U-Pb изотопного возраста, мы рассматриваем как отражение термальной истории. Полученные результаты являются важным дополнением для расшифровки сложной и длительной истории становления дунит-клинопироксенит-габбровых массивов Платиноносного пояса Урала.

*Работа выполнена по госбюджетной теме № з/р АААА-А18-118052590029-6; аналитические данные получены в ЦКП ИГГ УрО РАН "Геоаналитик", в ЦИИ ВСЕГЕИ и в ЦКП МИИ СО РАН, Новосибирск*

[1] Иванов О.К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. – Екатеринбург: Изд-во Уральского Университета. 1997. – 327 с

## Возраст ортоклаз-нефелиновых тылаитов Нижнетагильского массива по разным изотопным системам: время завершения формирования платиноносного пояса Урала

*Е.В. Пушкарев<sup>1</sup>, Н.Г. Солошенко<sup>1</sup>, Д.С. Юдин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Екатеринбург, Институт геологии и геохимии УрО РАН, [pushkarev@igg.uran.ru](mailto:pushkarev@igg.uran.ru)

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

Платиноносный пояс Урала (ППУ) – крупнейшая в мире цепь дунит-клинопироксенит-габбровых массивов, протянувшаяся вдоль 60 меридиана более чем на 900 км, является полихронным образованием, о чем свидетельствуют многочисленные изотопно-геохронологические данные, полученные за последние полвека и охватывающие временной интервал более 2 млрд. лет. Помимо геологических проблем взаимоотношений и генетических связей между ультраосновными породами и габброидами разного типа, входящими в ППУ, существует два главных геохронологических вопроса – это возраст начала формирования габбро-гипербазитовых массивов и время завершения магматической активности в Платиноносном поясе. Для решения второго вопроса о возрасте заключительных импульсов ультраосновного магматизма в ППУ благоприятным объектом являются ортоклаз-нефелиновые тылаиты, установленные в Кытлымском и Нижнетагильском массивах. Возраст ортоклаз-нефелиновых тылаитов в Кытлымском массиве (Северный Урал) был определен ранее и составляет 422 млн. лет по данным  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  системы и 419 млн. лет по Sm-Nd изотопии, что соответствует границе силура и девона. Данных о возрасте тылаитов в Нижнетагильском массиве до недавнего времени не было.

Ортоклаз-нефелиновые тылаиты Нижнетагильского массива залегают в его северо-восточной части среди клинопироксенитов внешней каймы, окружающих дунитовое ядро. Породы обладают высокой магнезиальностью ( $\text{MgO}=11-15\%$ ,  $\text{Mg\#} = 0.72-0.77$ ) при содержаниях  $\text{K}_2\text{O}$  до 2.5%. Несмотря на высокую меланократовость, породы характеризуются высокими содержаниями  $\text{Sr}=650-900$  г/т и  $\text{Rb}= 5-50$  г/т. Эти факторы являются благоприятными для проведения изотопного датирования  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  методом по флогопиту и изохронным Rb-Sr и Sm-Nd методами по породам и минералам.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование флогопита (ИГМ СО РАН, Новосибирск) позволило получить плато с 80% выделенного  $^{39}\text{Ar}$ , соответствующее раннедевонскому возрасту  $402\pm 5$  млн. лет. Для проведения Rb-Sr и Sm-Nd изотопных исследований были использованы валовый состав породы, монофракции клинопироксена и флогопита и нефелин-полевошпатовый концентрат. Анализ изотопного состава и содержания рубидия и стронция методом изотопного разбавления выполнен на многоколлекторном масс-спектрометре высокого разрешения TRITON Plus (Thermo) в ИГГ УрО РАН, Екатеринбург. Изохронным Rb-Sr методом получен возраст тылаитов, равный  $406\pm 7$  млн. лет,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.70368$  СКВО=0.22. Возраст по данным Sm-Nd метода равен  $406\pm 23$  млн. лет,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i = 0.51250\pm 0.00002$ , СКВО=0.0035. Полученные данные показывают, что формирование ортоклаз-нефелиновых тылаитов в Нижнетагильском массиве происходило в раннем девоне, что совпадает с оценками возраста завершения ультраосновного магматизма в ППУ, опубликованными ранее.

*Работа выполнена по госбюджетной теме № г/р АААА-А18-118052590029-6; аналитические данные получены в ЦКП ИГГ УрО РАН “Геоаналитик” и в ЦКП МИИ СО РАН, Новосибирск*

## Геохронология метаморфизма донеопротерозойских образований Приполярного Урала

*А.М. Пыстин, Ю.И. Пыстина*

Сыктывкар, Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, [pystin.48@mail.ru](mailto:pystin.48@mail.ru)

Район развития докембрийских отложений на Приполярном Урале в пределах Ляпинского антиклинория считается опорным для всего Тимано-Североуральского региона. Однако

степень геохронологической изученности докембрия этого района остается невысокой. Особенно это касается донеопротерозойской части разреза.

Преыдушими нашими работами было показано, что на Приполярном Урале выделяющиеся на донеопротерозойском уровне стратоны, сложенные полиметаморфическими образованиями с реликтовыми парагнейсами амфиболитовой и гранулитовой (?) фаций (няртинский метаморфический комплекс, маньхобеинская и цокурьинская свиты) относятся к одному структурному этажу, предположительно архейско-палеопротерозойскому [1, 2 и др.].

С целью получения корректных геохронологических данных при изучении полиметаморфических образований мы использовали результаты ранее выполненных специальных исследований морфологии цирконов из метаморфических и метаморфизованных первично-осадочных пород как Приполярного, так и других районов Урала [3, 4 и др.].

Среди большого разнообразия морфологических и генетических разновидностей цирконов в изучаемых породах наиболее информативными для установления ранних метаморфических событий были признаны метаморфогенные цирконы округлой формы (округлые многогранники), которые известны как цирконы «гранулитового типа» [5] и характерны для наиболее высокотемпературных и высокобарических метаморфитов. Такие цирконы были установлены во всех донеопротерозойских образованиях рассматриваемого района.

Первая датировка циркона «гранулитового типа» из гранат-слюдяных гнейсов няртинского комплекса была получена методом термоионной эмиссии свинца –  $(2125 \pm 25)$  млн. лет [3]. Выполненное позднее U-Pb датирование метаморфогенных цирконов из пород этого же комплекса на ионном микрозонде SHRIMP-II (ВСЕГЕИ) привело к неоднозначным результатам [6]. Для цирконов «гранулитового» типа было зафиксировано три возрастных интервала: 1746–1722, 960–942 и 752–662 млн лет. Навряд ли эти цифры отражают реальные возрастные рубежи нескольких последовательных этапов метаморфизма гранулитовой фации. По-видимому, это «омоложенные» значения, связанные с проявлением более низкотемпературных процессов (метаморфизма амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций).

В последнее время нами была предпринята попытка массового U-Pb датирования метаморфогенных цирконов из кристаллических сланцев няртинского комплекса. Исследования проводились U-Pb LA-SF-ICP-MS методом, реализованным на базе одноколлекторного магнитно-секторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Element XR и установки для лазерной абляции UP-213 в ГИН СО РАН [7].

В няртинском комплексе была отобрана проба мелкозернистого серого гранат-биотитового гнейса без признаков мигматизации и других вторичных процессов. В монофракции преобладающими оказались цирконы «гранулитового» типа. Они были тщательно отобраны вручную под бинолупой. Всего было выделено 110 зерен таких цирконов. Их размер варьируется от 80 до 300 мкм. Зерна прозрачные бледно-розовой окраски. Оптическая зональность отсутствует или слабо выражена. При анализе на масс-спектрометре выбирались наиболее чистые, не эродированные и не трещиноватые зерна. Всего было проанализировано 44 кристалла.

Возраст, вычисленный по верхнему пересечению дискордии с конкордией ( $2127 \pm 31$  млн лет), подтверждает ранее полученную датировку методом термоионной эмиссии свинца ( $2125 \pm 25$  млн. лет) и дает основание с большой степенью уверенности интерпретировать его как время проявления раннего этапа метаморфизма пород няртинского комплекса [8]. Отметим, что близкий возраст аналогичных цирконов установлен нами в александровском гнейсо-мигматитовом комплексе Южного Урала ( $2081 \pm 14$  млн лет, SHRIMP-II [4]).

Сопоставимые возрастные значения цирконов «гранулитового типа» получены нами также из сильно диафторированных гнейсов маньхобеинской и цокурьинской свит. Однако они пока могут рассматриваться только как предварительные и требуют дополнительного подтверждения на более представительном материале.

Таким образом, впервые на основе результатов массового U-Pb датирования метаморфогенных цирконов из гнейсов няртинского полиметаморфического комплекса Приполярного Урала с учетом уже имеющихся данных установлен палеопротерозойский возраст наиболее раннего этапа метаморфизма пород. Это дает основание утверждать, что

рассматриваемый комплекс, так же как тараташский и александровский комплексы Южного Урала относится к нижнедокембрийским образованиям, вовлеченным в структуру уралид. Позднедокембрийский разрез на Приполярном Урале начинается с неопротерозойских отложений, выделяемых как пуйвинская свита.

- [1] Глубинное строение Тимано-Североуральского региона. Сыктывкар: Геопринт, 2011. 261 с.
- [2] Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Базальные отложения верхнего докембрия в Тимано-Североуральском регионе // Литосфера, № 3. 2014. С. 41-50.
- [3] Пыстина Ю. И., Пыстин А. М. Цирконовая летопись уральского докембрия. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. 167 с.
- [4] Pystin A. & Pystina J. // International Geology Review, Vol. 57, Is. 11–12, 2015. P. 1650–1659.
- [5] Краснобаев А. А. Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 1986. 152 с.
- [6] Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 6. С. 25–38.
- [7] Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Цыганков А.А. // Геология и геофизика, 2016, т. 57, № 1. С. 241–258.
- [8] Пыстина Ю. И., Пыстин А. М., Хубанов В. Б. Нижний докембрий в структуре палеозоид на Приполярном Урале // Докл. РАН, 2019. Т. 486. № 5. С. 572–576.

## Опыт использования касситерита в качестве U-Pb геохронометра

*Н.Г. Ризванова, А.М. Ларин*

*Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [rizng@mail.ru](mailto:rizng@mail.ru)*

Определение возраста оловянной минерализации имеет решающее значение для развития надежных генетических моделей месторождений. Датирование касситерита U-Pb методом (ID TIMS) открывает широкие возможности для решения этих задач. Высокая точность метода и датирование непосредственно рудного минерала позволяют решать широкий круг задач:

- 1) установление генетической (или ее отсутствие) связи оруденения с предположительно рудоносными магматическими породами;
- 2) выявление длительности и дискретности рудообразующего процесса;
- 3) оценка влияния роли наложенных термальных, гидротермальных или метаморфических процессов на переотложение первичных руд и их корреляция с тектоническими событиями.

Датирование касситерита позволяет напрямую определять возраст рудных месторождений, содержащих его в качестве основного минерала в оловянной минерализации, второстепенного – в полиметаллических рудах и аксессуарного – в редкометалльных гранитах. Кроме того, прямое датирование аксессуарного касситерита зачастую является единственным способом определения возраста редкометалльных гранитов, так как циркон в таких гранитах нередко отсутствует или находится в непригодном для датирования сильно метамиктном состоянии.

Методика датирования касситерита содержит три важных аспекта: 1) предварительное кислотное отмывание касситерита, предшествующее разложению; 2) полное разложение чрезвычайно устойчивого минерала; 3) расчет возраста касситерита с учетом особенностей первичного изотопного состава свинца.

В результате проведенных исследований рассмотрена применимость касситерита для датирования рудных месторождений в широком диапазоне возрастов. Представлены результаты датирования U-Pb методом ID TIMS касситерита из шести рудных месторождений – от 1845 до 145 млн лет:

- возраст редкометалльного скарнового месторождения Питкярантского рудного поля в Северном Приладожье Фенноскандинавского щита составляет  $1540 \pm 1$  млн лет [1];
- возраст месторождения олова Туоканского рудного района Байкальской складчатой области  $\sim 1843 \pm 7.5$  млн лет [2];
- возраст касситерита из месторождения Мохового олово-порфиривого типа в Западном Забайкалье составляет  $821 \pm 3$  млн лет [3];

- возраст Sn-W рудного месторождения Логросан (Центрально-Иберийская зона, Юго-Западная Испания) равен  $315.3 \pm 1$  млн лет;
- возраст месторождений Ярославское и Чапаевское Вознесенского рудного района Приморья составляет  $480 \pm 4$  млн лет [4];
- самый молодой касситерит – из Орловского месторождения, с возрастом  $144.2 \pm 0.3$  млн лет [5].

Во всех случаях возрасты касситерита из рудных месторождений согласуются в пределах ошибки с установленным ранее периодом магматизма ассоциирующих гранитных пород.

Сравнение результатов оценки U-Pb и Pb-Pb возраста *in situ* LA-ICPMS и U-Pb методом ID TIMS показывает, что, несмотря на то, что возрасты касситерита согласуются в пределах ошибок с возрастными датированными рудоносными гранитами, большие неопределенности возраста LA-ICPMS не позволяют определить потенциальный временной интервал между рудообразованием и магматическими процессами. Это указывает на преимущество датирования касситеритов методом ID TIMS.

Независимо от сильно варьирующихся концентраций U и содержания общего Pb, касситерит дает надежную геохронологическую информацию во всех изученных рудных месторождениях. Кроме того, выщелоки, получающиеся при обработке касситерита, могут быть использованы для датирования наложенных процессов, что существенно расширяет спектр геохронологических задач, которые могут быть решены с использованием этого метода.

Таким образом, простота и эффективность используемой методики датирования касситерита делает его доступным U-Pb геохронометром. Его высокая устойчивость позволяет ему сохранять свои первичные изотопные характеристики в широком диапазоне вторичных преобразований и делает касситерит надежным источником информации о возрасте процесса рудообразования и последующих геологических событий.

Исследования выполнены в рамках тем НИР FMUW-2022-0004, FMUW-2022-0005 и гранта РФФИ 19-05-00223.

- [1] Ризванова Н.Г., Кузнецов А.Б. Новый подход для определения U-Pb возраста касситерита методом ID TIMS на примере Питкярантского месторождения олова // ДАН. – 2020. – Т.491. – №1. – С. 47-51.
- [2] Ризванова Н.Г., Ларин А.М. Новые данные о возрасте формирования и преобразования оловорудных месторождений Тууюканского рудного района (Байкало-Патомский складчато-надвиговый пояс) по результатам U-Pb датирования касситеритов // Материалы VI конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия. 22-24 октября 2019. Санкт-Петербург. – С.182-183.
- [3] Ларин А.М., Ризванова Н.Г., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П., Рыцк Е.Ю. Возраст формирования руд оловянного месторождения Моховое и ассоциирующих пород Жанок-Бамбукойской вулканоплутонической ассоциации (Южно-Муйский хребет, Северное Забайкалье) // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 90-летию ИГЕМ РАН «Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы» Москва. 2021, 5-9 апреля – С.161-164.
- [4] Rizvanova N.G., Alenicheva A.A., Skublov S.G., Sergeev S.A., Lykhin D.A. Early Ordovician Age of Fluorite-Rare-Metal Deposits at the Voznesensky Ore District (Far East, Russia): Evidence from Zircon and Cassiterite U-Pb and Fluorite Sm-Nd Dating Results // Minerals. – 2021. – 11(11). – P. 1154
- [5] Баданина Е.В., Сырицо Л.Ф., Иванова А.А., Ризванова Н.Г. Возрастные и изотопно-геохимические характеристики редкометалльного оруденения, связанного с Li-F плюмазитовыми гранитами Восточного Забайкалья // Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания «Петрология и геодинамика геологических процессов» 06–13 сентября 2021 г. Иркутск. – Т.1. – С.51-53.



## Изотопно-геохимическая характеристика циркона из пород хребта Шака (Южная Атлантика): U-Pb данные, изотопы кислорода

Н.А. Румянцева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет;

<sup>2</sup> ФГБУ «ВНИИОкеангеология» [rumyanat@gmail.com](mailto:rumyanat@gmail.com)

За последние десятилетия число находок древних по возрасту зерен циркона в пределах молодой океанической коры значительно выросло. Они служат предметом широкого обсуждения в научном мире, которое продолжается по настоящее время. Основной вопрос: механизм перемещения этого циркона. Изначально присутствие заведомо более древнего циркона пытались списать либо на контаминацию при опробовании пород, либо при выделении циркона в процессе сепарации минералов. Однако значительное количество таких находок, которым посвящено более 20 публикаций, и широкий спектр лабораторий, в которых производилась непосредственно пробоподготовка, показали, что это не редкость, а сам циркон следует рассматривать в качестве ксенокристов [1].

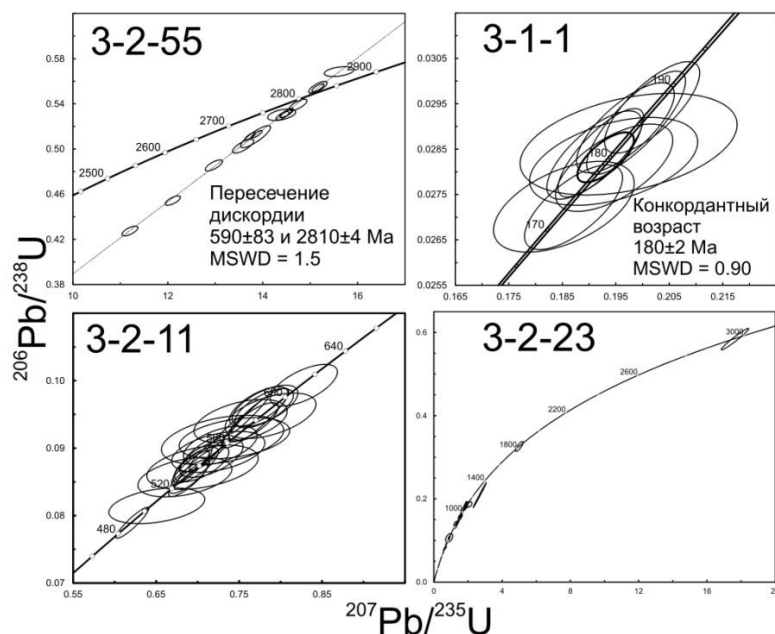


Рис. 1. Диаграмма с конкордией для циркона из пород хребта Шака.

Зерна циркона были извлечены из вмещающих пород при помощи стандартных методик с использованием электромагнитной сепарации и тяжёлых жидкостей в ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург). Датирование циркона проводилось U-Pb методом на ионном микрозонде SHRIMP-II в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). При этом точки для исследований выбирались заранее при помощи изображений циркона в проходящем и отражённом свете, во избежание попадания в анализируемую область трещин или микровключений в цирконе. Изотопный состав кислорода в цирконе был определён на ионном микрозонде Cameca IMS-1280 в Институте геологии и геофизики АН КНР (г. Пекин). Измерение редкоэлементного состава циркона проводилось при помощи ионного микрозонда Cameca IMS-4f в ЯФ ФТИАН (г. Ярославль).

Возраст ксенокристов варьирует в широком временном диапазоне. Циркон из обр. 3-2-55 образует дискордию с верхним пересечением с конкордией около 2.8 млрд лет и нижним пересечением около 590 млн лет (рис. 1). Возраст верхнего пересечения рассматривается как время кристаллизации непосредственно самого циркона, нижнее – наложенного термального события [2]. Циркон из обр. 3-1-1 образует конкордантный кластер возраста примерно 180 млн лет. Циркон из обр. 3-2-11 имеет возрастной диапазон от 490 до 610 млн лет с преобладающим количеством значений около 520-550 млн лет. Циркон из обр. 3-2-23 демонстрирует наибольший разброс возрастных значений, в основном от 500 млн лет до 1.1 млрд лет. При этом наблюдаются единичные значения палеопротерозойского и архейского возрастов [3].

Большинство зёрен циркона имеют высокое Th/U отношение, что характеризует циркон магматического генезиса. В среднем Th/U отношение составляет от 0.59 до 19.4, с единичными значениями ниже 0.03. Спектры распределения редкоземельных элементов (REE), нормированные на хондрит CI [4] обладают дифференцированным характером с преобладанием тяжёлых REE над лёгкими. Ярко выражены положительные Ce- и отрицательные Eu-аномалии.

Значение изотопов кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  варьирует от пониженных (относительно мантийных значений) 2.71‰ до повышенных 7.20‰. Эти данные свидетельствуют либо о наличии коровых меток, либо о возможном воздействии на породы нагретой морской воды. Однозначно эти данные интерпретировать сложно, но, вероятно, они отражают множественность источников поступления ксенокристов циркона в океаническую кору.

В заключении следует отметить, что в породах хребта Шака впервые установлен ксеногенный циркон, который имеет U-Pb возраст кристаллизации от архейских значений 2.8 млрд лет до мезозойских значений около 180 млн лет. Учитывая характер распределения REE и Th/U отношение, можно сделать вывод о магматическом происхождении этого циркона. Данные по изотопному составу кислорода отражают множественность источников поступления ксенокристов циркона в породы хребта Шака.

- [1] Bea F., Bortnikov N., Montero P. et al. Zircon xenocrysts evidence for crustal recycling at the Mid-Atlantic Ridge // *Lithos*. 2020. V. 354. 105361.
- [2] Skublov S.G., Rumyantseva N.A., Li Q. et al. Zircon xenocrysts from the Shaka Ridge record ancient continental crust // *Journal of Earth Science*. 2022. V. 33. № 1. P. 5-16.
- [3] Румянцева Н.А., Скублов С.Г., Ванштейн Б.Г. и др. Циркон из габброидов хребта Шака (Южная Атлантика) // *Записки Российского минералогического общества*. 2022. Ч. CLI. № 1. С. 44-73.
- [4] Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 1989. V. 42. P. 313-345.

## **О возрасте петротипических баргузинских гранитоидов Ангаро-Витимского батолита (верховья реки Баргузин): U-Pb изотопные данные по циркону (SHRIMP-II)**

*Е.Ю. Рыцк<sup>1</sup>, С.Д. Великославинский<sup>1</sup>, Е.В. Толмачева<sup>1</sup>, Н.В. Родионов<sup>2</sup>, Н.Г. Бережная<sup>2</sup>,  
А.М. Федосеенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [ERytsk@geogem.spb.ru](mailto:ERytsk@geogem.spb.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский геологический научно-исследовательский институт им.  
А.П. Карпинского

Длительность становления Ангаро-Витимского батолита по всем имеющимся U-Pb геохронологическим данным (циркон, ID-TIMS, SIMS) оценивается либо в 270-325 млн лет [1, 2], либо ограничивается интервалом времени 280 – 310 млн лет [3]. При этом, наиболее древние оценки возраста –  $301 \pm 2$  –  $314 \pm 8$  млн лет (ID TIMS [4]) были получены для больших навесок циркона сложного строения, выделенного из петротипических известково-щелочных гранитоидов баргузинского комплекса в истоках реки Баргузин. Таким образом, для подтверждения длительности формирования крупнейшего в Байкальской горной области батолита, необходимо уточнить возраст петротипических баргузинских гранитов. С этой целью было проведено дополнительное геохронологическое исследование единичных зерен ранее изученного циркона баргузинских гранитов [4] и элементов его строения с помощью вторично-ионного масс-спектрометра SHRIMP-II.

Аксессуарный циркон выделен из двух проб (БМП-1 и БМП-2), отобранных в левом борту долины реки Баргузин в 2 км выше урочища Балан-Тамур. Циркон представлен идиоморфными прозрачными длиннопризматическими и короткопризматическими кристаллами ( $K_{удл} = 1.2-4.0$ ). Длиннопризматические кристаллы однородные, в режиме КЛ характеризуются

осцилляторной зональностью, содержат первичные полностью раскристаллизованные расплавные включения и твердофазовые включения игольчатого апатита. Короткопризматические кристаллы обычно имеют сложное строение. В них отмечаются интенсивно резорбированные ядра магматического циркона, скорее всего ксеногенные, и широкие также магматические оболочки, для которых характерны осцилляторная зональность и наличие расплавных включений.

Средневзвешенная оценка  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возраста, полученная для 12 зерен магматического циркона (преимущественно однородные длиннопризматические кристаллы, в меньшем количестве – оболочки короткопризматических кристаллов с ксеногенными ядрами), составляет  $303 \pm 4$  млн лет (СКВО = 2.1) и интерпретируется как возраст кристаллизации петротипических баргузинских гранитов Ангаро-Витимского батолита.

Полученные оценки возраста ксеногенных ядер варьируют в широком диапазоне. В частности, интервал  $319 \pm 4$  –  $358 \pm 6$  млн лет может быть связан с процессами внутриплитного гранитоидного магматизма, который наиболее широко проявлен в краевой части Сибирского кратона. Вероятно, что в различной степени сохранившиеся реликты ксеногенных ядер этого возраста могли быть причиной получения сравнительно более “древних” оценок возраста циркона баргузинских гранитов.

Также выявлены ксеногенные ядра, соответствующие салаирским ( $532 \pm 7$  млн лет), позднебайкальским ( $657 \pm 9$  млн лет) и, главным образом, раннебайкальским магматическим событиям, проявленным в интервале  $768 \pm 10$  –  $798 \pm 10$  млн лет и отвечающие возрасту синколлизонных гранитоидов, а также плагиогранитов габбро-гранитной серии Анамакит-Муйского террейна ( $819 \pm 11$  млн лет [5]). Наиболее древнее  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  значение возраста одного из ксеногенных ядер циркона в баргузинских гранитах составляет  $1938 \pm 26$  млн лет и может свидетельствовать о принадлежности древней континентальной коры Баргузино-Витимского супертеррейна к ПалеоСибири.

В итоге, уточненная оценка возраста формирования гранитоидов баргузинского комплекса в его петротипе  $303 \pm 4$  млн лет, подтверждает нижнее ограничение возраста Ангаро-Витимского батолита в целом –  $\leq 310$  млн лет [3], а геохронологические исследования ксеногенных ядер циркона позволили предположить более широкую область распространения раннебайкальских магматических пород Анамакит-Муйского террейна и (или) продуктов их размыва. Работа выполнена в рамках госзадания НИР (ИГГД РАН FMUW-2022-0004) и при поддержке Фонда развития отечественной геологии (Санкт-Петербург).

- [1] Ярмолюк В.В., Будников С.В., Коваленко В.И., Антипин В.С., Горегляд А.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Козаков И.А., Ковач В.П., Яковлева З.С., Бережная Н.Г. Геохронология и геодинамическая позиция Ангаро-Витимского батолита // Петрология. 1997. Т. 5. № 5. С. 451-466.
- [2] Цыганков А.А., Матуков Д.И., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Посохов В.Ф., Цыренов Б.Ц., Хромов А.А., Сергеев С.А. Источники магм и этапы становления позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья // Геология и геофизика. 2007. Т. 48 (1). С. 156-180.
- [3] Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Рыцк Е.Ю., Ярмолюк В.В., Котов А.Б., Анисимова И.В., Яковлева З.С., Федосеев А.М., Плоткина Ю.В. Длительность формирования Ангаро-Витимского батолита: результаты U-Pb геохронологических исследований. // ДАН. 2012. Т. 444. № 2. С. 184-189.
- [4] Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю., Ризванова Н.Г. Герцинский возраст и докембрийский коровый протолит баргузинских гранитоидов Ангаро-Витимского батолита: U-Pb и Sm-Nd изотопные свидетельства // Доклады РАН. 1993. Т. 331. № 6. С. 726-729.
- [5] Рыцк Е. Ю., Амелин Ю. В., Ризванова Н. Г., Крымский Р. Ш., Митрофанов Г. Л., Митрофанова Н. Н., Переляев В. И., Шалаев В. С. Возраст пород Байкало-Муйского складчатого пояса // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2001. Т. 9. N4. С. 3-15.

## О возрасте формирования и метаморфизма гранитоидов Абчадского массива в Северном Прибайкалье: U-Pb изотопные данные по циркону (SHRIMP-II)

*Е.Ю. Рыцк<sup>1</sup>, Е.В. Толмачева<sup>1</sup>, С.Д. Великославинский<sup>1</sup>, Н.В. Родионов<sup>2</sup>, Ю.М. Лебедева<sup>1</sup>,  
Н.Г. Бережная<sup>2</sup>, А.М. Федосеенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [ERytsk@geogem.spb.ru](mailto:ERytsk@geogem.spb.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский геологический научно-исследовательский институт им.

А.П. Карпинского

Абчадский массив гранитоидов находится в краевой части Кутимского выступа фундамента Сибирского кратона, на границе с Олоkitской зоной рифтогенных комплексов раннего неопротерозоя. В целом массив имеет форму вытянутого купола, в центральной части которого преобладают массивные и разгнейсованные граносиениты, лейкократовые порфириовидные и гранофировые граниты, а краевая часть представлена гранофировыми гранитами и мигматитами. Сочетание неметаморфизованных гранитоидов, метаморфических пород и гранитоидов с явными признаками наложенных структурно-метаморфических преобразований, вызвали длительную дискуссию о происхождении и возрасте Абчадского массива [1, 2, 3 и др.]. В частности, нами [4], U-Pb методом по циркону была получена оценка возраста кристаллизации гранофировых гранитов и граносиенитов  $1861 \pm 8$  млн лет (верхнее пересечение дискордии), а также отмечена термальная активизация в каледонскую эпоху  $503 \pm 13$  млн лет (нижнее пересечение дискордии). Эта оценка позволяла коррелировать гранитоиды Абчадского массива с ирельским комплексом Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса [5]. Вместе с тем, учитывая неопределенность геохронологических данных, полученных по большим навескам циркона, мы вернулись к изучению циркона гранитоидов Абчадского массива методом локального U-Pb изотопного датирования единичных зерен и отдельных элементов их внутренней структуры (SHRIMP-II).

Геохронологические исследования проведены для двух проб гранитоидов. Проба Абч-3в –  $\text{Bi} \pm \text{Mu} - \text{Fsp} - \text{Pl} - \text{Q}$  гранофировый граносиенит центральной части массива (правый исток р. Аэлита). В ней преобладают длиннопризматические ( $K_{\text{удл}}$  в среднем 4-2) идиоморфные кристаллы циркона, состоящие из ксеноморфных магматических ядер и оболочек с осцилляторной зональностью. Ядра и оболочки содержат раскристаллизованные расплавные включения. Менее распространены обогащенные ураном (до 3000 ppm) идиоморфные кристаллы циркона метаморфической природы, содержащие множество субмикроскопических флюидных включений.

Проба Абч-1в –  $\text{Bi}(\text{Chl}) \pm \text{Mu} - \text{Sf}(\text{TiMgt}) - \text{Fsp} - \text{Pl} - \text{Q}$  гранофировый гранит из юго-восточной части массива в левом борту р. Абчада. Циркон в этой пробе представлен крупными идиоморфными и субидиоморфными прозрачными и полупрозрачными длиннопризматическими кристаллами длиной 300-400 мкм и  $K_{\text{удл}}$  2.5 – 3.0. Они состоят из ксеноморфных ядер с осцилляторной зональностью и раскристаллизованными расплавными включениями и бесцветных (черных в режиме КЛ) высокоурановых (2000-4000 г/т) оболочек со множеством флюидных субмикроскопических включений, указывающих на метаморфическую природу оболочек.

Средневзвешенная оценка  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраста 8 магматических ядер циркона из гранофирового граносиенита (проба Абч-3в) –  $1829 \pm 18$  млн лет ( $\text{СКВО} = 0.29$ ) интерпретируется как возраст кристаллизации гранитов. Для семи зерен высокоуранового циркона получены только дискордантные оценки возраста. Однако на диаграмме с конкордией фигуративные точки высокоурановых зерен циркона образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией ( $1849 \pm 14$  млн лет) в пределах ошибок соответствует оценке возраста кристаллизации, а нижнее может отвечать возрасту наложенного термального события  $445 \pm 10$  млн лет ( $\text{СКВО} = 0.76$ ). Следует отметить, что аналогичное распределение точек изотопного состава высокоурановых оболочек циркона отмечено для гнейсо-гранитов Кутимского выступа в бассейне реки Коганда: нижнее пересечение –  $421 \pm 15$  млн лет, верхнее –  $1904 \pm 27$  млн лет [6]. Однако при интерпретации изотопных данных SHRIMP-II для циркона с повышенным

содержанием U (более тысяч ppm) следует учитывать известный матричный эффект [7], а линейные зависимости изотопных отношений для высокоуранового циркона обычно связаны с диффузными потерями радиогенного Pb в ходе наложенного термального процесса.

Геохронологические исследования циркона из гранофирового гранита (проба Абч-1В) было выполнено с целью датирования в первую очередь высокоурановых метаморфических оболочек. Для них получено шесть конкордантных оценок  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возраста, средневзвешенное значение которых –  $455\pm 3$  млн лет. Средневзвешенное значение  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраста низкоурановых магматических ядер цирконов этой пробы  $1821\pm 11$  млн лет, интерпретируется как возраст кристаллизации гранофирового гранита и в пределах ошибок соответствует возрасту кристаллизации гранофирового граносиенита (проба Абч-3в). Таким образом, по сравнению с ранее полученной оценкой ( $1861\pm 8$  млн лет [4]) возраст становления Абчадского массива оценивается более молодым временным интервалом 1810-1847 млн лет, соответствующим возрасту латитов ламборского вулканогенного комплекса  $1827\pm 6$  млн лет [5].

Значение возраста метаморфических высокоурановых оболочек цирконов  $455\pm 3$  млн лет с  $\text{Th}/\text{U}\ll 0.1$  может надежно интерпретироваться в качестве оценки возраста наложенных на граниты структурно-метаморфических преобразований в конце каледонской эпохи. Область проявления каледонского метаморфизма в пределах Кутимского выступа локализована в крупной сдвиговой зоне, вытянутой от бассейна реки Лево́й Мини до среднего течения реки Чаи и далее на северо-запад на расстояние более 250 км. Возможно, что к этой области следует относить и метаморфические преобразования пород раннего неопротерозоя Олокито-Мамского прогиба Олоки́тской зоны.

Авторы выражают признательность Л.А. Неймарку и Е.Б. Сальниковой за ценные консультации и обсуждение полученных результатов. Работа выполнена в рамках госзадания НИР (ИГГД РАН FMUW-2022-0004) и при поддержке Фонда развития отечественной геологии (Санкт-Петербург).

- [1] Мануйлова М.М., Васьковский Д.П., Гурулев С.А. Геология докембрия Северного Прибайкалья. М. 1964. Наука. 226 с.
- [2] Макрыгина В.А. Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма умеренных и низких давлений. 1981. Новосибирск. Наука. 200 с.
- [3] Ларин А.М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб. Наука. 2011. 402 с.
- [4] Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю., Левченков О.А. и др. О раннепротерозойском-верхнерифейском возрасте пород олокитского комплекса (Северное Прибайкалье) по данным цирконовой геохронологии. В сб. Геология и геохронология докембрия Сибирской платформы и ее обрамления. 1990. Л.: Наука. С. 206-221.
- [5] Неймарк Л.А., Ларин А.М., Немчин А.А. и др. Геохимические, геохронологические (U-Pb) и изотопные (Pb, Nd) свидетельства анорогенного характера магматизма Северо-Байкальского вулcano-плутонического пояса // Петрология. 1998. Т. 6, №2. С. 139-164.
- [6] Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П. и др. Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны. ДАН. 2008. Т. 423. № 2. С. 228-233.
- [7] White L.T., Ireland T.R. High-uranium matrix effect in zircon and its implications for SHRIMP U-Pb age determinations. // Chemical Geology. 306-307. 2012. P. 78-91.

## Вулканические туфы в разрезах ашинской серии венда (эдиакария) на Южном Урале и их возраст: результаты U-Th-Pb (SIMS) датирования акцессорного циркона

*А.В. Рязанцев<sup>1</sup>, А.А. Разумовский<sup>1</sup>, И.А. Новиков<sup>2</sup>, А.И. Куртукова<sup>1</sup>, Ю.В. Яшунский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Геологический институт РАН, [avryazan51@mail.ru](mailto:avryazan51@mail.ru)

<sup>2</sup> Москва, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Вендское время на окраине Балтики, представленной в Башкирском мегантиклинории, ознаменовано аккреционно-коллизийными событиями, орогенезом и накоплением моласс ашинской серии. На уровне верхнего венда в разрезе серии выделяются урюкская, басинская, куккараукская и зиганская свиты. Имеющиеся датировки цирконов из туфов ашинской серии [7, 4] находятся в противоречии друг с другом и определяют дискуссионность расчленения разреза ашинской серии в Усть-Катаве и его корреляции с другими разрезами Южного и Среднего Урала. По мнению [6] U-Pb (La-ICP-MS) датировка циркона  $547,6 \pm 3,8$  млн л [7], полученная для вулканических туфов в разрезе Усть-Катава, нуждается в пересмотре.

Нами в двух новых местонахождениях исследованы туфы из басинской и зиганской свит, дополнительно исследован разрез с туфами в Усть-Катаве и определен U/Pb (SHRIMP) возраст акцессорного циркона из туфов.

Туфы в разрезе ашинской серии слагают горизонты мощностью 5–300 мм и представлены кристалло-, чаще, кристалло-витрокластическими разностями. Туфы всех разрезов сильно изменены вторичными процессами. Реконструкция составов по малоподвижным элементам показывает принадлежность туфов к риолитам, комендитам, трахитам, трахиандезитам. В туфах проявлена редкометальная геохимическая специализация. Сумма РЗЭ в них варьирует в диапазоне 260–880 г/т, Zr – 172–470 г/т, U до 17 – 25 г/т, Nb 35–158 г/т. Повышенные содержания Ta и Nb в туфах связаны с титаномагнетитом, РЗЭ – с флоренситом и апатитом, U и Th с цирконом и апатитом. Содержания Ba в туфах варьируют в диапазоне 320–1240 г/т, а в разрезе басинской свиты в Усть-Катаве – 33658 г/т.

*Разрез на восточном крыле Алатауского антиклинория.* Восточнее с. Толпарово, в нижней части разреза басинской свиты выше пачки переслаивающихся бордовых и зеленых алевролитов залегает пачка, содержащая туфы. В ее основании находятся палевые туфоаргиллиты (5 м), выше – желто-палевые кварц-полевошпатовые песчаники мелко-среднезернистые, расслоенные туфами (10 м). В разрезе присутствуют не менее 9 горизонтов по 0,5–8 см витро- и кристаллокластических туфов, разделенных пластами песчаников мощностью 0,3–1,2 м. Выше залегает толща переслаивающихся зеленых песчаников и алевролитов.

Циркон выделен из кристалло-витрокластических туфов. По 9 кристаллам получено значение  $577 \pm 7$  млн л, СКВО=0.31, Вероятность=1.0.

