

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 543.27

**ВЫСОКОВАКУУМНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ ГЕЛИЯ И ДРУГИХ ГАЗОВ
ИЗ МИЛИГРАММОВЫХ НАВЕСОК МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД
НА БАЗЕ ИТТЕРБИЕВОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА В
СКАНИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ**

©2025 г. О. В. Якубович^{a,b,*}, Б. М. Гороховский^a, С. В. Гаврилов^b,
Н. Р. Галль^c, Е. В. Адамская^a, А. Б. Котов^a, Е. С. Иванова^a,
Л. А. Соколова^{a,b}, Н. А. Васильева^{a,b}, М. О. Аносова^d

^aИнститут геологии и геохронологии докембрия

Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

^bИнститут наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета

Россия, 199178, Санкт-Петербург, 10-я линия В.О., 33–35

^cФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

^dИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского

Российской академии наук

Россия, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19

*e-mail: olya.v.yakubovich@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.2025 г.

После доработки 20.06.2025 г.

Принята к публикации 19.07.2025 г.

В настоящее время основной техникой, используемой для выделения газов из твердых геологических образцов с целью проведения геохронологических исследований, является их термическая деструкция либо в изотермическом режиме, например в печи двойного вакуума, либо под действием лазерного излучения. Подходы, основанные на применении лазерных технологий, являются более экспрессными и низкофоновыми. Описана оригинальная высоковакуумная экспериментальная установка на основе иттербиевого оптоволоконного лазера для выделения газов из миллиграммовых навесок горных пород и минералов в сканирующем режиме. Показано, что в предложенной конфигурации в ячейке может быть достигнут статический вакуум на уровне 10^{-8} торр и обеспечен нагрев единичных зерен минералов до температуры более 1800 °С. На примере международного стандарта для (U,Th)–He-датирования – апатита Дуранго – продемонстрировано, что

лазерная установка обеспечивает полное выделение радиогенного гелия из минерала и может быть использована для изотопно-геохронологических исследований.

1. ВВЕДЕНИЕ

Методы изотопной геологии являются ключевыми в области наук о Земле. На основе изотопно-геохронологических данных строятся современные геологические карты, а также определяются стратегии поиска и разведки месторождений полезных ископаемых. Среди методов изотопной геологии выделяется группа методов, основанная на измерениях содержания и изотопного состава благородных газов в минералах и горных породах. По содержанию изотопов ^{40}Ar и ^4He , образованных в ходе радиоактивного распада ^{40}K , а также изотопов U, Th и членов их радиоактивных семейств можно определить возраст минерала [1]. Как правило, для решения такого типа задач геологи работают с миллиграммовыми навесками вещества, а содержание благородных газов в пробе редко превышает 10^{-4} см³/г.

В настоящее время основной техникой, используемой для выделения благородных газов из кристаллической решетки минералов, является их термическая деструкция либо в изотермическом режиме, например в печи двойного вакуума, либо под действием лазерного излучения. В первом случае весь образец более или менее равномерно нагревается внутри высоковакуумной кюветы и газы выходят из него при плавлении, при его термической деструкции или за счет диффузии с последующей термической десорбцией. Нагрев, как правило, осуществляется путем пропускания тока через нагревательный цилиндр, сделанный из рения, графита, или других тугоплавких материалов; в ряде случаев используются специальные индукционные печи. При лазерной экстракции излучение воздействует на образец более локально. В зависимости от типа лазера выделение газов происходит либо при нагреве образца (ИК-лазеры), либо при абляции (УФ-лазеры), либо при деструкции (СО₂-лазеры) той части образца, на которую попадает излучение. Наиболее распространенным решением для экстракции благородных газов является использование эксимерного лазера [2], СО₂-лазера (в том числе в сканирующем режиме) [3] и диодного лазера [4].