*Разрез на западном крыле Алатауского антиклинория.* В разрезе, вскрытом вдоль новой дороги Макарово-Кулгунино, присутствуют басинская, куккараукская и зиганская свиты. Ранее [4] в верхней части разреза басинской свиты из горизонта кристалло- и витрокластических туфов мощностью до 7 см, залегающего среди толщи переслаивающихся серо-зеленых песчаников и алевролитов, был выделен циркон. По 20 кристаллам получено значение  $573 \pm 2$  млн л, СКВО=0.0092, Вероятность = 0.92.

В этом же разрезе, выше конгломератов и гравелитов куккараукской свиты, в зиганской свите, в толще переслаивающихся пестроцветных мелкозернистых песчаников и алевролитов прослеживаются 2 сближенных горизонта туфов, мощностью 0,25–0,40 м, разделенные интервалом около 2 м терригенных пород. По циркону, выделенному из туфов нижнего горизонта, по 11 кристаллам получено значение  $566 \pm 5$  млн л, СКВО = 0.50, Вероятность = 0.97.

*Разрез на западном крыле Сулеймановской антиклинали.* На севере Усть-Катава, ниже терригенных пород такатинской свиты среднего девона обнажается фрагмент разреза басинской свиты (снизу-вверх): пачка (50 м) переслаивающихся алевролитов и алевропесчаников темно-зеленого и бордового цвета, которая сменяется пачкой бордовых песчаников и алевролитов (90 м). В разрезе нижней пачки на нижнем уровне присутствуют

горизонты витрокластических туфов мощностью 0.5–1 см, а выше – 2 горизонта мощностью 7–10 см. По 10 кристаллам циркона, выделенным из нижнего мощного горизонта витрокластических туфов получено значение  $578 \pm 7$  млн л, СКВО = 0.27, Вероятность = 0,98. Полученное значение не подтверждает ранее полученный результат со значением  $547.6 \pm 3.8$  млн л [7], который, по-видимому, является ошибочным.

Полученные данные и значения возраста в интервале  $578 \pm 7$  –  $566 \pm 5$  млн л позволяют коррелировать басинскую, куккараукскую и зиганскую (по крайней мере ее нижнюю часть) свиты с редкинским региональным ярусом, а не с котлинским, как это делалось ранее [1, 3]. Наиболее ранние эдиакарские органические остатки, представленные палеопасцхнидами, находятся в басинской свите разреза в Усть-Катаве [3] ниже пачки с туфами, имеющими возраст  $578 \pm 7$  млн л. Корреляция разрезов венда показывает, что нижней части зиганской свиты Башкирского мегантиклинория по возрасту соответствуют перевалокская свита Среднего Урала, в разрезе которой присутствуют туфы с возрастом  $567 \pm 4$  млн л [1, 4], которые также имеют редкометальную геохимическую специализацию [2].

Вулканизм, продуктом которого являются туфы ашинской серии, вероятно характеризует тыловую часть окраинно-континентального вулcano-плутонического пояса [5], на переходе к задуговому прогибу.

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-05-00308, в рамках госзадания ГИН РАН.

- [1] Гражданкин Д.В., Маслов А.В. Место венда в международной стратиграфической шкале // Геология и геофизика, 2015, т. 56, № 4, с. 703-717.
- [2] Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Ронкин Ю.Л. и др. Пепловые туфы в отложениях сыльвицкой серии верхнего венда (Кваркушско-Каменногорский мегантиклинорий, Средний Урал) // Литосфера, 2006, № 3, с. 45-70.
- [3] Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гражданкин Д.В., Колесников А.В. Верхний венд востока, северо-востока и севера Восточно-Европейской платформы: процессы осадконакопления и эволюция биоты. Литосфера, 2018, 18(4), с. 520-542.
- [4] Разумовский А.А., Новиков И.А., Рязанцев А.В. и др. Древнейшие вендские ископаемые Евразии: U–Pb-изотопный возраст басинской свиты (ашинская серия, Южный Урал) // ДАН, 2020, т. 495, № 2, с. 3-8.
- [5] Рязанцев А.В., Кузнецов Н.Б., Дегтярев К.Е. и др. Реконструкция венд-кембрийской активной континентальной окраины на Южном Урале по результатам изучения детритовых цирконов из ордовикских терригенных пород // Геотектоника, 2019, т. 53, № 4, с. 43-59.
- [6] Kolesnikov, A.V., Bobkov, N.I. (2019). Revisiting the age of the Asha Group in the South Urals. Estudios Geológicos 75(2): e103.
- [7] Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G. et al. Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: Paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals // Prec. Res., 2013, v. 236, p. 16-30.

## **Методика анализа локальных вариаций изотопного состава Sr и Pb в кристаллической структуре минералов – ключ к реконструкции условий протекания геологических процессов**

*В.М. Саватенков<sup>1,2</sup>, А.В. Мезенцева<sup>1</sup>, О.В. Галанкина<sup>1</sup>, Л.В. Шпакович<sup>1</sup>, М.В. Кузнецов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [v.m.savatenkov@ipgg.ru](mailto:v.m.savatenkov@ipgg.ru)

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

Изотопные системы минералов, в том числе и системы, включающие радиогенные изотопы, являются чувствительным индикатором вторичных процессов, приводящих к изменению вещественного состава горных пород. К таким вторичным процессам относятся метаморфизм, метасоматоз, процессы химического выветривания.

С одной стороны, реакция изотопных систем на вторичные процессы накладывает ограничения на изотопные методы для определения возраста геологических процессов, а также первичных изотопных параметров для оценки определения источника вещества. С другой стороны, кинетика поведения изотопов при вторичных воздействиях (температура, химические реакции) используются для реконструкции условий протекания вторичных процессов. Основным параметром, характеризующим поведение радиогенных изотопов в минералах, который широко используется в геологических реконструкциях, является температура закрытия изотопных систем в различных минералах.

Вместе с тем, потенциально кинетические параметры, характеризующие поведение радиогенных изотопов в кристаллической решётке, такие, как скорость диффузии, скорость химической реакции и их температурная зависимость, могут использоваться для более широкого круга задач, таких как температура протекания вторичных процессов, продолжительность их протекания, химическая активность флюидов и пр. Для решения подобных задач, на сегодняшний день, широко используются стабильные изотопы (O, H, C, S).

Ключевым в применении изотопных систем для решения подобных задач является локальное изучение неоднородностей изотопного состава элементов в минералах, что позволяет более конкретно охарактеризовать кинетику поведения изотопов в структуре минералов при вторичных термальных и химических воздействиях. В этой связи, на сегодняшний день широко применяются локальные методы изучения изотопного состава радиогенных изотопов, в первую очередь метода индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией (LA-ICP-MS). Однако, этот метод имеет существенные ограничения по точности, требует высокой концентрации исследуемого элемента и отсутствие изобарных масс. В этой связи, в основном локальными методами изучаются изотопные характеристики Pb, как не имеющего изобарных изотопов, и содержащегося в ряде минералов в повышенных количествах (сульфиды, K-полевой шпат). Следующим является Sr в минералах с низким содержанием Rb (апатит, плагиоклаз).

Альтернативным способом получения высокоточной информации об изотопных характеристиках элементов, содержащих радиогенные изотопы, является традиционный анализ малых количеств вещества, включая метод изотопного разбавления. Чувствительность масс-спектрометров класса TIMS, а также высокая стабильность ионного тока, которую обеспечивает этот вид масс-спектрометрического анализа, позволяет с высокой точностью проводить изотопный анализ элементов, анализируемое количество которых составляет десятки доли нанограмма. Возможность высокоточного анализа изотопного состава элементов в малых количествах вещества позволяет изучать локальные вариации изотопных характеристик в минералах путём высверливания малых фрагментов из различных участков минерала [1].

Комплексный анализ изотопных характеристик Sr и Pb в различных фрагментах минералов при изучении влияния внешних параметров (температура, флюид) на кинетику поведения этих элементов позволяет избежать таких неопределённостей, как размер диффузионных доменов, ограниченных линейными дислокациями (трещины, плоскости спайности). Наиболее перспективным объектом для таких исследований является калиевый полевой шпат, который характеризуется повышенным, по сравнению с другими силикатами, содержанием Pb и Sr, и для которого были определены кинетические параметры диффузии этих элементов [2, 3].

В настоящей работе представлены результаты изотопного анализа Pb и Sr анализируемые содержания которых составляют 0.5 и 1 нг соответственно. Для изотопного анализа Pb была использована методика интегральных токов [4]. Изотопный состав Sr определялся методом измерения на Та эмиттере в одно-ленточном режиме [1]. Воспроизводимость изотопных отношений Pb в стандарте SRM981 составила 0.03%. Воспроизводимость изотопных отношений Sr в стандарте SRM987 составила 0.005%.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-05-00401

- [1] Charlier B.L.A., Ginibre C., Morgan D., Nowell G.M., Pearson D.G., Davidson J.P., C.J. Ottley Methods for the microsampling and high-precision analysis of strontium and rubidium isotopes at single crystal scale for petrological and geochronological applications // Chem. Geol. – 2006. – 232. – P. 114-133.



- [2] Cherniak D.J., Watson E.B. A study of strontium diffusion in K-feldspar, Na-K feldspar and anorthite using Rutherford Backscattering Spectroscopy // Earth and Planetary Science Letters – 1992. – 113. – P. 411-425.
- [3] Cherniak D.J. Diffusion of lead in plagioclase and K-feldspar: an investigation using Rutherford Backscattering and Resonant Nuclear Reaction Analysis // Contrib. Mineral. Petrol. – 1995. – 120. – P. 358-371.
- [4] Fukami Y., Tobita M., Yokoyama T., Usui T., Moriwaki R. Precise isotope analysis of sub-nanogram lead by total evaporation thermal ionization mass spectrometry (TE-TIMS) coupled with a  $^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}$  double spike method // J. Anal. At. Spectrom. – 2017. – 32. – P. 848-857.

## Сложности геохронологических исследований метаморфизованного раннедокембрийского щелочно-карбонатитового комплекса Курского блока Сарматии

*К.А. Савко<sup>1</sup>, А.В. Самсонов<sup>2</sup>, М.В. Стифеева<sup>3</sup>, Е.Б. Сальникова<sup>3</sup>, А.Б. Котов<sup>3</sup>, А.Б. Кузнецов<sup>3</sup>,  
Ю.О. Ларионова<sup>2</sup>, Е.Х. Корниш<sup>1</sup>, М.В. Червяковская<sup>4</sup>, Е.В. Толмачева<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Воронеж, ВГУ, [savko@geol.vsu.ru](mailto:savko@geol.vsu.ru)

<sup>2</sup> Москва, ИГЕМ РАН, [samsonovigem@mail.ru](mailto:samsonovigem@mail.ru)

<sup>3</sup> Санкт-Петербург, ИГГД РАН, [katesalnikova@yandex.ru](mailto:katesalnikova@yandex.ru)

<sup>4</sup> Екатеринбург, ИГиГ УрО РАН, [zaitseva.mv1991@gmail.com](mailto:zaitseva.mv1991@gmail.com)

Многие щелочно-карбонатитовые комплексы (ЩКК) подвергаются более поздней тектонической переработке, что приводит к интенсивному преобразованию первично-магматических ассоциаций и, соответственно, к сложностям в интерпретации геохронологических и петрологических данных. Мы обсудим проблемы геохронологических, изотопно-геохимических и петрологических исследований карбонатитов на примере метаморфизованного Дубравинского ЩКК (Курский блок Сарматии).

В строении Дубравинского массива принимают участие породы трех групп: клинопироксениты, карбонатиты (вместе с силикокарбонатитами и фоскоритами) и сиениты (вместе с щелочными гранитами). Складчатая форма интрузивных тел Дубравинского массива предполагает, что они подверглись НТ/ЛР метаморфизму с возрастом около 2,07 млрд. лет, проявленному в Курском блоке при коллизии Сарматии и Волгоуралии [1]. Карбонатиты и пироксениты имеют гранобластовые, лепидогранобластовые структуры, гнейсовидные и полосчатые текстуры. В сиенитах и щелочных гранитах, за исключением иногда проявленных директивных текстур, не проявлены признаки метаморфизма. P-T параметры метаморфизма 630 °C и 4-5 кбар были оценены для палеопротерозойских метапелитов Приоскольской структуры [2] рядом с Дубравинским массивом.

*U-Pb изотопные исследования* проведены для минералов главных типов пород Дубравинского ЩКК. Методом ID TIMS были определены возрасты титанита и андрадита из *щелочных пироксенитов*, которые составляют  $2071 \pm 11$  млн. лет и  $2075 \pm 3$  млн. лет, соответственно. Оценка возраста цирконов из *карбонатитов* составляет  $2000 \pm 31$  млн. лет (SRIMP-II), а монацита –  $1965 \pm 5$  млн. лет (ID TIMS). От этих значений резко отличается возраст цирконов из щелочных сиенитов и гранитов. Для сиенитов получен конкордантный возраст циркона  $2587 \pm 9$  млн. лет, а для щелочных гранитов  $2809 \pm 3$  млн. лет (SHRIMP-II).

*Изотопная систематика.* В Sm-Nd изохронных координатах породы ЩКК в целом имеют широкие вариации. Близкие к линейным корреляции фигуративных точек устанавливаются для щелочных гранитов ( $T \sim 3.5 \pm 1.6$  млрд лет, СКВО=6.1) и карбонатитов ( $T \sim 2.2 \pm 0.7$  млрд лет, СКВО=7.5) (рис. 1). Однако большие величины СКВО и ошибки возраста не позволяют рассматривать эти линии как изохроны и придавать рассчитанным возрастам геохронологическую значимость. Фоскориты, щелочные пироксениты и сиениты имеют еще больший разброс точек и не дают никакой геохронологической информации. В Rb-Sr изохронных координатах точки фоскоритов располагаются вблизи линии с возрастом  $T \sim 1.4 \pm 1.1$  млрд лет, СКВО=56 (рис. 2б). Сиениты с еще большим разбросом располагаются вдоль линии с возрастом  $T \sim 1.9 \pm 1.4$  млрд лет (СКВО=41000). Максимальный разброс и отсутствие какой-либо

корреляции демонстрируют фигуративные точки карбонатитов. В отличие от U-Pb изотопной системы цирконов, Lu-Hf изотопная система демонстрирует более широкие вариации изотопного состава  $Hf - \epsilon Hf(2587) = (-3.5) - (-8.9)$ . Модельные возрасты T<sub>Hf(C)</sub>, рассчитанные по двухстадийной модели являются преимущественно палеоархейскими от 3279 до 3809 млн. лет. Lu-Hf изотопные исследования циркона из карбонатита указывают на экстремально высоко радиогенный изотопный состав  $Hf - \epsilon Hf(2000) = +6.3 - +22.7$ . Все полученные значения изотопного состава углерода и кислорода для карбонатитов попадают в область первично магматических протолитов:  $\delta^{13}C \text{‰}_{(PDB)} = (-4,9)$  до  $(-6,4)$   $\delta^{18}O \text{‰}_{(SMOW)} = (+8,0) - (+9,8)$ .

*Интерпретация.* Щелочные граниты характеризуются наиболее древним возрастом циркона  $2809 \pm 3$  млн. лет, который совпадает с возрастом гранулитового метаморфизма, зафиксированного в палеоархейских ТТГ, метапелитах и метабазитах [3]. Граниты также имеют наименее радиогенный состав Nd всех пород ЩКК и палеоархейские модельные возрасты (T<sub>NdDM</sub>). Учитывая эти данные и морфологические особенности циркона, мы полагаем, что циркон с возрастом  $\approx 2.8$  млрд. лет был захвачен из пород палеоархейского фундамента Курского блока. Возраст циркона из сиенитов 2.59 млрд. лет ранее был ошибочно интерпретирован как возраст образования Дубравинского ЩКК [4]. Значения изотопного состава Sr и Nd, пересчитанные на 2.59 млрд. лет, находятся в области нереальных для Земли величин, предполагая более деплетированные, чем DM (Sm-Nd) и UR (Rb-Sr) источники магм. Это означает, что выбранный для расчетов возраст не согласуется с этими данными. Можно полагать, что циркон унаследован из источников магм с возрастом около 2,6 млрд. лет, связанных внутриплитным магматизмом в Курском блоке. Возраст титанита  $2071 \pm 11$  млн. лет и андрадита  $2075 \pm 3$  млн лет из щелочных пироксенитов, титанита из карбонатитов  $2080 \pm 13$  млн. лет [5] совпадает с возрастом метаморфизма при коллизии Сарматии и Волгоуралии [1].

Таким образом, возраст магматического протолита для пород Дубравинского ЩКК достоверно не установлен, но может быть близок к 2.07 млрд. лет, совпадающий с возрастом Черниговского ЩКК на Украинском щите, который находится вместе с Дубравинским в пределах палеоархейского Азовско-Курского домена. В нем же определен возраст апатита  $2007 \pm 1$  и  $1988 \pm 2$  млн. лет.

- [1] Savko K.A., Samsonov A.V., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Korish E.H., Larionov A.N., Anisimova I.V., Bazikov N.S. The Early Precambrian Metamorphic Events in Eastern Sarmatia// Precambrian Research – 2018. – 311. – P. 1–23.
- [2] Савко К.А., Кальмуцкая Н.Ю. Петрология недосыщенных калием метапелитов Воронежского кристаллического массива с рассмотрением парагенезиса оливин-жедрит-ортопироксен-гранат магнетит// Петрология – 2002. – 10(3) – С. 283-311.
- [3] Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N., Chervyakovskaya M.V., Korish E.H., Larionova Yu.O., Bazikov N.S., Tsybulyaev S.V. A buried Paleoarchean core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotope mapping and paleotectonic application// Precambrian Research – 2021. – 353. – 106021.
- [4] Савко К.А., Цыбуляев С.В., Самсонов А.В., Базиков Н.С., Кориш Е.Х., Терентьев Р.А., Паневин В.В. Архейские карбонатиты и щелочные породы Курского блока Сарматии: возраст и геодинамическая обстановка// ДАН – 2021. – 498(1) – С. 69-75.
- [5] Альбеков А.Ю., Чернышов Н.М., Рыборак М.В., Кузнецов В.С., Сальникова Е.Б., Холин В.М. Изотопный U-Pb возраст апатитоносных карбонатитов Курского блока Воронежского кристаллического массива// ДАН – 2017. – 473(3). – С. 320-321.

## О возрасте гелиодора Супруновского пегматитового месторождения (Северо-Байкальская провинция): U-Pb изотопные данные по циркону (ID TIMS)

*Е.Б. Сальникова, А.А. Иванова, Е.Ю. Рыцк, А.Б. Котов, Ю.В. Плоткина, А.М. Федосеенко*

*Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [katesalnikova@yandex.ru](mailto:katesalnikova@yandex.ru)*

Северо-Байкальская пегматитовая провинция локализована в Байкало-Патомском складчатом поясе краевой части Сибирского кратона и включает многочисленные месторождения мусковитовых пегматитов Мамского слюдоносного района на севере и редкие проявления редкометалльных пегматитов с преобладанием бериллиевой минерализации на юге. В Мамском слюдоносном районе установлены возрастные рубежи формирования ранних плагиоклазовых пегматитовых жил  $388 \pm 2$  млн лет и поздних двуполевошпатовых пегматитов  $333 \pm 1$  млн лет [1], однако оценки возраста редкометалльных пегматитов ограничены данными для пегматитов Абчадского узла [2].

Супруновское месторождение с уникальной бериллиевой минерализацией находится в пределах Кутимского узла (Верхнекутимский тектонический блок) и является единственным месторождением южной части провинции. Оно приурочено к относительно крупному жильному телу двуполевошпатовых пегматитов (190x30-35 м) [3], локализованному в кристаллических сланцах и гнейсовидных гранитах ирельского (яральского) комплекса с возрастом  $1836 \pm 16$  млн лет (ID TIMS). Бериллиевая минерализация развита в центральной части жилы, сложенной блоковым пегматитом кварц-альбитового и кварц-микроклинового состава с кварцевым ядром. Кристаллы преобладающего гелиодора обычно крупные (до метра), сильно трещиноватые, замутненные и сопровождаются серицитовыми и альбит-серицитовыми оторочками. В качестве включений в гелиодоре присутствует циркон, образующий крупные (до 0.5 мм) замутненные трещиноватые кристаллы.

Нами выполнены U-Pb (ID TIMS) геохронологические исследования метамиктизированного циркона, выделенного непосредственно из гелиодора пегматитов Супруновского месторождения. Для изотопных исследований использовался предварительный высокотемпературный отжиг и последующая «мягкая» кислотная обработка циркона [4]. Остаток циркона после обработки характеризуется незначительной возрастной дискордантностью (1.1-1.8%), а величина его возраста ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) составляет  $333 \pm 10$  млн лет. Эта оценка возраста отвечает возрасту кристаллизации берилла. Она совпадает с возрастом формирования двуполевошпатовых пегматитов Мамского слюдоносного района и указывает на единый этап пегматитообразования в раннем карбоне, определивший минерагеническую специализацию и зональность Северо-Байкальской провинции.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (№ 20-05-00437) и НИР (№ FMUW-2022-0003).

- [1] Ткачев А.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Рыцк Е.Ю., Иванова А.А., Толмачева Е.В., Плоткина Ю.В., Жукова И.А., Сапожникова Л.Н. О возрасте формирования пегматитов Мамской слюдоносной провинции: новые U-Pb (ID-TIMS) данные по циркону. Материалы XIII Всероссийского Петрографического совещания. Иркутск. –2021. – С.156-157.
- [2] Неймарк Л.А., Ларин А.М., Рыцк Е.Ю., Гороховский Б.М., Овчинникова Г.В. U-Pb-геохронологические и Pb-изотопные свидетельства герцинского этапа рудогенеза в пределах протерозойского обрамления юга Сибирской платформы (Северо-Западное Прибайкалье) // Доклады АН. – 1993. – 333. – С.765-768.
- [3] Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49 – Киренск. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ. – 2012. – 607 с.
- [4] Иванова А.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Плоткина Ю.В., Толмачева Е.В., Сырицо Л.Ф., Бочаров В.Н. U-Pb (ID-TIMS) датирование высокоурановых метамиктизированных

цирконов: новые возможности известных подходов // Петрология. – 2021. – 29. – С. 656-667.

## Метод дифференциального растворения в U-Pb геохронологии: прошлое и настоящее

*Е.Б. Сальникова, А.Б. Котов, А.А. Иванова, М.А. Суханова, М.В. Стифеева, Ю.В. Плоткина,  
А.М. Федосеенко, Е.В. Толмачева*

*Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [katesalnikova@yandex.ru](mailto:katesalnikova@yandex.ru)*

1. С момента разработки Д. Тилтоном [1] U-Pb метода датирования циркона, он остается наиболее надежным, точным и, соответственно, востребованным. Известно, что главным фактором, ограничивающим точность определения возраста с помощью этого метода, является частичная потеря радиогенного свинца минералами-геохронометрами. На протяжении последних пятидесяти лет разработаны различные подходы к решению этой проблемы [2-9]. Наиболее эффективным из них считается метод дифференциального растворения или «химической абразии» в сочетании с предварительным высокотемпературным отжигом. Обычно он используется для U-Pb (ID-TIMS) изотопного датирования, но иногда применяется и для предварительной подготовки циркона для локальных U-Th-Pb (SIMS) геохронологических исследований. При этом предложенный Д. Маттинсоном [9] подход был значительно упрощен. Во многих случаях приемы ступенчатого выщелачивания заменяются однократной кислотной обработкой циркона в достаточно «жестких» условиях при температуре 210-220°C в течении 10-18 часов. Традиционно считается, что метод дифференциального растворения следует использовать для циркона с хорошей или средней степенью сохранности кристаллической структуры, свободного от присутствия унаследованной компоненты радиогенного свинца. Следует отметить, что метамиктный циркон для исследований такого рода считается не пригодным.

2. На примере литий-фтористых гранитов Тургинского массива (Восточное Забайкалье) продемонстрирована принципиальная возможность использования высокоуранового метамиктизированного циркона с высокой степенью радиационных повреждений для U-Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований с помощью методик предварительного высокотемпературного отжига и последующей кислотной обработки [10]. Показано, что для циркона с высокой дозой авторадационного облучения возможен подбор оптимальных условий высокотемпературного отжига и кислотной обработки, обеспечивающих, с одной стороны, практически полное удаление метамиктной фазы, а с другой – получение достаточного количества материала для U-Pb (ID-TIMS) датирования. Полученный опыт работы с высокоурановым метамиктизированным цирконом успешно применен для U-Pb геохронологических исследований целого ряда объектов (щелочные граниты Арысканского (H)REE-Nb-Ta-Zr-Th-U месторождения, Снежного фенакит-бериллового месторождения, пегматитов Мамского месторождения, Супруновского месторождения с уникальной бериллиевой минерализацией и др.).

3. В результате многолетних геохронологических исследований гранитоидов повышенной щелочности Центрально-Азиатского складчатого пояса выявлена главная изотопно-геохимическая особенность цирконов из этих пород, которая состоит в присутствии значительного количества примесного, в том числе унаследованного свинца, обусловленного микровключениями рудных минералов. При этом эти включения демонстрируют высокую способность к селективному растворению в ходе предварительной кислотной обработки в сочетании с высокотемпературным отжигом. Для обработанного таким образом циркона в большинстве случаев получены конкордантные оценки U-Pb возраста.

4. Методика дифференциального растворения («дискретная химическая абразия») может быть также использована для разделения фаз циркона и бадделеита из поликристаллических циркон-бадделеитовых агрегатов оливиновых габброноритов Амбарнского массива (Беломорская провинция). Она основана на принципиально различной устойчивости циркона и бадделеита в различных кислотах и включает двухэтапную процедуру кислотной обработки. В

результате этих исследований была получена как оценка возраста магматического бадделеита, так и циркона его оболочек, образовавшегося при метаморфизме. Кроме того, методика дифференциального растворения может успешно применяться для уменьшения дискордантности бадделеита, кристаллы которого осложнены субмикронной оболочкой циркона, что является распространенным явлением в базитах.

5. Наконец, методика дифференциального растворения нашла применение для U-Pb геохронологических исследований монацита на примере Q-Ser-Ab апогранитных березитов Верхнекаралонского золоторудного месторождения. Характерной особенностью этого монацита является присутствие большого количества включений сульфидов и гидроокислов железа, что является препятствием для геохронологических исследований. Использование предварительной кислотной обработки позволило получить для него оценку возраста  $335 \pm 26$  млн лет. Несмотря на значительную погрешность определения возраста, этот эксперимент можно считать успешным, однако дальнейшие усилия следует направить на выбор оптимальных условий дифференциального растворения монацита.

- [1] Tilton G. et al. Isotopic composition and distribution of lead, uranium, and thorium in a Precambrian granite // GSA Bulletin. – 1955.- 66. – P. 1131-1148.
- [2] Макеев А.Ф. и др., Изучение миграции свинца и урана в цирконах методом дифференциального растворения // Радиохимия. – 1978. – XX. – С. 439-445.
- [3] Макеев А.Ф. Дифференциальное растворение цирконов как метод изучения миграции изотопов свинца и урана. – Автореф. канд. дис. – Л.: 1979. – 22 с.
- [4] Макеев А.Ф. Радиационно-химические превращения цирконов и их применение в геохронологии. – Л.: Наука. 1981. – 64 с.
- [5] Krogh T.E., Davis G.L. Alteration in zircons and differential dissolution of altered and metamict zircon // YearBook 74. Carnegie Institution. Washington. – 1975. – P. 619-623.
- [6] Krogh T.E. Improved accuracy age determination of U-Pb zircon by the creation of more concordant systems using an air abrasion technique // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1982. – 46. – P. 637-649.
- [7] Todt WA, Büsch W (1981) U-Pb investigations on zircons from pre-Variscan gneisses—a study from the Schwarzwald, West Germany // Geochim Cosmochim Acta. – 1981. – 45. – P. 1789-1801.
- [8] Mattinson J.M. A study of complex discordance in zircons using step-wise dissolution techniques // Contrib. Mineral. Petrol. – 1994. – 116. – P. 117-129.
- [9] Mattinson J.M. Zircon U-Pb chemical abrasion “CATIMS” method: combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved and accuracy of zircon ages // Chem. Geol. – 2005. – 220. – P. 47-66.
- [10] Иванова А.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Плоткина Ю.В., Толмачева Е.В., Сырицо Л.Ф., Бочаров В.Н. U-Pb (ID-TIMS) датирование высокоурановых метамиктизированных цирконов: новые возможности известных подходов // Петрология. – 2021. – 29. – С. 656-667.

### **Тунгусский супертеррейн, Сибирский кратон: границы и коровая эволюция по результатам изотопно-геохронологического изучения керн скважин**

*А.В. Самсонов<sup>1</sup>, Ю.О. Ларионова<sup>1</sup>, А.Н. Ларионов<sup>2</sup>, К.Г. Ерофеева<sup>1</sup>, А.В. Постников<sup>3</sup>,  
В.А. Спиридонов<sup>4</sup>, И.А. Сабиров<sup>3</sup>, И.В. Спиридонов<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
[samsonovigem@mail.ru](mailto:samsonovigem@mail.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им.  
А.П. Карпинского, [Larionov@vsegei.ru](mailto:Larionov@vsegei.ru)

<sup>3</sup> Москва, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, [apostnikov@mtu-net.ru](mailto:apostnikov@mtu-net.ru)

<sup>4</sup> Москва, ФГБУ «ВНИГНИ», [vik-spiridonov@yandex.ru](mailto:vik-spiridonov@yandex.ru)

Раннедокембрийский фундамент Сибирской платформы, Сибирский кратон (СК), выведен на поверхность только в небольших выступах в ее краевых частях на юге, на западе и на севере.

На остальной территории представления о его строении и составе базируются на геофизических данных с привлечением результатов изучения керн глубоких скважин. В восточной части СК Sm-Nd изотопные исследования керн скважин [1] в сочетании с данными по Алданскому и Анабарскому щитам и результатами изучения коровых ксенолитов из кимберлитов служат основой для выделения архейских и палеопротерозойских доменов. Западная часть СК изучена хуже. Здесь выделяется крупный блок коры – Тунгусский супертеррейн (ТСТ), строение, состав и возраст которого основаны на интерпретации геофизических полей [2], на данных по керну нескольких скважин [1, 3] и на результатах датирования детритового циркона из неопротерозойских осадочных пород в западном обрамлении СК [4]. Восточным ограничением ТСТ служит Таймыро-Байкальская коллизийная зона, которая полностью перекрыта осадочными породами чехла, выделена по геофизическим данным, и ее положение в разных тектонических схемах существенно различается [4]. В докладе будут приведены результаты изучения керн на трех опорных участках в контурах ТСТ, уточняющие его состав, возраст и положение его восточной границы.

Участок 1 располагается на западе ТСТ, на Байкитском поднятии фундамента. Здесь изучен крупный Юрубченский массив постколлизийных гранитоидов [5]. Этот массив включает близкие по возрасту ( $2563 \pm 10$  млн лет), но разные по источникам гранодиориты ( $\epsilon_{NdT} = +1.5 \pm 0.6$ ) и лейкограниты ( $\epsilon_{NdT} = -1.0 \pm 0.7$ ). Возрастные аналоги Юрубченского массива широко распространены в составе ТСТ, на что указывает преобладание в неопротерозойских осадочных породах в западном его обрамлении кластогенного циркона с возрастом 2.55 – 2.60 млрд лет [4].

На Участке 2, северо-запад Непско-Ботуобинского поднятия, скв. Кулиндинская-1 вскрыла постколлизийные граниты с U-Pb возрастом циркона  $2525 \pm 10$  млн лет,  $\epsilon_{NdT} = +1.0$ , которые по всем характеристикам близки неоархейским гранодиоритам Юрубченского массива. Граниты внедрялись в метаморфизованные терригенные осадочные породы, содержащие детритовый циркон с U-Pb возрастными от 2620 до 3284 млн лет [6]. Эти неоархейские породы граничат с ювенильными палеопротерозойскими гнейсогранитами ( $T_{NdDM}$  от 2.3 до 2.4 млрд лет), которые вскрыты скв. Ереминская-101 [1] в 20 км северо-восточнее скв. Кулиндинская-1.

На Участке 3 в центре Ангаро-Ленской ступени к югу от Братского водохранилища, скважины на разных берегах Ангары вскрыли в фундаменте разные комплексы. Скважина Левобережная вскрыла постколлизийный габбро-диорит-гранодиоритовый массив с возрастом  $2530 \pm 30$  млн лет, гранитоиды которого имеют значимый вклад древней коровой компоненты ( $\epsilon_{NdT} = -1.6 \pm 0.5$ ), но по геохимии близки к гранитоидам Юрубченского и Кулиндинского массивов. Скважина Правобережная вскрыла метаморфизованную терригенно-карбонатную толщу, которая формировалась за счет архейских источников ( $T_{NdDM}$  от 2.97 до 3.14 млрд лет, U-Pb возрасты детритового циркона от 2.6 до 2.7 млрд лет). На зернах архейского циркона и в гранитоидах, и в метаосадочных породах фиксируются тонкие каймы светлого в СЛ, вероятно, метаморфического циркона с возрастом около 1.8 млрд лет. Перекрывающие рифейские гравелиты и песчаники, вскрытые скв. Правобережные, содержат наряду с неоархейским (2.5-2.7 млрд лет), около 20 % детритового циркона с возрастными 1.8–2.1 млрд лет, указывая на приграничное положение изученного архейского участка. Этот молодой циркон мог поступать из палеопротерозойских комплексов, вскрытых к востоку скважинами на Южно-Ковыктинской площади [3] и далее с Ачитканского выступа [7].

Главные выводы. 1). В составе ТСТ широкое распространение имеют постколлизийные гранитоиды с возрастом 2.53-2.56 млрд лет, внедрение которых, вероятно, завершило консолидацию этого крупного неоархейского блока. 2). Изотопные характеристики этих гранитоидов и данные по вмещающим породам свидетельствуют о разном возрасте архейских комплексов в разных частях ТСТ. Это поддерживает композитную модель этого супертеррейна [7], который был консолидирован в единый континентальный блок в конце неоархея 2.53-2.56 млрд лет назад. 3). На северо-западе Непско-Ботуобинского поднятия и в центре Ангаро-Ленской ступени зафиксировано положение восточной границы ТСТ. Метаморфизованная терригенно-карбонатная толща, вскрытая скв. Правобережные на восточном краю ТСТ, может представлять фрагмент палеопротерозойской пассивной окраины. 4). По возрасту кратонизации ТСТ моложе террейнов, относимых к архейским суперкратонам Ваалбара и Сьюпериа, но

сопоставим с террейнами суперкратона Славия [8] и, возможно, представляет тектонический фрагмент этого самого молодого архейского континента.

Исследования выполнены по гранту РФФИ № 20-05-00686.

- [1] Ковач В.П., Котов А.Б., Смелов А.П. и др. Этапы формирования континентальной коры погребенного фундамента восточной части Сибирской платформы: Sm-Nd изотопные данные // Петрология. – 2000. – 8. – С. 394–408.
- [2] Глебовицкий В.А., Хильтова В.Я., Козаков И.К. Тектоническое строение Сибирского кратона: интерпретация геолого-геофизических, геохронологических и изотопно-геохимических данных // Геотектоника. – 2008. – 1. – С.12-26.
- [3] Бочкарев В.С., Брехунцов А.М., Лукомская К.Г. и др. Первые данные об абсолютном возрасте фундамента Сибирской платформы, полученные на основе U-Pb датирования цирконов на SHRIMP II (поздний архей) // Горные ведомости. – 2011. – 12. – С. 6–22.
- [4] Priyatkina N., Ernst R E., Khudoley A.K. A preliminary reassessment of the Siberian cratonic basement with new U-Pb-Hf detrital zircon data // Prec.Res. – 2020. – 340. – 105645.
- [5] Самсонов А.В., Постников А.В., Спиридонов В.А. и др. Неоархейские гранитоиды на западе Тунгусского супертеррейна, фундамент Сибирской платформы: геохронология, петрология, тектоническое значение // Петрология. – 2021. – 29. – С. 451-477.
- [6] Самсонов А.В., Ерофеева К.Г., Ларионова Ю.О. и др. Восточная окраина неоархейского Тунгусского террейна: Данные по скважинам в центральной части Сибирской платформы // Петрология. – 2022. – 5. (В печати).
- [7] Donskaya T.V. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from paleoproterozoic Granitoids // Precambrian Res. – 2020. – 348. – 105869.
- [8] Bleeker W. The late Archean record: A puzzle in ca. 35 pieces // Lithos. – 2003. – 71. – P. 99–134.

### **U-Pb, Sm-Nd и Rb-Sr изотопные исследования ксенолитов из раннетриасовой эксплозивной диатремы для расшифровки фундамента Норильского района, Сибирская платформа**

*А.В. Самсонов<sup>1</sup>, С.Ф. Служеникин<sup>1</sup>, Ю.О. Ларионова<sup>1</sup>, А.Н. Ларионов<sup>2</sup>, К.Г. Ерофеева<sup>1</sup>,  
А.Г. Полозов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
[samsonovigem@mail.ru](mailto:samsonovigem@mail.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им.  
А.П. Карпинского

Изучение состава и возраста погребенного фундамента древних платформ основано главным образом на материале керна глубоких скважин, реже – на ксенолитах, которые вынесены кимберлитовыми и базальтовыми магмами. Такие природные поставщики редки, но дают неоценимую информацию о составе фундамента на участках, где платформенный чехол имеет большую мощность.

Одним из примеров этого является северо-западная часть Сибирской платформы, где фундамент перекрыт мощным вулканогенно-осадочным чехлом, и данные о его строении, составе и возрасте базируются на сейсмических данных и результатах изучения детритового циркона в рифей-вендских осадочных породах Туруханского и Игарского поднятий [1, 2]. Единственным «породным» источником информации о составе и возрасте фундамента служат коровые ксенолиты из раннетриасовой эксплозивной Масловской диатремы, Норильский район [3]. Изучение разнообразных по составу ксенолитов, включая граниты, трондьемиты, кристаллические сланцы, гнейсы и амфиболиты, показало вариации Sm-Nd модельных возрастов  $T_{NdDM}$  от 2.40 до 1.65 млрд лет, а для одного ксенолита гранита получен широкий спектр U-Pb возрастов от 0.91 до 3.0 млрд лет [3]. Мы провели Sr-Nd изотопное изучение и U-Pb датирование по циркону новой коллекции из семи ксенолитов гранитоидов, включая лейкограниты и трондьемиты, и одного ксенолита гравелита.

Биотит-мусковитовые лейкограниты ( $\text{SiO}_2$  75-78 вес. %) имеют порфиоровые и полнокристаллические структуры, и по геохимическим характеристикам отвечают S-гранитам. В двух изученных образцах лейкогранитов, большинство кристаллов циркона состоят из ядер и оболочек. По ядрам получен широкий спектр  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрастов от 1124 до 2681 млн лет, и они, вероятно, представляют ксеногенную компоненту, вынесенную гранитными расплавами из корового источника магм. Оболочки в составе полифазных кристаллов и отдельные монофазные кристаллы дают близкие субконкордантные возрасты со среднезвешенными значениями  $869 \pm 14$  и  $869 \pm 6$  млн лет, которые фиксируют возраст кристаллизации гранитов. Валовые пробы лейкогранитов имеют широкие вариации и «коровые» Nd-Sr изотопные характеристики ( $\epsilon_{\text{NdT}}$  от  $-8.8$  до  $-11$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$  от 0.7070 до 0.7342), дополняя U-Pb данные о древнем коровом источнике магм. Rb/Sr изотопное исследование биотита и мусковита из одного образца лейкогранита дает двухточечную изохрону с возрастом 868 млн лет.

Мусковит-биотитовые трондьемиты по особенностям состава отвечают I-гранитам, а их геохимические особенности, такие как низкие концентрации РЗЭ с умеренным фракционированием  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  от 1.4 до 2.0, предполагают образование расплавов с HfI-содержащим реститом, т.е. при высоких концентрациях воды. Среди циркона, изученного в двух образцах, преобладают зональные кристаллы магматической генерации, лишь некоторые из них содержат ядра.  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрасты ядер варьируют в интервале от 926 до 1948 млн лет. Магматический циркон дает близкие субконкордантные величины возрастов со среднезвешенными значениями  $870 \pm 7$  и  $867 \pm 8$  млн лет. В отличие от лейкогранитов, трондьемиты имеют более компактные и ювенильные Nd-Sr изотопные характеристики ( $\epsilon_{\text{NdT}}$  от  $-0.25$  до  $+0.16$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$  от 0.7051 до 0.7055). Rb/Sr изотопное исследование мусковита из трондьемита дает двухточечную изохрону с возрастом 826 млн лет.

Гравелит сложен обломками кварца (80 %) и полевых шпатов (20%), кварц-полевошпатовый цемент содержит <5% карбоната. U-Pb датирование детритового циркона (всего 103 определения с дискордантностью <10%) дает три обособленных пика  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрастов: 1.97 млрд лет (>50 % всей популяции), 1.80 млрд лет (~ 15 %) и 0.84 млрд лет (~ 20 %), а также единичные возрасты в интервале 2.0-2.4 млрд лет.

Обсуждение и выводы.

1. Граниты и трондьемиты, вынесенные трубкой Масловская, имеют неразличимо близкие, в пределах ошибок, возрасты около 870 млн лет, и принадлежат к единому неопротерозойскому структурно-тектоническому комплексу, который слагает кристаллический фундамент Сибирской платформы под Норильским районом.

2. Эти граниты и трондьемиты различаются по геохимическим и изотопным характеристикам, что предполагает различия состава и возраста источников расплавов. Гранитные расплавы, вероятно, образовались с участием мезопротерозойских осадков в источнике. Образование трондьемитовых расплавов могло быть связано с плавлением деплетированного метабазитового субстрата или с дифференциацией ювенильных тоналитовых магм, контаминированных коровым материалом. Близкая по возрасту генерация кислых расплавов из предполагаемых источников могла быть реализована при субдукции базитовой коры под перекрытую мезопротерозойскими осадочными породами окраину Сибирского кратона, т.е. в обстановке активной окраины.

3. Ксенолиты гранитоидов с возрастом 870 млн лет, вынесенные раннетриасовой эксплозивной Масловской диатремой (Норильский район), могут представлять часть активной окраины, которая формировалась на севере СК в начале неопротерозоя [4, 5].

Исследования проводились за счет средств гранта РФФИ № 20-05-00686 и гранта РНФ № 21-17-00119.

- [1] Priyatkina N., Khudoley A.K., Collins W.J. et al. Detrital zircon record of meso- and neoproterozoic sedimentary basins in northern part of the Siberian Craton: Characterizing buried crust of the basement // Precam. Res. – 2016. – 285. – P. 21–38.
- [2] Кочнев Б.Б., Худoley А.К., Дюфрейн С.Э. и др. Неопротерозойский вулканогенно-осадочный бассейн на северо-западной окраине Сибирского кратона (по результатам



- датирования обломочных цирконов) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). – 2020. – 18. – С. 181–183.
- [3] Czamanske G.K., Wooden J.L., Walker R.J. et al. Geochemical, isotopic, and SHRIMP age data for precambrian basement rocks, permian volcanic rocks, and sedimentary host rocks to the ore-bearing intrusions, Noril'sk-Talnakh District, Siberian Russia // *Int. Geol. Rev.* – 2000. – 42. – P. 895–927.
- [4] Priyatkina N., Collins W.J., Khudoley A.K. et al. The Proterozoic evolution of northern Siberian Craton margin: a comparison of U–Pb–Hf signatures from sedimentary units of the Taimyr orogenic belt and the Siberian platform // *Int. Geol. Rev.* – 2017. – 1. – P. 1–27.
- [5] Kuzmichev A.B., Danukalova M.K., Proskurnin V.F. et al. The pre-Vendian (640–610 Ma) granite magmatism in the Central Taimyr fold belt: the final stage of the Neoproterozoic evolution of the Siberian paleocontinent active margin // *Geodyn. Tecton.* – 2019. – 10. – P. 841–861.

## Селективное обогащение сульфидов неодимом как индикатор их гидротермального или метаморфического генезиса

*П.А. Серов*

*Апатиты, ГИ КНЦ РАН, [serov@geoksc.apatity.ru](mailto:serov@geoksc.apatity.ru)*

Одним из перспективных направлений геохронологии является датирование рудного процесса Sm-Nd методом с использованием сульфидных минералов наряду с породообразующими и аксессуарами. Успешное использование этого подхода на ключевых рудных объектах Балтийского щита позволило установить главные рубежи рудообразования и геохронологически подтвердить выводы о сингенетической или эпигенетической природе рудного процесса [1, 2, 5, 6]. Однако, в ходе исследований было установлено, что помимо непосредственно геохронологических определений, получаемые коэффициенты минерал/порода для концентраций неодима и самария в сульфидах могут нести важную информацию о природе рудогенного флюида при вторичных процессах. В ходе исследований масс-спектрометрически проанализированы концентрации неодима и самария в сульфидах из пород протерозойских Cu-Ni-PGE месторождений Фенноскандинавского щита: Мончегорского рудного района (Мончетундровский массив и Мончеплутон), Федорово-Панского расслоенного комплекса, Печенгского рудного поля (Пильгуярвинское месторождение), Колвицкого анортозитового массива, рудопроявления Озерное (Карелия), интрузивных комплексов Ахмаваара и Пеникат (Финляндия). Определяя соотношение концентраций Nd и Sm в сульфидах и породе (коэффициенты  $D_{Nd}$  и  $D_{Sm}$ ), были установлены изотопно-геохимические маркеры для каждого конкретного месторождения, а вся совокупность данных позволила определить пределы этих вариаций для разных сульфидных минералов. Были установлены коэффициенты  $D_{Nd}$  и  $D_{Sm}$  для пирита, пирротина, халькопирита, пентландита и смесовых фракций сульфидов. Отношение  $D_{Nd}/D_{Sm}$  по всей совокупности ( $N=45$  монофракций) составило 1.4, что совпадает с интервалом значений, полученных ранее в эксперименте с сульфидами [7]. В этой работе была показана зависимость коэффициентов распределения неодима и самария от содержания FeO и температуры: было экспериментально определено, что при снижении температуры при давлении 1.5 GPa отношение  $D_{Nd}/D_{Sm}$  возрастает и стремится в диапазон значений 1.3-1.5 [7]. Для сингенетических руд отношения  $D_{Nd}/D_{Sm}$  в природных сульфидах в среднем составляют 1.4, в то время как для переотложенных или измененных руд отношение  $D_{Nd}/D_{Sm}$  возрастает до 7.7. Аналогичный эффект возрастания отношения  $D_{Nd}/D_{Sm}$ , вызванного селективным (относительно самария) накоплением неодима в сульфидах наблюдается в среднедевонском золоторудном месторождении Токузбай (Южный Алтай, Китай). Ранее для этого месторождения были проведены комплексные Nd-Sr-Pb изотопные исследования сульфидов и вмещающих их пород [3], которые позволяют рассчитать коэффициенты  $D_{Nd}/D_{Sm}$  и продемонстрировать универсальность наблюдаемого эффекта на геологическом объекте, имеющем кардинальные отличия в возрасте, генезисе и особенностях рудного процесса. Результаты расчета показывают, что для первичной вкрапленной минерализации во вмещающих метаосадках и диоритовых дайках отношения  $D_{Nd}/D_{Sm}$  не

выходят за пределы среднего значения 1.3-1.5. В то же время, для поздних пиритов и халькопиритов из диоритовых даек, связанных с главной рудной стадией, отношения  $D_{Nd}/D_{Sm}$  возрастают до 2.3-8.5. Это свидетельствует о соответствии источника рудного флюида веществу диоритовых даек, что и является одним из главных выводов работы [3]. Наблюдаемый эффект селективного накопления неодима, вероятно, свидетельствует о вторичном гидротермальном или метаморфическом воздействии, которое привело к возрастанию подвижности неодима и его миграции. Подобный эффект предполагается не только для сульфидных минералов, но, например и для цирконов [4]. Вследствие этого процесса происходит относительное накопление неодима по сравнению с самарием и закономерное возрастание отношения  $D_{Nd}/D_{Sm}$ . Изотопно это приводит к существенному понижению Sm/Nd отношения для таких вторичных сульфидов, а положение их фигуративных точек на изохроне стремится в область низких значений  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ . В целом, большая подвижность неодима по сравнению с самарием может объясняться тем, что радиогенный неодим не занимает эквивалентной самарию структурной позиции в минерале.

Таким образом, определено, что коэффициенты сульфид/порода для Nd и Sm (и отношение  $D_{Nd}/D_{Sm}$ ) в сульфидах перспективны для реконструкции последовательности сульфидного минералообразования, а также для изотопно-геохимического обоснования вероятных источников рудоформирующих флюидов для месторождений различных генетических типов. Показано, что величина  $D_{Nd}/D_{Sm}$  возрастает для минералов поздних процессов, которые соответствуют переотложению руд или метаморфическому и гидротермальному воздействию.

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0226-2019-0053.

- [1] Серов П.А., Екимова Н.А., Баянова Т.Б., Митрофанов Ф.П. Сульфидные минералы – новые геохронометры при Sm-Nd датировании рудогенеза расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузий Балтийского щита // Литосфера. – 2014. – № 4. – С. 11-21.
- [2] Чашин В. В., Баянова Т. Б., Митрофанов Ф. П., Серов П. А. Малосульфидные платинометалльные руды палеопротерозойского Мончегорского плутона и его южного обрамления (Кольский полуостров, Россия): геологическая характеристика и изотопно-геохронологические свидетельства полихронности рудно-магматических систем // Геология рудных месторождений. – 2016. – Т. 58. № 1. – С. 41-63.
- [3] Aibai A., Deng X., Pirajno F., Han S., Liu W., Li X., Chen X., Wu Y., Liu J., Chen Y. Origin of ore-forming fluids of Tokuzbay gold deposit in the South Altai, northwest China: Constraints from Sr–Nd–Pb isotopes // Ore Geol. Rev. – 2021. – 134. – 104165.
- [4] Bolhar R., Tappe S., Wilson A.H., Ireland T., Avila J., Anhaeusser C. A petrochronology window into near-surface fluid/rock interaction within Archaean ultramafic-mafic crust: Insights from the 3.25 Ga Stolzberg Complex, Barberton Greenstone Belt // Chem. Geol. – 2021. – 569. – 120130.
- [5] Serov P.A. Paleoproterozoic Pt-Pd Fedorovo-Pansky and Cu-Ni-Cr Monchegorsk ore complexes: age, metamorphism, and crustal contamination according to Sm-Nd data // Minerals. – 2021. – 11. – 1410.
- [6] Serov P.A., Bayanova T.B. The Sulfide/Silicate Coefficients of Nd and Sm: Geochemical “fingerprints” for the syn- and epigenetic Cu-Ni-(PGE) ores in the NE Fennoscandian Shield // Minerals. – 2021. – 11. – 1069.
- [7] Wohlers A., Wood B.J. Uranium, thorium and REE partitioning into sulfide liquids: Implications for reduced S-rich bodies // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2017. – 205. – P. 226–244.

## **Изотопно-геохронологические исследования редкометалльных пегматитов: возможности и ограничения современных методов**

*П.А. Серов, Л.Н. Морозова*

*Апатиты, ГИ КНЦ РАН, [serov@geoksc.apatity.ru](mailto:serov@geoksc.apatity.ru)*

Процессы рудообразования, ведущие к максимальному фракционированию элементов и обогащению пегматитов редкими элементами (Li, Be, Cs, Nb, Ta, Rb и Sn), являются

достаточной причиной для пристального внимания исследователей. Однако, основные усилия сосредотачиваются как правило на минералогических и геохимических исследованиях пегматитов, в то время как исследований их изотопных систем явно недостаточно [7]. Вместе с тем, установление возраста пегматитов и вероятных путей эволюции их вещества является одной из важнейших задач, так как зачастую пегматиты не обнаруживают пространственной и временной связи с их материнскими гранитами, а для некоторых пегматитов характерен также и большой временной разрыв (до сотен млн лет) с предполагаемым гранитным источником [1].

Несмотря на то, что развитие аналитических методов в последние годы привело к возможности датировать геологические события с высокой точностью – до сотен и даже десятков тысяч лет, тем не менее, относительно долгоживущие магматические объекты, особенно связанные с активными флюидами, часто являются достаточно проблемными для абсолютной геохронометрии. В этом ключе пегматиты являются хорошим примером такого “трудного” объекта. Геохронологическому изучению и установлению возраста пегматитов и связанных с ними месторождений редких металлов часто препятствуют экстремальные или длительные гидротермальные воздействия, которые могут нарушать широко используемые изотопные системы, такие как Sm-Nd, Rb-Sr, K-Ar и Ar-Ar. Циркон, классический минерал для U-Pb датирования, часто является метамиктным в этих системах. Поэтому в качестве одного из перспективных геохронометров для датирования пегматитового процесса в настоящее время успешно используется группа минералов колумбита, которые более устойчивы к гидротермальным изменениям, чем цирконы из тех же пегматитов [4]. Локальные методы датирования *in situ*, такие как LA-ICP-MS и SIMS, позволяют избежать влияния богатых ураном включений (например, уранинита), которые обычно присутствуют в минералах группы колумбита. Изотопная Rb-Sr система также потенциально подходит для датирования пегматитов, поскольку они содержат минералы с высоким содержанием Rb (слюды), а первоначальные отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (например, по апатиту) могут давать важную информацию об источнике. Недавно разработанный метод локального Rb-Sr-датирования *in situ* с помощью LA-ICP-MS позволяет преодолеть основные проблемы, обычно связанные с этим методом, позволяя получать данные с высоким разрешением, что благоприятствует получению достаточно точных возрастных определений [5].

Особую ценность представляют результаты использования методик локального анализа, использующих изотопные системы бора ( $\delta^{11}\text{B}$ ), лития ( $\delta^7\text{Li}$ ), бария ( $\delta^{138/134}\text{Ba}$ ) для породообразующих и акцессорных минералов пегматитов [2, 3, 6].

Перспективным инструментом для изучения процессов рудообразования и источников метаморфических флюидов могут быть исследования изотопного состава бора в турмалинах. На основе экспериментальных данных описано температурозависимое фракционирование изотопов бора между гранитным расплавом и турмалином [3]. Было установлено, что гранитный расплав обогащен  $^{11}\text{B}$  по сравнению с турмалином. Это означает, что для позднемагматического турмалина  $\delta^{11}\text{B}$  должен быть выше, чем у турмалина, кристаллизовавшегося на ранней стадии. В то же время изотопный состав бора турмалина, кристаллизующегося из гранитного расплава при высоких температурах (~700–800°C), может отражать состав силикатного расплава. Это позволяет приблизиться к пониманию материнских источников пегматитового вещества.

Моделирование изотопного фракционирования лития при внедрении пегматитов показывает, что более легкие изотопные составы лития сподуменсодержащих пегматитов связаны с более высокой скоростью охлаждения расплава, тогда как более тяжелые изотопные составы безрудных пегматитов можно отнести к более продолжительному фракционированию, обусловленному диффузией [8].

Многообещающе выглядит использование изотопов бария для определения роли магматических флюидов и источника в происхождении материнских гранитов. Экспериментальные исследования показывают, что низкие значения  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  в магматических флюидах, вероятно, являются результатом отделения из глубинного магматического резервуара [6]. Такие флюиды не только изменяли изотопный состав бария материнских гранитов (более низкие значения по сравнению с осадками и гранитами S-типа), но также переносили

подвижные металлические элементы, которые способствовали образованию месторождений редких металлов.

Таким образом, наиболее перспективными и предпочтительными методами при изучении редкометалльных пегматитов являются локальные методики датирования *in situ*, а использование изотопных систем лития, бора, бария позволяют получать важную информацию об условиях формирования и источниках рудного вещества.

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0226-2019-0053 и при финансовой поддержке гранта РФФИ 22-17-20002.

- [1] Загорский В.Е., Владимиров А.Г., Макагон В.М., Кузнецова Л.Г., Смирнов С.З., Дьячков Б.А., Анникова И.Ю., Шокальский С.П., Уваров А.Н. Крупные поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизийных сдвигово-раздвиговых деформаций континентальной литосферы // Геология и геофизика. – 2014. – 55. – С. 303–322.
- [2] Chen B., Huang C., Zhao H. Lithium and Nd isotopic constraints on the origin of Li-poor pegmatite with implications for Li mineralization // Chem. Geol. – 2020. – 551. – 119769.
- [3] Cheng L., Zhang C., Zhou Y., Horn I., Weyer S., Holtz F. Experiments reveal enrichment of <sup>11</sup>B in granitic melt resulting from tourmaline crystallisation // Geochemical Perspect. Lett. – 2022. – 20. – P. 37–42.
- [4] Galliski M.Á., von Quadt A., Márquez-Zavalía M.F. LA-ICP-MS U-Pb columbite ages and trace-element signature from rare-element granitic pegmatites of the Pampean Pegmatite Province, Argentina // Lithos. – 2021. – 386–387. – 106001.
- [5] Högmalin K.J., Zack T., Karlsson A.K.O., Sjöqvist A.S.L., Garbe-Schönberg D. In situ Rb-Sr and K-Ca dating by LA-ICP-MS/MS: An evaluation of N<sub>2</sub>O and SF<sub>6</sub> as reaction gases // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2017. – 32. – P. 305–313.
- [6] Huang F., Bai R., Deng G., Liu X., Li X. Barium isotope evidence for the role of magmatic fluids in the origin of Himalayan leucogranites // Science Bulletin. – 2021. – 66. – P. 2329–2336.
- [7] London D., Kontak D.J. Granitic Pegmatites: Scientific Wonders and Economic Bonanzas // Elements. – 2012. – 8. – P. 257–261.
- [8] Zhou J.-S., Wang Q., Xu Y.-G., Cempírek J., Wang H., Ma J.-L., Wei G.-J., Huang T.-Y., Zhu G.-H., Zhang L. Geochronology, petrology, and lithium isotope geochemistry of the Bailongshan granite-pegmatite system, Northern Tibet: Implications for the ore-forming potential of pegmatites // Chem. Geol. – 2021. – 584. – 120484.

## **Дискуссия о возрасте эклогитов Беломорского подвижного пояса: результаты комплексного датирования и новые аргументы**

*С.Г. Скублов, А.В. Березин, Л.И. Салимгараева*

*Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [skublov@yandex.ru](mailto:skublov@yandex.ru)*

Эклогиты Беломорского подвижного пояса (БПП) являются ключевым объектом для геодинамических реконструкций не только БПП, но и Фенноскандинавского щита в целом. Одним из главных вопросов для эклогитов БПП является установление времени их формирования. Интерпретация возраста эклогитов БПП как архейского позволила ряду исследователей распространить на этот сегмент архейской коры геодинамические механизмы тектоники плит современного типа. В настоящее время геохронологические данные, полученные по эклогитам БПП, в целом, интерпретируются по-разному. Несмотря на множество публикаций по проблеме возраста эклогитов Беломорского пояса (количество статей превышает 70) до сих пор отсутствует обобщающая обзорная работа, где был бы проведен объективный критический анализ всех точек зрения на проблему времени эклогитового метаморфизма и аргументов, лежащих в их основе. Авторская трактовка возраста эклогитового метаморфизма в пределах БПП основана на комплексе независимых изотопно-геохимических методов датирования – локальном U-Pb методе по гетерогенным цирконам с магматическими ядрами и эклогитовыми каймами, Lu-Hf и Sm-Nd методам по

породообразующим минералам эклогитового парагенезиса – гранату и омфациту. Все три метода независимо друг от друга определяют возраст эклогитового метаморфизма как свекофеннский, около 1900 млн лет.

В результате обобщения [1] всех доступных данных (около 900 анализов) по составу циркона из эклогитовых комплексов мира выявлены общие закономерности состава эклогитового циркона, заключающиеся в аномально пониженном содержании Th (в среднем не больше 3 ppm) и величины Th/U отношения (в среднем 0.03), значительно пониженном содержании всего спектра REE (до 22 ppm) и, особенно, LREE (менее 2 ppm), пониженном содержании Y (в среднем 34 ppm), U (100 ppm), P (41 ppm) и повышенным – Hf (в среднем 11400 ppm). Спектр распределения REE в цирконе из эклогитов отличается четко выраженным пологим распределением HREE; отсутствием или слабо выраженной отрицательной Eu-аномалией; сильно редуцированной положительной Ce-аномалией (Ce/Ce\* в среднем 11); «корытообразным» провалом в легкой части спектра REE, достигающим до появления отрицательной Nd-аномалии.

Вышеперечисленные закономерности позволяют уверенно отличать циркон, образованный в процессе эклогитового метаморфизма, от циркона магматического генезиса и циркона других метаморфических фаций. Причина появления геохимических особенностей состава циркона из эклогитов традиционно увязывается с совместной кристаллизацией с гранатом – минералом-концентратором HREE и Y. Однако только присутствие граната не объясняет резкой обедненности циркона LREE и другими редкими элементами. К тому же, циркон, ассоциирующий с гранатом в породах амфиболитовой фации, обеднен Y и HREE в меньшей степени, чем циркон из эклогитов. Отсутствие отрицательной Eu-аномалии обычно объясняется безплагиоклазовым парагенезисом эклогитов, поскольку плагиоклаз забирает в себя значительную часть Eu в породе по «камуфлированной» схеме изоморфизма совместно со Sr. Но сопоставление циркона из эклогитов-метабазитов (в отсутствии плагиоклаза) и из гнейсов, испытавших метаморфизм эклогитовой фации, не устанавливает значимых различий по величине Eu-аномалии (Eu/Eu\*). Для циркона из эклогитов обеих групп наблюдается отсутствие или слабо выраженная отрицательная Eu-аномалия. В качестве причины обедненности циркона из эклогитов Th и LREE и аномальности их спектров REE в части Pr и Nd, иногда выдвигается одновременность кристаллизации с клиноцоизитом в ходе метаморфизма эклогитовой фации. Рядом авторов обстановка кристаллизации «нового» метаморфического циркона, или перекристаллизации ранее образованного магматического циркона в условиях эклогитовой фации метаморфизма рассматривается в качестве совершенно закрытой системы с лимитированным содержанием редких элементов. Представляется, что повсеместно проявленные особенности состава циркона из эклогитов (в которых клиноцоизит может и отсутствовать, а плагиоклаз при давлении 11-12 кбар – присутствовать) сложно объяснить только спецификой минерального парагенезиса эклогитов. Особое внимание следует уделить учету флюидного режима эклогитового метаморфизма, его возможного влияния на транспортировку (вынос) высокозарядных элементов, которыми обеднен циркон эклогитов, и которые немобильны при «обычном» метаморфизме. Установленные в работе [1] закономерности геохимии циркона из эклогитов универсальны, они не зависят от типа породы (метабазиты, метаультрабазиты, гнейсы) и величины давления (эклогиты высокого и сверхвысокого давления). Комплексное использование этих признаков позволяет уверенно отличать эклогитовый циркон от циркона магматического генезиса и метаморфического циркона, не связанного с высокобарическим метаморфизмом.

Для эклогитов БПП (на примере районов Салмы, Гридино и Керетского архипелага) установлено, что центральные части (ядра) циркона из эклогитов-метагаббро с варьирующим возрастом от 2.2 до 2.8-2.9 млрд. лет являются магматическими, а их внешние метаморфические каймы с возрастом около 1.9 млрд. лет по редкоэлементному составу соответствуют типовым эклогитовым цирконам. Как было показано для всех изученных проявлений эклогитов в БПП, эклогитовый метаморфизм с возрастом около 1.9 млрд лет ограничен самым молодым возрастом магматического протолита эклогитов около 2.2 млрд лет и возрастом наложенных процессов 1.84-1.87 млрд лет.

Современными исследованиями установлено, что для циркона и граната значение  $\delta^{18}\text{O}$  является одним из самых надежных критериев, отражающих условия их генезиса, к тому же, наиболее точно соответствуя изотопному составу кислорода в породе в целом. Для проверки равновесия зерен и оторочек циркона с возрастом около 1.9 млрд лет и граната эклогитов было проведено локальное определение изотопного состава кислорода методом SIMS [2]. Результаты исследования в минералах из будин эклогитов Куру-Ваары (с магматическим протолитом архейского возраста) показали, что изотопный состав кислорода в гранате ( $\delta^{18}\text{O} = 4.0\text{-}5.0\%$ ) находится в равновесии с составом палеопротерозойского (около 1.9 млрд лет) циркона ( $\delta^{18}\text{O} = 4.5\text{-}5.4\%$ ); значения же  $\delta^{18}\text{O}$  в магматических доменах циркона архейского возраста (примерно 2.88 млрд лет) значительно выше (5.1-5.9%) и неравновесны с таковыми в гранате.

- [1] Скублов С.Г., Березин А.В., Бережная Н.Г. Общие закономерности состава цирконов из эклогитов по редким элементам применительно к проблеме возраста эклогитов Беломорского подвижного пояса // Петрология. – 2012. – 20. – С. 470-494.
- [2] Melnik A.E., Skublov S.G., Rubatto D., Müller D., Li X.H., Li Q.L., Berezin A.V., Herwartz D., Machevariani M.M. Garnet and zircon geochronology of the Paleoproterozoic Kuru-Vaara eclogites, northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield // Prec. Res. – 2021. – 353. – 106014.

### **Метаморфическая модификация циркона и ее значение для реконструкции истории высокоградных комплексов: *in situ* геохронологические и изотопно-геохимические данные исследований эклогит-гнейсового комплекса Северо-Муйского блока (Забайкалье)**

*С.Ю. Скузоватов<sup>1</sup>, К.-Л. Ван<sup>2</sup>, Х.-Я. Лу<sup>2</sup>, С.-Х. Лу<sup>3</sup>, В.С. Шацкий<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Иркутск, Институт геохимии СО РАН, [skuzovатов@igc.irk.ru](mailto:skuzovатов@igc.irk.ru)

<sup>2</sup> Taipei, Taiwan, Institute of Earth Sciences, Academia Sinica

<sup>3</sup> Beijing, China, Institute of Geology and Geophysics

<sup>4</sup> Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН

Использование корректных геохронометров принципиально важно для хронологии высокобарического метаморфизма. Циркон традиционно используется в качестве такого хронометра, однако его использование зачастую ограничено высокотемпературными парагенезисами, в которых циркон наиболее эффективно кристаллизуется при непосредственном участии флюидов и расплавов, и исходно богатыми цирконом фельзическими породами. В то же время соотношение метаморфизма и роста/модификации в низко- и среднетемпературных метаосадочных породах и метагранитоидах может быть неочевидным в силу (1) ограниченного развития или сохранения высокобарических минеральных парагенезисов, и (2) сложной истории перекристаллизации первичного циркона с незавершенным характером изотопного переуравновешивания.

В восточной части Байкало-Муйского складчатого пояса выделен Северо-Муйский эклогит-гнейсовый блок высокоградных пород дискуссионного происхождения [1-3]. Предыдущими исследованиями показано, что эклогиты ассоциируют с метагранитоидами раннепротерозойского возраста (764±5 и 763±14 млн. лет) и метаосадками, возраст источников сноса для которых имеет диапазон 941–793 млн. лет [2]. Новые детальные LA-ICP-MS исследования показали, что циркон в гранатсодержащих метагранитоидах в основном сохраняет оригинальное состояние U-Pb системы, а возраст их магматического протолита может быть древнее ранее установленного (возраст кристаллизации по конкордии 799±4 млн. лет). Циркон при этом имеет высокую степень сохранности первично-магматической, осцилляторной структуры исходных зерен, «магматические» геохимические характеристики (высокое отношение тяжелых/легких РЗЭ, отрицательная Eu аномалия), узкий диапазон первичных  $\epsilon_{\text{Hf}}$  и обилие включений апатита. В отличие от циркона из метагранитоидов, детритовый циркон из метаосадочных пород характеризуется контрастной степенью модификации в результате метаморфизма пород. Циркон из безгранатового сланца

характеризуется прямолинейной или криволинейной осцилляторной структурой, указывающей на начальные стадии перекристаллизации, тогда как в гранат-двуслюдном гнейсе первично-магматический циркон сохранен в виде центральных доменов, занимающих лишь 15-30% объема зерен. В обоих случаях магматические домены сохраняют первичное состояние U-Pb системы, соответствующей диапазонам в 846–758 и 856–776 млн. лет, или претерпели ограниченную потерю Pb, что, в частности, выражено в трендах изменения  $\epsilon_{\text{Hf}}$ . Большая же часть объема циркона из гранат-двуслюдного гнейса представлена неоднородной зоной, насыщенной включениями метаморфических минералов из матрикса породы (слюд, эпидота), захваченным на фронте перекристаллизации. Средневзвешенный возраст, полученный по таким зонам рекристаллизации, имеющим геохимические характеристики высокобарического циркона (плоское распределение средних и тяжелых РЗЭ, отсутствие Eu аномалии), оценен в  $639 \pm 6$  млн. лет. Циркон из гранатсодержащих пород в большинстве случаев имеет тонкие каймы перекристаллизации с дискордантными возрастными оценками (рис. 1) и систематически более низкими  $\delta^{18}\text{O}$ , однако контрастными геохимическими характеристиками («магматическими» в метагранитоиде, «эклогитовыми» – в гранатовом гнейсе).

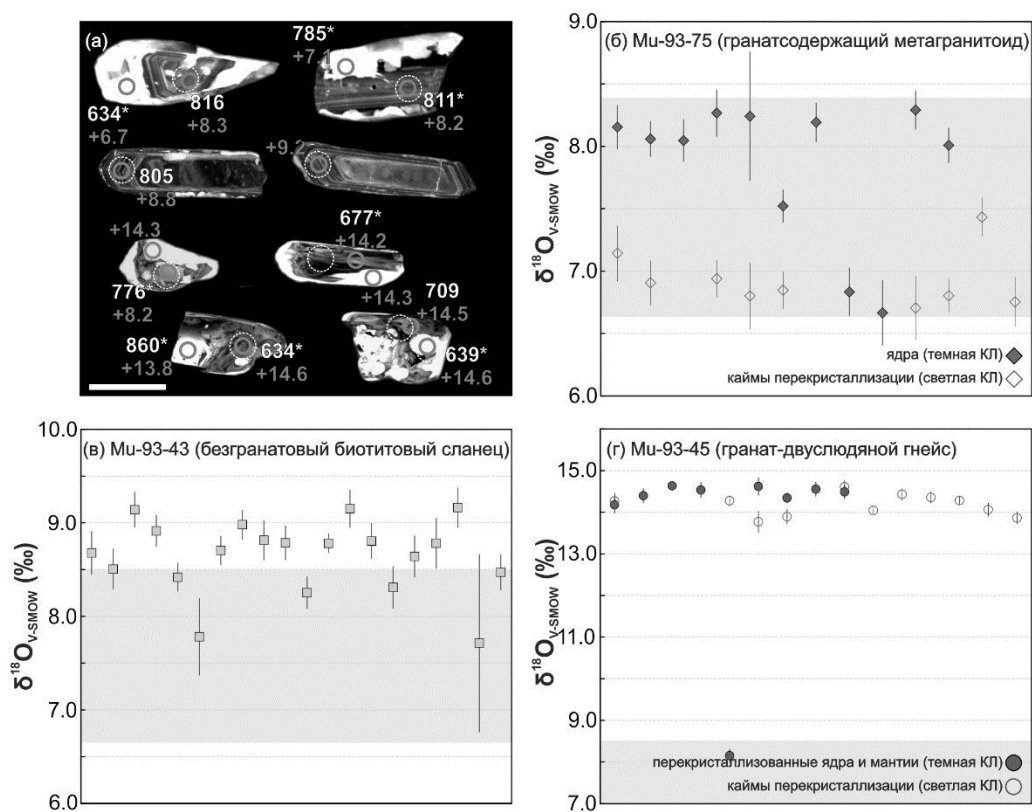


Рис. 1. Представительные КЛ-топограммы внутреннего строения циркона из фельзических пород Северо-Муйского блока с полученными значениями  $^{206}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}$  возраста и  $\delta^{18}\text{O}$  (а) и изотопный состав кислорода циркона из трех образцов.

Таким образом, циркон в породах, совмещенных с эклогитами, демонстрирует различный отклик на метаморфизм, вероятно связанный с его полистадийностью, парагенетической принадлежностью (совместно с гранатом или без него), разницей в условиях или механизмах реализации высоких давлений (к примеру, локализацией их в отдельных зонах) или, что наиболее вероятно, преимущественно внутренним и ограниченным источником водных флюидов, способствующих модификации циркона.

Исследования проводятся при поддержке РФФ (грант № 21-77-10038).

- [1] Шацкий В.С., Ситникова Е.С., Томиленко А.А., Рагозин А.Л., Козьменко О.А., Ягоутц Э. Эклогит-гнейсовый комплекс Муйской глыбы (Восточная Сибирь): возраст, минералогия, геохимия, петрология // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. №6. – С. 657-682.

- [2] Shatsky V.S., Malkovets V.G., Belousova E.A., Skuzovatov S.Yu. Evolution history of the Neoproterozoic eclogite-bearing complex of the Muya dome (Central Asian Orogenic Belt): constraints from zircon U-Pb age, Hf and whole-rock Nd isotopes // *Precambrian Res.* – 2015. – Vol. 261. – P. 1–11.
- [3] Skuzovatov S.Yu., Shatsky V.S., Wang K.-L. Continental subduction during arc-microcontinent collision in the southern Siberian craton: constraints on protoliths and metamorphic evolution of the North Muya complex eclogites (Eastern Siberia) // *Lithos.* – 2019. – Vol. 342–343. – P. 76–96.

## Возрасты и геохимия цирконов из мигматизированного архейского флиша Беломорской провинции и геодинамические следствия

*А.И. Слабунов<sup>1</sup>, П.Я. Азимов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Петрозаводск, Институт геологии КарНЦ РАН, [slabunov@krc.karelia.ru](mailto:slabunov@krc.karelia.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [pavel.azimov@mail.ru](mailto:pavel.azimov@mail.ru)

Чупинский парагнейсовый пояс Беломорской провинции (БП) Фенноскандинавского щита – самая крупная структура этого типа в регионе [1, 2]. Она сложена неоднократно (в архее и в палеопротерозое) метаморфизованными в условиях амфиболитовой/гранулитовой фации повышенных давлений [1, 3] мезоархейскими [4] граувакками [5]. Породы Чупинского пояса представляют собой чередование мигматизированных кианит-гранат-биотитовых (Ку-Grt-Bt) и гранат-биотитовых (Grt-Bt) гнейсов. В местах с хорошей обнаженностью и низкой степенью мигматизации отмечается циклическое переслаивание Ку-Grt-Bt и Grt-Bt гнейсов. Это переслаивание имеет черты сходства с флишевой полосчатостью.

Для уточнения истории становления чупинских гнейсов и проверки гипотезы о их флишевой природе было предпринято изучение методом LA-ICP-MS цирконов, выделенных из чередующихся слоев Ку-Grt-Bt и Grt-Bt гнейсов мощностью 3-5 см. Кроме того, были изучены цирконы из лейкосомы, сформировавшейся при мигматизации этих пород.

В Grt-Bt гнейсах выделяются две морфологические группы цирконов: удлиненно-призматические (резко преобладают) и изометричные. Среди первых отмечаются редкие разности с тонкими каймами.  $^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}$  возрасты преобладающей группы удлиненно-призматических цирконов варьирует от 2887 до 2790 млн лет (Ma), их U-Pb возраст по верхнему пересечению оценивается в  $2822 \pm 66$  Ma.  $^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}$  возраст одного из изометричных зерен оценивается в  $2693 \pm 17$  Ma, а редких тонких кайм в примерно 2,5 млрд лет. Мезоархейские цирконы обеднены ЛРЗЭ, обогащены ТРЗЭ, характеризуются небольшой отрицательной Eu-аномалией, на дискриминационных диаграммах (Y-U, Y-Yb/Sm [6]) их фигуративные точки лежат в поле гранитоидов. Наиболее вероятным источником этих цирконов были гранитоиды и кислые вулканиты ранней субдукционной стадии формирования земной коры БП [3, 4]. Неоархейское зерно циркона обеднено ТРЗЭ, что, вероятно, связано с его формированием синхронно с гранатосодержащим парагенезом неоархейского коллизионного метаморфизма [1, 3].

Из Ку-Grt-Bt гнейсов также выделены цирконы и среди них установлены две морфологические группы: удлиненно-призматические и изометричные. Отличительной особенностью обеих групп, по сравнению с аналогичными зернами из Grt-Bt гнейсов, является широкое развитие кайм. Среди последних выделяются ранние,  $^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}$  возраст которых оценивается в  $2697 \pm 17$  Ma. Такой же возраст имеют некоторые изометричные зерна. Цирконы этой возрастной группы слабо обеднены ТРЗЭ. Возраст поздней генерации кайм оценивается в  $1931 \pm 14$  Ma (конкордантный U-Pb возраст). Эти зерна характеризуются слабой дифференциацией РЗЭ, при этом они немного обеднены ТРЗЭ и по геохимическим особенностям отличаются от неоархейских.  $^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}$  возрасты ядер в этих гнейсах варьирует от 3386 до 2796 Ma, но наиболее распространена группа,  $^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}$  возраст которой  $2854 \pm 22$  Ma. Цирконы ядер обогащены ТРЗЭ, часть зерен имеет большие положительные Се-аномалии, наиболее дискордантные зерна обогащены ЛРЗЭ. Вместе с тем, большая часть фигуративных точек этих цирконов на дискриминационных диаграммах (Y-U, Y-Yb/Sm [6]) лежат в поле гранитоидов.