В настоящей работе мы приводим описание новой сканирующей лазерной системы, основанной на иттербиевом оптоволоконном лазере, которая была разработана и собрана в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН для экстракции гелия из микрограммовых навесок минералов.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экстракционная лазерная система была собрана на базе масс-спектрометрического комплекса МСУ-Г-01-М. Этот комплекс (МСУ-Г-01) был разработан в 2009 г. ООО “Спектрон-Аналит” в Санкт-Петербурге. В дальнейшем он был модифицирован путем добавления дополнительной высокотемпературной камеры для экстракции гелия, в новой комплектации он получил название МСУ-Г-01-М (2011 г.). Главная особенность этого прибора состоит в малом объеме аналитической части и, соответственно, в предельно высокой чувствительности определения гелия. Этот комплекс обеспечивает надежную регистрацию 10^6 атомов гелия, а вакуумная система дает остаточное давление в рабочем объеме на уровне 10^{-9} торр, и парциальное давление по He, равное 10^{-17} торр [5, 6].

Для создания новой лазерной экстракционной системы был выбран иттербиевый оптоволоконный лазер с длиной волны 1064 нм. Этот оптоволоконный лазер является распространенным на рынке и широко используется в промышленности для гравировки металлических изделий. Основные характеристики используемого лазера приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики лазерного источника

Модель	Wattsan FL TT RS50
Производитель	Wattsan Production Technology Co. Ltd, Китай
Рабочее поле, мм ²	200×200
Тип лазера	Иттербиевый оптоволоконный
Мощность лазера, Вт	50
Длина волны, нм:	1064
Скорость маркировки, мм/с	До 7000
Тип охлаждения лазера	Воздушное
Срок службы излучателя, ч	До 100000
Выходная частота лазера, кГц	20–60

Для экстракции гелия из минералов с помощью оптоволоконного иттербиевого лазера мы сконструировали высоковакуумную лазерную ячейку по аналогии с той, которая используется для экстракции гелия диодным лазером [4]. В съемном фланце ячейки есть окно из прозрачного сапфирового стекла: сапфир прозрачен для излучения в диапазоне длин волн от 200 до 5500 нм [7], но не пропускает гелий из атмосферы при комнатной температуре. Откачка ячейки от атмосферного давления является двухступенчатой: первая ступень – это откачка до форвакуума с помощью насоса Varian DS 202, высокий вакуум достигается путем длительной откачки (в течение 12 ч) турбомолекулярным насосом Hi Cube (Pfeiffer) и

диффузионным насосом Varian AX-65. Подключение ячейки к насосам и масс-спектрометрическому комплексу МСУ-Г-01 осуществляется через цельнометаллические высоковакуумные вентили с медными конусами, прогреваемые до 240 °С. Для соединения компонентов используют медные уплотнений типа Conflat (CF) разного диаметра (внутренний диаметр 16, 63 мм). Такая система откачки и изоляции позволяет получать в ячейке статический вакуум на уровне 10^{-8} торр через несколько часов после загрузки образцов. Компонентная схема вакуумной ячейки представлена на рис. 1. При измерении содержаний гелия в образце откачка (вентиль VM1 и VM2) закрыта.

Для измерения низких содержаний гелия ячейка дополнена системой очистки от активных газов, представляющей собой U-образный изгиб металлической трубки без наполнителя, охлажденный во время измерений до температуры жидкого азота. При воздействии лазерным излучением на образец происходит нагревание подложки, на которой он располагается, что приводит к увеличению фона измерения. Для отвода этого избыточного тепла в качестве подложки используется толстая медная пластина (толщиной 1 см), в которой сделаны лунки для образцов. Изображение лазерной ячейки в собранном виде представлено на рис. 2а.

Фокусировка лазера на образец осуществляется с помощью ИК-лазера-трассировщика, а сам нагрев происходит в режиме расфокусировки иттербиевого лазера: проба находится на расстоянии, в 1.5 раза большем фокусного расстояния линзы лазера. Для обеспечения равномерности нагрева пробы, размер которой больше размера пятна лазера, используется сканирующий режим. Заливка – нагрев всей пробы – осуществляется за счет быстрого автоматического перемещения пучка лазерным маркером по аналогии с тем, как это делается при гравировке сложных рисунков. Используемая скорость заливки (движения маркера) составляет 3000 мм/с. Длительность нагрева контролируется количеством повторяющихся проходов маркера по одной и той же траектории.

Рис 1. Схема высоковакуумной ячейки для экстракции гелия из минералов оптоволоконным иттербиевым лазером...