Цирконы из лейкосомы гнейсов представлены однородной выборкой короткопризматических, до изометричных, зерен без кайм. Возраст этих цирконов оценивается в  $2707 \pm 8$  Ма (U-Pb, по верхнему пересечению), что соответствует времени мигматизации пород. Геохимические особенности этих зерен циркона заключаются в том, что они немного обеднены ТРЗЭ и в них выражена отрицательная Eu-аномалия.

Таким образом, во всех трех пробах установлена одновозрастная (в пределах ошибки) неоархейская ( $2693 \pm 17$ ,  $2697 \pm 17$ ,  $2707 \pm 8$  Ма, соответственно) группа циркона. Она немного обеднена ТРЗЭ, что, вероятно, связано с ее парагенетичностью гранатсодержащим метаморфическими ассоциациям, характерными для неоархейских коллизионных процессов [1, 3].

Кроме того, локально, только в слоях Ку-Grt-Bt гнейсов, наряду с неоархейскими, проявлены и палеопротерозойские ( $1931 \pm 14$  Ма) метаморфические каймы в цирконах. Геохимические особенности этих цирконов также указывают на синхронность их образования с гранатсодержащими парагенезами. Это не противоречит представлениям о проявлении в БП палеопротерозойских коллизионных процессов, связанных с лапландско-кольской орогенцией [1, 3].

Сопоставление возрастов и геохимии ядер цирконов в двух разновидностях парагнейсов указывает на то, что преобладающим их источником в обоих случаях были мезоархейские кислые породы. Однако в Ку-Grt-Bt гнейсах отмечены более древние (3.3-2.98 млрд лет) зерна, чем известные в БП породы. Этот феномен может быть связан с тем, что в протолит гнейсов входили наиболее тонкие фракции осаждающегося из мутьевых потоков при формировании флиша вещества. В эту фракцию могли попадать наиболее мелкие зерна циркона, принесенные в этот преддуговой бассейн из удаленных районов, например, Водлозерского террейна Карельского кратона [7].

Данные материалы являются вкладом в программу ИГ КарНЦ РАН АААА-А18-118020290085-4.

- [1] Ранний докембрий Балтийского щита. Отв. ред.: Глебовицкий В.А. – СПб.: Наука. 2006. – 711 с.
- [2] Куликов В.С., Светов С.А., Слабунов А.И. и др. Геологическая карта Юго-Восточной Фенноскандии м-ба 1: 750 000: новые подходы к составлению // Труды КарНЦ РАН. Серия Геология докембрия – 2017. –2. – С. 3-41.
- [3] Слабунов А.И., Азимов П.Я., Глебовицкий В.А. и др. Архейская и палеопротерозойская мигматизации пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия // ДАН. – 2016. – 467. – 1. – С. 71-74.
- [4] Бибилова Е. В., Богданова С. В., Глебовицкий В. А. и др. Этапы эволюции Беломорского подвижного пояса по данным U-Pb цирконовой геохронологии (ионный микрозонд NORDSIM) // Петрология. – 2004. – 3. – С. 227-244.
- [5] Мыскова Т.А., Глебовицкий В.А., Миллер Ю.В. и др. Супракрустальные толщи Беломорского подвижного пояса: первичный состав, возраст и происхождение // Стратиграфия и геологическая корреляция. – 2003. – 11. – 6. – С. 3-19.
- [6] Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type // Contrib. Mineral. Petrol. – 2002. – 143. – P.602-622.
- [7] Слабунов А.И., Хелтга П., Шаров Н.В., Нестерова Н.С. 4-D модель формирования земной коры Фенноскандинавского щита в архее как синтез современных геологических данных // Геология Карелии от архея до наших дней. М-лы докладов Всерос. конф., посвященной 50-летию Института геологии КарНЦ РАН. Петрозаводск, КарНЦ РАН. –2011. – С.13-21.

## U-Pb (LA-ICP-MS) возраст детритовых цирконов из верхнедокембрийских отложений полуострова Канин

*А.А. Соболева<sup>1</sup>, В.Л. Андреичев<sup>1</sup>, В.Б. Хубанов<sup>2</sup>, Д.В. Зархидзе<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Сыктывкар, Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, [aa\\_soboleva@mail.ru](mailto:aa_soboleva@mail.ru), [andreichev@geo.komisc.ru](mailto:andreichev@geo.komisc.ru)

<sup>2</sup> Улан-Удэ, Геологический институт СО РАН, [khubanov@mail.ru](mailto:khubanov@mail.ru)

<sup>3</sup> Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, [dzarkhidze@yandex.ru](mailto:dzarkhidze@yandex.ru)

Выходы верхнего докембрия на полуострове Канин слагают хр. Канин Камень, пересекающий полуостров с северо-запада на юго-восток. Верхнедокембрийские толщи представлены преимущественно тонкозернистыми терригенными и карбонатно-терригенными отложениями мощностью до 10 км. Они были расчленены на микулкинскую, тархановскую и табуевскую серии, различающиеся по литологическому составу и степени метаморфических преобразований, соответствующих уровням амфиболитовой фации, кварц-альбит-эпидот-биотитовой субфации зеленосланцевой фации (эпидот-амфиболитовой фации) и серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фаций, соответственно [1]. Было показано, что в общем плане границы фаций близки к стратиграфическим границам, хотя изограды по индекс-минералам на отдельных участках пересекают их [2]. Более поздними геолого-съемочными работами было также подтверждено, что границы метаморфических фаций не точно соответствуют границам серий. Вкрест простирания пород хр. Канин Камень, с ЮЗ на СВ происходит плавное понижение степени метаморфизма верхнедокембрийских пород от амфиболитовой до эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фации. Между фациями существуют постепенные переходы, позволяющие предполагать одновременное формирование этой метаморфической зональности в позднем протерозое [3, 5]. При этом есть и другая точка зрения, согласно которой микулкинская серия была метаморфизована в ~1.9 млрд лет [6].

По находкам микрофитолигов и микрофитофоссилий возраст табуевской серии определен как позднерифейский [3, 7]. Тархановская серия датируется средним рифеем условно. На основании более высокой степени метаморфизма микулкинскую серию относят к нижнему рифею. Существуют также представления об их одновозрастности [4], а также о раннепротерозойском возрасте микулкинской серии [6].

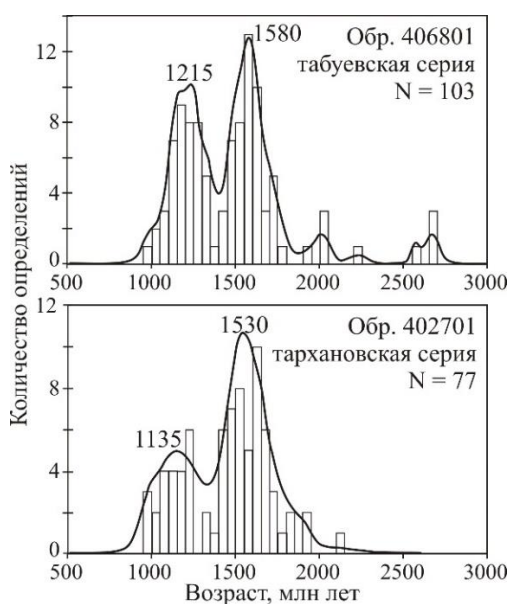


Рис. 1. Гистограммы и кривые плотности вероятности распределения  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрастов зерен детритового циркона из апосаммитовых кварцитов табуевской и тархановской серий.

Для корректировки возраста метатерригенного комплекса хр. Канин Камень было проведено U-Pb (LA ICP MS) датирование детритовых цирконов из серицитовых кварцитов верхней части табуевской серии (горелорецкая свита, обр. 406801, р. Рыбная), представляющих собой песчаники, метаморфизованные в условиях хлорит-серицитовой субфации зеленосланцевой фации. Кроме того, выполнено датирование зерен детритового циркона из

биотитовых кварцитов средней части тархановской серии (мязгинская свита, обр. 402701) из р-на верховьев р. Б. Ойва, относящихся к биотит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации.

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  – возрасты 103 зерен детритового циркона из серицитовых кварцитов табуевской серии (обр. 406801) образуют интервал 982–2673 млн лет с максимумами плотности вероятности (МПВ) 1215 и 1589 млн лет (Рис. 1). Датировки 77 цирконовых зерен из биотитовых кварцитов тархановской серии (обр. 402701) находятся в диапазоне 980–2110 млн лет с МПВ 1135 и 1530 млн лет. Распределения цирконовых возрастов свидетельствует о том, что среди зерен детритового циркона, выделенных из пород табуевской серии, резко преобладают зерна, источниками которых были магматические и метаморфические породы средне- и раннерифейского возраста (по 41 %). В меньшей степени представлен циркон, принадлежавший породам раннепротерозойского (14 %), позднеархейского (4 %) и позднерифейского (1 %) возраста. Среди цирконовых датировок для тархановской серии (обр. 402701), наибольшее число относится к раннему рифею (49 %), зерен циркона из среднерифейских и раннепротерозойских кристаллических комплексов меньше (26 % и 18 % соответственно). В заметном количестве (6%) присутствуют зерна позднерифейского возраста. В целом для обоих образцов характерно бимодальное распределение возрастов циркона с максимальным числом датировок в ~ 1.1–1.2 млрд лет и 1.5–1.6 млрд лет.

Преобладание в табуевской и тархановской сериях зерен детритового циркона с ранне-среднерифейскими возрастными сближает их с терригенными породами барминской серии Северного Тимана, четлаской и вымской сериями Среднего Тимана, хобеинской и пуйвинской свитами Приполярного Урала и ишеримской свитой Северного Урала, для которых главными источниками зерен детритового циркона предполагаются комплексы Фенноскандии и Среднерусского орогена [8]. Присутствие в табуевской и тархановской сериях зерен детритового циркона с возрастными 1.0–1.2 млрд лет свидетельствует о том, что в осадконакоплении могли участвовать продукты разрушения Свеконорвежского (Гренвильского) орогена.

Отложения табуевской и тархановской серий начали накапливаться не ранее начала позднего рифея. Об этом свидетельствуют средневзвешенные значения возраста трех самых молодых зерен циркона из обоих исследованных образцов: обр. 406801 –  $995 \pm 83$  млн лет (95%, СКВО = 0.35), обр. 402701 –  $989 \pm 56$  млн лет (95%, СКВО = 0.033). Таким образом, возраст тархановской серии следует считать позднерифейским.

- [1] Гецен В.Г. Строение фундамента Северного Тимана и полуострова Канин. – Л.: Наука, 1975. – 144 с.
- [2] Гецен В.Г. Структурная эволюция метаморфического комплекса полуострова Канин // Геология и полезные ископаемые Северо-Востока европейской части СССР. – Сыктывкар, 1978. – С. 60–64.
- [3] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-37, 38 – м. Святой Нос, м. Канин Нос. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. – 251 с.
- [4] Журавлев В. А., Куприн В. Ф., Лукьянова Л. И., Парамонова М. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Мезенская. Лист Q-38 – Мезень. Объяснительная записка. – С П б .: В С Е Г Е И, 2012. – 311 с .
- [5] Казак А. П., Дымникова Н. Г., Горноста́й Б. А., Якобсон К. Э. Метаморфическая зональность рифейских отложений Тимано-Канинского региона // Сов. Геология. – 1989. – № 7. – С. 65–74.
- [6] Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Структура, метаморфизм и возраст докембрийских образований полуострова Канин и Северного Тимана // Проблемы геологии и минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 176–194.
- [7] Раабен М. Е., Забродин В.Е. Водорослевая проблематика верхнего рифея. – М.: Наука, 1972. 130 с.

- [8] Соболева А. А., Андреичев В. Л., Михайленко Ю. В., Хубанов В. Б. U-Pb (LA-ICP-MS) изотопные возрасты и вероятные источники детритового циркона в кварцитопесчаниках хобеинской свиты (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. – 2022. – №1 (325). – С. 4–20.

## Влияние дислокаций в апатите на сохранность гелия

Л.А. Соколова<sup>1</sup>, О.В. Якубович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный Университет

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт Геологии и геохронологии докембрия РАН

При радиоактивном распаде  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  дочерним продуктом является гелий. Таким образом, со временем в уран- и торий-содержащих минералах начинает накапливаться гелий. При повышении температуры гелий начинает теряться минералом. На этой особенности основаны методы термохронологии по благородным газам (U-Th-He) [1].

Существует две модели описания миграции благородных газов из решетки: диффузионная и односкачковая. Диффузионная модель выход атома из решетки минерала определяется временем его блуждания в зерне, соответственно количество энергии, необходимое чтобы покинуть кристаллическую решетку, зависит от размера зерна. Односкачковая модель предполагает, что энергия, затраченная на первый скачок, для выхода из «ловушки», несопоставимо больше, чем энергия, необходимая для последующей диффузии, и поэтому не учитывает размер зерна [2]. Традиционно низкотемпературная термохронология опирается на диффузионную модель миграции гелия из минерала [1].

Цель данной работы – изучить влияние дислокаций на сохранность гелия в апатите, и их влияние на U-Th-He возраст. В качестве объекта исследования выбран апатит Durango – стандарт при измерении U-Th-He возрастов [3], а также апатит из месторождения Кондер, травление которого в 5 М HNO<sub>3</sub> на протяжении 20 секунд при 20°C, выявило большое количество нарушений кристаллической решетки, интерпретируемых как дислокации [4].

Изучение кинетики выделения гелия из апатита выполнялось на масс-спектрометре МСУ-Г-1-М (ИГГД РАН). Для измерений зерно, предварительно завернутое в танталовую фольгу, помещалось в масс-спектрометр и в вакууме происходил ступенчатый нагрев, спектр выделения гелия фиксировался. Размер зерен и условия съемки оставались постоянными для разных образцов.

Пик выделения гелия из эталонного апатита Дуранго находится приблизительно на 40 ампер (n=3), что соответствует температуре порядка 700°C. В то время как для апатита из месторождения Кондер (n=8) положение пика смещается на 900–1000°C. Различие в кинетике выделения гелия указывает на то, что дислокации влияют на миграцию гелия в апатите, причем, наличие дислокаций увеличивает сохранность гелия в нем.

Параллельно с измерением кинетики выделения гелия было проведено U-Th-He датирование апатита Durango (n=5) и апатита Кондёр (n=8). Возраста эталонного апатита получились воспроизводимыми, соответствующие литературным данным (около 31 млн лет) [3]. Возраста апатита Кондёр имеют очень большую дисперсию полученных возрастов (от 67 до 104 млн лет).

Наличие дислокаций в апатите может быть одной из причин овердисперсии U-Th-He возрастов [5]. Полученный нами данные, свидетельствуют о том, что наличие дислокаций в структуре апатита увеличивает сохранность гелия в нем. Для корректной интерпретации данных U-Th-He датирования гелиевым методом необходимо знать особенности внутренней структуры апатита, или проводить измерение концентрации гелия и параллельно измерять миграционные параметры гелия в каждом отдельном зерне, как это было предложено ранее Ю.А. Шуколюковым [2].

- [1] Reiners P.W., Carlson R.W., Renne P.R., Cooper K.M., Granger D.E., McLean N.M., and Schoene B. The (U-Th)/He system // *Geochronology and thermochronology*. – 2018. – С. 291-363.

- [2] Якубович О.В., Шуколюков Ю.А., и др. Геотермохронология по благородным газам: II. Исследование устойчивости Уран – Торий – Гелиевой изотопной системы в цирконах // Петрография. – 2010. – Том 18. – № 6. – С. 3–18.
- [3] Zeitler P.K., Herczeg A.L., McDougall I., and M. Honda, U-Th-He dating of apatite: A potential thermochronometer // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1987. – V. 51. – P. 2865–2868.
- [4] Gleadow A.J.W., Belton D.X., Kohn B.P., and Brown R.W. Fission track dating of phosphate minerals and the thermochronology of apatite // Rev. Mineral. Geochemistry. – 2002. – V. 48. – P. 579–630.
- [5] McDannell K.T., Zeitler P.K., Janes D.G., Idleman B.D., and Fayon A.K., Screening apatites for (U-Th)/He thermochronometry via continuous ramped heating: He age components and implications for age dispersion // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2018. – V. 223. – P. 90–106.

**Основной магматизм 2.0 млрд лет  
в Онежской структуре Фенноскандинавского щита:  
первые результаты U-Pb (ID-TIMS) датирования бадделеита**

*А.В. Степанова<sup>1</sup>, Е.Б. Сальникова<sup>2</sup>, А.В. Самсонов<sup>3</sup>, М.А. Суханова<sup>2</sup>, В.В. Устинова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Петрозаводск, Институт геологии КарНЦ РАН, [stepanov@krc.karelia.ru](mailto:stepanov@krc.karelia.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [katesalnikova@yandex.ru](mailto:katesalnikova@yandex.ru)

<sup>3</sup> Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, [samsonovigem@mail.ru](mailto:samsonovigem@mail.ru)

Онежская палеопротерозойская структура, или Онежский палеобассейн – одна из наиболее крупных и хорошо сохранившихся вулканогенно-осадочных структур на Фенноскандинавском щите [1, 2]. Многолетние детальные исследования осадочных комплексов Онежской структуры выявили масштабные вариации изотопного состава O, C и S, что свидетельствует о кардинальных изменениях экзогенных процессов в палеопротерозое [1]. Несмотря на детальную информацию о характере вариаций изотопного состава O, C и S, время и продолжительность проявления этих процессов остаются неопределенными. До сих пор основой для возрастного расчленения разреза осадочных пород являются литолого-стратиграфические данные, на основе которых выделяются две крупные эпохи осадконакопления, ятулий (2.30-2.06 млрд лет) и людиковый (2.06-1.92 млрд лет). Результаты датирования осадочных пород в разрезе Онежской структуры Pb-Pb (2090±70 млн лет, ятулий, карбонатные породы, [3]) и Re-Os (2050±10 млн лет, людиковый, шунгиты, [4]) методами единичны и характеризуются большими ошибками.

Важным элементом в разрезе людиковия в центральной части Онежской структуры являются силлы базитов, которые большинством исследователей рассматривались в составе заонежского магматического комплекса, формировавшегося синхронно с вмещающими осадочными комплексами заонежской свиты людиковия. Первые U-Pb геохронологические данные, полученные для базитов заонежского комплекса в Онежской структуре, оказались противоречивыми, возрасты выделенных из них цирконов варьируют в широком диапазоне (от 140 до 2800 млн лет) и не всегда имеют геологический смысл [1]. В такой ситуации результаты U-Pb датирования бадделеита являются значительно более надежными.

Нами были изучены долериты в районе с. Толвуя, на Заонежском полуострове в центральной части Онежской структуры, где вскрыты силлы долеритов и осадочные породы заонежского надгоризонта людиковия. Большая часть базитов преобразована в условиях зеленосланцевой фации – эпидот-амфиболитовой фации и не сохранила реликтов первичных магматических минералов, за исключением редких реликтов клинопироксена. По химическому составу долериты отвечают умеренно-магнезиальным базитам нормальной щелочности толеитовой серии. Ряд тел дифференцирован и крайние дифференциаты представлены крупнозернистыми лейкократовыми гранофировыми метадолеритами с высоким содержанием SiO<sub>2</sub> (до 58 мас. %) и Zr (до 550 ppm) и низким содержанием MgO (2 мас.%), Cr и Ni (< 10 ppm).

Из крупнозернистых долеритов в центральной части силла долеритов (обр. ТОЛ-4), сложенных преимущественно альбитом, кварцем, стильпномеланом и хлоритом были

выделены бадделеит и циркон. Циркон формирует удлиненно-призматические зерна (до 200 мкм по удлинению), иногда содержащие большое количество темноокрашенных включений, но во многих случаях бесцветных, прозрачных и не имеющих зональности. Морфологические особенности циркона предполагают его кристаллизацию из расплава. Бадделеит формирует мелкие (30-70 мкм) пластинчатые и псевдопризматические зерна, светло-коричневые с хорошо сохранившейся штриховкой на гранях. U-Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования были выполнены для трех микронавесок (6-10 наиболее чистых зерен) бадделеита. Средняя величина его возраста ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) составляет  $1999.9 \pm 4.0$  млн лет.

Полученный возраст кристаллизации долеритов надежно определяет эпизод формирования базитов 2.0 млрд лет, который ранее в восточной и юго-восточной части Фенноскандинавского щита известен не был. Возраст кристаллизации долеритов определяет верхнюю временную границу формирования осадочных комплексов заонежской свиты людиковия, в том числе и шунгитовых пород. В целом он не противоречит оценке возраста шунгитов 2050 млн лет [4].

Полученные данные свидетельствуют о возможности совместной кристаллизации бадделеита и циркона из расплавов среднего состава. Хорошая сохранность бадделеита в изученных образцах свидетельствует о его устойчивости в метадолеритах при метаморфических преобразованиях зеленосланцевой фации, что существенно расширяет возможности U-Pb датирования базитов.

- [1] Онежская палеопротерозойская структура // под ред. Л.В. Глушанин, Н.В. Шаров, В.В. Щипцов. – КарНЦ РАН, Петрозаводск. – 2011. – 431 с.
- [2] Melezhik V.A., Medvedev P. V, Svetov S.A. 4.3 The Onega Basin Frontiers in Earth Sciences // под ред. V.A. Melezhik et al. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. – 2013. – P. 387-490.
- [3] Овчинникова Г.В. и др. Pb-Pb возраст ятулийских карбонатных пород: туломозерская свита юго-восточной Карелии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2007. – № 4 (15). – С. 20-33.
- [4] Hannan J.L. et al. Re-Os geochronology of shungite: A 2.05 Ga fossil oil field in Karelia Experimental analysis of supercritical CO<sub>2</sub>-brine-rock interactions using a flow-through reactor. – 2008. – P. A351.

### **Последовательность преобразования амфиболитов Кандалакшско-Колвицкого комплекса (арктическая зона Фенноскандинавского щита): новые данные (U-Pb, TIMS) по циркону**

*Е.Н. Стешенко<sup>1</sup>, Т.Б. Баянова<sup>1,2</sup>, В.В. Чащин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, [steshenko@geoksc.apatity.ru](mailto:steshenko@geoksc.apatity.ru)

<sup>2</sup> Институт динамики геосферы РАН, г. Москва, [tamara@geoksc.apatity.ru](mailto:tamara@geoksc.apatity.ru)

Оценка времени и продолжительности проявления эпизодов метаморфических и метасоматических преобразований исходных магматических пород является важным условием в разработке и построении геодинамических моделей.

Кандалакшско-Колвицкая зона является южной частью Лапландского гранулитового пояса (ЛГП) и сложена вулканогенными толщами с залегающими среди них телами анортозитов. Кандалакшско-Колвицкий габбро-анортозитовый комплекс залегают на гранатовых плагиоамфиболитах кандалакшской толщи и перекрывается гранат-клинопироксен-плагиоклазовыми кристаллосланцами плоскотундровской толщи, метаморфизованными в условиях гранулитовой фации [1], [2] и представляет большой интерес для комплексных изотопно-геохимических исследований. Впервые с использованием  $^{205}\text{Pb}$  искусственного трассера U-Pb методом были датированы единичные зёрна циркона из метагаббро Колвицкого массива, возраст которых равен  $2448 \pm 5$  млн. лет. Для метагаббро Кандалакшского массива определён новый прецизионный U-Pb возраст по единичным зернам циркона, равный

2453.5±4.8 млн. лет, который интерпретируется временем магматического формирования пород массива [3], [4].

Для проведения датирования единичных зёрен циркона U-Pb методом была отобрана представительная геохронологическая проба из амфиболитов Кандалакшского массива. На датирование было выделено 5 морфотипов циркона, которые были подготовлены в соответствии с методикой [5].

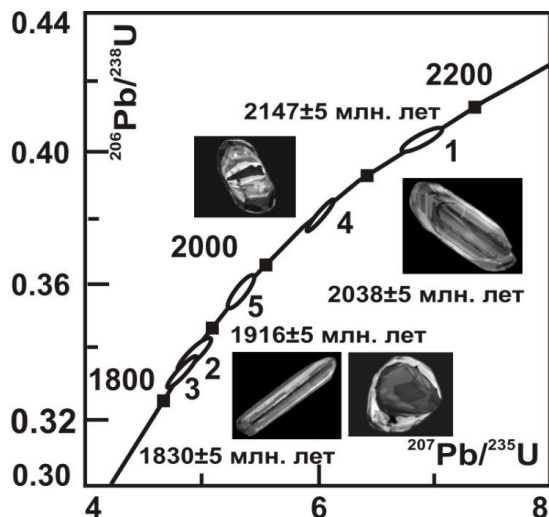


Рис. 1. Изотопная U-Pb диаграмма для единичных зёрен циркона из амфиболита Кандалакшский массив.

U-Pb датирование выполнено для 5 фракций циркона мономинеральной фракции, выделенной из пробы 385/2 (рис. 1), представленной амфиболитами (миндалекаменными метабазальтами), сохранившихся в виде реликта среди основных гранулитов Кандалакшской структуры Кандалакшко-Колвицкого гранулитового пояса. По циркону первого морфотипа получен конкордантный U-Pb возраст равный 2145±5 млн. лет, который интерпретируется временем образования вулканитов (протолитов основных гранулитов), которые могут сопоставляться по времени образования с ятулийскими вулканитами рифтогенных структур региона. Конкордантный возраст равный 2038±5 млн. лет, полученный по циркону второго морфотипа, по-видимому, отражает процессы ранних метаморфических преобразований этих вулканитов в условиях амфиболитовой фации. По третьему морфотипу цирконов получен конкордантный возраст равный 1916±5 млн. лет, который соответствует времени тектономагматической активизации коры в условиях амфиболитовой фации в свекофенский этап развития Беломоро-Лапландского пояса, широко проявленного в этом регионе (1919±8 млн лет [6]). Конкордантный возраст циркона четвертого морфотипа, соответствующий 1830±5 млн. лет, характеризует постколлизийный этап геологической истории Кандалакшко-Колвицкого гранулитового пояса. Таким образом, в изученных цирконах нашла свое отражение длительная (около 300 млн. лет) история эволюции Кандалакшко-Колвицкого гранулитового пояса на заключительном этапе своего развития.

Полученные данные показывает длительную эволюцию кандалакшко-колвицкой зоны, определенную по разным типам циркона из одного образца амфиболитов. Разные возраст морфотипов циркона свидетельствует о неоднократной кристаллизации циркона в породах и еще раз подтверждает свойства циркона как уникального геохронометра. Новые полученные геохронологические данные согласуются с ранее полученными результатами (U-Pb по циркону, Sm-Nd и Rb-Sr по породам и минералам) для пород Кандалакшко-Колвицкой зоны [7]. Анализ новых данных позволяет сделать вывод о принадлежности Кандалакшко-Колвицкого комплекса к обширной изверженной Восточно-Скандинавской провинции, которая длительно развивалась на рубеже 2.53-2.39 млрд лет.

Работа выполнена в рамках темы НИР №0226-2019-0053 и частично поддержана из средств гранта РФФИ № 21-17-00161.

[1] Стешенко Е.Н., Баянова Т.Б., Серов П.А. и др. // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2015. №11. С. 19-24.

- [2] Чашин В.В., Стешенко Е.Н., Савченко Е.Э. и др. // Литосфера. 2016. № 5. С. 17-34.
- [3] Steshenko E.N., Nikolaev A.I., Bayanova T.B., Drogobuzhskaya S.V., Chashchin V.V., Serov P.A., Lyalina L.M., Novikov A.I., Elizarov D.V. The Paleoproterozoic Kolva Anorthosite Block: New Data on the U–Pb Age (ID TIMS) and Geochemical Features of Zircon. // *Doklady Earth Sciences*, 2018, Vol. 479, Part 1, pp. 366–370.
- [4] Steshenko E.N., Nikolaev A.I., Bayanova T.B., Drogobuzhskaya S.V., Chashchin V.V., Serov P.A., Lyalina L.M., Novikov A.I. The Paleoproterozoic Kandalaksha Anorthosite Massif: New U–Pb (ID–TIMS) Data and Geochemical Features of Zircon // *Doklady Earth Sciences*, 2017, Vol. 477, Part 2, pp. 1454–1457.
- [5] Bayanova T., Mitrofanov F., Serov P., Nerovich L., Yekimova N., Nitkina E. and Kamensky I. Layered PGE Paleoproterozoic (LIP) Intrusions in the N-E Part of the Fennoscandian Shield – Isotope Nd-Sr and  $3\text{He}/4\text{He}$  Data, Summarizing U-Pb Ages (on Baddeleyite and Zircon), Sm-Nd Data (on Rock-Forming and Sulphide Minerals), Duration and Mineralization / *Geochronology – Methods and Case Studies* / Edited by Nils-Axel Mörner // INTECH, 2014. P. 143-193. DOI:10.5772/58835
- [6] Каулина Л.В., Богданова М.Н. Основные этапы развития Северо-Западного Беломорья (по U-Pb изотопным данным) // *Литосфера*. 2000. № 12. С. 85.
- [7] Steshenko E.N., Bayanova T.B., Serov P.A. The Paleoproterozoic Kandalaksha - Kolvitsa Gabbro - Anorthosite Complex (Fennoscandian Shield): New U–Pb, Sm–Nd, and Nd–Sr (ID - TIMS) Isotope Data on the Age of Formation, Metamorphism, and Geochemical Features of Zircon (LA - ICP - MS) // *Minerals – 2020. – №10. – V. 254*. DOI:10.3390/min10030254

### Новые данные о возрасте Сыннырского массива (Северное Прибайкалье)

*М.В. Стифеева*<sup>1</sup>, *Н.В. Владыкин*<sup>2</sup>, *И.А. Сотникова*<sup>2</sup>, *Е.Б. Сальникова*<sup>1</sup>, *А.Б. Котоев*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [stifeeva.maria@yandex.ru](mailto:stifeeva.maria@yandex.ru)

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

Северобайкальская щелочная провинция представляет особый интерес благодаря широкому развитию массивов высококалийных и ультракалийных пород. Она расположена в области сочленения Сибирского платформы и Центрально-Азиатского подвижного пояса и протягивается от северной оконечности Байкала до северо-западной части Алданского щита. Сыннырский массив, входящий в состав этой провинции, является крупнейшей в мире (площадь более 500 км<sup>2</sup>) интрузией центрального типа, сложенной щелочными породами ультракалийной серии. Он локализован на контакте рифтогенных структур Олоктинской зоны и Байкало-Муйского пояса [1].

Сыннырский массив имеет многофазное, концентрически-зональное строение, отражающее процесс магматической дифференциации, характерный для щелочных расплавов. Последовательность формирования слагающих его пород представляется так [2]: биотитовые пироксениты → шонкиниты → лейцитовые сиениты (сынныриты) → нефелиновые сиениты (дитроиты) → фельшпатоидные сиениты (пуласкиты) → кварцевые сиениты дайки щелочных сиенитов и гранитов → дайки лампрофиров → щелочные граниты, комендиты. Rb-Sr для сынныритов и шонкинитов соответствует возрасту 291 млн лет [3].

В число акцессорных минералов нефелиновых сиенитов и фельшпатоидных сиенитов входит Ca-Fe гранат, являющийся, как показано в [4] надежным минералом-геохронометром для оценки возраста пород щелочного состава.

Для проведения U-Pb геохронологических исследований (ID TIMS) были отобраны гранаты из мелкозернистого нефелинового сиенита (проба СНР-5/2), среднезернистого нефелинового сиенита (проба СНР-12/11) и пегматоидного обособления крупнозернистого сиенита (проба СНР-3/11). Химический состав гранатов соответствует андрадиту, однако, для граната из пр. СНР 5/2 отмечается значительная доля Al-компонентов – гроссуляра и хатчеонита. Для граната характерно высокое содержание урана (7.5-17.3 мкг/г) и низкая доля обыкновенного свинца



(Pbc/Pbt = 0.34). Конкордантный возраст граната соответствует  $295 \pm 1$  млн лет (СКВО = 2.4). Эти данные хорошо согласуются с возрастом циркона из пуласкитов Бурпалинского массива  $294 \pm 1$  млн лет [5], также входящего в состав Северобайкальской провинции.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 22-17-00211) и НИР (№ 0284-2021-0008).

- [1] Жидков А.Я. Уникальное месторождение псевдолейцитовых ультракалиевых сиенитов // Докл. АН СССР. – Т. 152. – № 12. – 1963. – С. 414-417.
- [2] Владыкин Н.В. Модель зарождения и кристаллизации ультраосновных-щелочнокарбонатных магм Сибирского региона, проблемы их рудоносности, мантийные источники и связь с плюмовым процессом // Геология и геофизика. – Т. 57. – № 5. – 2016. – С. 889-905.
- [3] Саватенков В.М., Рыцк Е.Ю., Великославинский С.Д., Лебедева Ю.М. Изотопные (Nd-Sr) характеристики и возможные источники ультракалиевых щелочных пород Сыннырского массива (Северное Прибайкалье) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – № 16. – 2019. – С. 497-501.
- [4] Salnikova E.B., Chakmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Yu.D., Nikiforov A.V. Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // Lithos. – 2019. – V. 338. – P. 141-154.
- [5] Котов А.Б., Владыкин Н.В., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б. Пермский возраст Бурпалинского щелочного массива (Северное Прибайкалье): геодинамические следствия // Докл. РАН. – Т. 453. – № 3. – 2013. – С. 295-299.

### **U-Pb возраст граната из скарнов Хову-Аксинского Ni-Co-As месторождения**

*М.В. Стифеева<sup>1</sup>, А.Н. Никифоров<sup>2</sup>, Е.Б. Сальникова<sup>1</sup>, Ю.В. Плоткина<sup>1</sup>, А.Б. Котов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [stifeeva.maria@yandex.ru](mailto:stifeeva.maria@yandex.ru)

<sup>2</sup> Москва, институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

Хову-Аксинское Ni-Co-As гидротермальное месторождение входит в состав Алтае-Саянской кобальтовой металлогенической провинции, одной из крупнейших по запасам в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса. Она расположена в пределах Убсунур-Хову-Аксинской зоны пересечения глубинных разломов в южном борту Тувинского межгорного прогиба. Ni-Co-As оруденение локализовано в скарнированных участках осадочно-вулканогенных пород нижнего кембрия, терригенно-карбонатных осадочных пород силура и осадочно-вулканогенные пород нижнего девона. Происхождение контактово-метасоматических образований является предметом дискуссии.

Скарновые тела различной мощности имеют линзовидную и жилообразную форму и сохраняют реликтовую текстуру исходных пород. По минеральному составу выделяют пироксеновые, гранат-пироксеновые и пироксен-скаполитовые разновидности скарнов. Ni-Co-As оруденение по отношению к скарнообразованию развивается позднее и происходило в два этапа. Первый этап (368-383 млн лет, [1]) связан с завершающей стадией контактово-метасоматических процессов и выражен в образовании рудных зон, сложенных кварцем, кальцитом, хлоритом и сульфоарсенидами кобальта. Второму этапу (250-195 млн лет, [1, 2]) рудогенеза предшествует внедрение даек диабазов, плагипорфиров, заложение новых систем разрывных нарушений и последующее образование кварц-карбонатных жил с большим количеством рудных минералов.

Гранат является одним из основных породообразующих минералов скарновых пород. Он представлен крупными (до 2 см) хорошо огранёнными кристаллами. Зёрна граната трещиноватые, по трещинам развиваются хлорит и карбонат. Окраска зёрен неоднородная: от тёмно-коричневой в центре зёрен до желтовато-коричневой в краевых частях. Состав граната отвечает ряду андрадит-гроссуляр с преобладающим количеством андрадитового компонента

(52-79%). Содержание REE по сравнению с гранатами схожего генезиса не высокое (37.5-97.2 мкг/г). Характерно обеднение LREE ( $[La/Sm]_N = 0.01-0.02$ ) и обогащение MREE ( $[Gd/Yb]_N = 1.32-6.56$ ). Различий между распределением данной группы элементов между краевыми и центральными частями зёрен не наблюдается.

Для проведения U-Pb (ID TIMS) геохронологических исследований использованы три микронавески фрагментов кристаллов граната наиболее тёмного цвета. Содержание U в нем изменяется в пределах 10.76-29.48 мкг/г. Отмечается низкая доля обыкновенного свинца ( $Pb_c/Pb_{tot} = 0.07-0.42$ ). Точки изотопного состава граната располагаются на дискордии, нижнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту  $399 \pm 2$  млн лет ( $СКВО = 0.082$ ).

Полученная оценка возраста граната незначительно древнее оценки Ar-Ar возраста –  $383 \pm 5$  млн лет серицита [3] из Cu-Co-As руд месторождения Хову-Аксы. Выявленные различия в возрасте могут быть связаны с длительностью процессов рудообразования, или, что более вероятно, разницей температуры закрытия U-Pb и Ar-Ag систем различных минералов. В любом случае постскарновые этапы гидротермального минералообразования не повлияли на U-Pb систему в гранате, что позволяет рассматривать этот минерал в качестве надёжного геохронометра для оценки возраста месторождений подобного генезиса.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 22-17-00211).

- [1] Лебедев В.И., Боровиков А.А., Гущина Л.В., Шабалин С.И. Физико-химическое моделирование гидротермальных процессов рудообразования Ni-Co-As ( $\pm U$ -Ag), Co-S-As ( $\pm Au$ -W), Cu-Co-As ( $\pm Sb$ -Ag) месторождений // Геология рудных месторождений. – Т. 61. – № 3. – 2019. – С. 31-63.
- [2] Лебедев В.И. О дайках Хову-Аксынского рудного поля // Материалы по геологии Тувинской АССР. Кызыл: Тувинск. Кн. Изд-во. – 1971. – С. 74-86.
- [3] Третьякова И.Г., Борисенко А.С., Лебедев В.И., Павлова Г.Г., Говердовский В.А., Травин А.В. Возрастные рубежи формирования кобальтового оруденения Алтае-Саянской складчатой области и его корреляция с магматизмом // Геология и геофизика. 2010. – Т. 51. – № 9. – С. 1379-1395.

## **Новые данные о возрасте формирования щелочных пород Большетагнинского массива (Зиминский рудный узел, Восточно-Саянская щелочная провинция)**

*М.В. Стифеева<sup>1</sup>, В.Б. Савельева<sup>2</sup>, Е.Б. Сальникова<sup>1</sup>, А.Б. Котов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [stifeeva.maria@yandex.ru](mailto:stifeeva.maria@yandex.ru)

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

Вдоль юго-западной границы Сибирского кратона расположена Восточно-Саянская провинция щёлочно-ультраосновных пород с карбонатитами. Интенсивно проявленный щелочной магматизм в пределах данного региона является важнейшим свидетельством масштабных тектонических процессов в позднем рифее [1, 2].

Большетагнинский массив входит в состав Зиминского рудного узла. Массив, площадью около 4 км, имеет округлую форму и зонально-кольцевое строение, которое отражает последовательность формирования серий пород: ийолиты-мельтейгиты, нефелиновые и субщелочные (калишпатовые) сиениты, пикритовые порфириды и карбонатиты [3, 4]. Также в пределах массива широко развиты жилы и дайки ультраосновного состава, прорывающие более ранние породы.

Для проведения U-Pb (ID TIMS) геохронологических исследований был отобран гранат из ийолита (обр. 25/19) и нефелинового сиенит-порфира (обр. к23/19). Гранат из ийолита наряду с нефелином, клинопироксеном и кальцитом является породообразующим минералом. Он кристаллизовался одним из последних, зачастую замещая краевые части клинопироксена и кальцита. В кристаллах граната наблюдается пятнистая или ритмичная зональность,

присутствуют реликты титаномагнетита и канкритизированного нефелина. Химический состав граната соответствует ряду андрадит (25.7-78.2%) – моримотоит (12.9-33.4%) – шорломит (4-25%) с постоянным присутствием кальдеритового (до 3.5%) минала. Отмечается примесь Zr и Na.

Гранат из нефелинового сиенит-порфира (обр. к23/19) занимает интерстиции между зёрнами нефелина и калиевого полевого шпата. Он имеет зональное строение, среди включений фиксируются апатит, кальцит и пирит. Состав граната соответствует ряду андрадит (44.5-67.1%) – моримотоит (15.3-29.5%) с примесью шорломитового (до 10%) компонента. Характерно присутствие в составе Zr, V и Na.

U-Pb геохронологические исследования проведены для трёх микронавесок граната из обр. 25/19 и двух навесок из обр. к23/19. Содержание урана в исследованных гранатах изменяется в пределах 4.64-4.58 мкг/г и 2.70-5.25 мкг/г соответственно. Доля обыкновенного свинца (Pbc/Pbt) не превышает 0.53. Для граната из двух микронавесок получено конкордантное значение возраста  $632 \pm 2$  млн лет (СКВО = 0.02), а среднее значение возраста ( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ), рассчитанного для четырёх микронавесок составляет  $633 \pm 2$  млн лет (СКВО = 0.61). Полученные результаты согласуются с U-Pb возрастом циркона из ийолитов Жидойского массива ( $632 \pm 2$  млн лет) [1], что свидетельствуют о синхронности формирования этих массивов. Геохронологическое изучение цирконов, граната и флогопита из пород Белозиминского и Ингилийского массивов, однако, выявило более древний этап магматической активности – 639-661 млн лет [1, 5, 6]. Это позволяет говорить о продолжительном интервале (632-661 млн лет) формирования щелочных пород в пределах Восточно-Саянской провинции.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 22-17-00211).

- [1] 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 // Докл. АН. – 2005. – Т. 404. – № 3. – С. 400-406.
- [2] Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Ковач В.П., Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. Геодинамика формирования каледонид Центрально-Азиатского складчатого пояса // Докл. АН. – 2003. – Т. 389. – № 3. – С. 354-359.
- [3] Фролов А.А., Багдасаров Ю.А. Большетагнинский массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов // Советская геология. – № 12. – 1967. – С. 80-93.
- [4] Фролов А.А., Белов С.В. Комплексные карбонатитовые месторождения Зиминского рудного района (Восточный Саян, Россия) // Геология рудных месторождений. – № 2. – 1999. – С. 109-130.
- [5] Salnikova E.B., Chakmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Yu.D., Nikiforov A.V. Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // Lithos. – 2019. – V. 338. – P. 141-154
- [6] Doroshkevich, A.G., Veksler, I.V., Izbrodin, I.A., Ripp, G.S., Khromova, E.A., Posokhov, V.F., Travin, A.V., Vladykin, N.V. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids. // J. Asian Earth Sci. – 2016. – 116. – P. 81-96.

## Термохронология метаморфических комплексов Гридинско-Амбарнинского домена Беломорской провинции Фенноскандинавского щита

*М.А. Суханова<sup>1</sup>, Е.Б. Сальникова<sup>1</sup>, А.В. Степанова<sup>2</sup>, М.В. Стифеева<sup>1</sup>, А.Б. Котов<sup>1</sup>,  
П.Я. Азимов<sup>1</sup>, О.В. Галанкина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, ИГГД РАН,

<sup>2</sup> Петрозаводск, ИГ КНЦ РАН

Беломорская провинция расположена в северо-восточной части Фенноскандинавского щита. Известно, что породы этой провинции были преобразованы в результате архейского (2.8–2.7 млрд лет) и раннепротерозойского (1.9–1.8 млрд лет) метаморфических событий [1-8]. Для отдельных доменов Беломорской провинции [3, 9, 6, 10] получены многочисленные геохронологические данные для различных минералов-геохронометров с широким диапазоном температуры закрытия изотопных систем, позволившие оценить скорость остывания пород. В то же время систематические исследования такого рода в рамках изучения одной изотопной системы разных минералов для метаморфических пород Беломорской провинции не проводились.

Для того, чтобы восполнить этот пробел, были выполнены U-Pb геохронологические исследования (ID TIMS) бадделеита, циркона, монацита и рутила из оливиновых габброноритов Амбарнского массива и вмещающих их глиноземистых гнейсов чупинской толщи Гридинско-Амбарнского домена Беломорской провинции. Оливиновые габбронориты с возрастом  $2411 \pm 6$  млн лет метаморфизованы в условиях гранулитовой фации. Возраст метаморфизма, определенный по оболочкам циркона на кристаллах бадделеита, составляет  $1911 \pm 35$  млн лет. Минимальная оценка температуры кристаллизации этого циркона соответствует  $843^\circ\text{C}$  и согласуется с оценками температур формирования коронарных структур, полученными по слагающим их породообразующим минералам.

U-Pb возраст монацита из Grt-Ку-Vt-гнейсов, вмещающих Амбарнский массив, составляет  $1856 \pm 4$  и  $2727 \pm 46$  млн лет. Температура закрытия U-Pb изотопной системы монацита –  $800\text{--}850^\circ\text{C}$  [11]. Это позволяет предполагать, что полученные для монацита оценки возрастов отражают проявление позднеархейского и раннепротерозойского этапов высокотемпературного метаморфизма. Величина возраста рутила из Grt-Ку-Vt-гнейсов (минерала с наиболее низкой температурой закрытия U-Pb системы ( $400\text{--}450^\circ\text{C}$ )), составляет  $1796 \pm 40$  млн лет. Возраст титанита из глиноземистых гнейсов чупинской толщи смежного домена находится в интервале  $1837\text{--}1853$  млн лет [3]. Температура закрытия U-Pb изотопной системы этого минерала соответствует  $700\text{--}660^\circ\text{C}$  [12].

На основании полученных оценок U-Pb возраста минералов, образованных в результате палеопротерозойского метаморфизма и имеющих различные температуры закрытия изотопной системы, определена скорость остывания пород Гридинско-Амбарнского домена центральной части Беломорской провинции, которая составляет  $4,5^\circ\text{C}/\text{млн лет}$ , что в целом согласуется с данными, полученными ранее для Восточной части Карельского кратона, включающей Беломорскую провинцию, где средняя скорость остывания соответствует  $2\text{--}4^\circ\text{C}/\text{млн лет}$  [3]. Однако по сравнению с северной частью Беломорской провинции остывание происходило быстрее: для эклогитов и эклогитоподобных пород Чалмозера и Узкой и Широкой Салмы средняя скорость остывания составляет  $2^\circ\text{C}/\text{млн лет}$  [11].

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (№ 20-05-00437) и НИР №№ FMUW-2022-0002, FMUW-2022-0003, FWME-2019-0060.

- [1] Ранний докембрий Балтийского щита / под ред. В. А. Глебовицкий. Санкт-Петербург: 2005. Вып. Наука. 711 с.
- [2] Максимов О.А., Балаганский В.В., Слабунов А.И., Ларионов А.Н. Два этапа высокобарного метаморфизма в раннедокембрийских эклогитах (район Гридино Беломорской провинции

- Фенноскандинавского щита): петрология и геохронология // Петрология. – 2022. – Т. 30. – № 2. – С. 1-26.
- [3] Bibikova E., Skiold T., Bogdanova S., Gorbachev R., Slabunov A. Titanite-rutile thermochronometry across the boundary between the Archaean Craton in Karelia and the Belomorian Mobile Belt, eastern Baltic Shield // Precambrian Res. – 2001. – V. 105. – № 2-4. – P. 315-330.
- [4] Бибикина Е.В., Богданова С.В., Глебовицкий В.А., Клайссон С., Шельд Т. Этапы эволюции Беломорского подвижного пояса по данным U-Pb цирконового геохронологии (ионный микронзонд NORDSIM) // Петрология. – 2004. – V. 12. – № 3. – P. 227-244.
- [5] Березин А. В., Скублов С. Г., Марин Р. А. Н. Ю. Б., Мельник А. Е., Богомолов Е. С. Новое проявление эклогитов в Беломорском подвижном поясе: геология, условия метаморфизма и изотопный возраст // – 2013. – Т. 223. – С. 64-75.
- [6] Скублов С.Г. Зак Т., Березин А.В., Мельник А.Е., Ризванова Н.Г. Результаты локального исследования (LA-ICP-MS) геохимии и U-Pb возраста рутилов из пород Беломорского подвижного пояса // Геохимия. – 2013. – № 2. – P. 180-187.
- [7] Скублов С. Г., Березин А. В., Мельник А. Е., Астафьев Б. Ю., Воинова О. А., Алексеев В. И. Возраст протолита эклогитов южной части Пижострова, Беломорский пояс: протолит метабазитов как индикатор времени эклогитизации // Петрология. – 2016. – Т. 24. – 6. – С. 640-653.
- [8] Сальникова Е.Б., Степанова А.В., Суханова М.А., Котов А.Б., Степанов В.С., Азимов П.Я., Егорова С.В., Плоткина Ю.В., Толмачева Е.В., Кервинен А.В., Родионов Н.В. История формирования коронитовых метагабброноритов Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: результаты U-Pb (ID-TIMS) датирования циркон-бадделеитовых агрегатов с помощью дискретной химической абразии // в печати.
- [9] Левский Л.К., Морозова И.М., Левченко О.А., Байкова В.С., Богомолова Е.С. Изотопно-геохронологические системы в метаморфических породах (О-в Поньгома, Беломорский подвижный пояс) // Геохимия. – 2009. – 3. – С. 227-244.
- [10] Каулина Т.В. Термохронология пород для реконструкции развития подвижных поясов // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2012. – 8 – С. 111-114.
- [11] Cherniak, D.J., Watson, E.B., Grove, M., Harrison, T.M., 2004. Pb diffusion in monazite: a combined RBS/SIMS study. Geochim. Cosmochim. Acta. – 68. – P. 829–840. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.07.012>.
- [12] Cherniak D.J. Lead diffusion in titanite and preliminary results on the effects of radiation damage on Pb transport // Chemical Geology. – 1993. – V. 110. – P. 177-194.

## Возраст циркона (U-Pb, SHRIMP-II) из раннерифейских образований внешних островов Финского залива

*Е.Н. Терехов<sup>1</sup>, С.Г. Скублов<sup>2</sup>, Н.Б. Кузнецов<sup>1</sup>, Т.В. Романюк<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Геологический институт РАН, [terekhoff.zhenya@yandex.ru](mailto:terekhoff.zhenya@yandex.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт Геологии и геохронологии докембрия РАН

<sup>3</sup> Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

В представленной работе рассмотрены изотопный возраст, строение и состав рифейских толщ, обнаженных на Внешних островах Финского залива (Гогланд, Большой Тюттерс, Соммерс и Мощный). В пределах Финского залива раннерифейские супракрустальные образования известны с начала XX в. Это хогландская серия, поля распространения пород которой занимают большую часть о. Гогланд и ориентированы перпендикулярно основным тектоническим элементам южного ограничения Балтийского щита (БЩ). Наличие рифейских толщ в других местах Финского залива дискуссионно. Ранее считалось что от крупного рифейского авлакогена в Ботническом заливе существует небольшое ответвление в сторону Финского залива и этот трог можно проследить до о. Гогланд, но это не нашло подтверждения результатами последующих исследований. Зато восточнее о. Гогланд на Государственной

геологической карте 1: 1 000 000 показано поле развития нижнего рифея, но геохронологические подтверждения этого отсутствуют.

Нами проведено геохронологическое изучение некоторых образований Внешних островов Финского залива. Прежде всего, получены возрастные оценки по трем пробам (Тс-6, Тс-8 и Тс-9) метавулканитов хогландской серии о. Соммерс. Циркон из этих проб был выделен в ГИН РАН по стандартной методике с использованием тяжелых жидкостей. U–Pb изотопные анализы циркона проведены в ЦИИ ВСЕГЕИ на ионном микрозонде SHRIMP-II по стандартной методике. Конкордантная датировка, полученная по результатам изотопного анализа 15 кристаллов циркона из кварцевых порфиров (проба Тс-6)  $1662 \pm 8$  млн лет. Это на 20 млн лет древнее, чем ранее полученные датировки основания хогландской серии 1.64–1.63 млрд лет на о. Гогланд. Такие значения возраста близки к оценкам времени проявления главных импульсов магматизма Выборгского батолита (1.64–1.63 млрд лет), в пределах которого известны выходы кварцевых порфиров, слагающих провесы кровли [Беляев, 2013].

В северной части о. Соммерс развиты магматиты, более пестрые по составу и сильнее измененные (фация зеленых сланцев). Для циркона из этих пород получены более молодые датировки. Так, для циркона из трахибазальтов (проба Тс-8) возрастная оценка составила  $1591 \pm 14$  млн лет, а для циркона из кварц-полевошпатовых порфиров риодацитового состава (проба Тс-9) –  $1578 \pm 5$  млн лет. Датировки циркона из проб Тс-8 и Тс-9 с учетом состава пород, из которых они выделены, соответствуют известным закономерностям эволюции интрузий анортозит-рапакивиподобной ассоциации, в которой основные породы древнее гранитоидов. Но при этом возрасты циркона из Тс-8 и Тс-9 не попадают во временной интервал образования ни Выборгского (1655–1625 млн лет) ни Салминского (1550 млн лет) плутонов, а близки возрасту Рижского плутона и гранитов рапакиви Аландских островов [Ларин, 2011]. Это позволяет предполагать наличие в районе Внешних островов Финского залива неизвестного (не вскрытого на дневной поверхности) массива гранитов рапакиви или же образований наиболее поздней фазы Выборгского плутона, комагматичных эффузивам о. Соммерс.

Кроме того, нами датированы зёрна детритового циркона (**dZr**), выделенные из кварцито-песчаного матрикса существенно кварцевых базальных конгломератов, слагающих на о. Гогланд невыдержанный по простиранию горизонт в основании разреза хогландской серии. U–Pb изотопная система зёрен **dZr** изучена в ЛАХИ ГИН РАН методом LA-ICP-MS по стандартной методике. Всего выполнено 150 анализов в 141 зерне. Большинство зерен округлой формы и сильно окатаны. 13 изученных зёрен в той или иной мере сохранили удлиненную идиоморфную форму и имеют возраст от 1893 до 2122 млн лет. Вероятнее всего, эти зерна не испытали длительной транспортировки и/или интенсивного окатывания. Это может быть указанием на то, что они происходят из близких источников. Для 10 зерен, где по их изображениям можно было предположить наличие древнего ядра и молодой каймы, изучены и ядра, и каймы. В 7 случаях датировки ядер и кайм в пределах ошибки измерения совпадают.

За исключением двух самых молодых и двух самых древних датировок, все остальные U–Pb возрасты формируют три группы. Первую плотную доминирующую группу формируют датировки в интервале возрастов 1.87–2.22 млрд лет (85 датировок). Две другие группы 2.32–2.61 млрд лет (13 датировок) и 2.67–2.93 млрд лет (22 датировки).

Таким образом, анализ U–Pb изотопных датировок, полученных по зёрнам **dZr** из кварцито-песчаного матрикса базальных конгломератов хогландской серии, позволяет предположить, что основание хогландской серии было сформировано при накоплении продуктов эрозии средне-позднепалеопротерозойских и архейских кристаллических комплексов. При этом обращает на себя внимание отсутствие **dZr** с возрастными 1850–1650 млн лет. То есть в породах хогландской серии нет **dZr** с возрастными, попадающими в интервал продолжительностью 200 млн лет, предшествующий предполагаемому времени начала формирования (1640–1660 млн лет) серии.

Если учесть, что в той части **БЩ**, которая сопряжена с севера с рассматриваемым районом, породы с возрастом 1.65–1.8 млрд лет слагают лишь мелкие тела, то следует предположить, что эти породы не могут быть источником большого количества **dZr**. Однако в изученных породах о. Гогланд нет и **dZr** с возрастом (1.85–1.80 млрд лет), широко развитых в Южной Финляндии и Северном Приладожье массивов позднеорогенных калиевых гранитов и мигматитов. Отсутствие в изученных породах о. Гогланд зёрен **dZr** с этими возрастными требует объяснения. По-

видимому, граниты и мигматиты с возрастaми 1.85-1.75 млрд лет, образованные на глубинах от 2-3 км до 10 км, к началу хогландского времени не были выведены на эрозионный срез, и, следовательно, не могли быть источниками  $dZr$ . Это означает, что орогенических поднятий накануне рифея не было. При этом в приозерской свите верхов нижнего рифея Пашского грабена и вмещающей Валаамские интрузии с возрастом 1.45-1.47 млрд лет, есть свекофенские (1.9-1.75 млрд лет)  $dZr$ , и даже  $dZr$  с возрастом Салминского массива. Но при этом в них нет  $dZr$  с возрастом Выборгского массива [Купцова и др., 2011]. Всё это указывает на важные тектонические изменения в регионе в середине раннего рифея и выраженные в возрастании расчлененности рельефа и появления на поверхности глубинных образований.

Широкое распространение кварцевого обломочного материала (в том числе грубого) в основании рифейских разрезов региона, обрамляющего БЩ с юга, требует ответа на вопросы, которые могут быть сформулированы следующим образом. Откуда столько обломочного кварца? И почему среди галек доминируют кварцевые гальки? Ответ на эти вопросы можно найти на о. Бол. Тютерс, на котором развиты плащеобразные тела предрифейских вторичных кварцитов, возраст которых определен по прорывающим их микроклиновым гранитам, с датировками в интервале от 1.83 до 1.5 млрд лет, полученными разными методами (K-Ar и U-Pb, ID-TIMS и SHRIMP-II). Размыв этих вторичных кварцитов и обусловил обилие кварцевой кластики в низах хогландской серии.

Исследования проведены по Гос. заданию ГИН РАН, ИГГД РАН и ИФЗ РАН.

## Этапы редкометалльного магматизма Калба-Нарымского пояса (Восточный Казахстан)

*А.В. Травин<sup>1</sup>, Н.А. Зимановская<sup>2</sup>, И.Ю. Анникова<sup>1</sup>, Н.Г. Мурзинцев<sup>1</sup>, С.С. Айтбаева<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Новосибирск, ИГМ СО РАН, [travin@igm.nsc.ru](mailto:travin@igm.nsc.ru)

<sup>2</sup>Усть-Каменогорск, республика Казахстан, ВКТУ, [nata.zim@mail.ru](mailto:nata.zim@mail.ru)

Особенностью Центрально-Азиатского пояса является развитие фанерозойского гранитоидного магматизма в форме мезоабиссальных батолитов, формировавшихся под воздействием магм мантийного генезиса [1]. В состав ареалов гранитоидного магматизма входят Li-F граниты с редкометалльным оруденением [2]. Принципиальной для понимания механизмов редкометалльного рудообразования является соотношение их возраста со стадиями формирования батолитов.

Формирование Калба-Нарымского гранитоидного пояса, главной редкометалльной структуры Алтайской аккреционно-коллизонной системы [3, 4], является результатом взаимодействия ее структур и Таримского плюма [5]. На основании геологических данных и результатов изотопного датирования установлена последовательность формирования гранитоидных комплексов: гранодиорит-граниты калгутинского (303-308 млн лет), плагиограниты кунушского (299-307 млн лет) комплексов, формирующие небольшие тела и дайки северо-западного простирания; гранодиорит-граниты калбинского (286-297 млн лет), гранит-лейкограниты монастырского (283-285 млн лет) комплексов, формирующие собственно Калба-Нарымский батолит [5].

В пределах пояса сосредоточены месторождения и рудопроявления пегматитового, альбитит-грейзенового, грейзеново-кварцево-жильного и гидротермального типов. К ведущему геолого-промышленному типу относятся месторождения сподуменовых пегматитов (Ta, Nb, Be, Li, Cs, Sn) асубулакского комплекса. По отношению к Калбинскому батолиту они занимают «внутригранитную» позицию, при этом полученные  $^{40}Ar/^{39}Ar$  методом по мусковиту датировки располагаются в широком диапазоне – 282-295 млн лет [5, 6]. По всей видимости, их разброс обусловлен длительной дифференциацией родоначальной магмы в пределах нижних, подстилающих магматических резервуаров (рис. 1).

К особому типу редкометалльных пегматитов, руды которых обогащены Li при низком содержании других редких элементов (Ta, Nb, Be, Sn) относятся рудные объекты (Ахметкино, Луконь, Алдай, Точка и др.) Карагоин-Сарыозекской зоны, расположенной в юго-западной

части Калба-Нарымского пояса. Зона охватывает эндо- и экзоконтактовые зоны гранитных массивов калбинского, монастырского комплексов и метаморфизированные осадочные породы такырской свиты. Установлена пространственная приуроченность редкометалльных пегматитов к образованиям плагиогранитов кунушского комплекса. Нами  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом по мусковиту из месторождения Точка (3 образца) и участка Алдай получены методом плато согласующиеся значения возраста:  $293 \pm 4$ ,  $292 \pm 4$ ,  $290 \pm 4$ ,  $293 \pm 4$  млн лет. Датировки значительно моложе возраста плагиогранитов кунушского комплекса. Если предположить, что формирование сподуменовых пегматитов было связано с плагиогранитами кунушского комплекса, а внедрение массивов более поздних калбинского и монастырского комплексов привело к омоложению изотопной системы мусковита, температура закрытия которой порядка  $370^\circ\text{C}$ , логичней ожидать значений, равных возрасту самого позднего – монастырского комплекса (284 млн лет). Кроме этого, представляется маловероятным, что при наложенном прогреве для месторождений, расположенных на различном удалении от массивов, могут быть получены одинаковые значения.

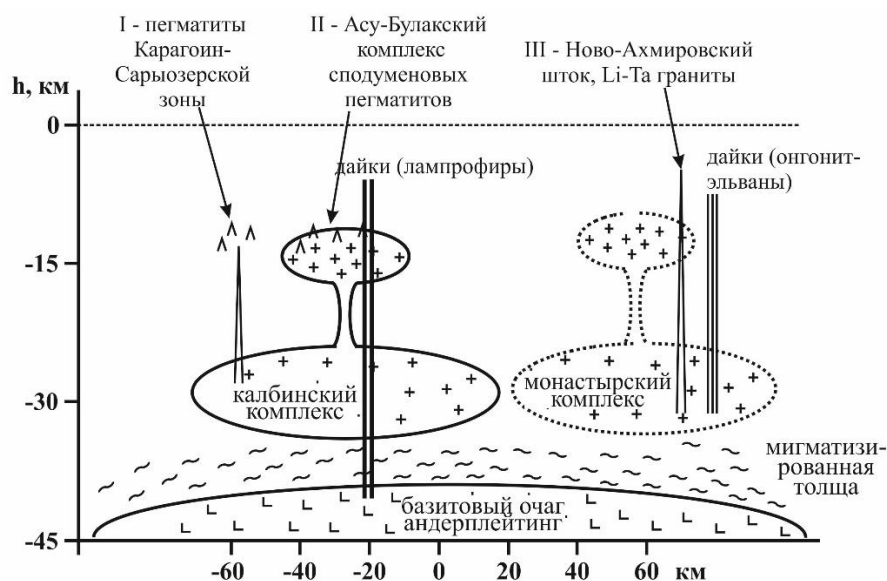


Рис. 1. Конфигурация редкометалльной рудно-магматической системы Калба-Нарымского пояса.

С учетом сказанного, логично предположить, что датировки (среднее взвешенное –  $292 \pm 2$  млн лет) соответствуют возрасту формирования сподуменовых пегматитов Карагоин-Сарыозекской рудной зоны, образовавшихся синхронно с породами первой фазы калбинского комплекса. Пространственная приуроченность редкометалльных пегматитов к образованиям плагиогранитов кунушского комплекса объясняется тем, что фракционированные расплавы поднимались из глубинной области магмогенерации гранодиорит-гранитов 1 фазы калбинского комплекса напрямую, по тем же тектонически ослабленным зонам, по которым ранее происходил подъем расплавов кунушского комплекса.

В пределах Иртышской сдвиговой зоны (ИСЗ), на северо-восточном фланге Калба-Нарымского пояса, расположено Ново-Ахмировское месторождение, представленное штоком Li-F гранитов, возраст которого значительно моложе –  $272 \pm 3$  млн лет [7,8]. Геохимические особенности Ново-Ахмировского месторождения и поясов онгонитовых даек позволяют предположить их формирование в результате длительного фракционирования глубинной магматической камеры, по составу скорее соответствующей лейкогранитам монастырского комплекса (рис. 1).

*Исследования выполнены на основе материалов исследований, полученных в результате выполнения НИР по теме ИРН АР08052371 (№0120РК00135), финансируемой МОН РК (договор № 120 от 01.06.2020г.), а также – в рамках государственного задания ИГМ СО РАН.*

- [1] Ярмолук В.В., Кузьмин М.И. // Геология рудных месторождений, 2012. Т. 54, № 5. С. 375-399.
- [2] Антипин В.С. и др. // Геология и геофизика, 2021. С. 104-108.



- [3] Щерба Г.Н. и др. Большой Алтай: (геология и металлогения). В 3 кн. Кн. 2. Металлогения / Алматы: РИО ВАК РК, 2000. 400 с.
- [4] Дьячков Б.А. // Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2012. – 129 с.
- [5] Хромых С.В. и др. // Геология и геофизика, 2016. Т. 57, № 5. С.983-1004.
- [6] Khromykh S.V. et al // Minerals. 2020. Vol.10. Iss. 11. P.1-15.
- [7] Владимиров В.Г. и др. // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту), г. Иркутск, 2021 г., Выпуск 19. С. 35-37.
- [8] Мурзинцев Н.Г. и др. // Геодинамика&Тектонофизика. Т. 10. № 2. С. 375-404.

### **Цирконы из мафических пород: магматические vs. ксеногенные (примеры из раннедокембрийских пород юго-запада Сибирского кратона)**

*О.М. Туркина<sup>1</sup>, Н.В. Родионов<sup>2</sup>, Н.Г. Бережная<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН, [turkina@igm.nsc.ru](mailto:turkina@igm.nsc.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, ЦИИ ВСЕГЕИ, [nickolay\\_rodionov@vsegei.ru](mailto:nickolay_rodionov@vsegei.ru)

С развитием методов изотопной геохронологии все более актуальным становится развитие подходов к корректной интерпретации результатов датирования. Наиболее остро дискуссионной остается интерпретация данных по цирконам из мафических магматических пород. Ключевым является вопрос о возможности кристаллизации циркона из базитового расплава и его отличия от ксеногенного, унаследованного от источника или захваченного из коровых пород. Результаты изотопно-геохронологического изучения циркона из палеопротерозойских базитов юго-запада Сибирского кратона дают ответы на некоторые дискуссионные вопросы.

В Сибирском кратоне широко проявлен палеопротерозойский коллизионный гранитоидный магматизм, связанный с его амальгамацией и вхождением в структуру суперконтинента Коламбия. На юго-западе в Шарыжалгайском выступе постколлизионный гранитоидный магматизм отвечает интервалу 1.86-1.84 млрд лет. Сведения о мафическом магматизме этого этапа ограничены габбро-долеритами Китойского роя даек (1864 млн лет) [1] и породами Малозадойского перидотит-габбрового массива (1863 млн лет) [2], расположенными в юго-восточном Иркутском блоке Шарыжалгай. Дальнейшее исследование в этом блоке привело к обнаружению второго Жидойского ареала даек и Полуденного монцогаббро-монцодиоритового массива, сложенных недеформированными и не испытавшими высокотемпературного метаморфизма породами. Породы всех четырех перечисленных объектов обладают рядом сходных черт. Они содержат микрографические сростания щелочного полевого шпата и кварца и обогащены биотитом. При широком диапазоне Mg# (84-35) они характеризуются повышенным содержанием K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, а также несовместимых редких элементов, в том числе Zr, концентрации которого изменяются от 37-77 ppm в высоко-Mg габброноритах до 107-330 ppm в габбро-долеритах. Такие концентрации допускают насыщение по Zr при кристаллизации мафического расплава.

Циркон для U-Pb изотопного датирования (SHRIMP II и LA ICP MS) был выделен из монцогаббро и монцодиоритов Полуденного массива и габбро-долеритов Жидойского дайкового ареала с концентрациями Zr 49-146 ppm и 207-238 ppm, соответственно. Морфология циркона из монцогаббро и монцодиоритов, представленного удлинёнными зёрнами (100-250 µm) с искривлёнными гранями и многочисленными твердофазными включениями, предполагает кристаллизацию из последних «капель» расплава, что согласуется с оценками температур насыщения цирконием 650-680°C. В катодолюминисценции (КЛ) циркон из монцодиорита имеет грубую зональность с чередованием темных и светлых полос, реже однороден. Он отличается широким диапазоном концентраций U (170-1739 ppm) и Th/U (0.1-2.9), с преобладанием Th/U > 1. Конкордантный возраст циркона по 56 точкам составляет 1876±30 млн лет (СКВО). Циркон из монцогаббро однороден в КЛ и сходен по геохимическим параметрам с цирконом из монцодиорита: U=247-1596 ppm, Th=187-740 ppm, Th/U=0.33-1.9.

Средневзвешенный  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраст 10 зерен составляет  $1830 \pm 7.8$  млн лет (СКВО=0.27), что в пределах ошибки сопоставимо с возрастом циркона из монцодиорита.

В габбро-долеритах из двух соседних даек (обр. 14-21 и 15-21) доминирует мелкий (70-150  $\mu\text{m}$ ) призматический циркон. В образце 15-21 циркон не зонален, его светимость в КЛ коррелирует с содержанием U, по концентрации которого выделяется две группы: 208-1414 и 2849-8661 ppm. Отсутствует прямая корреляция между возрастом и содержанием U, напротив, высокоурановые зерна характеризуются снижением  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраста вследствие повышенной дискордантности ( $D=4-55\%$ ), то есть потеря радиогенного Pb связана с метамиктностью таких цирконов. За исключением трех зерен с  $\text{Th}/\text{U}=1.3-2.1$ , большинство цирконов имеют  $\text{Th}/\text{U}$  от 0.1 до 0.48. Для 15 цирконов с  $D \leq 5\%$  средневзвешенный возраст составляет  $1855 \pm 4.2$  млн лет (СКВО=1.6), а по верхнему пересечению дискордии с конкордией –  $1857 \pm 10$  млн лет ( $n=19$ ). Два древних циркона размером  $\geq 100 \mu\text{m}$  представляют слабо зональное в КЛ зерно и оболочку на подобном ядре с  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрастом 2531 и 1910 млн лет, соответственно, и вероятно имеют ксеногенную природу. В габбро-долерите (обр. 14-21) зерна циркона не зональны или слабо зональны в КЛ во внешних зонах. Они имеют пониженные концентрации U (157-932 ppm), Th (67-759 ppm) и  $\text{Th}/\text{U}=0.44-0.91$ . Конкордантный и средневзвешенный возраста 10 зерен циркона составляют  $1851 \pm 7.7$  млн лет (СКВО=0.002) и  $1850 \pm 7.5$  млн лет (СКВО=0.21) и идентичны возрасту циркона из соседней дайки. Габбро-долерит (обр. 7-21) отличается большей раскристаллизованностью с крупными лейстами плагиоклаза. Циркон представлен удлинёнными кристаллами (100-150  $\mu\text{m}$ ) не зональными в КЛ, реже с полосчатой зональностью. Подобно циркону из базитов Полуденного массива он нередко имеет искривленные грани и содержит твердофазные включения. Выделяется две группы по содержанию U: 384-1379 ppm и 940-3487 ppm, высокоурановые цирконы обогащены Th (1090-5259 ppm) и имеют повышенное  $\text{Th}/\text{U}$  (1.4-1.8). Отсутствует прямая корреляция между возрастом и содержанием U и Th, но высокоурановые цирконы характеризуются повышенной дискордантностью ( $D=4-13\%$ ). Вся совокупность 16 зерен имеет возраст по верхнему пересечению дискордии с конкордией  $1858 \pm 6.5$  млн лет (СКВО=0.27).

**Выводы.** В пользу магматического происхождения цирконов из палеопротерозойских базитов свидетельствует его близость по возрасту (1.87-1.85 млрд лет). Кристаллизация циркона из мафического расплава в результате насыщения обусловлена высокими концентрациями Zr. В пользу образования циркона из последних порций эволюционировавшего мафического расплава свидетельствует форма кристаллов с искривленными гранями и обилие твердофазных включений. Однородность в КЛ или зональность в виде чередования полос различной светимости отличает циркон из изученных мафических пород от циркона из кислых пород с типичной тонкой осцилляторной зональностью. В пользу поздней кристаллизации циркона из мафических пород может свидетельствовать его обогащение U и Th, отражающее накопление этих высоко несовместимых элементов в остаточном расплаве.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00265).

- [1] Гладкочуб Д.П., Писаревский С.А., Мазукабзов А.М., Седерлунд У., Склярёв Е.В., Донская Т.В., Эрнст Р.Э., Станевич А.М. Первые свидетельства палеопротерозойского позднеколлизийного базитового магматизма в Присяянском выступе фундамента Сибирского кратона // ДАН, 2013, т. 450, № 4, с. 440—444.
- [2] Мехоношин А.С., Эрнст Р.Э., Седерлунд У., Гамильтон М.А., Колотилина Т.Б., Изох А.Э., Поляков Г.В., Толстых Н.Д. Связь платиноносных ультрамафит-мафитовых интрузивов с крупными изверженными провинциями (на примере Сибирского кратона) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (5), с. 1043—1057.

## U-Th-Pb возраст монацитов редкометалльно-редкоземельных проявлений Косьюского рудного узла (Средний Тиман)

*О.В. Удоратина<sup>1</sup>, А.А. Вирюс<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Сыктывкар, Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, [taykey@yandex.ru](mailto:taykey@yandex.ru)

<sup>2</sup> Черноголовка, Институт экспериментальной минералогии РАН, [allavirus@yandex.ru](mailto:allavirus@yandex.ru)

Монацит является ведущим рудным минералом комплексных редкометалльно-торий-редкоземельных руд Косьюского рудного узла на Среднем Тимане. На выделенных рудных полях лишь на одном (Октябрьском) ведущее развитие получил ксенотим, на всех остальных – монацит (Косьюское, Бобровское, Мезенское, Щугорское).

Монацит развит в карбонатитах, породах жильного комплекса (кварц-карбонатных, кварц-полевошпатовых жилах с гетитом и гематитом), так и в фенитах развитых по первично осадочным терригенным, терригенно-карбонатным породам, а также магматическим породам (щелочным пикритам) [1-4]. Возраст пород субстрата позднерифейский, возраст магматических пород уровне 600 млн лет.

Возраст минералов рассчитывали методом CHIME (chemical Th-U-total Pb isochron method) [6] по результатам определения содержаний Th, U, Pb методом электронно-зондового рентгеноспектрального анализа. Для построения изохроны использовали программу Isoplot 3.66 [5].

Монацит образует кристаллы и наблюдается в виде мелких включений в различных минералах. Кристаллы моноклинной сингонии имеют пинакоидальный облик, уплощены по {100}, спайность совершенная по {001}. Окраска желто-коричневая. Для монацитов характерен гетеровалентный изоморфизм с Th, ( $2\text{Ce}^{3+}\text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Th}^{4+}\text{Si}^{4+}(\text{Th}[\text{SiO}_4])$ ). Монацит наблюдается нередко в сростании с торитом и имеет скрытую зональность, обусловленную неравномерным распределением элементов.

Монацит *Новобобровского* проявления встречающийся в жилах и ассоциирующий с Mn-колумбитом, содержит мас. %:  $\text{La}_2\text{O}_3$  на уровне 8,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  – 26–28,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 16–18,  $\text{ThO}_2$  на уровне. В монаците резко преобладает церий, наблюдается высокое содержание неодима и характерно постоянное присутствие тория. По химическому составу они подразделены на три группы по преобладающему катиону: 1 тип ( $\text{La}_2\text{O}_3 \geq \text{Ce}_2\text{O}_3$ ), 2 тип ( $\text{La}_2\text{O}_3 = \text{Ce}_2\text{O}_3$ ), 3 тип ( $\text{Ce}_2\text{O}_3 > \text{La}_2\text{O}_3$ ).

Значения точечных Th-U-Pb возрастов монацитов лежат в интервале 450–600 млн лет, погрешность определения (по  $2\sigma$  критерию) порядка  $\pm 92$  млн. лет. Средневзвешенная величина точечного Th-U-Pb возраста монацитов составила  $527 \pm 12$  млн лет. Возраст монацитов, полученный методом построения изохроны  $\text{ThO}_2^* - \text{PbO}$ , составил  $552 \pm 31$  млн лет [4].

Монацит *Нижне-Мезенского* проявления, встречающийся в калиевых фенитах по кварцитопесчаникам визингской свиты, ассоциирующий с Fe-колумбитом, Nb-рутилом, F-апатитом, гидрофосфатами (Fe, Al, Sr, Th, Ca) содержит мас. %:  $\text{La}_2\text{O}_3$  (7.6–17.4),  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (17.3–28),  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (7.5–12.5),  $\text{ThO}_2$  (5–14). В монаците также преобладает церий и характерно высокое содержание тория. По химическому составу они отнесены к 3 типу ( $\text{Ce}_2\text{O}_3 > \text{La}_2\text{O}_3$ ). Значения точечных Th-U-Pb возрастов монацитов лежат в интервале **697–406** млн лет, погрешность определения (по  $2\sigma$  критерию) порядка  $\pm 100$  млн. лет. Средневзвешенная величина точечного Th-U-Pb возраста монацитов составила  $564 \pm 27$  млн лет. Возраст монацитов, полученный методом построения изохроны  $\text{ThO}_2^* - \text{PbO}$ , составил  $627 \pm 103$  млн лет.