Рис 2. Фотография экстракционной лазерной системы... Фотография образца во время нагрева оптоволоконным иттербиевым лазером...

3. ТЕСТИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ЯЧЕЙКИ

Для оценки возможностей применения разработанной лазерной ячейки для решения геологических задач была проведена серия экспериментов по экстракции радиогенного гелия из апатита Дуранго, являющегося международным стандартом для (U,Th)–He-датирования [8], самородной платины RS-Pt с известной концентрацией радиогенного гелия [9] и изоферроплатины из россыпей Дальнего Востока РФ.

Единичные зерна апатита Дуранго (размером около 100 мкм) были завернуты в танталовую фольгу и помещены на медную подложку ($n=10$). Зерна платины (массой 0.4–4.8 мг, $n=8$) были помещены на медную подложку на танталовую фольгу (полностью в фольгу не заворачивались). Поскольку при нагреве возможно частичное испарение вещества, для защиты верхнего окна из сапфирового стекла от напыления было использовано дополнительное сапфировое стекло, которое кладется непосредственно на медную подложку. Контроль температуры осуществляется с помощью оптического пирометра (ПРОМИНЬ-М). Для выделения гелия нагрев осуществлялся путем последовательного увеличения мощности лазера до момента, пока гелий не перестанет выделяться из образца. Бланк эксперимента определялся путем нагрева пустого танталового конверта при идентичных условиях.

Для калибровки лазерной ячейки – определения новой чувствительности масс-спектрометрического комплекса МСУ-Г-01-М из-за изменения его объема – использовались метеоритный стандарт Княгиня [10] и платиновый стандарт RS-Pt [9]. Для калибровки комплекса экстракция гелия осуществлялась в высоковакуумной печи масс-спектрометрического комплекса МСУ-Г-01-М (экстрактор 2; [6]).

3.1. Апатит

Для апатита полного выделения гелия удалось достичь при следующих установках: 25–40% мощности лазера, размер нагреваемой области $1.5 \times 1.5 \text{ мм}^2$ (размер танталового конверта), длительность нагрева 20–30 мин (4000–6000 проходов лазерного маркера). Выходная частота лазера 40 кГц. Температура танталового конверта с пробой при таких условиях составляет порядка 800–1000 °С. Некоторая вариативность условий полного выделения гелия из апатита, вероятно, связана с разной эффективностью нагрева танталовых конвертов, обусловленной более плотным контактом с медной подложкой и/или отражением части лазерного излучения. Разная эффективность нагрева при одинаковых установках фиксировалась и визуально с помощью оптического пирометра.

Для использования предложенной лазерной ячейки для (U,Th)–He-датирования апатита важно убедиться не только в полной экстракции гелия из зерен апатита, но и в отсутствии их излишнего перегрева, так как чрезмерный нагрев приводит к испарению урана и, как следствие, завышенным значениям (U,Th)–He-возраста [11]. Для определения (U,Th)–He-возраста в дегазированные зерна по стандартной методике методом изотопного разбавления с использованием ^{230}Th - ^{235}U -трассера на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELEMENT 2 (ГЕОХИ РАН) и ELEMENT XR (ИГГД РАН) было определено содержание урана и тория. Разложение зерен осуществлялось в закрытых бюксах на плитке (180 °С, 12 ч) в концентрированной азотной кислоте.

В табл. 2 и на рис. 3 приведены результаты (U,Th)–He-датирования апатита Дуранго, полученные на разработанной лазерной экстракционной ячейке. Видно, что значения (U,Th)–He-возраста хорошо воспроизводятся и лежат в диапазоне от 29.4 до 31.9 млн лет, они соответствуют данным, полученным в других лабораториях, где экстракция гелия осуществлялась с использованием диодного лазера (29–33 млн лет) [12].