Монацит *Октябрьского* проявления, встречающийся в жильных альбититах и натровых (альбит-эгириновых) фенитах по кварцитопесчаникам светлинской свиты, ассоциирующий с ксенотимом, колумбитом, апатитом, ильменитом содержит мас. %:  $\text{La}_2\text{O}_3$  (8.7–14.4),  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (19–29),  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (8.2–12),  $\text{ThO}_2$  (4.6–18.3). В монаците резко преобладает церий, характерно постоянное присутствие тория. По химическому составу они отнесены к 3 типу ( $\text{Ce}_2\text{O}_3 > \text{La}_2\text{O}_3$ ). Значения точечных Th-U-Pb возрастов монацитов лежат в интервале **838–576** млн лет, погрешность определения (по  $2\sigma$  критерию) порядка  $\pm 140$  млн. лет. Средневзвешенная величина точечного Th-U-Pb возраста монацитов составила  $722 \pm 36$  млн лет. Возраст, полученный методом построения изохроны  $\text{ThO}_2^* - \text{PbO}$ , составил  $821 \pm 332$  млн лет.

Монацит *Верхне-Щугорского* месторождения, встречающийся в бокситоносной коре выветривания (БКС), развитой по щелочным метасоматитам (микроклин-эгирин-альбит-карбонатные (доломитовые)) и в самих щелочных метасоматитах развитых по терригенно-карбонатным отложениям рочугской и ворыквинской свит быстринской серии. Монацит ассоциирует с пироксеном (Sr-пироксен, Pb-пироксен), колумбитом (Fe-колумбит, Ti-колумбит), ильменорутилом, ксенотимом, содержит мас. %:  $\text{La}_2\text{O}_3$  (7.2–11.7),  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (19.5–25.5),  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (13–20.5),  $\text{ThO}_2$  (1–8). В монаците преобладает церий, содержание тория наименьшие из всех. По химическому составу монациты также отнесены к 3 типу ( $\text{Ce}_2\text{O}_3 > \text{La}_2\text{O}_3$ ). Значения точечных Th-U-Pb возрастов монацитов лежат в интервале **929–240** млн лет, погрешность определения (по  $2\sigma$  критерию) порядка  $\pm 300$  млн лет. Средневзвешенная величина точечного Th-U-Pb возраста монацитов составила **562 $\pm$ 43** млн лет. Возраст монацитов, полученный методом построения изохроны  $\text{ThO}_2^* - \text{PbO}$ , составил **590 $\pm$ 69** млн лет.

Значения абсолютного датирования имеют большую погрешность, что связано как с неоднородным составом монацитов, так и с особенностями выбранного метода. Полученные данные по монацитам рудных полей (млн лет): 552 $\pm$ 31 (Новобобровское), 627 $\pm$ 103 (Нижне Мезенское) 821 $\pm$ 332 (Октябрьское), 590 $\pm$ 69 (Верхне-Щугорского) сильно варьируют. Учитывая данные о предполагаемой генетической связи оруденения с комплексом щелочных пикритов и карбонатитов возраст которых 600 млн лет (ранний венд) необходимы исследования других минералов геохронометров.

Работа проводится в рамках проекта РФФИ и Республики Коми, № 20-45-110-010.

- [1] Ивенсен Ю. П. Магматизм Тимана и полуострова Канин. –М.-Л.: Наука. 1964. – 126 с.
- [2] Ковальчук Н.С., Шумилова Т.Г., Степаненко В.И. Редкоземельная минерализация в карбонатитах Косьюского массива (Средний Тиман) // ЗРМО. – 2013– N3. – С.109-132.
- [3] Костюхин М.Н., Степаненко В.И. Байкальский магматизм Канино-Тиманского региона. – Л.: Наука, 1987. – 232 с.
- [4] Удоратина О.В., Вирус А.А., Козырева И.В., Швецова И.В., Капитанова В.А. Возраст монацитов жильной серии четласского комплекса (Средний Тиман): Th-U-Pb данные // Вестник ИГ КНЦ УрО РАН. – 2015. – N3. – С.23-29.
- [5] Ludwig K.R. User's manual for ISOPLOT/EX, version 2. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center: Spec. Publ. – 1999.– N1a. – 120 p.
- [6] Suzuki K., Adachi M. The chemical Th-U-total Pb isochron ages of zircon and monazite from the gray granite of the Hida Terrane, Japan. // The Journal of Earth and Planetary Sciences. – 1991. – N38. – P.11-38.

## Возраст рудных метапесчаников (Маньхамбо, Северный Урал)

*О.В. Удоратина<sup>1</sup>, Н.Ю. Никулова<sup>1</sup>, В.Б. Хубанов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Сыктывкар, Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, [taykey@yandex.ru](mailto:taykey@yandex.ru)

<sup>2</sup> Улан-Удэ, Геологический институт СО РАН, [khubanov@mail.ru](mailto:khubanov@mail.ru)

В восточной части Маньхамбовского гранитного массива (Северный Урал) комплексное REE-U-Th-RMe оруденение локализовано в перекрывающих граниты палеонтологически «немых» метатерригенных отложениях, относительно тектонической позиции и возраста которых существуют различные точки зрения. 1) отложения, метаморфизованные в условиях зеленосланцевой фации, залегают на гранитоидах массива со стратиграфическим несогласием, представлены классическим трансгрессивным циклом и относятся к нижнепалеозойской тельпосской ( $O_{1tl}$ ) свите; 2) имеют тектонический контакт (либо рассматривается также стратиграфическое несогласие), но представлены нижнерифейской хобеинской ( $R_{1hb}$ ) свитой [1-2, 5, 7, 9]. На геологической карте последнего поколения гранитоиды Маньхамбо обозначены как среднерифейские, а перекрывающие их отложения как средне-позднерифейские [2].

Непосредственно контактируют с гранитоидами конгломераты, вверх по разрезу сменяющиеся гравелитами и песчаниками, составляющими основную часть разреза. Продуктивное оруденение локализовано в гравелитах, в метапесчаниках, содержания рудных

минералов постепенно затухает. Катаклазированная, милонитизированная и насыщенная рудными минералами толща выделена в самостоятельный рудный *тольинский* комплекс [5].

Нами проведены комплексные исследования пород из скважин участков Турман (Центральный и Южный) Верхнетольинской площади в верховьях ручьёв Парья и Горелый. Изучены минералы тяжелой фракции протолочных проб. Особое внимание уделено распределению в породе (аншлифы) рудных минералов и цирконов. Минералогические, петрографические, химические исследования проведены на базе ЦКП «Геонаука». U-Pb исследования выборки цирконов проведены методом LA ICP MS в ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). U-Pb (SHRIMP II) возраст цирконов из гранитной гальки конгломератов контактирующих с гранитами составил  $539 \pm 4$  млн лет и близок к возрастам цирконов гранитоидов региона [6]. U-Pb (LA ICP MS) значения возраста цирконов из гравелитов показали высокую дискордантность. Ниже приведены результаты исследования цирконов из песчаников верхней части разреза.

Разнозернистый полевошпат-кварцевый песчаник (обр. 374) характеризующийся неравномернозернистой бластосаммитовой структурой и массивной текстурой, содержит редкие мелкие (около 2.0 мм) гравийные зерна, сложенные микропегматитом, полевошпат-кварцевой мелкокристаллической породой, кварцем и кварцитом. Рудные минералы представлены отдельными зернами размером до 0.5 мм и мелкими (сотые доли мм) зернами, нередко образующими цепочки, сплошные слойки и пятна, где их количество достигает 10 об. %. В шлифах отмечаются единичные зерна циркона, апатита и титанита.

Цирконы в протолочной пробе представлены окатанными, полуокатанными и неокатанными зернами и кристаллами, различного размера и окраски. Проведено датирование 60 зерен, анализы с дискордантностью (D) > 10 % (6 зерен) были исключены из дальнейшего рассмотрения. Из 54 конкордантных значений 38 зерен (~ 70 % выборки) представляют раннекембрийско-раннеордовикский интервал 550–474 млн лет с максимумом плотности вероятности 510 млн лет. Появление цирконов с такими возрастными объясняется магматическими событиями, возможно, связанными как с континентальной коллизией пассивной окраины Балтики и активной окраины Арктиды, так и уральским эпиконтинентальным рифтогенезом [4]. Источниками раннекембрийско-раннеордовикских цирконов могли быть комплексы коллизионных и островодужных образований протоуралид-тиманид поздневендско-кембрийского сальнерско-маньхамбовского интрузивного [3] комплекса или гранитоиды области развития рифтовых формаций, связанные со становлением лейкогранитовых интрузий второй фазы сальнерско-маньхамбовского комплекса [8]. Наиболее древние цирконы (3 зерна) с возрастными 1800–1300 млн лет, могли произойти из комплексов, участвовавших в строении аккреационно-коллизионного Свеко-Норвежского мегаблока Балтийского щита [4].

Популяцию из 8 зерен (14 %) составляют цирконы с возрастными 466–415 млн лет. Мы полагаем, что попадание датировок цирконов в этот возрастной интервал обусловлено влиянием постдиагенетических гидротермально-метасоматических процессов, искаживших изотопные соотношения. Такой вывод подтверждается проведенными нами ранее исследованиями химического состава и внутреннего строения цирконов из этой толщи [7].

Таким образом, наиболее вероятно, что временем формирования той части терригенной толщи, вмещающей редкоземельно-уран-торий-редкометалльное оруденение тольинского комплекса (из которой отобран образец), перекрывающей гранитоиды массива Маньхамбо был конец нижнего–начало среднего ордовика.

- [1] Бороздина Г.М. О корреляции стратотипа хобеинской свиты и отложений в восточном контакте гранитного массива Мань-Хамбо // *ЕЖЕГОДНИК-2008. Тр. ИГГ УрО РАН. – 156. Екатеринбург. – 2009. – С.57-59.*
- [2] Государственная геологическая карта РФ 1:200000. Серия Северо-Уральская. Лист Р-40-VI. Объяснительная записка. – М. 1999. – 114 с.
- [3] Кузнецов Н.Б., Удоратина О.В. Возраст и геодинамические условия формирования позднекембрийских гранитоидов Вангырского массива, Приполярный Урал // *Бюл. МОИП. Отд. геологии. – 2007. – 82. – N2. – С.3-12.*

- [4] Кузнецов Н.Б., Алексеев А.С., Белоусова Е.А., Романюк Т.В., Реймерс А.Н., Цельмович В.А. Тестирование моделей поздневендской эволюции северо-восточной периферии Восточно-Европейской платформы на основе первых результатов U/Pb-изотопного датирования (LA-ICP-MS) детритных цирконов из верхневендских песчаников Юго-Восточного Беломорья // ДАН. – 2014. – 458. – №3. – С.313-317.
- [5] Павлова А.А., Нечелюстов Г.Н., Рябцев В.В. Ториевая и урановая минерализация в породах восточного контакта гранитного массива Мань-Хамбо и условия ее формирования // Разведка и Охрана Недр. – №4. – 2011. – С.57-63.
- [6] Удоратина О.В., Ларионов А.Н., Никулова Н.Ю. U-Pb возраст цирконов гранитной гальки из отложений, перекрывающих массив Маньхамбо (Северный Урал) // Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы. ИГГД РАН. – С-Пб: Springer, 2015. С.312–313.
- [7] Удоратина О.В., Никулова Н.Ю., Варламов Д.А. Минералогия и литохимия рудных метапесчаников, перекрывающих гранитный массив Мань-Хамбо (Северный Урал) // Вестник ИГ КНЦ УрО РАН. 2014. – №4(232). – С.3-9.
- [8] Удоратина О.В., Соболева А.А., Кузенков Н.А. и др. Возраст гранитоидов Маньхамбовского и Ильяизского массивов (Северный Урал): U-Pb данные // ДАН. – 2006. – 406. – 6. С.810-815.
- [9] Щербин С.С. Взаимоотношение разновозрастных гранитоидов с доордовикскими осадочно-метаморфическими породами в районе Мань-Хамбо на Приполярном Урале // Магматизм, метаморфизм и оруденение в геологической истории Урала. Свердловск. – 1974. – С.62-64.

## Возраст и геохимия базитовых субвулканитов позднепалеозойской Баргузинской провинции: свидетельства гетерогенности мантии

*В.Б. Хубанов, А.А. Цыганков, Г.Н. Бурмакина*

*Улан-Удэ, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, [khubanov@mail.ru](mailto:khubanov@mail.ru)*

Позднепалеозойская Баргузинская салическая крупная изверженная провинция имеет площадь более 500 тыс. км<sup>2</sup> и объединяет в себя Ангаро-Витимский батолит (ареал-плутон) известково-щелочных гранитоидов, а также ряд линейных рифтовых зон (поясов), протяженностью от сотен до первых тысяч километров. Рифтовые зоны маркируются широким распространением массивов субщелочных и щелочных гранитоидов, полей бимодальных вулканитов и щелочных плутонов (йолитов, щелочных габбро, лейцитовых и нефелиновых сиенитов) [1]. Нередко условия растяжения фиксируются поясами и роями субпараллельных даек. В сообщении представлены геохронологические и геохимические данные различных комплексов базитовых даек, распространенных в пределах Баргузинской провинции, которые дают дополнительную информацию о специфике и роли позднепалеозойского мантийного магматизма в ее формировании.

В Западно-Забайкальской рифтовой зоне дайки образуют пояс протяженностью 200 км в северо-восточном направлении. По составу это бимодальная трахибазальт-трахит-комендитовая субвулканическая серия. Пространственно пояс занимает промежуточное положение между двумя многофазными щелочно-гранитоидными Брянским и Хоринским плутонами, площадь каждого из которых более 1,5 тыс. км<sup>2</sup>. Возраст базитовых даек составляет 290–280 млн лет [2, 3].

В пределах Восточно-Саянской рифтовой зоне наблюдается близость формирования редкометальной минерализации с щелочными гранитоидами. Здесь же присутствуют базитовые дайки субмеридионального простирания и мелкие габброидные массивы. Одним из типоморфных объектов с базит – щелочно-гранитоидной ассоциацией является бериллиевое месторождение Снежное [4]. С помощью U-Pb LA-ICP-MS метода датированы базитовые дайки рвущих рудные структуры бериллиевое месторождения Снежное. Возраст цирконов из диабазовой (долеритовой) дайки составил 301±6 млн лет, из микрогаббровой – 297±2 млн лет.

По петрогенным компонентам базитовые дайки обеих зон отвечают трахибазальтам. Однако они сильно отличаются друг от друга по микроэлементному составу. У Восточно-Саянских базитовых даек наблюдаются относительно повышенные содержания HFSE и REE (370-400 ppm), чем у мафических пород Западного Забайкалья ( $\Sigma\text{REE} \sim 117\text{-}311$  ppm). Спектр REE характеризуется заметным обогащением легкими лантаноидами с  $\text{La}/\text{Yb}_{\text{PM}} \sim 2\text{-}24$ , тогда как базиты Западного Забайкалья имеют меньшее значение  $\text{La}/\text{Yb}_{\text{PM}} \sim 8\text{-}20$ . Также на графике спайдерграмм нормированных составов у Восточно-Саянских базитовых даек слабо выражены Ta-Nb минимумы.

Подобные геохимические особенности базитовых даек предполагают генерацию мафических магм из астеносферного мантийного источника для Восточно-Саянской рифтовой зоны и из литосферной модифицированной мантии для Западно-Забайкальской зоны Баргузинской провинции.

Исследования выполнены в рамках выполнения проектов Фундаментальных научных исследований № гос. рег. АААА-А21-121011390002-2, Комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН и гранта РФФИ (№ 20-05-00344). Геохронологические работы приведены в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ.

- [1] Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Ernst R.E. Intraplate geodynamics and magmatism in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2014. V. 93. P. 158–179.
- [2] Хубанов В.Б. Бимодальный дайковый пояс центральной части Западного Забайкалья: геологическое строение, возраст, состав и петрогенезис. Автореф. дис. канд. геол. -мин. наук. Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2009. 23 с.
- [3] Буянтуев М.Д., Хубанов В.Б., Врублевская Т.Т. U-Pb LA-ICP-MS датирование цирконов из субвулканитов бимодальной дайковой серии Западного Забайкалья: методика, свидетельства позднепалеозойского растяжения земной коры // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 2. С. 369-384.
- [4] Ярмолюк В.В., Лыхин Д.А., Шурига Т.Н., Воронцов А.А., Сугоракова А.М. Возраст, состав пород, руд и геологическое положение бериллиевого месторождения Снежное: к обоснованию позднепалеозойской Восточно-Саянской редкометальной зоны (Россия) // *Геология рудных месторождений*. 2011. Т. 53. № 5. С. 438–449.

## **Нарушение замкнутости Rb-Sr изотопной системы во флогопите из карбонатита массива Одихинча (Маймеч-Котуйская провинция, Сибирь)**

*А.Р. Цховребова, Ю.А. Костицын*

*Москва, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, [tsann3@gmail.com](mailto:tsann3@gmail.com),  
[kostitsyn@geokhi.ru](mailto:kostitsyn@geokhi.ru)*

Маймеч-Котуйская ультраосновная щелочная провинция расположена на северной окраине Сибирской платформы, к западу от Анабарской антеклизы [1]. В состав провинции входит более сорока щелочно-карбонатитовых интрузивов.

Магматизм в провинции развивался в узком интервале времени 252 – 250 млн лет [2, 3, 4]. В основании её вулканической толщи залегают щелочные базальты Арыджангской свиты, возраст которых составляет  $251.7 \pm 0.4$  млн лет [2],  $252.1 \pm 0.5$ ,  $252.2 \pm 0.6$  и  $250.1 \pm 0.9$  млн лет [3] по результатам исследований U-Pb изотопной системы.

При определении возраста самого крупного массива Маймеч-Котуйской провинции – Гулинского – возникли сложности. По минеральным фракциям циркона и бадделеита из карбонатита Гулинского интрузива U-Pb методом [3] получили дискордантные результаты. Возраст карбонатита в упомянутой работе рассчитан только по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  и составляет  $250.2 \pm 0.3$  млн лет.

В настоящей работе приводятся результаты изотопно-геохронологических исследований Rb-Sr системы во флогопите из карбонатита массива Одихинча – второго по величине интрузива Маймеча-Котуйской провинции. Это многофазная интрузия, представленная ультраосновно-щелочными породами и карбонатитами [1].

Мы предприняли попытку определить возраст карбонатита по флогопиту Rb-Sr изотопным методом. Образец карбонатита Od-16-19 представляет собой среднезернистую породу, сложенную преимущественно кальцитом с небольшим количеством флогопита и редкого перовскита. При Rb-Sr исследовании нами были проанализированы отдельные кристаллы кальцита и более десятка кристаллов флогопита.

Изотопный анализ элементов проводили на твердофазном масс-спектрометре Triton TE в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН.

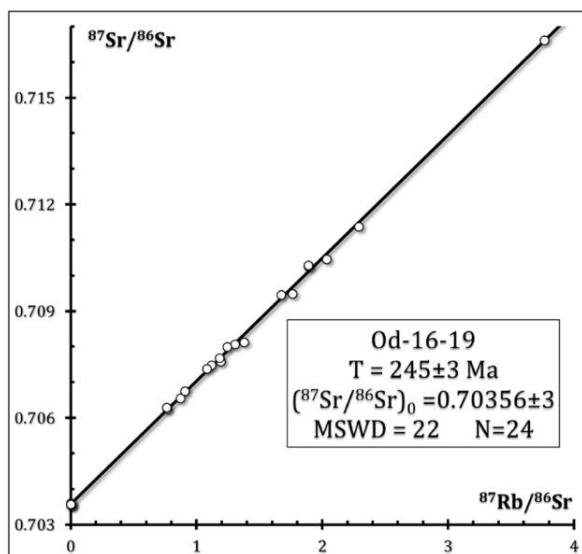


Рис. 1. Изохронная диаграмма для карбонатита Od-16-19 по отдельным зёрнам кальцита и флогопита.

Средний квадрат взвешенных отклонений (СКВО) по полученным результатам измерений равен 22, что определённо указывает на нарушение замкнутости Rb-Sr изотопной системы минералов (рис.1). Можно предположить, что нарушение изохроны связано с длительным периодом кристаллизации карбонатита, или что в формировании пород имело место участие вещества более неоднородного состава.

- [1] Егоров Л.С. Мелилитовые породы Маймеча-Котуйской провинции: Издательство Недр, Ленинградское отделение. – 1969. – 247 с.
- [2] Burgess S.D., Bowring S.A. (2015) High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction. // *Science advances*. – 1 (7), – e1500470.
- [3] Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Y., Fedorenko V.A., Davis D., Trofimov V. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian–Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2003. – 214 (1-2). – С. 75-91.
- [4] Kogarko L.N., Zartman R.E. A Pb isotope investigation of the Guli massif, Maymecha-Kotuy alkaline-ultramafic complex, Siberian flood basalt province, Polar Siberia. *Mineralogy and Petrology*. – 2007. – 89 (1). – P. 113-132.



## Новые результаты U-Pb датирования обломочного циркона из пограничных пермо-триасовых разрезов восточного борта Московской синеклизы

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

<sup>1</sup> Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т

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

Мы представляем результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочного циркона из 12-ти проб песчаников, отобранных из пограничных пермо-триасовых пород восточного борта Московской синеклизы. Объектами исследования являются шесть представительных разрезов региона (рис. 1): Жуков овраг (4 пробы), Асташиха (3 пробы), Недуброво (2 пробы), Клыково (2 пробы) и Балебиха (1 проба). Следует отдельно отметить, что разрез Жуков овраг является опорным для границы перми-триаса Русской плиты.



Рис. 1. Географическое положение изученных разрезов.

Рубеж палеозоя и мезозоя отвечает масштабной биогеосистемной перестройке, в частности, для территории Восточно-Европейской платформы. Отсутствие регионального перерыва на границе перми и триаса [1], а также континентальные обстановки осадконакопления предопределили значительные трудности в расчленении и корреляции разрезов пограничного пермо-триасового континентально-терригенного комплекса Русской плиты.

Палеогеографическая обстановка осадконакопления в бассейне Московской синеклизы на рубеже перми и триаса имеет длительную историю изучения (Н.И. Строк, И.С. Трофимова, В.К. Голубев, М.П. Арефьев, В.Н. Кулешов и др.) и продолжает уточняться до сих пор. Для решения данной задачи задействовались разнообразные методы – фациальный анализ, анализ минералов тяжелой фракции, выявление закономерностей поведения изотопов кислорода и углерода. Всеми авторами отмечаются многочисленные периодические эпизоды похолодания/потепления и связанная с ними гумидизация/аридизация климата, а также неоднократные перестройки речных систем и выраженная конкуренция нескольких питающих провинций (источников сноса), поставляющих обломочный материал на платформу. Тем не менее, следует учесть, что только сравнительно недавние исследования (например, [2]) выполнялись на основе актуальной

унифицированной стратиграфической схемы пермской системы, что накладывает значительные ограничения на анализ и интерпретацию результатов более ранних работ. Метод изотопного датирования зерен обломочного циркона при исследованиях пермо-триасового комплекса Русской плиты ранее систематически не применялся.

Генеральной целью настоящего исследования является реконструкция палеогеографической обстановки в центральных районах Русской плиты в пограничное пермо-триасовое время, а также получение дополнительных ограничений для надежной корреляции соответствующих континентально-терригенных толщ.

U-Pb LA-ICP-MS датирование циркона проводилось на базе четырёх институтов: ИГМ СО РАН (Новосибирск), ИГГД РАН (Санкт-Петербург), ИЗК СО РАН (Иркутск) и ГИН СО РАН (Улан-Удэ). Всего было получено 1444 оценки изотопного возраста, из них 1268 с дискордантностью менее 10%. Последние находятся в широком временном диапазоне от архея до позднего палеозоя и формируют либо одномодальное (с характерными возрастными около 350-370 млн. лет), либо тримодальное распределение (с модами около 350-370, 1000-1100 млн. лет, а также около 1500-1800 млн. лет). Одномодальный тип распределения U-Pb возрастов зёрен обломочного циркона характерен, в первую очередь, для нижнетриасовых интервалов разрезов, а для некоторых верхнепермских отложений фиксируется поочередная смена двух выделенных типов. Этот вывод, в целом, подтверждает имеющиеся представления о существенной реорганизации питающих провинций Московской синеклизы в позднепермско-раннетриасовое время и свидетельствует о «соперничестве» различных источников сноса в течение поздней перми.

- [1] Golubev V.K. Permian-Triassic boundary stratigraphy of the East European platform. The State of the Art: no evidence for a major temporal hiatus. Newsletter of subcommission on Permian Strtigraphy, 2019. P. 33-36.
- [2] Арефьев М.П., Голубев В.К., Кулешов В.Н. и др. Комплексная палеонтологическая, седиментологическая и геохимическая характеристика терминальных отложений пермской системы северо-восточного борта Московской синеклизы. Статья 1. Бассейн реки Малая Северная Двина // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2016. Т. 91, № 1. С. 24–49.

### **Этапы формирования орогенных золоторудных месторождений «сухоложского» типа (Бодайбинский район, Северное Забайкалье, Россия): Rb-Sr и $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ геохронологические данные**

*А.В. Чугаев<sup>1</sup>, И.В. Чернышев<sup>1</sup>, А.Е. Будяк<sup>2</sup>, Ю.О. Ларионова<sup>1</sup>, Ю.И. Тарасова<sup>2</sup>, А.В. Травин<sup>3</sup>,  
И.В. Рассохина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
[vassachav@mail.ru](mailto:vassachav@mail.ru)

<sup>2</sup> Иркутск, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, [budyak@igc.irk.ru](mailto:budyak@igc.irk.ru)

<sup>3</sup> Новосибирск, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, [travin@igm.nsc.ru](mailto:travin@igm.nsc.ru)

Бодайбинский рудный район (Северное Забайкалье), расположенный в пределах Байкало-Патомского складчатого пояса, входит в число крупнейших золотодобывающих регионов мира. За почти 200 летнюю историю его освоения здесь добыто более 1500 т золота. Сейчас, ежегодная добыча превышает 20 т. Основные запасы коренного золота в Бодайбинском районе (БР) связаны с орогенными месторождениями, локализованными среди неопротерозойских метаосадочных пород черносланцевой формации. Сходство этих месторождений по геологическому строению и минеральному составу руд позволила исследователям объединить их в единый «сухоложский» тип.

Несмотря на обширный комплекс геологических, геохимических и изотопных данных по рудной минерализации месторождений «сухоложского» типа, единого мнения среди исследователей об их генезисе нет. Существующие разногласия о генезисе месторождений «сухоложского» типа во много объясняются тем, что ключевым и не решенным в полной мере

вопросом до сих пор остается их возраст. Имеющиеся геохронологические данные весьма ограничены и определяют широкий (от ордовика до карбона) разброс значений. Большинство получены для месторождения Сухой Лог. Для других месторождений «сухоложского» типа данные о возрасте отсутствуют.

В докладе представлены результаты комплексного Rb-Sr и  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  геохронологического изучения четырех месторождений «сухоложского» типа Вернинское, Голец Высочайший, Ыкан и Ожерелье, которые отличаются по масштабу проявленной золоторудной минерализации, геохимическим и минералогическим особенностям. Датировались ранние прожилково-вкрапленные руды, имеющие основное промышленное значение для БР, и поздние золотоносные кварцевые жилы. Подробное изложение методических подходов и полученных результатов приведено в нашей работе [1].

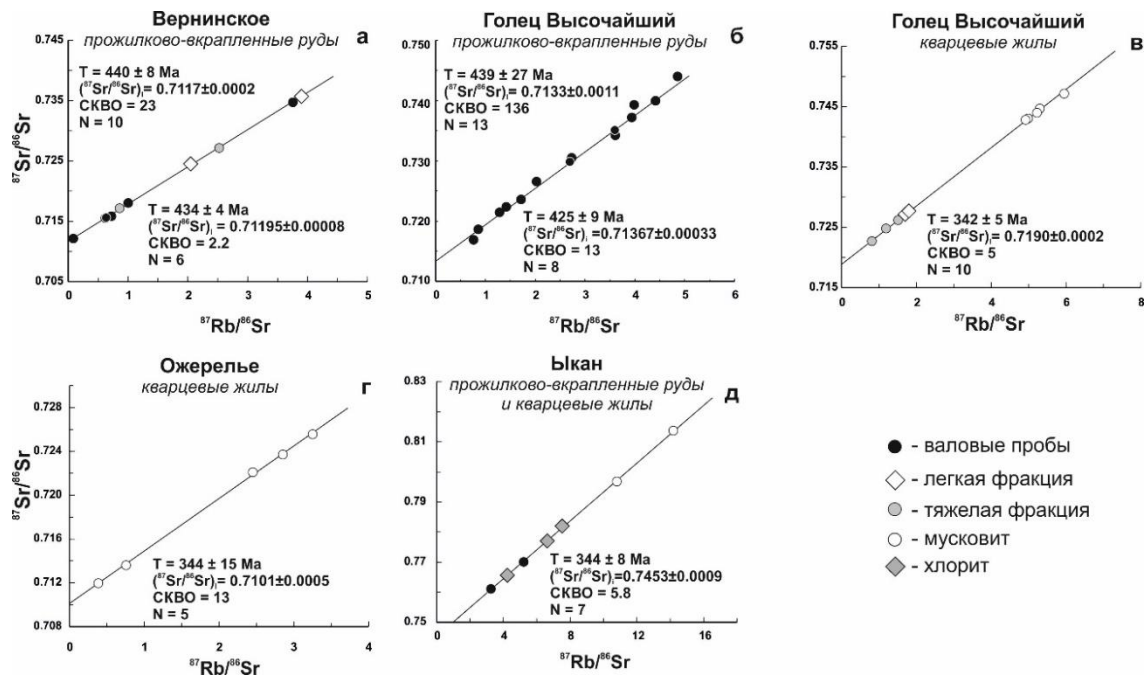


Рис. 1. Rb-Sr диаграммы для золоторудных месторождений «сухоложского» типа (Бодайбинский район, Северное Забайкалье).

Rb-Sr геохронологическое изучение (рис. 1) ранних прожилково-вкрапленных руд и поздних кварцевых жил проведено по валовым пробам и минеральным фракциям. Выделяется две группы Rb-Sr возрастов. Первая группа объединяет силурийские возрасты, которые были получены для прожилково-вкрапленных руд месторождений Вернинское ( $434 \pm 4$  млн лет) и Голец Высочайший ( $425 \pm 9$  млн лет). Они оказались весьма близки, хотя и несколько моложе, к ранее опубликованной Rb-Sr датировке ( $454 \pm 6$  млн лет) прожилково-вкрапленных руд месторождения Сухой Лог. Вторая группа представлена хорошо согласующимися в пределах погрешности каменноугольными возрастными. Они получены для поздних кварцевых жил месторождений Голец Высочайший ( $342 \pm 5$  млн лет), Ожерелье ( $344 \pm 15$  млн лет), а также для прожилково-вкрапленной и жильной минерализации месторождения Икан ( $344 \pm 8$  млн. лет). В свою очередь, приведенные выше датировки совпадают с Rb-Sr возрастом ( $326 \pm 14$  млн. лет) поздних кварцевых жил месторождения Сухой Лог.

$^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  данные получены для двух образцов мусковита из поздних кварцевых жил месторождений Голец Высочайший и Ожерелье. Их  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возрастные спектры имеют сложную форму («лестница вниз» и «лестница вверх»), что указывает на нарушение замкнутости K-Ar изотопной системы. В обоих спектрах выделяются протяженные плато, которым соответствуют Ar-Ar возрасты:  $331 \pm 9$  млн лет для месторождения Голец Высочайший и  $323 \pm 10$  млн лет для месторождения Ожерелье. Эти  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датировки удовлетворительно согласуются с Rb-Sr возрастными данными, свидетельствующими о среднекарбонном возрасте золотоносных кварцевых жил.

Сходство возрастов для одного и того же типа руды месторождений, расположенных в десятках километрах друг от друга и локализованные в различных тектонических блоках и стратиграфических горизонтах неопротерозойских метасадочных толщ, свидетельствует о наличии в истории их формирования двух рудообразующих событий: силурийского (450-430 млн лет назад) и каменноугольного (340-330 млн лет назад). В палеозойской геологической истории Байкало-Патомского складчатого пояса на ордовикско-силурийский период, в течение которого образовывались прожилково-вкрапленные руды, происходила аккреция островных дуг к южной окраине Сибирского кратона, что сопровождалось метаморфизмом и образованием син-метаморфических гранитоидных интрузий. Формирование поздних кварцевых жил по времени совпадает с постороженным развитием Байкало-Патомского пояса. В это время происходит становление в регионе крупномасштабного Ангаро-Витимского гранитоидного батолита.

- [1] Chugaev, A.V., Budyak, A.E., Larionova, Yu.O., Chernyshev, I.V., Travin, A.V., Tarasova, Yu.I., Gareev, B.I., Batalin, G.A., Rassokhina, I.V., Oleinikova, T.I.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – 144. 104855.

## **Rb-Sr геохронология многофазного гранитного массива Раумид (Южный Памир): результаты изучения породообразующих минералов**

*К.Н. Шатагин*

*Москва, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
[shat@igem.ru](mailto:shat@igem.ru)*

Гранитный массив Раумид (Раумидский массив) расположен на Южном Памире в пределах Рушанско-Пшартской зоны. По данным детального картирования массив сформировался в эоцене в результате восьми фаз внедрения гранитной магмы, два из которых – первое и четвертое – произошли из глубины, а остальные носили характер внутрикамерного перемещения расплава [1]. Интерес к массиву Раумид долгие годы определяли два обстоятельства: многофазное внутреннее строение, сходное с таковым многочисленных палеозойских массивов аналогичного состава в Центральном и Восточном Казахстане, и впечатляющая вертикальная обнаженность, позволяющая проследить черты строения и состава пород отдельно взятых фаз становления на 1-1.5 тыс. м по вертикали [2].

Проведенное в 2006 г. LA-ICP-MS U-Pb датирование циркона позволило заключить, что граниты всех фаз становления массива имеют одинаковый возраст, составляющий  $35,5 \pm 0,9$  млн лет [3]. U-Pb возраст циркона стал репером для оценки надежности и геологического смысла результатов Rb-Sr датирования породообразующих (как магматических, так и постамагматических) минералов раумидских гранитов.

Всего было получено 11 Rb-Sr датировок: шесть – по биотиту, три – по мусковиту и две – по K-Na полевоому шпату. При этом только одна Rb-Sr датировка получена по полноценной изохроне, остальные – по парам «плагиоклаз (или флюорит) – высокорубидиевый минерал». Последнее обстоятельство создаёт проблему для прямого сравнения датировок. Тем не менее, как изохронная датировка, так и семь датировок по парам минералов, безукоризненно попадают в створ, задаваемый погрешностью U-Pb возраста циркона. Средний возраст этих образцов составляет  $35,7 \pm 0,5$  млн лет. Три датировки (по биотиту и двум фракциям мусковита) явно отличаются в сторону более молодых значений, средний возраст этих образцов составляет  $33,3 \pm 0,4$  млн лет.

Охарактеризованные Rb-Sr изотопные данные хорошо согласуются с результатом U-Pb датирования циркона, однако имеют внутренние противоречия. Так, в группу минералов раумидских гранитов с возрастом  $35,7 \pm 0,5$  млн лет попал один явно постамагматический мусковит. Кроме этого, один биотит, рассматриваемый как минерал магматического происхождения, попал в группу постамагматических минералов с возрастом  $33,3 \pm 0,4$  млн лет.

Полученные Rb-Sr геохронологические результаты будут рассмотрены в докладе в контексте сложившихся на настоящий момент представлений об особенностях формирования и преобразования гранитов Раумидского массива.

- [1] Волков В.Н., Негрей Е.В. Строение плутона Раумид и проблема становления гранитных интрузивов // Сов. геология. 1974. № 3. С. 46–59.
- [2] Волков В.Н. Генезис вертикальной зональности Раумидского гранитного плутона (Южный Памир). // Известия АН СССР. Сер. Геол. 1990. № 6. С. 52–63.
- [3] Костицын Ю.А., Белоусова Е.А., Волков В.Н., Шатагин К.Н. Сравнительные исследования изотопного и элементного состава цирконов и материнских гранитов Раумидского массива // Материалы XVIII симпозиума по геохимии изотопов им. А.П. Виноградова, Москва, 14–16 ноября 2007 г. Москва: ГЕОХИ РАН. 2007. С. 131–132.

### **Метаморфические «глыбы» складчатого обрамления Сибирской платформы: интерпретация новых изотопно-геохронологических данных**

*С.И. Школьник<sup>1</sup>, Е.Ф. Летникова<sup>2</sup>, А.В. Иванов<sup>2</sup>, Е.И. Демонтерова<sup>1</sup>, В.А. Беляев<sup>3</sup>,  
Л.З. Резницкий<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Иркутск, Институт земной коры СО РАН, [sink@crust.irk.ru](mailto:sink@crust.irk.ru)

<sup>2</sup> Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН, [efletnik@igm.nsc.ru](mailto:efletnik@igm.nsc.ru)

<sup>3</sup> Иркутск, Институт геохимии СО РАН, [belyaev\\_vasya@mail.ru](mailto:belyaev_vasya@mail.ru)

В течение многих десятилетий степень метаморфизма являлась главным критерием оценки возраста палеонтологически «немых» метаморфических комплексов. Уровень метаморфизма, превышающий зеленосланцевую фацию, был достаточным основанием для отнесения пород к докембрию. Этот же критерий применялся при тектоническом районировании, находясь в основе выделения докембрийских выступов фундамента, массивов или «глыб». Подход к интерпретации метаморфической неоднородности начинает меняться с 60-70 гг. прошлого века вследствие введения в практику геологических исследований метаморфического картирования, а также становятся более доступными различные методы изотопного датирования, и разрабатывается методология их применения к метаморфическим комплексам.

Складчатое обрамление Сибирской платформы изобилует по количеству выделяемых в его пределах массивов, глыб, выступов и комплексов высокометаморфизованных пород, относящихся прежде к выступам фундамента кратона или фрагментам древних континентальных блоков (палеомикроконтинентов). Так, гранулитовый метаморфизм пород Слюдянского и Китойкинского блоков на начальных этапах исследования этих структур, позволял относить их к комплексам фундамента древних платформ. И только проведенные комплексные изотопные исследования позволили установить палеозойский возраст метаморфизма и природу слагающих толщ [1 и др.]. Основными тектоническими элементами южного складчатого обрамления платформы, в составе которых выделялись блоки с докембрийским фундаментом являются Тувино-Монгольский (ТММ) и Баргузинский палеомикроконтиненты. В составе обрамляющих с севера ТММ толщ венд-кембрийской Кузнецко-Таннуольской [2] островодужной системы также выделяются «глыбы» докембрийских пород – Харальская и Агойская, природа которых остается неизвестной. К фундаменту Тувино-Монгольского палеомикроконтинента, помимо Гарганской, относились разрозненные выступы пород повышенной степени метаморфизма – Шутхулайская, Бутугольская глыбы, в разное время также включался Сангиленский блок, а в пределах Тункинских гольцов еще и Шумацкая и Хонголдойская глыбы. Для большей части выделявшихся докембрийских массивов, проведенные геологические, петрографические и петрохимические исследования показали, что метаморфические породы, слагающие Шумацкую, Хонголдойскую, Шутхулайскую глыбы являются полными литологическими, стратиграфическими и возрастными аналогами позднеопротерозойских

неметаморфизованных толщ [3 и др.]. В данной работе будут рассмотрены проведенные авторами изотопные исследования метаморфических пород некоторых «глыб» в пределах южного складчатого обрамления Сибирской платформы.

К настоящему времени по породам «глыб», являющихся как бы фундаментом Баргузинского палеомикроконтинента, получен значительный пакет изотопно-геохронологических данных. Установлено, что возраст синтетектонических гранито-гнейсов Амалатского «массива» оценен в  $790 \pm 6$  млн лет [4], а детритовых цирконов из слюдяных сланцев Ципиканского выступа находится в пределах диапазона 847-781 млн лет [5]. Исследование детритовых цирконов из гнейсов Гаргинской «глыбы» показало, что большая часть проанализированных зерен магматических цирконов определяет возрастной диапазон их образования в интервале 680-840 млн лет, с пиком на 810 млн лет. Модельный Nd возраст гранито-гнейсов варьирует в интервале 2.6-2.8 млрд лет, а величина  $\epsilon_{Nd}(700)$  от  $-14.1$  до  $-17.2$ , что указывает на участие в их образовании коровых источников архейского возраста.

В зоне распространения образований ТММ исследовались метаморфические породы Бутугольской глыбы. Установлено, что средневзвешенный возраст гнейсов, полученный по 133 значениям изотопного состава циркона, отвечает  $1009.5 \pm 8.1$  млн лет. Это значение возраста отвечает времени кристаллизации протолита гнейсов глыбы. Основной диапазон возрастов детритовых цирконов из пробы биотитового гнейса (76 определений) отвечает 1300-1700 млн лет и единичными значимыми пиками на 890, 1050, 1900, 2007 млн лет. Хотя возрастной диапазон формирования пород Бутугольской глыбы условно совпадает с временем существования Дунжугурской дуги (800-1034 млн лет) [6], эти образования не могут рассматриваться как источники сноса, а полученные по детритовым цирконам возрастные интервалы до настоящего времени в толщах ТММ не устанавливались.

Методом LA-ICP-MS по цирконам были получены первые данные о возрасте толщ Харальского метаморфического выступа. Вулканиды нижней части харальской свиты могли образоваться в позднем рифее-венде не древнее 730 млн лет, а архейский и палеопротерозойский возраст ксеногенных цирконов из кислых туфов верхней части харальской свиты является прямым свидетельством присутствия в строении Харальского блока древней докембрийской континентальной коры. Среди источников сноса метатерригенных пород Харальского блока явно угадывается присутствие пород континентальной коры с возрастом древнее 1.0 млрд лет ( $T_{Nd} (DM-2st) = 1.0-1.8$  млрд лет и варьирующей величиной  $\epsilon_{Nd} (0.7) = +3.0 - +4.7$ ) до  $\epsilon_{Nd} (0.7) = -2.4 - -4.8$  в верхней части свиты.

Таким образом, возрастной диапазон детритовых цирконов и изотопный Sm-Nd состав из пород «глыб» складчатого обрамления Сибирской платформы, как показали наши исследования, дает принципиально новую информацию о природе, источниках сноса и геодинамических условиях формирования протолитов толщ, что позволяет устанавливать основные стадии эволюции в развитии этих тектонических структур.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 20-05-00560 и РНФ № 19-17-00099.

- [1] Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Резницкий Л.З. и др. О возрасте метаморфизма слюдянского кристаллического комплекса (Южное Прибайкалье): результаты U-Pb геохронологических исследований // Петрология. 1997. – 4. – 227-239.
- [2] Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 1996. – 1. – 63-81.
- [3] Летникова Е.Ф., Вещева С.В., Прошенкин А.И., Кузнецов А.Б. Неопротерозойские терригенные отложения Тувино-Монгольского массива: геохимическая корреляция, источники сноса, геодинамическая реконструкция // Геология и геофизика. 2011. – 12. – 2110-2121.
- [4] Рыцк Е.Ю., Шалаев В.С., Ризванова Н.Г. и др. Олокитская зона Байкальской складчатой области: новые изотопно-геохронологические и петрогеохимические данные. Геотектоника. – 2002. – 1. – 29-41.
- [5] Руженцев С.В., Минина О.Р., Некрасов Г.Е. и др. Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция. Геотектоника. 2012. – 2. – 3-28.

- [6] Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М.: ПРОБЕЛ-2000, 2004. 192 с.

## Гранитоиды Нодягинского массива (Полярный Урал): U-Pb (SIMS) данные

*А.С. Шуйский<sup>1</sup>, О.В. Удортина<sup>1</sup>, М. Гроув<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Сыктывкар, Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, [self88@yandex.ru](mailto:self88@yandex.ru)

<sup>2</sup> Стэнфорд, Стэнфордский Университет, [marty.j.grove@gmail.com](mailto:marty.j.grove@gmail.com)

Гранитоиды Нодягинского (Поетарского) массива выходят на поверхность в руч. Паатарка бас. р. Щучьей на Полярном Урале. Массив в плане имеет пластообразную форму, (1×8.5 км), ориентирован согласно с вмещающими отложениями минесейшорской свиты (R<sub>2mn</sub>). На картах нового поколения [1] гранитоиды Нодягинского массива рассматриваются в составе сядатаяхинского гранитового комплекса (γV-Є<sub>1s</sub>). Возраст гранитоидов (U-Pb метод по единичным зернам циркона (SHRIMP II, ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург) оценивается 561–558 млн лет [2].

Нами породы массива опробованы (в центральной части массива) при проведении тематических работ в 2014 г., также использована коллекция В.Н.Охотникова (архив ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) и опубликованные данные предшественников.

Гранитоиды представлены гранитами и лейкогранитами. Все породы окварцованы и альбитизированы, на макроуровне все породы имеют катаклазированные и милонитизированные, иногда массивные и гнейсовидные текстуры. Микроструктуры гранобластовые и лепидогранобластовые.

*Граниты* среднезернистые розоватого и зеленоватого облика, массивные, гнейсовидные с порфирированной структурой содержат (об. %) кварц (30-45), плагиоклаз (An<sub>0-10</sub>) (30) и КПШ (M<sub>i</sub>) (25-30), слюда (мусковит) (5-10). Акцессорные минералы представлены титанитом, цирконом, апатитом, рудные магнетитом, вторичные – эпидотом. В порфиробластах КПШ размер (0.1-2 см), основной матрикс сложен Pl+Kfs+Q+Mus. Химический состав (мас. %): SiO<sub>2</sub> от 68 до 83, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) от 5.2 до 8.6, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 0.3-1.2. Породы в основном калиевые насыщенные глиноземом (ASI = 0.8-1.3). По петрохимической классификации породы относятся к семейству гранитов. Граниты характеризуются также низким суммарным содержанием РЗЭ – 86–164 г/т. Спектры распределения РЗЭ со слабо пологим наклоном с преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми ((La/Yb)<sub>N</sub> – 2-13), характерна отрицательная европиевая аномалия (Eu/Eu\* – 0.1-0.5). На мультидиаграммах (нормированы на примитивную мантию) фиксируется в целом обогащение крупно-ионными элементами по отношению к высокозарядным, отмечаются минимумы Nb, Sr, Eu, Ti, максимумы Rb, K, Pb, Gd.

*Лейкогранит* светло серые с массивной (нередко с директивной) текстурой, средне-мелкозернистые с порфирированной структурой. Состоят (об. %) кварц (40-55), плагиоклаз (An<sub>0-10</sub>) (30-40) и КПШ (M<sub>i</sub>) (10-20), слюда (мусковит) (5-7). Акцессорные минералы представлены титанитом, цирконом, апатитом, рудные магнетитом и галенитом, вторичные эпидотом и кальцитом. Порфиробласты КПШ (0.2-1 см) погружены в матрикс Pl+Kfs+Q+Mus. Химический состав (мас. %): содержания SiO<sub>2</sub> (82–88), сумма щелочей (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) – 4.8-6.4, (Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O) – 0.4-9, породы умеренно-калиевые и умеренно-натровые, насыщенные глиноземом (ASI = от 1.24 до 1.6). По петрохимической классификации породы относятся к семейству лейкогранитов. Породы характеризуются низким суммарным содержанием РЗЭ 8–23 г/т, спектры распределения РЗЭ со слабо пологим наклоном с преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми ((La/Yb)<sub>N</sub> – 3-4.7), характерна положительная европиевая аномалия (Eu/Eu\* – 1.3-3.3). На мультидиаграммах (нормированы на примитивную мантию) фиксируется в целом обогащение крупно-ионными элементами по отношению к высокозарядным, отмечаются минимумы Nb, Sr, Sm, Ti, максимумы Rb, K, Pb, Zr.

По субстратной классификации гранитоиды Нодягинского массива относятся к I – типу гранитов (лейкограниты), часть точек смещается в поле гранитоидов А-типа (граниты). На

диаграммах Nb-Y, Ta-Yb, Rb-(Y+Nb), (Yb+Ta) фигуративные точки попадают в область островодужных образований (лейкограниты), часть точек смещается в поле гранитоидов А-типа (граниты).

Для датирования отобрана проба лейкогранита (А45-14). Определения возраста цирконов проведены U-Pb (SIMS) методом на приборе SHRIMP RG в Стэнфордском Университете, США, методика исследований приведена в работе [4].

Цирконы (200-100 мкм) прозрачные, бесцветные с кремовым оттенком и леденцовой поверхностью. В выборке наблюдаются кристаллы призматического габитуса с хорошими головками и их обломки, Ку 1:2. В цирконе наблюдаются черные мелкие включения. В катодоллюминесцентных лучах в единичных кристаллах наблюдается осциляторная зональность. Содержание Th/U варьирует от 0.5 до 1.1.

Возраст цирконов, рассчитанный по величине отношения  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , был определен в 6 точках. Диапазон возрастов от 582 до 536 млн лет. Конкордантный возраст составил  $545.2 \pm 27.4$  млн лет (СКВО=1.5). Модельная температура кристаллизации циркона, оцененная по содержанию Ti в цирконе при  $a_{\text{SiO}_2}=1$  и  $a_{\text{TiO}_2}=0.7$ , варьирует от 760 до 710°C (единичное значение 853°C).

Содержания элементов-примесей в цирконах близки, спектры распределения соотносятся со спектрами циркона магматического генезиса, включая параметры Ce-, Nd и Eu-аномалий.

Таким образом, для цирконов из лейкогранитов Нодзьягинского (Поетарского) массива установлены новые возрастные, геохимические и термометрические данные. Образование пород происходило в позднем венде раннем кембрии при коллизионных процессах формирования тиманид.

- [1] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская серия Лист Q-41-I, II (Лаборовая). Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. – 2009. – 372 с.
- [2] Мельгунов А.Н. Основные черты геологического строения и минерально-сырьевой потенциал Северного, Приполярного и Полярного Урала / А.Н. Мельгунов, В.П. Водолазская, А.В. Жданов, Н.Г. Берлянд и др. – СПб: Изд-во ВСЕГЕИ. – 2010. – 274 с.
- [3] Шуйский А.С. Петрохимическая характеристика Нодзьягинского массива (Полярный Урал) // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 27-й науч. конф. – Сыктывкар: Геопринт. – 2018. – С.258-264.
- [4] Shuyskiy A.S., Udoratina O.V., Miller E.L., Coble M.A. Granites of the Gerdiz massif (Polar Urals): new data // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2018. – N12. – С.23-30.

## $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ исследование миларита из Ермаковского F-Ве месторождения (Западное Забайкалье, Россия)

Д.С. Юдин<sup>1</sup>, Б.Б. Дамдинов<sup>2</sup>, Л.Б. Дамдинова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирск, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, [yudin@igm.nsc.ru](mailto:yudin@igm.nsc.ru)

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

Ермаковское F-Ве месторождение, крупнейшее в России и одно из крупнейших в мире месторождений бериллия, расположено в Западном Забайкалье в 140 км восточнее г. Улан-Удэ. Происхождение бериллиевого оруденения связывается со штоком лейкократовых эгиринсодержащих субщелочных гранитов [1].

Имеющиеся данные по возрасту магматических пород, присутствующих в рудном поле месторождения, опубликованных в работе [2], позволили выделить дорудные магматические породы: габброиды и гнейсовидные граниты (333 – 316 млн. лет); дайки основного и кислого состава – трахидолериты, трахиандезиты, трахириолиты (325 ± 3 млн. лет). Рудоносные лейкократовые эгиринсодержащие граниты (226 ± 1 млн. лет, по данным U-Pb датирования методом TIMS, 224 млн. лет по данным Rb-Sr изохронного датирования) образуют слабо эродированный (0.01 км<sup>2</sup> на поверхности), расширяющийся с глубиной выступ Ермаковской



интрузии. Рудные тела группируются вокруг этого выступа на удалении от 100 до 400 м, но в самих гранитах F-Be оруденение не обнаружено, хотя их локальная флюоритизация сопровождается 2-4 кратным повышением содержания Be. Возраста руд, определенные Rb-Sr изохронным методом по калиевому полевому шпату и флюориту, флогопиту и флюориту, имеют значения  $225.5 \pm 1.3$  и  $225.9 \pm 1.2$  млн. лет соответственно. Позднее, было проведено U-Pb датирование апатита из руд Ермаковского месторождения и получены две близкие по возрасту датировки –  $225.1 \pm 6.2$  и  $219 \pm 1.2$  млн лет [3].

Пострудный магматизм представлен единичной дайкой фельзитов, имеющей секущие взаимоотношения с другими породными комплексами, и лишенной признаков гидротермальной проработки в местах пересечения ею рудных залежей. Возраст фельзитов определен Rb-Sr методом по 6 валовым пробам и составляет  $161 \pm 5$  млн. лет [2]. Хотя ранее была опубликована Rb-Sr датировка в 184 млн. лет [4].

Главным бериллиевым минералом руд Ермаковского месторождения является фенакит ( $\text{BeSiO}_4$ ), отложение которого происходило на ранней стадии рудообразования, тогда как миларит-бавенитовая минерализация формировалась на самой поздней сульфидно-карбонатной стадии [5]. Четкого структурного перерыва между стадиями не обнаружено, но наблюдается замещение раннего фенакита агрегатами миларита, бавенита и кальцита.

С целью исследования эволюции Ермаковского месторождения было проведено  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование (в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН) по калиевому полевому шпату (КПШ) и милариту – калийсодержащему водному силикату бериллия ( $\text{KCa}_2(\text{Be}_2\text{AlSi}_{12}\text{O}_{30}) \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) из разных рудных тел Ермаковского месторождения.

Впервые  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датировка получена непосредственно по бериллиевому минералу – милариту. Проба для датирования была отобрана из крупного кристалла, радиально-лучистого, без видимых включений, примесей других минералов и вторичных преобразований. В возрастном спектре миларита (образец Ер-17) выделяется устойчивое плато в высокотемпературной части спектра, состоящее из четырёх последовательных ступеней, составляющих  $\square 50\%$  выделенного  $^{39}\text{Ar}$  с возрастом  $182.5 \pm 3.0$  млн. лет.

Датирование калиевого полевого шпата из разных рудных зон Ермаковского месторождения показало согласующиеся значения изотопного возраста в интервале 169.8 – 170.6 млн. лет (рис. 1).

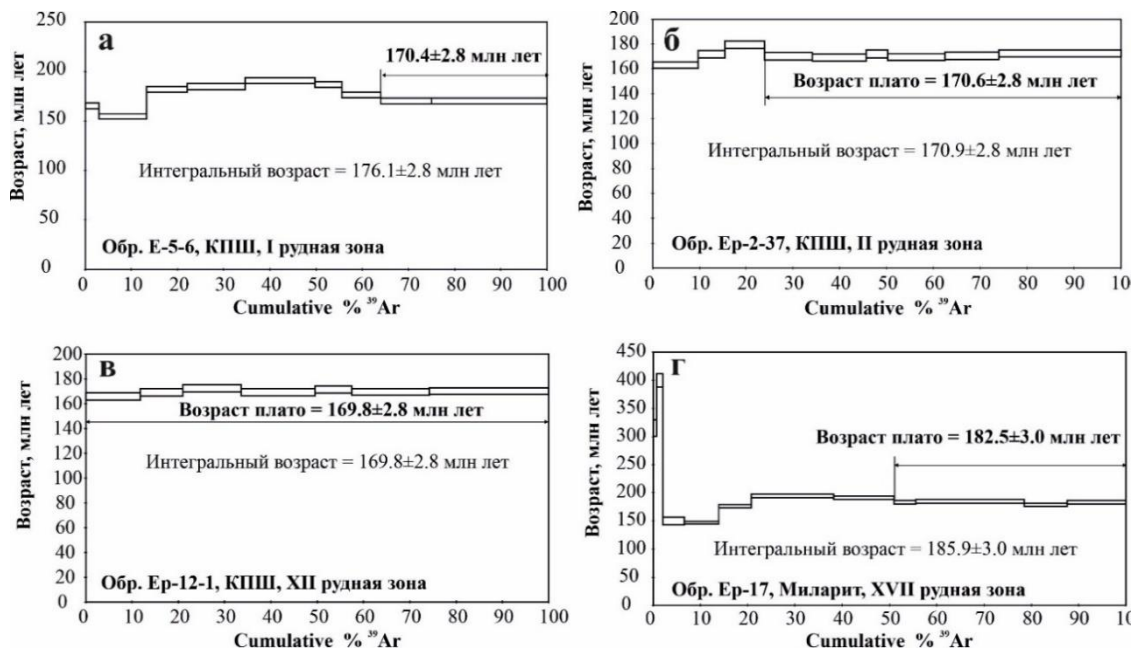


Рис. 1.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возрастные спектры минералов руд Ермаковского F-Be месторождения: а – КПШ из руд первой рудной зоны (обр. Е-5-6); б – КПШ из руд второй рудной зоны (обр. Ер-2-37); в – КПШ из руд двенадцатой рудной зоны (обр. Ер-12-1); г – миларит из руд семнадцатой рудной зоны (обр. Ер-17).

Таким образом, результаты  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования минералов из руд Ермаковского F-Be месторождения позволяют сделать вывод, что процессы минералообразования происходили в течение достаточно длительного периода в промежутке 225 – 170 млн. лет: 225 млн. лет – внедрение гранитной интрузии, рудообразование; 182 млн. лет – K-метасоматоз, приведший к замещению фенакита миларитом; 170 млн. лет – пострудный магматизм.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН.

- [1] Рейф Ф. Г. Щелочные граниты и бериллиевое (фенакит-бертрандитовое) оруденение на примере Оротского и Ермаковского месторождений // *Геохимия*, 2008, № 3, с. 243-263.
- [2] Лыхин Д.А., Ярмолюк В.В. Западно-Забайкальская бериллиевая провинция: месторождения, рудоносный магматизм, источники вещества // М.: ИГЕМ РАН, GEOS, 2015, 256 с.
- [3] Ripp G. S., Izbrodin I. A., Rampilov M. O., Tomilenko A. A., Lastochkin E. I., Posokhov V. F. Relationship of F-Be mineralization to granites and syenites at the Ermakovka deposit (Western Transbaikalia) // *Geologica Acta*, 18.2, 1-13, I-VI.2020.
- [4] Лыхин Д.А., Костицын Ю.А., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П., Рипп Г.С. Рудоносный магматизм Ермаковского бериллиевого месторождения в Западном Забайкалье: возраст, источники магм и соотношение с оруденением // *Геология рудных месторождений*, 2010, т. 43, № 1, с. 52–70.
- [5] Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Гальченко В.И. Ермаковское флюорит-бериллиевое месторождение (Западное Забайкалье, Россия), М.: ВИМС, 2009, 309 с.

## Современное состояние U-Th-He метода

О.В. Якубович<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, [olya.v.yakubovich@gmail.com](mailto:olya.v.yakubovich@gmail.com)

Развитие новых методов и подходов в геохронологии позволяет определять возраст и длительность тех процессов, которые раньше было невозможно на прямую определить с помощью традиционных минералов-геохронометров. К одним из таких методов, который за последние 25–30 лет внес большой вклад в понимание скорости и динамики различных геологических процессов, является U-Th-He метод. Первые попытки определения возраста минералов по радиогенному гелию были предприняты еще Робертом Струттом и Лордом Резерфордом в начале прошлого века. В России развитие этого направления связано с работами В.Г. Хлопина и Э.К. Герлинга. Вскоре исследователи пришли к выводу, что гелий очень плохо держится в кристаллической решетке большинства минералов, и, следовательно, метод не пригоден для геохронологии. Лишь в конце прошлого века, после того как М. Додсон ввел понятие температуры закрытия, трудами в первую очередь проф. К. Фарли появилось новое направление в области геохронологии – низкотемпературная термохронология по радиогенному гелию.

Определение «возраста» низкотемпературных событий (70–150°C) оказалось очень востребованным в области нефтяной геологии, так как позволяет реконструировать термическую историю осадочного бассейна, а значит спрогнозировать перспективы его нефтегазоносности. Высокая актуальность таких работ в начале XXI века привела к появлению нового поколения масс-спектрометров для определения низких концентраций радиогенного гелия. Для измерения изотопа  $^4\text{He}$  не требуются масс-спектрометры высокого разрешения, поэтому для решения этих задач в мире используются как магнито-секторные, так и квадрупольные анализаторы, а для выделения гелия из минералов, используют либо традиционные высоковакуумные печи/реакторы, либо диодные и эксимерные лазеры. В последнем случае метод позволяет определять концентрацию гелия не в зерне, а в точке (кратере).

Высокая чувствительность таких приборов, а также относительная простота измерения концентраций урана и тория в минералах методом ICP-MS, способствовала более широкому применению U-Th-He метода для решения задач «низкотемпературной» геологии. В настоящее

время метод широко используется для изучения эволюции орогенических поясов, определение эрозионного среза на кристаллических щитах, для датирования молодых извержений (от 50 тыс лет). Есть ряд работ по успешному применению этого метода для датирования разрывных нарушений и определения возраста серпентинизации ультраосновных пород. В качестве минералов U-Th-He термохронометров использую апатит, циркон, рутил, магнетит, реже флюорит и гранат.

Отдельным направлением исследований является определение возраста поверхностных процессов. U-Th-He датирование оксидов и гидроксидов железа позволяет определять длительность процессов выветривания и колебания уровня грунтовых вод во временных масштабах первых десятков миллионов лет. Также метод успешно применяется для датирования процессов рудообразования на дне океана (железомарганцевые образования). По концентрации гелия в кварце, находящемся в равновесии с грунтовыми водами, также можно определять возраст воды.

В ИГГД РАН мы развиваем направление U-Th-He датирования пирита, который является одним из самых распространенных минералов в большинстве рудных месторождений, а также часто встречается и в осадочных породах. Развитие этого подхода стало возможно так как ранее, нами была показана высокая сохранность гелия в этом минерале, а во-вторых, потому что масс-спектрометр МСУ-Г-01-М, сделанный в ООО «Спектрон-Аналит» по техническому заданию Ю.А. Шуколюкова (ИГГД РАН), обладает оригинальной системой ввода образца, которая позволяет сохранить его, для дальнейшего измерения урана и тория.

В докладе будут рассмотрены следующие аспекты: (1) форма нахождения урана в пирите; (2) проблема избыточного гелия; (3) методика U-Th-He датирования; (4) рассмотрены примеры U-Th-He датирования пирита из (а) колчеданных руд месторождения Узельга, Южный Урал; (б) околорудных метасоматитов месторождения Новогоднее Монто, Полярный Урал; (в) пирита из метатурбидитов Мининской площади, Западный Таймыр; а также рассмотрены перспективы U-Th-He датирования арсенопирита. Отдельно внимание будет уделено обсуждению вопроса о пригодности зерен пирита для проведения U-Th-He датирования (размер зерен, наличие включений, зональность).

## Multiple metamorphic events recorded in kyanite-andalusite gneisses from Parvenets complex, Thracian lithotectonic unit, Bulgaria

*M. Georgieva<sup>1</sup>, Tz. Vladinova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Sofia University "St. Kliment Ohridski", 15 Tsar Osvooboditel Blvd., 1504 Sofia, Bulgaria, [milena@gea.uni-sofia.bg](mailto:milena@gea.uni-sofia.bg)

<sup>2</sup> Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia, Bulgaria, [tz.vladinova@gmail.com](mailto:tz.vladinova@gmail.com)

Parvenets metamorphic complex comprises the northernmost parts of the Central Rhodope Mts and was attributed by different authors both to the Rhodope Massif and the Srednogorie Zone. According to Sarov [1], the Parvenets complex is part of the Thracian lithotectonic unit, which consists of varying in age and origin rocks, affected by the Maritsa dextral strike-slip shear zone. The boundaries of Parvenets metamorphic complex with higher-grade Rhodopian metamorphic suites to the south are hidden by younger sediments. In similar way, a big part of the Thracian unit is covered by sediments of Thracian basin and hinder the field information.

New structural and geochronological data revealed polymetamorphic history of the Parvenets complex. High-grade metamorphism in amphibolite facies (at 620-685°C and 0.7-1.25 to GPa) is preserved in garnet-kyanite-staurolite-plagioclase-quartz association in studied kyanite-andalusite gneisses [2-3]. Big rounded monazite grains included in plagioclase porphyroclasts yield a concordant age of 303.7 ± 3.3 Ma [4] and constrain the amphibolite facies metamorphism to Late Carboniferous time. Andalusite-biotite-plagioclase-muscovite-quartz±chlorite ±K-feldspar is the later superimposed paragenesis of greenschist facies (< 600°C and <0.4 GPa). Euhedral, rounded to resorbed grains and clusters of monazites in the matrix do not yield concordant age, but on the Tera-Wasserburg diagram, most analyses plot close to the lower intercept age of 77.5 ± 3.2 [4]. The greenschist lower pressure metamorphic event coincides with the intrusion of Late Cretaceous plutons in the Thracian lithotectonic unit.

In this study we provide new data for U-Pb zircon geochronology in the same kyanite-andalusite gneisses, in order to complete the tectonometamorphic evolution of the Parvenets metamorphic complex. For better structural control we studied *in situ* 8 zircon grains by LA-ICP-MS. The zircon grains are rounded and rather big (usually > 50  $\mu\text{m}$ ) included in plagioclase and in the matrix and experienced long transport and reburial, evidenced by rounded shape, cracks and irregular core to rim structure. On CL images they have small bright to dark resorbed cores, rarely with ghost oscillatory zoning (one analysis yielded a concordant age of 497.2  $\pm$ 120 Ma). Homogeneous gray thick metamorphic rims of zircons, included in plagioclase, yielded a concordant age of 342.1  $\pm$ 8.4 Ma (four analyses, MSWD = 0.81), similar to previously reported age of high-grade Variscan metamorphism in the Srednogorie Zone [5]. Younger ages for matrix zircons, from 297 to 318 Ma (three analyses), are similar to the ages from monazite inclusions, and are typical for high-grade units of the Rhodope Massif. This new geochronological data confirm that the Parvenets complex records multiple metamorphic events and has a unique tectonometamorphic evolution.

Acknowledgements: This study was supported by project DN14/5 of the National Science Fund, Bulgaria.

- [1] Sarov S. Lithotectonic subdivision of the metamorphic rocks in the area of Rila and Rhodope Mountains – results from geological mapping at scale 1:50000. – Sofia: Earth and Man Nat. Museum, Sp. Publ., 2012. – P. 43-47.
- [2] Ichev M., S. Pristavova. Relic kyanite in the gneiss-schists of Parvenets complex, North part of Central Rhodope Mountains. // C. R. Acad. Bulg. Sci. – 2004. – 57, 1. – P. 49-52.
- [3] Vladinova Tz., M. Georgieva, Z. Cherneva. Purple\_X modeling of kyanite-andalusite gneisses from Thracian lithotectonic unit (Parvenets complex), Bulgaria // Rev. Bulg. Geol. Soc., Geosciences. – 2015. – P. 79-80.
- [4] Georgieva M., V. Bosse, Z. Cherneva, Tz. Vladinova. Polymetamorphic evolution of Parvenets complex, Bulgaria – U-Th-Pb monazite geochronology and geochemistry // Rev. Bulg. Geol. Soc., Geosciences. – 2018. – 79, 3. – P. 49-50.
- [5] Carrigan C., S. Mukasa, I. Haydutov, K. Kolcheva. Neoproterozoic magmatism and Carboniferous high-grade metamorphism in the Sredna Gora Zone, Bulgaria: An extension of the Gondwana-derived Avalonian-Cadomian belt? // Precamb. Res. – 2006. – 147, 3-4 – P. 404-416.

### ***In situ* U-Pb geochronology on pegmatite-hosted titanite from the vicinity of Strashimir Pb-Zn vein deposit, Central Rhodopes, Bulgaria: an indication for overprinting hydrothermal event**

*S. Georgieva, R. Vassileva, G. Milenkov, E. Stefanova, I. Peytcheva*

*Sofia, Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, 1113, Bulgaria, [sylvina@geology.bas.bg](mailto:sylvina@geology.bas.bg)*

The vein and metasomatic Pb-Zn deposits (age ~30 Ma) from the Madan ore district are hosted by high-grade metamorphic complex (gneisses, amphibolites and marbles) referred to the Madan Lithotectonic Unit in the Central Rhodopes, Bulgaria. Numerous pegmatite bodies (age 49.63 $\pm$ 0.94 Ma, determined by U-Pb geochronology on titanite [1]) intercalate or crosscut the country rocks. A well exposed large (more than 6 m thick) pegmatite dyke in the upper part of the Strashimir base metal vein deposit, emplaced along the contact between marbles and gneisses was studied. Along this contact the pegmatite suffered intense hydrothermal alteration observed as well-developed zone. The mineralization is composed of epidote, chlorite, quartz, carbonates, titanite and hematite. The epidote is deep pink to red or yellow to pistachio green. Elongated prismatic crystals up to 5 cm, clusters or radial aggregates are typical. Fine-grained dark-green chlorite, calcite and quartz fill the voids between epidote crystals. Relics of K-feldspar, allanite and apatite are established as well. Titanite is observed both as anhedral crystals enclosed in epidote matrix and as euhedral crystals (up to 3 mm long) in the cavities between the prismatic epidote crystals in association with chlorite and carbonate (Fig. 1A).

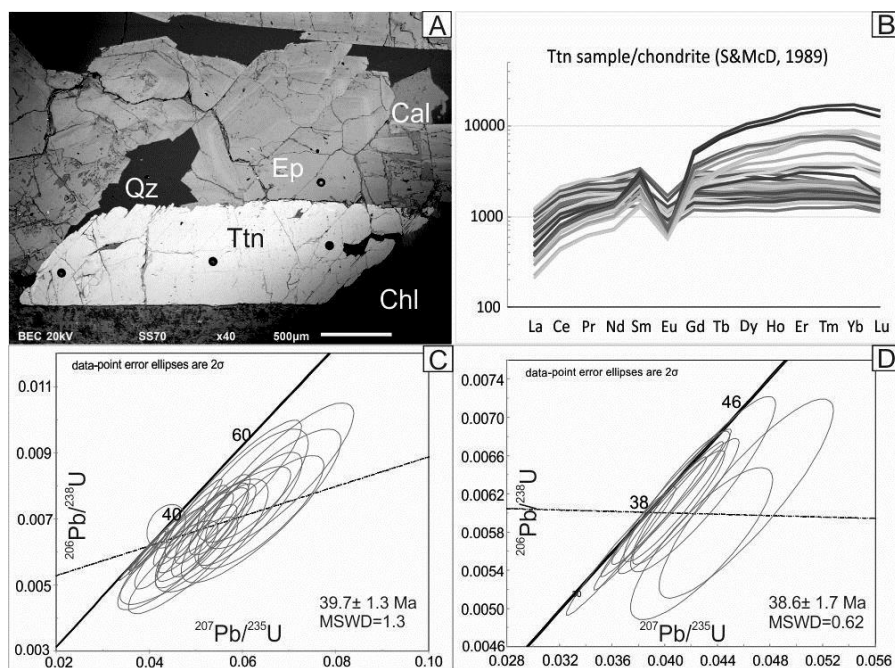


Fig. 1. A, BSE image of euhedral titanite in association with chlorite, epidote, and quartz; B, chondrite-normalized REE diagram; C, U-Pb age diagram for euhedral titanite in association with chlorite; D, U-Pb age diagram for anhedral titanite enclosed in epidote. *Abbr.:* Ep, epidote, Qz, quartz, Cal, calcite, Chl, chlorite, Ttn titanite

The minor and trace element signature and U-Pb isotope characteristics of the titanite were analyzed by the LA-ICP-MS system (Geological Institute, BAS) consisting of New Wave Research 193 nm Excimer laser UP-193FX attached to a Perkin-Elmer ELAN DRC-e quadrupole ICP-MS with 6 Hz and 25–50  $\mu\text{m}$  laser ablation craters. NIST 610 and MKED1 standard reference materials were used as external standards for element concentration and dating analyses, respectively. The titanite chemical composition reveals  $\text{Al}_2\text{O}_3$  up to 3.84 wt%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (1.56 wt%) and minor amounts of MnO and MgO. Considerable incorporation of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  ( $\leq 5.22$  wt%) in certain crystal zones is established. Significant concentrations of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $\leq 2.83$  wt%), Ta (3544 ppm), Sn (3403 ppm), Zr (2632 ppm), U (941 ppm), V (853 ppm) and Th (513 ppm) are detected as well. The  $\Sigma\text{REE}$  ranges within 2835–12719 ppm. Chondrite-normalized pattern shows relative depletion of LREE compared to HREE (Fig. 1B). The titanites reveal discordant U-Pb ages. After the application of the common  $^{207}\text{Pb}$  correction [2] they yield a lower intercept U-Pb age of  $39.7 \pm 1.3$  Ma with Mean Square Weighted Deviation (MSWD) of 1.3 for chlorite associated euhedral titanite (Fig. 1C), and  $38.6 \pm 1.7$  Ma with MSWD 0.62 for epidote-enclosed anhedral titanite (Fig. 1D). The geochemical features of titanite such as Th/U ratio 0.11–1.22,  $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}}$  0.49–1.47, depletion of LREE relative to HREE suggest its hydrothermal origin [3, 4, 5]. The U-Pb ages of the studied mineral reveal geochemical similarities to those from Petrovitsa deposit which are also defined as hydrothermal ( $39.2 \pm 1.5$  Ma; Milenkov, unpublished data). The high  $\Sigma\text{REE}$  ( $\leq 12\,719$  ppm) and Lu/Hf ratios (0.43–1.69) are probably controlled by complex factors (crystallization sequence, dissolution-precipitation, whole-rock composition). The titanite age is younger compared to that of the pegmatites from the region. Combined with the characteristic hydrothermal geochemical features of the studied mineral its formation refers to Late Eocene overprinting hydrothermal event in the Madan ore region.

*Acknowledgements.* The study is supported by the KP-06-N34/4 project, financed by the Bulgarian National Science Fund.

- [1] Milenkov G., R.D. Vassileva, I. Peytcheva, V. Grozdev. U/Pb dating and trace element compositions in pegmatite-hosted titanite from the Petrovitsa Pb-Zn deposit, Madan district, South Bulgaria. // *Rev. Bulg. Geol. Soc.* – 2020. – 81. – 3. – P. 90-92.
- [2] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . // *Chem. Geol.* 2002. – 192. – P. 59-79. DOI:10.1016/S0009-2541(02)00195-X.

- [3] Li J.-W., D.X. Deng, F.M. Zhou, S.Y. Liu, F.X. Zhao, L.J. Guo. Laser ablation ICP-MS titanite U-Th-Pb dating of hydrothermal ore deposits: A case study of the Tonglushan Cu-Fe-Au skarn deposit, SE Hubei Province, China. // *Chem. Geol.* – 2010. – 270. P. 56-67. DOI:10.1016/j.chemgeo.2009.11.005.
- [4] Pan L.-C., R.-Z. Hu, X.-W. Bi, C. Li, C.-L. Wang, X.-S. Wang, J.-J. Zhu. Titanite major and trace element compositions as petrogenetic and metallogenic indicators of Mo ore deposits: Examples from four granite plutons in the southern Yidun arc, SW China. // *Amer. Mineral.* – 2018. – 103. – P. 1417-1434. DOI:10.2138/am-2018-6224.
- [5] Scibiorski E., C. Kirkland, N. Evans. Trace elements in titanite: A potential tool to constrain polygenetic growth processes and timing. // *Chem. Geol.* – 2019. – 509. P. 1-19; DOI:10.1016/j.chemgeo.2019.01.006.

## A new age of pegmatite-hosted titanite from the Govedarnika Pb-Zn deposit, Central Rhodopes, Bulgaria

*Y. Georgieva*<sup>1</sup>, *G. Milenkov*<sup>2</sup>, *R. Vassileva*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sofia, Sofia University, Faculty of Geology and Geography, Sofia 1000, Bulgaria, [yordanova0907@gmail.com](mailto:yordanova0907@gmail.com)

<sup>2</sup> Sofia, Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, Bulgaria, [rosivas@geology.bas.bg](mailto:rosivas@geology.bas.bg), [georgimilenkov7@gmail.com](mailto:georgimilenkov7@gmail.com)

The current study presents a new age determination and geochemical data for the Govedarnika Pb-Zn deposit, situated in Laki district, South Bulgaria. The Laki region occupies the northern part of the area of the Central Rhodopean Pb-Zn(±Ag) deposits, related to four NNE-trending ore-bearing faults cutting through the high grade Rhodopean metamorphic complex. Rich base metal mineralization in the area is presented as subvertical polymetallic veins, formed by open-space filling in the aluminosilicate rocks [1]. Metasomatic replacement in carbonate environment led to the formation of skarn-ore bodies, composed of Mn-rich silicates and carbonates and economic sphalerite-galena mineralization, which is typical for the Govedarnika mine. In addition to this, weakly studied pegmatite bodies, emplaced in the host metamorphites are acting as a potential source for strategic elements.

Titanite (CaTiSiO<sub>5</sub>) is a common accessory mineral in magmatic and metamorphic rocks but it can also be observed within a hydrothermal alteration assemblage after aluminosilicate rocks. Generally, it accommodates significant amounts of rare earth elements (REE) and displays different geochemical characteristics that can provide insights into its origin [2]. Here we present *in situ* U/Pb LA-ICP-MS dating and trace element signature of pegmatite-hosted titanite crystals from the Govedarnika Pb-Zn deposit.