Таблица 2. Результаты (U,Th)–He-датирования апатита Дуранго с использованием экстракционной лазерной ячейки на основе оптоволоконного иттербиевого лазера

№	^4He , 10^{10} атомов	1σ	U, 10^{10} атомов	1σ	Th, 10^{10} атомов	1σ	Th/U	Возраст, млн лет	\pm
1397	66.2	0.7	318	8	5780	160	18.2	31.1	0.7
1401	104.4	0.9	501	13	8850	240	17.7	31.9	0.6
1406	39.2	0.3	204	5	3600	100	17.6	29.4	0.5
1410	112.8	0.6	560	14	10000	250	17.9	30.5	0.4
1412	178.7	1.0	890	21	15800	400	17.8	30.7	0.4
1426	225.7	1.7	1090	20	19700	400	18.1	31.1	0.5
1436	106.8	0.4	510	16	9100	300	17.8	31.9	0.5
1467	30.6	0.2	155	3	2800	40	18.1	29.7	0.4
1474	18.6	0.5	101	2	1660	30	16.4	29.8	1.6
1497	110.1	2.6	550	10	9600	210	17.5	30.8	1.4
Бланк	0.16	0.09	–	–	–	–	–	–	–

Рис 3. Результаты (U,Th)–He-датирования апатита Дуранго с использованием иттербиевого оптоволоконного лазера.

3.2. Платина

Полное выделение радиогенного гелия из платины происходит при ее плавлении [13]. При этом происходит изменение первоначально неправильной формы зерна на шарообразную, что легко наблюдается визуально. Плавления платины с помощью лазерной установки на танталовой фольге удалось достичь при следующих настройках: 85–100% мощности лазера, размер нагреваемой области $1.5 \times 1.5 \text{ мм}^2$, длительность нагрева 10–15 мин (2000–3000 проходов лазерного маркера). Выходная частота лазера 40 кГц. Используемый пирометр не откалиброван на температуры более 1400 °С, поэтому установить точную температуру нагрева поверхности не представляется возможным, но локально в одном из экспериментов было зафиксировано проплавление танталовой фольги (3020 °С). Если зерно платины положить непосредственно на медную подложку, то визуальный нагрев зерна не наблюдался.

При нагреве платины наблюдалось частичное напыление покрывного поверхностного сапфирового стекла, что снижало эффективность дальнейшего нагрева образца. В ряде случаев это приводило к растрескиванию покрывного стекла и измерение приходилось останавливать.

Электронная микроскопия (JSM 6510LA JEOL с JED-2200) отполированных срезов зерен платины показала, что в визуально расплавленных зернах остаются реликты нерасплавленного материала (объемная доля от 18 до 30 % для зерен массой 4.86 и 1.3 мг соответственно). Таким образом, применение оптоволоконного иттербиевого лазера для экстракции гелия из платины требует дополнительно контроля полноты выделения гелия, либо дальнейшей модификации условий экстракции гелия из этого минерала. Фон ячейки при используемых условиях экстракции гелия из платины, определенный по количеству избыточного гелия в образцах платины RS-Pt, составляет около 10^{10} атомов ^4He .

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные указывают на то, что разработанная лазерная экстракционная система может быть использована для выделения гелия из ряда минералов. Система обеспечивает стабильный нагрев образцов до температур порядка 1000 °С в течение относительно длительного времени (20–30 мин). Таких условий достаточно для полного выделения гелия из таких минералов, как апатит, циркон и пирит [15].

Уровень фона лазерной ячейки незначительно ниже, чем уровень фона высоковакуумной печи масс-спектрометрического комплекса МСУ-Г-01-М, и средняя

скорость получения аналитических данных в текущей модификации лазерной ячейки увеличивается в 5–6 раз. Это обеспечивается в первую очередь за счет возможности одновременной загрузки сразу нескольких образцов (от 8 до 16) и возможности перехода к измерению следующего образца без дополнительной остановки измерений (стандартная процедура загрузки-выгрузки в высоковакуумную камеру занимает 3 ч).

Нагрев в автоматическом сканирующем режиме позволяет выделять гелий из относительно крупных образцов (площадь поверхности нагрева до 20 мм²), однако точность поддержания температуры нагрева в случае использования лазерной ячейки существенно ниже, чем в высоковакуумной печи. При перемещении лазерного пучка по относительно большому танталовому конверту видно, что удаленная часть успевает немного остыть.

4.1. Оценка температурного предела возможностей экстракционной ячейки

Для того чтобы тепловой контакт образца с медной подложкой не мешал нагреву образца, образец помещался в конверт из танталовой фольги; при этом передача тепла в подложку резко уменьшалась, что позволяло нагревать фольгу до 1000 °С и выше.

В экспериментах по выделению гелия из платины степень плавления платиновых образцов сильно зависела от их размера и формы, что приводило к неполной экстракции гелия. В текущей конструкции ячейки методика работы с платиной пока не отработана, что отчасти связано с мощностными ограничениями использованного лазера. Проведем оценочный расчет возможности плавления миллиграммовых зерен платины. Средняя удельная теплоемкость платины составляет 133 Дж·(кг·К)⁻¹ в интервале от комнатной температуры до температуры плавления [16]. Соответственно, теплоемкость 5 мг платины составляет 6.65·10⁻⁴ Дж·К⁻¹. При нагреве этого образца до температуры плавления, т.е. от 300 К до 2041 К, необходимая теплота составит

$$\Delta Q = 1741 \cdot 6.65 \cdot 10^{-4} \approx 1.1 \text{ Дж.} \quad (1)$$

С другой стороны, при попадании лазерного излучения на образец при мощности излучения $P = 50$ Вт и среднем коэффициенте серости $\varepsilon \approx 0.3$ [16] поглощенная мощность составит

$$P_1 = P \varepsilon = 15 \text{ Вт.} \quad (2)$$

Соответственно, количество тепла ΔQ_{ext} , выделившегося в образце за время экспозиции $t = 600$ с, составит

$$\Delta Q_{\text{ext}} = P_1 t = 9000 \text{ Дж.} \quad (3)$$

Как видно, величины ΔQ и ΔQ_{ext} различаются почти в 10000 раз, и если бы вся мощность, принесенная лазерным излучением, действительно превратилась бы в тепло, запасенное в образце, то он не только бы весь расплавился, но и частично испарился. Этого не происходит, так как с ростом температур резко растут потери тепла как за счет излучения, так и за счет теплопроводности остаточного газа (теплопередача между твердыми телами в высоком вакууме пренебрежимо мала, так как контакт носит практически точечный характер; теплообмен осуществляется в основном за счет газового переноса в узких зазорах между соприкасающимися поверхностями).

Потери за счет излучения ΔQ_{rad} определяются формулой Стефана–Больцмана, скорректированной с учетом коэффициента серости ε , причем величина ε зависит от температуры, имея величину, близкую к единице при низких температурах и уменьшающуюся до величины $\varepsilon = 0.3$ при температуре, близкой к температуре плавления. Эти потери также пропорциональны площади поверхности образца S :

$$\Delta Q_{\text{rad}} = S \cdot \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (4)$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная Стефана–Больцмана.

Унос тепла за счет теплопроводности газа ΔQ_{gas} пропорционален площади поверхности образца S , разности между температурами образца и стенок вакуумной камеры ΔT , давлению P и эффективному коэффициенту аккомодации α , сильно и сложно зависящему от давления и состава остаточных газов:

$$\Delta Q_{\text{gas}} = \alpha(P) \cdot \Delta T \cdot P \cdot S. \quad (5)$$

Полный объем тепла, отведенного от образца, определяется интегралом формул (4) и (5) по интервалу температур нагрева (от 300 К до температуры плавления платины). В аналитическом виде эти интегралы рассчитать нельзя, и даже их цифровой анализ затруднен из-за неопределенности с величинами коэффициентов $\varepsilon(T)$ и $\alpha(P)$. Вместо этого удобно оценить мощность тепловых потерь как за счет излучения, так и за счет газовых процессов при максимальной температуре; для второй части задачи воспользуемся данными, представленными в работе [17].

Примем, что зерно платины имеет форму сфероида с диаметром $R \approx 0.4$ мм, его поверхность $S = 4\pi R^2 = 2 \text{ мм}^2$. Подставив эти значения в формулу (4) и воспользовавшись данными из работы [17], получаем

$$\Delta Q_{\text{rad}}(2041 \text{ К}) = 55.6 \text{ Вт}.$$

Видно, что в этой ситуации чисто радиационные потери существенно превышают приносимую лазером энергию мощностью 15 Вт, и учет роли газа не требуется, хотя он тоже

может уносить некоторое количество тепла. Видимо, именно поэтому относительно крупные зерна платины не удалось полностью расплавить. Отметим, что если бы площадь поверхности платинового образца была в 4 раза меньше, то мощности лазера в высоком вакууме могло бы уже быть достаточно для его плавления. Таким образом, можно предположить, что для экстракции гелия из платины подходят исключительно зерна размером менее 250 мкм (навеска порядка 1 мг).