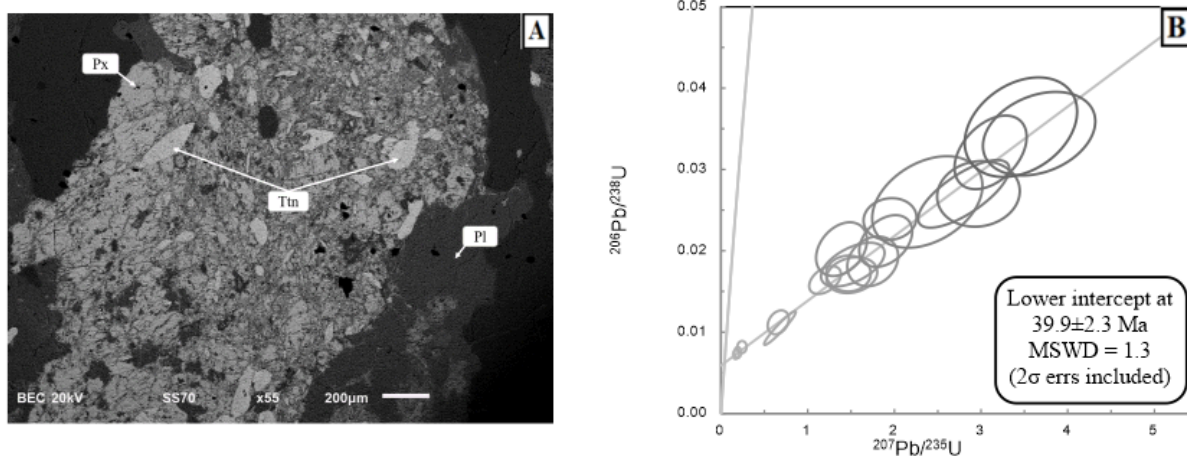


Fig.1. A. BSE image of titanites hosted in altered pegmatite; B. U/Pb concordia plots of titanite grains; *Abbr.*: Pl – plagioclase, Px – pyroxene, Ttn – titanite

The mineral relationships and textures in the pegmatites' bodies were studied by optical and scanning-electron microscopy (SEM-BSE regime) (Fig.1A). The chemical composition of the studied

minerals was determined by JEOL JSM-6010PLUS/LA at the University of Mining and Geology in Sofia. U-Pb isotope characteristics and trace-element compositions were defined at the Geological Institute (BAS), using the LA-ICP-MS system consisting of New Wave Research 193 nm Excimer laser UP-193FX attached to a Perkin-Elmer ELAN DRC-e quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometer. Ablation craters for dating were 30  $\mu\text{m}$  and 25–50  $\mu\text{m}$  for tracing. MKED1 and Temora standards were the primary external standards for age determination and NIST 610 for compositional characteristics. Isoplot and SILLS programs and the  $\text{SiO}_2$  content in titanite (as internal standard from EPMA) were used for data reduction and calculation of the chemical composition. The dating results were processed using Iolite combined with Vizual Age to obtain ages and ratios corrected for instrumental drift and down-hole fractionation. Correction for common lead [3] was applied before establishing the age of the titanites.

The studied pegmatites are composed mainly by K-feldspar, plagioclase and quartz, and accessories of titanite, apatite and scarce zircon. The hydrothermal alteration produced specific secondary mineralization of chlorite, hematite and epidote. The analyzed titanites yielded a lower intercept age of  $39.9 \pm 2.3$  Ma (Fig.1B). Apart from the major elements CaO (26.6–31.6 wt%),  $\text{TiO}_2$  (29.3–33.1 wt%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2.6–4.0 wt%), their chemical composition is characterized by minor amounts of FeO (average of 0.6 wt%) and MnO (average of 0.08 wt%). The obtained mean concentrations of trace elements are: V (~180 ppm), Y (~225 pm), Nb (~2262 ppm) and Sn (~180 ppm). The average sum of REE in titanites from Govedarnika is very low (310 ppm), LREE slightly prevail over HREE. Moreover, low Th/U (0.12) and Dy/Yb (<2.00) ratios, low HFSE contents and positive Eu-anomaly suggest hydrothermal or metamorphic origin of the studied samples [4].

Based on previous geochronology in the region of the Central Rhodopean base metal deposits [2,5] and the mineral-forming processes in the Govedarnika deposit, we assume that the new U/Pb age of the pegmatite-hosted titanite could not be interpreted as timing of the pegmatite crystallization. However, it evidences for earlier events compared to the deposition of the sulfide mineralization ( $29.95 \pm 0.23$  Ma [6]). Considering the mineral occurrence of the titanite, its geochemical characteristics and U/Pb age, it is suggested that the titanite formation is pre-ore and likely related to post-magmatic hydrothermal or metamorphic events.

*Acknowledgements:* The study is financially supported by the KP-06-N34/4 project of the Bulgarian National Science Fund.

- [1] Vassileva R.D., V. Grozdev, I. Peytcheva, A. von Quadt, E. Salnikova. Andradite from Pb-Zn Djurkovo deposit, Central Rhodopes: chemical composition and U/Pb dating // Rev. Bulg. Geol. Soc. – 2020. – 81. – 3. – P. 58-60.
- [2] Milenkov G., R.D. Vassileva, I. Peytcheva, V. Grozdev. U/Pb dating and trace element compositions in pegmatite-hosted titanite from the Petrovitsa Pb-Zn deposit, Madan district, South Bulgaria // Rev. Bulg. Geol. Soc. – 2020. – 81. – 3 – P. 90-92.
- [3] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  // Chem. Geol. 2002. – 192. – P. 59-79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X).
- [4] Liu T., S. Jiang, R. Zheng, W. Chen. Titanite U-Pb dating and geochemical constraints on the Paleozoic magmatic-metamorphic events and Nb-Ta mineralization in the Yushishan deposit, South Qilian, NW China // Lithos – 2022. – 412-413 – 106612.
- [5] Hantsche A., K. Kouzmanov, A. Dini, R. Vassileva, M. Guillong, A. von Quadt. New U-Pb Age constraints on tertiary magmatism and Pb-Zn skarn formation in the Madan District, Central Rhodopes, Bulgaria // Goldschmidt Conference – 2017. – P. 1533.
- [6] Kaiser-Rohrmeier M., R. Handler, A. von Quadt, C. Heinrich. Hydrothermal Pb-Zn ore formation in the Central Rhodopian Dome, south Bulgaria: Review and new time constraints for Ar-Ar geochronology // Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen – 2004. – 84. – 1-2 – P. 37-58.

## Sample preparation by Ar Ion Beam for Microanalysis in Earth Science

A. Kudryavtsev<sup>1</sup>, E. Vasilev<sup>2</sup>, O. Telnova<sup>3</sup>, J. Marshall<sup>4</sup>

<sup>1</sup>TESCAN Ltd., Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup>IG Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

<sup>4</sup>School of Ocean and Earth Science, Southampton, United Kingdom

Since the EBSD information comes from a depth of few tens of nanometers, the most critical issue of the EBSD measurement is the surface quality. The ion beam can gently polish the surface for EBSD mapping as well as cut any inhomogeneous solid samples to create a new surface for imaging and microanalysis. Therefore ion sample preparation is regarded as the most promising, precise and universal method for preparing of a wide range of materials with the purpose of microanalysis, such as EDS, EBSD and TKD. Paleontological objects are among the most fragile samples during surface preparation. Diamond is also an “extremely hard” material and ion polishing can be used to significantly improve the surface quality in both cases.

### 1. Ion Polishing for EBSD Analysis of Natural Diamonds

High surface quality on a series of mechanically polished natural diamonds was achieved using a near parallel Ar<sup>+</sup> ion beam (see. Fig. 1 left). Only this parallel beam technique allows polishing large samples up to 12 mm in diameter (see. Fig. 1 right). Ion Ar<sup>+</sup> polishing was carried out applying beam energy of 1 keV and a tilting angle of 4 degree for 30 min. This type of surface preparation reveals the misorientation of the structure and the subgrains of the diamond crystal. We have shown that splitting of the diamond crystal into subgrains happens more often than it is usually assumed [1]. In case of polycrystalline diamond, cracking, disorientation and regeneration of diamond crystals have also been shown by EBSD mapping. In plastically deformed crystals we have identified 60° twins with a thickness of 60-600 nm. In some cases, at the intersection of the twins <110> etching channels (Rose channels) are observed. Thus, the EBSD method allows us to obtain new data on the real structure of even such a well-studied mineral as the diamond.

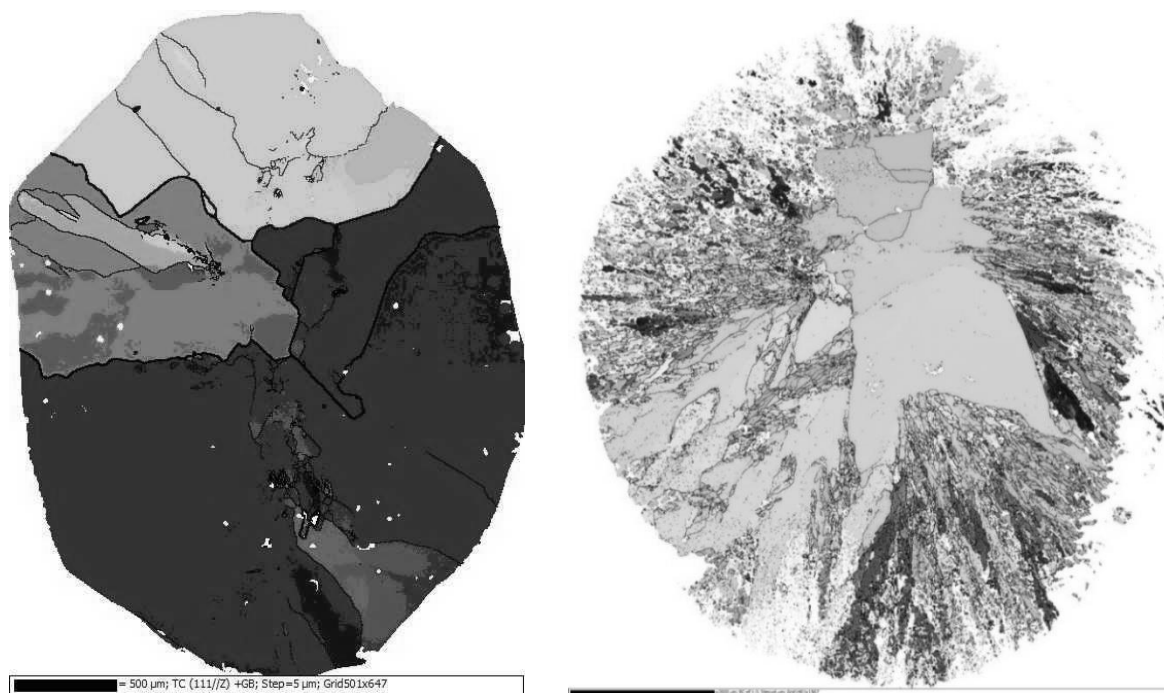


Fig.1. Texture component map (111//Z) of diamond surface (left) and large area polishing of diamond in IPF Z colour (right).



## 2. Ion Slope Cutting of Devonian Micro- and Megaspores

Devonian micro- and megaspores were collected in the Pease Bay formation in the northeastern part of Scotland. These collection is compiled by the University of Southgemtom University J. Marshall, United Kingdom. Studying the morphology and ultrathin structure of spores *in-situ* in various phylogenetic lines of Paleozoic plants and comparing them with dispersed ones is necessary to get information to reconstruct plant communities in the history of Earth. When preparing paleontological samples, the process is time consuming and sophisticated, and there is a high probability of failure. That is why we decided on using ion milling technique. Studying the fine inner structure inside these spores and their microanalysis was done following ion beam cutting.

Slope cut of megaspores 1200  $\mu\text{m}$  in diameter was performed by 8 keV of  $\text{Ar}^+$  ion beam with 30 degree tilting angle for 2.5 hours (see. Fig.2 left). Focused  $\text{Ga}^+$  ion beam (FIB) of 30 keV at 90 degree was used for local ion cutting of a microspore 100  $\mu\text{m}$  in diameter (see. Fig. 2 right). The use of FIB and the near parallel ion beam techniques allows us to study the micro- and nanostructure of the sporoderm surface, its numerous layers and ultrathin structure. These results are in a good agreement with a preliminary TEM analysis [2].

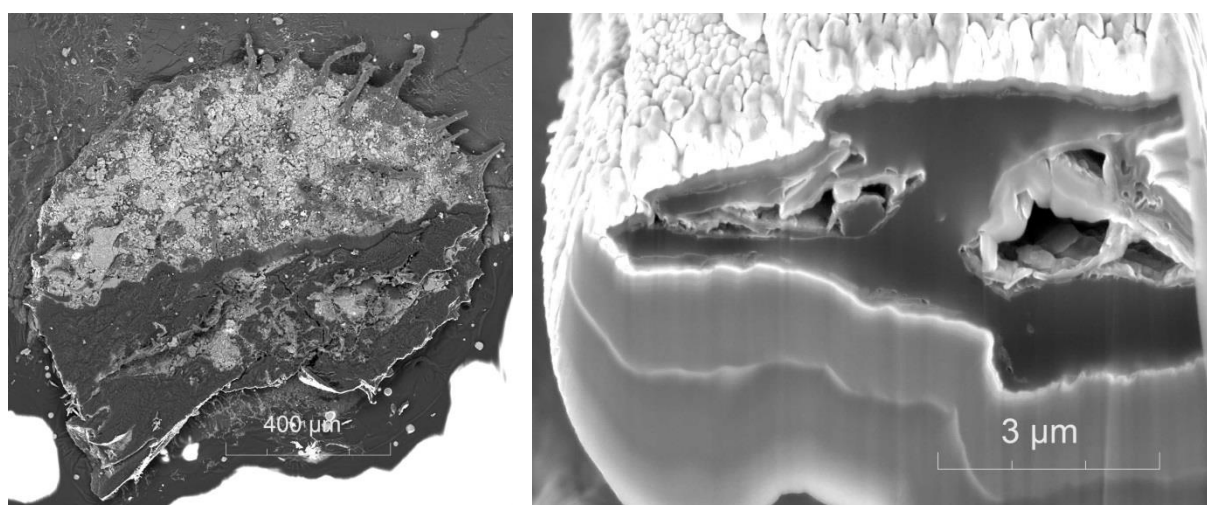


Fig. 2. 30° slope cut of megaspore - *Archaeotriletes* Naumova (left) and 90° FIB cross-section of microspores edge - *Curriculumonoletes orbis* McLean et Neves (right).

- [1] Y.L. Orlov, The mineralogy of diamond, New York: Wiley and Sons, (1977) 235.  
 [2] D. McLean, R. Neves, Review of Palaeobotany and Palynology, 126 (2003) 153–162.

## Eclogites from Devisil lithotectonic unit (East Rhodopes, Bulgaria) – main features and possible protolithic age

*L.A. Macheva*<sup>1</sup>, *Ph.A. Machev*<sup>2</sup>, *J.V. Plotkina*<sup>3</sup>, *E.B. Salnikova*<sup>3</sup>, *M.J. Koreshkova*<sup>4</sup>, *A. Ryazantsev*<sup>5</sup>,  
*M.V. Stifeeva*<sup>3</sup>, *I.M. Peycheva*<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Sofia, Institute of Mineralogy and Crystallography, [Lu\\_macheva@dir.bg](mailto:Lu_macheva@dir.bg)

<sup>2</sup> Sofia, „St. Kliment Ohridski“ University, [machev@gea.uni-sofia.bg](mailto:machev@gea.uni-sofia.bg)

<sup>3</sup> Saint Petersburg, IPGG RAS, [plotkina@yandex.ru](mailto:plotkina@yandex.ru), [katesalnikova@yandex.ru](mailto:katesalnikova@yandex.ru)

<sup>4</sup> Saint Petersburg, St. Petersburg State University

<sup>5</sup> Moscow, Geological Institute, RAS

<sup>6</sup> Sofia, Geological Institute, BAS

The Rhodopes represent an area of Alpine successive stages of nappe-stacking and post-collisional extension exposed in terranes with different composition, age and metamorphic evolution. Numerous eclogitic boudins and slivers are scattered in the metamorphic units of these terranes. Dating of these rocks provides information for ancient oceanic lithosphere in the Bulgarian part of the Alpine collisional belt.

The eclogitic rocks under study belong to the Devisil Lithotectonic Unit (DLU) which crops out in the Eastern Rhodopes (Bulgaria). It is built of metagabbro associated with metaplagiogrinites, marbles, metapelites with sporadic thin intercalations of quartzites and lense-like bodies of amphibolized eclogites. The unit is limited at the bottom and top by ductile shear zones – Kesebir and Devesil zones, respectively. The Kesebir zone is marked by ductile sheared metagranite mylonites, along the boundary with Kesebir Lithotectonic Unit. Distinct mineral and striation lineations with meridional strike are observed in the mylonitic foliation. The foliation dips to the east at 35–40°. Shear-sense criteria indicate dextral normal slip movement. The upper boundary of the Unit is marked by the Devesil shear zone [1] which separates DLU from the Krumovitsa Unit.

The metaeclogites form small lenses in the lower section of the Devisil Unit included in garnet-bearing two mica schists. They are dark green in color with massive structure. In the strongly deformed parts thin bands of small recrystallized garnets were formed. The protoliths of these rocks are basic magmatic rocks with MORB characteristics ( $\text{SiO}_2=44.8-48.9\%$  and  $\text{MgO}=5.7-6.7\%$ ).

The high-pressure (HP) mineral assemblage is presented by garnet (Grt)+omphacite (Omp)+rutile (Rt). Three generations of garnet have been recognized in studied eclogites: Grt1 exhibiting small partially rounded porphyroblasts up to 0.2 cm in diameter with inclusions of omphacite, needle-like rutile exolutions and quartz; Grt2 forms small idioblastic recrystallized grains located in monomineralic bands. The presence of relatively larger grains in these bands is not uncommon. Grt3 represents bands of monocrystalline garnet up to 6 mm in thickness surrounded by more fine-grained individuals. Grt2 and Grt3 are free of inclusions and it seems that Grt2 can be considered as a recrystallization product of Grt3. Grt1 shows progressive growth zoning with increase of almandine and pyrope from core to rim and decrease of grossular content in the same direction. Spessartine remains relatively constant through the grains rapidly increasing at the rims whereas Grt2 and Grt3 are homogenous and similar in composition and thus differing sharply from Grt1. They are rich in spessartine (up to 23%) and depleted in pyrope component (max 11%).

Omphacite is preserved as single rare grains in the garnet whereas, in the matrix it is partly or completely replaced by plagioclase-clinopyroxene symplectites. The Jadeite-component of clinopyroxene varies in the range – 42.8-56.70%.

Rutile occurs as numerous small grains included in garnet porphyroblasts or in symplectitized matrix being partially replaced by ilmenite.

Quartz forms short bands of unstrained grains with triple junction texture.

By decreasing pressure but at still high temperature plagioclase+clinopyroxene symplectites are formed as a breakdown product after omphacite. Moving away from omphacite relics toward the rim of the symplectitic corona, the size of the symplectite grains becomes progressively smaller. Pyroxene from symplectites is almost pure diopside with Jd component 2.4-3.3% and the plagioclase composition is  $\text{An}_{4-10.7}$  independently of the position in the corona.

During the early high-temperature amphibolite facies overprint of the eclogites under relatively static conditions and in the presence of water Mg-hornblende was formed. It is represented by large (macroscopically visible) green-yellow in color porphyroblasts bearing inclusions of garnet, clinopyroxene-albite symplectites and rutile. No amphibole coronas around garnet porphyroblasts are observed.

The P-T conditions of the HP metamorphism were defined by Zr-in-Rutile [2] and Grt-Cpx [3] thermometers. The temperature is in the range 620-665°C and the Jd in pyroxene barometer [4] provides pressure conditions at about 1.8-2.0 GPa. For the subsequent amphibolite facies metamorphism, we obtain temperature of 600-640°C at 0.6-0.8 GPa ( $\text{Al}_t$  in Am barometer). These temperatures are close to the values of the HP stage. This can be explained with a rapid nearly isothermal exhumation of the eclogites which prevents formation of Am-Pl symplectites by breakdown of Cpx-Ab aggregates.

We try to date zircons from eclogite rocks of the Devisil Tectonic Unit. The separated zircons are short prismatic, partially rounded, transparent, colorless to pale-yellowish with a size 80-120  $\mu\text{m}$ . U-Pb dating, CL images and trace element analyses of zircons from metaeclogites were performed at the LA ICP-MS Laboratory at the Geological Institute of the Bulgarian Academy of Sciences. CL images reveal oscillatory or sector zoning.

Studied zircons are poor in REE, U and Th. Their Chondrite-normalized REE patterns is characterized by a steeply-rising slope from the LREE to the HREE.

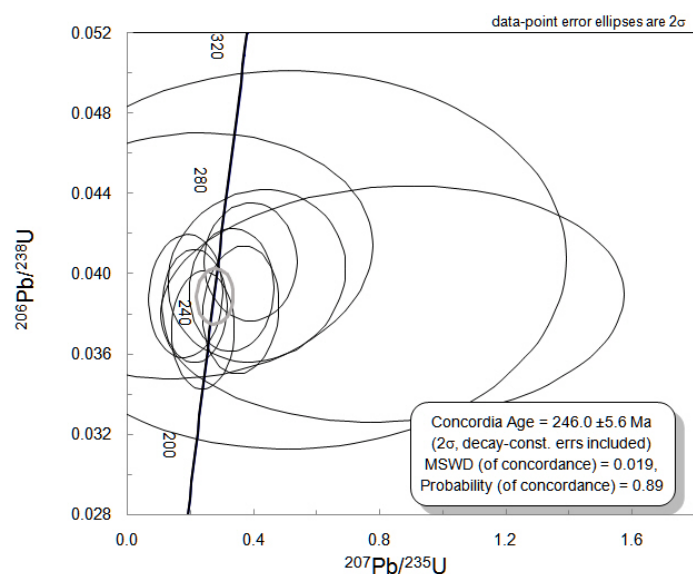


Fig.1. U-Pb concordia diagram for eclogites from Devisil Lithotectonic Unit.

Zircon U-Pb isotope dating of amphibolitized eclogites from Devisil Unit in the Eastern Rhodopes give evidence for a possible Triassic age of the protoliths  $246 \pm 5.6$  Ma (Fig. 1.). Because of the low U contents of zircon we accept this age with caution and suppose that more precise dating is necessary.

Acknowledgments: The investigations were supported by the bilateral project Bulgaria-Russia – KP-06-Russia-32 (Bulgarian part) and 20-55-18017 (Russian part).

- [1] Sarov S., Yordanov B., Georgiev S., Valkov V., Balkanska E., Grozdev V., Marinova R., Markov N. Explanatory Notes to the Geological Map of Bulgaria on Scale 1:50 000, Krumovgrad Map Sheet. Geology and Geophysics JSCo. 2008 – 104 p.
- [2] Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contrib. Mineral. Petrol. – 2006. – 151.- P. 413-433.
- [3] Ellis D.J., Green D.H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria // Contr. Miner. Petrol. – 1979. – 71. P. 13-22.
- [4] Holland T.J.B. The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600-1200°C // Amer. Mineral. – 1980. – 65. – P.129-134.

### Implications of LA-ICP-MS *in situ* U-Pb geochronology on garnet and titanite: a case study from the Western Rhodopes, South Bulgaria

R. Vassileva<sup>1</sup>, I. Peytcheva<sup>1</sup>, V. Grozdev<sup>1</sup>, Yu. Plotkina<sup>2</sup>, E. Salnikova<sup>2</sup>, M. Stifeeva<sup>2</sup>, P. Machev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sofia, Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences; [rosivas@geology.bas.bg](mailto:rosivas@geology.bas.bg)

<sup>2</sup> Saint Petersburg, Institute of Precambrian Geology and Geochronology, RAS

<sup>3</sup> Sofia, „St. Kliment Ohridski“ University

The geochemical and mineralogical characteristics of two garnet-bearing skarn types, outcropping 2-3 km SW of the Velingrad town in West Rhodopes Mts, were studied in order to apply U-Pb geochronometry using LA-ICP-MS. The selected skarns are mainly composed by Ca-garnets (grossular-andradite), which differ by their mineral assemblage, chemical composition, occurrence, trace element signatures, formation processes and timing. Their characteristics are well described by [1]. Occasionally, the low U-content in garnets and later overprinted hydrothermal processes prevent the precise age record and led to increased error uncertainties. To better understand and distinguish the processes of pegmatite crystallization from the overprinting tectonic and hydrothermal processes, in the present study we have additionally applied *in situ* U-Pb dating in co-genetic titanite crystals.

The studied titanite-garnet assemblage is formed by skarnification processes in the marble levels of the metamorphic sequence of the Chepinska Unit (composed mainly of various gneisses, amphibolites, calcisilicate rocks and migmatites). These rocks act as the metamorphic frame to parts of the Rila-West-Rhodopes batholith (RWRB), comprising plutonic bodies with different age and tectonic position [2]. The defined Unit 1 comprises granodiorites being interpreted as constituents of an older Late Cretaceous synmetamorphic pluton with calcalkaline affinity and crust-contaminated mantle-derived composition. This pluton outcrops as two bigger bodies that are dated at 67-70 Ma by U-Pb zircon method [3; 4]. The Units 2 and 3 granites are both Paleogene with high-K calcalkaline signature but differ in their age of 52 Ma and 35-40 Ma [2-4]. Crosscutting pegmatite veins and processes of migmatization are assigned to all three phases of RWRB and to the Late Alpine metamorphism (43-37 Ma, [5]).

Type 1 garnet occurrence is presented as syntectonic porphyroblasts composed by grossular, diopside, plagioclase, titanite, quartz, and pyrite. Type 2 skarns are formed by fluid infiltration in marbles on the contact with crosscutting pegmatite veins. Their mineral composition includes Fe-rich grossular, epidote, Fe-rich diopside, plagioclase and apatite. The incorporation of V, Cr, Ga, Ge, Y, Zr, Nb and Sn in the contact garnets is one order of magnitude higher compared to the composition of garnet porphyroblasts [1]. Low U content (1.2-1.7 ppm) and relatively high Pb content in type 1, combined with possible overprinting processes hampers the precise age record, yielding  $88 \pm 26$  Ma. The deformational processes that garnets suffered, led to U-depletion, thus the acquired U-Pb age stays tentative. However, Late Cretaceous-Paleocene tectono-metamorphic events are known in the Rhodopes [5]. Type 2 grossulars from the contact with pegmatite dykes are dated at  $42.97 \pm 0.66$  Ma, suggesting a genetic link to the 43-37 Ma Cenozoic granites of the Rila-West Rhodope batholiths [2-6].

In attempt to specify and crosscheck the age of the porphyroblasts we have additionally dated the abundant titanite single crystals, occurring in close association with diopside and garnet. The ages were acquired by *in situ* U-Pb geochronometry with LA-ICP-MS in the Geological Institute of the Bulgarian Academy of Sciences, using MKED1 and NIST 610 external standards for dating and tracing, respectively. Titanite yielded lower intercept age of  $61.1 \pm 5.2$  Ma (Fig. 1), after applying correction for common Pb (MSWD is 0.70). Despite the relatively big error uncertainty and possible alteration during the overprinting Late Alpine processes, the formation of the porphyroblasts is obviously connected with the tectono-magmatic processes of the synmetamorphic plutonic rocks of the Unit 1 of the RWRB [2]. Moreover, the Late Cretaceous temporal evolution of the magmato-hydrothermal system in western Rhodopes is recorded by U/Pb geochronology on granitic zircon ( $71.12 \pm 0.72$  Ma) and skarn garnet ( $68.55 \pm 0.74$  Ma), suggesting a link between the hosting granites and the skarn mineralization [7].

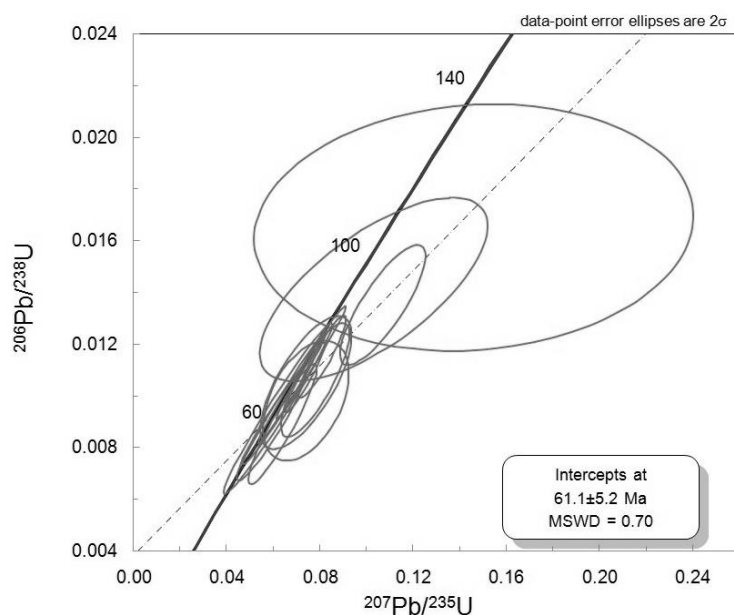


Fig. 1. U-Pb Concordia diagram for common  $^{207}\text{Pb}$  corrected titanites from porphyroblasts

*Acknowledgements:* The garnet geochemistry and geochronology data are obtained in the frame of the bilateral DNTS 02/15 project. Geochronology and geochemistry of titanite are financed by the KP-06-N34/4 project of the Bulgarian National Science Fund.

- [1] Vassileva R., Peytcheva I., Grozdev V., von Quadt A., Guillong M., Plotkina Y., Salnikova E. Two types of skarn garnets from West Rhodopes, South Bulgaria: LA-ICP-MS U-Pb dating and tracing evidence // 15<sup>th</sup> biennial SGA meeting, Glasgow, Scotland – 2019. –1. – 416-419.
- [2] Kamenov B., Peytcheva I., Klain L., Arsova K., Kostitsin Y., Salnikova E. Rila-West Rhodope Batholith: Petrological and geochemical constraints for its composite character // *Geochemistry Mineralogy Petrology* – 1999. – 36. – P. 3-27.
- [3] Peytcheva I., von Quadt A., Naydenov K., Sarov S., Dimov D., Voinova E. U-Pb zircon-xenotime-monazite dating and Hf-isotope tracing to distinguish Cretaceous and Paleogene granitoids in the Western Rhodopes and Rila Mountain // *Geosciences* – 2007. – P. 89-91.
- [4] Peytcheva I., von Quadt A., Kostov-Kytin V., Kadiyski M., Stavrev M. U-Pb dating and composition of columbite from Vishteritsa: Implication for timing of granite magmatism and rare-element granitic pegmatites in the Western Rhodopes, Bulgaria. // *Geologica Carpathica* – 2021. – 72. – 3. – P. 195–212.
- [5] Cherneva Z., Ovtcharova M., Dimov D., von Quadt A. “Baby-granites” in migmatites from Chepinska river valley, Western Rhodope – geochemistry and U-Pb isotope dating on monazite and zircon // *Geosciences-2006*. – P. 205-208.
- [6] Peytcheva I., Kostitsin Y., Salnikova E., Kamenov B., Klain L. Rb-Sr and U-Pb isotope data for the Rila-Rhodopes batholiths // *Geochem Mineral Petrol* – 1998. – 35 – P. 93-105.
- [7] Stavrev M., Peytcheva I., Hikov A., Vassileva R., von Quadt A., Guillong M., Grozdev V., Plotkina Y. Late Cretaceous magmatism in part of the Western Rhodopes (Bulgaria): U-Pb dating on zircon and grossular-andradite garnets // *Comptes rendus de l’Acad. Bulgare des Sciences* – 2020. – 73. – 4. – P. 521-530.

## Хронология древних верхнемантийных пород – новый подход

Е.С. Богомолов<sup>1,2</sup>, И.Л. Жуланова<sup>3</sup>, Л.К. Левский<sup>1</sup>, А.В. Мезенцева<sup>1</sup>, Н.А. Сергеева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН  
[e.bogomolov@mail.ru](mailto:e.bogomolov@mail.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им.  
А.П.Карпинского, [e.bogomolox@mail.ru](mailto:e.bogomolox@mail.ru)

<sup>3</sup> Магадан, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А.Шило ДВО РАН,  
[l.k.levskii@ipgg.ru](mailto:l.k.levskii@ipgg.ru)

**Введение.** Важность всестороннего, в том числе геохронологического, изучения уникальных пород, образовавшихся на границе верхней мантии и нижней коры, нет необходимости подчеркивать. В тоже время специфические высокотемпературные условия, в которых находятся такие породы, начиная с момента образования и до времени их выхода на поверхность, ставят труднопреодолимые препятствия на пути использования изотопных методов. Изотопная история ксенолитов стирается, и она вновь начинается с момента выхода вмещающих их кимберлитов на поверхность. Имеющийся арсенал долгоживущих геохронометров полностью исчерпан и следует искать новые подходы.

**Методы.** В настоящее время с переменным успехом преимущественно используются два метода: U-Pb (цирконы) и Re-Os (сульфиды). Первый отмечен своей значительной термоустойчивостью, хотя это достоинство является в тоже время и недостатком. Нередко следы истории древних цирконов сохраняются в более молодых породах и ошибочно их удревяют (смотри ниже). В различных метаморфических условиях поведение урана и свинца различается и труднопредсказуемо. Наконец, циркон является аксессуарным минералом, что снижает доказательность когенетичности и синхронности его образования. Рений и осмий – сидерофильные элементы и концентрируются в сульфидной фракции (от 0.01% до 3%) в эклогитах, что делает их следовыми элементами.

Сказанное выше определило выбор Pb-Pb метода для последующей работы. Этот метод широко использовался как для коровых, так и, в меньшей степени, для мантийных пород. Однако, используемый как таковой, он давал для мантийных пород результаты, отягченные большой ошибкой. Для устранения этого дефекта было применено ступенчатое кислотное выщелачивание при химической пробоподготовке образцов. Ступенчатое выщелачивание позволило обнаружить «анатомию» изотопного состава свинца и разделить его на две части: изотопная и радиогенная компоненты. Новый подход определяется четырьмя параметрами: один элемент – Pb, два минерала – Сrx (Pb радиогенный) и Sulphides (Pb исходный), один образец – 1 г.

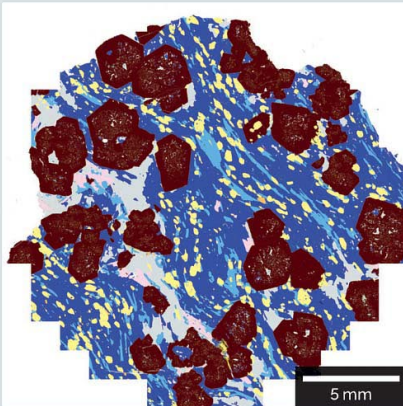
**Результаты.** В качестве объекта исследования была использована коллекция эклогитоподобных пород, отобранных на Ауланджинском обнажении массива Омолон (Восточная Сибирь). Проводившиеся ранее хронологические исследования этих пород с использованием цирконов в режиме TIMS и SIMS дали архейские значения возраста: 3400 млн лет (экстраполяция до пересечения с конкордией) и 3600±200 млн лет. В нашей работе было установлено время двух метаморфических событий эклогитовой фации: 3782±33 млн лет и 2562±15 млн лет, а также время выхода пород на поверхность, определенное по рутилу: 1619±27 млн лет. Обнаружено своеобразное распределение по величине отношения <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb исходного свинца вдоль линии смешения из двух резервуаров с низким и высоким значением этого отношения. Низкое значение соответствует измеренному возрасту породы, в то время как высокое значение отвечает компоненту из более древней мантии.

**Заключение.** Аналогов предлагаемого подхода по правильности и точности полученных возрастных данных не обнаружено. Показано наличие двух процессов метаморфизма палеоархейского и палеопротерозойского возраста. Отмечена высокая термоустойчивость Pb-Pb системы в клинопироксене. Определен изотопный состав исходного свинца и установлена причина вариации отношения <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb. Преобладающий исходный свинец концентрируется в сульфидной фракции и располагается на изотопном графике **слева от геохроны**.

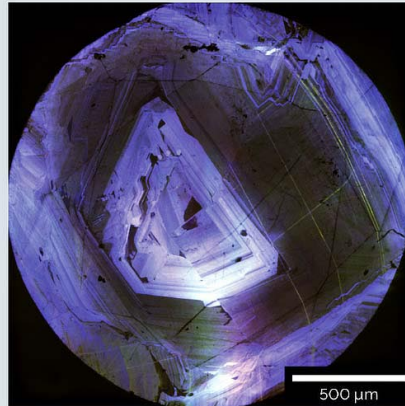
Работа выполнена в институте геологии и геохронологии докембрия РАН в рамках темы НИР FMUW-2022-0005.

## ООО «ТЕСКАН»

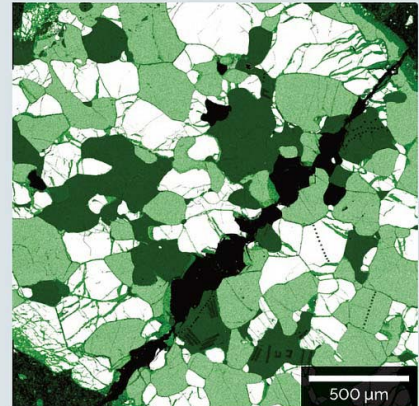
– поставщик сканирующих электронных микроскопов TESCAN, аналитических систем и оборудования для пробоподготовки



▲ Эклогит. Карта распределения минералов



▲ Алмаз. Катодолюминесценция



▲ Распределение магния в ксенолите перидотита из щелочных базальтов

### Наши преимущества

- ✓ Комплексная методическая поддержка: индивидуальное обучение, ориентированное на задачи пользователей, и ежегодные бесплатные обучающие семинары
- ✓ Собственные демонстрационные лаборатории в Москве и Санкт-Петербурге: возможность проведения демонстрационных исследований образцов заказчиков
- ✓ Собственная сервисная служба: монтаж, пусконаладочные работы, гарантийное и постгарантийное обслуживание
- ✓ Опыт оснащения лабораторий в самых различных сферах: геология и горнодобывающая промышленность, исследования материалов и изделий, биология, криминалистика и другие

### Поставляемое оборудование:

- Сканирующие электронные микроскопы (W-SEM, FEG-SEM)
- Приставки для элементного энергодисперсионного (EDS) и волнодисперсионного (WDS) микроанализа, детекторы катодолюминесценции (CL)
- Комплексы автоматизированного минералогического анализа (TIMA)
- Системы анализа картин дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD)
- Станции со сфокусированным ионным пучком (FIB-SEM), ионная микротомография (3D-SEM, 3D-EDS, 3D-EBSD)
- Рентгеновские томографы для визуализации и исследования кернов (CoreTom)
- Пробоподготовка: механическая и ионная полировка, компактные напылительные установки и другое оборудование