Учитывая относительно высокий фон ячейки при экстракции гелия из платины (10^{10} атомов) и учитывая небольшой размер зерен, которые могут быть расплавлены, мы можем заключить, что для геохронологических исследований платины (Pt–He-датирование) в такой модификации лазерной ячейки подходят только зерна с возрастом более 100 млн лет.

4.2. Оценка возможностей разработанной лазерной ячейки для экстракции аргона

Экстракционные лазерные ячейки для выделения радиогенного аргона из минералов обычно основаны на CO₂-лазере, так как излучение при его длине волны наиболее эффективно взаимодействует с силикатными минералами. Использование подобного лазера, для которого стандартные сапфировые смотровые стекла являются непрозрачными, накладывает ряд ограничений: в качестве окна необходимо использовать более редкие ZnSe-окна с системой дополнительной откачки. Необходимость наличия дополнительного контура откачки связана с тем, что ZnSe нельзя приварить к нержавеющей стали, его зажимают между двумя алюминиевыми уплотнениями [3]. Это не может обеспечить полную герметичность системы, и при отсутствии непрерывной откачки происходит натекание аргона и других газов из атмосферы в камеру масс-спектрометра.

Температура экстракции аргона из большинства силикатных минералов составляет порядка 1200–1400 °С. Подобные условия, вероятно, можно будет достичь в разработанной ячейке с использованием иттербиевого лазера. Однако с учетом относительно больших навесок минералов, используемых для ⁴⁰K-⁴⁰Ar- и ³⁹Ar/⁴⁰Ar-датирования, мощность лазера для эффективной экстракции аргона, вероятно, должна быть увеличена до 100 Вт.

4.3. Сравнение разработанной лазерной ячейки для экстракции газов с аналогами

Разработанная лазерная ячейка по своим основным характеристикам не уступает экстракционным ячейкам на основе диодных лазеров, а наличие сканирующего режима позволяет использовать ее для решения более широкого спектра геологических и термохронологических задач. Лазерные ячейки на основе эксимерного и CO₂-лазеров

принципиально по-другому взаимодействуют с веществом – происходит абляция вещества. Поэтому в данной модификации и настройках разработанная ячейка не может быть альтернативой этим системам экстракции газов.

Таким образом, разработанная ячейка может быть использована как самостоятельный элемент при разработке отечественных масс-спектрометрических комплексов для изотопно-геохронологических исследований.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана оригинальная высоковакуумная экспериментальная установка на основе иттербиевого оптоволоконного лазера для выделения газов из миллиграммовых навесок горных пород и минералов в сканирующем режиме. Показано, что в предложенной конфигурации в ячейке может быть достигнут статический вакуум на уровне 10^{-8} торр и обеспечен нагрев единичных зерен минералов до температуры более 1800 °С. По своим характеристикам разработанная ячейка не уступает имеющимся аналогам, а по некоторым даже превосходит их.

На примере международного стандарта для (U,Th)–He-датирования – апатита Дуранго – продемонстрировано, что лазерная установка обеспечивает полное выделение радиогенного гелия из минерала и может быть использована для изотопно-геохронологических исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-77-10088) с использованием оборудования ЦКП “Аириз” (ИГГД РАН), а также в рамках плановых тем ИГГД РАН (FMUW-2025-0002). Работа М.О.Аносовой по изучению химического состава апатита выполнена в рамках государственного задания ГЕОХИ РАН. Работа Н.Р. Галля по расчету параметров нагрева выполнена в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фор Г.* Основы изотопной геологии. Москва: Мир, 1989.
2. *Evans N.J., McInnes B.I.A., McDonald B et al.* // J. Anal. At. Spectrom. 2015. V. 30. P. 1636. <https://doi.org/10.1039/c5ja00085h>
3. *Barfod D.N., Mark D.F., Tait A., Dymock R.C., Imlach J.* // Geol. Soc. Spec. Publ. 2013. V. 378.

- P.79. <https://doi.org/10.1144/SP378.23>
4. *Foeken J.P.T., Stuart F.M., Dobson K.J., Persano C., Vilbert D.* // *Geosystems*. 2006. V. 7. P. 1. <https://doi.org/10.1029/2005GC001190>.
 5. *Якубович О.В., Шуколюков Ю.А., Котов А.Б., Яковлева С.З., Сальникова Е.Б.* // *Петрология*. 2010. Т. 8. С. 579.
 6. *Шуколюков Ю.А., Якубович О.В., Яковлева С.З., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Рыцк Е.Ю.* // *Петрология*. 2012. Т. 20. № 1. С. 3. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17313794>
 7. *Loewenstein E.V.* // *J. Opt. Soc. Am.* 1961. V. 51. P. 108. <https://doi.org/10.1364/JOSA.51.000108>
 8. *Farley K.A.* // *Rev. Mineral. Geochemistry*. 2002. V. 47. P. 819. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.18>
 9. *Yakubovich O.V., Stuart F.M., Ivanova E.S., Gervilla F.* // *Geostand. Geoanal. Res.* 2023. V. 47. P. 957. <https://doi.org/10.1111/ggr.12502>
 10. *Schultz L., Franke L.* // *Meteorit. Planet. Sci.* 2004. V. 39. P. 1889. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00083.x>
 11. *Stuart F.M., Persano C.* // *Eos Trans. AGU* 1999. V. 80. № 46. P. F1169
 12. *Corona-Esquivel R., Levresse G., Solé J., Henriquez F., Pi T.* // *J. South Am. Earth Sci.* 2018. V. 88. P. 367. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.09.014>
 13. *Шуколюков Ю.А., Якубович О.В., Мочалов А.Г., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Корнеев С.И., Гороховский Б.М.* // *Петрология*. 2012. Т. 20. № 6. С. 545. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17936947>
 14. *Vermeesch P.* // *Geosci. Front.* 2018. V. 9. P. 1479. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
 15. *Якубович О.В., Гедз А.М., Викентьев И. В., Котов А.Б., Гороховский, Б.М.* // *Петрология*. 2019. Т. 27. № 1. С. 65. <https://doi.org/10.31857/S0869-590327165-86>
 16. *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин: справочник. Москва: Атомиздат, 1976.
 17. *Рутьков Е.В., Беляева О.А., Галь Н.Р.* // *ЖТФ*. 2023. Т. 93. № 2. С. 286. <https://doi.org/10.21883/jtf.2023.02.54505.187-22>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис 1.** Схема высоковакуумной ячейки для экстракции гелия из минералов оптоволоконным иттербиевым лазером в модификации, предусматривающей ее подключение к масс-спектрометрическому комплексу МСУ-Г-01 (**а** – вид сбоку, **б** – вид сверху): ВМ1 и ВМ2 – вентили откачки соответственно на масляный фор-насос и турбомолекулярный насос; ВМ3 – вентиль напуска газа в камеру масс-спектрометра; 1 – медная подложка, 2 – сапфировое стекло, 3 – прогреваемый вентиль с медным конусом, 4 – соединение CF-16, 5 – соединение CF-63.
- Рис 2.** Фотография экстракционной лазерной системы (**а**): 1 – высоковакуумная лазерная ячейка, 2 – лазерный маркер, 3 – ловушка с жидким азотом, 4 – масс-спектрометрический комплекс МСУ-Г-01-М, 5 – программа управления лазерным маркером. Фотография образца во время нагрева оптоволоконным иттербиевым лазером (**б**).
- Рис 3.** Результаты (U,Th)–He-датирования апатита Дуранго с использованием иттербиевого оптоволоконного лазера. Расчет значений возраста и ошибки определения выполнен в программе IsoplotR [14]. Представленные погрешности соответствуют 2σ . Диапазон разброса значений (U,Th)–He-возраста апатита Дуранго (закрашенная более светлая область) взят из компиляции данных по датированию этого апатита в разных лабораториях [12].

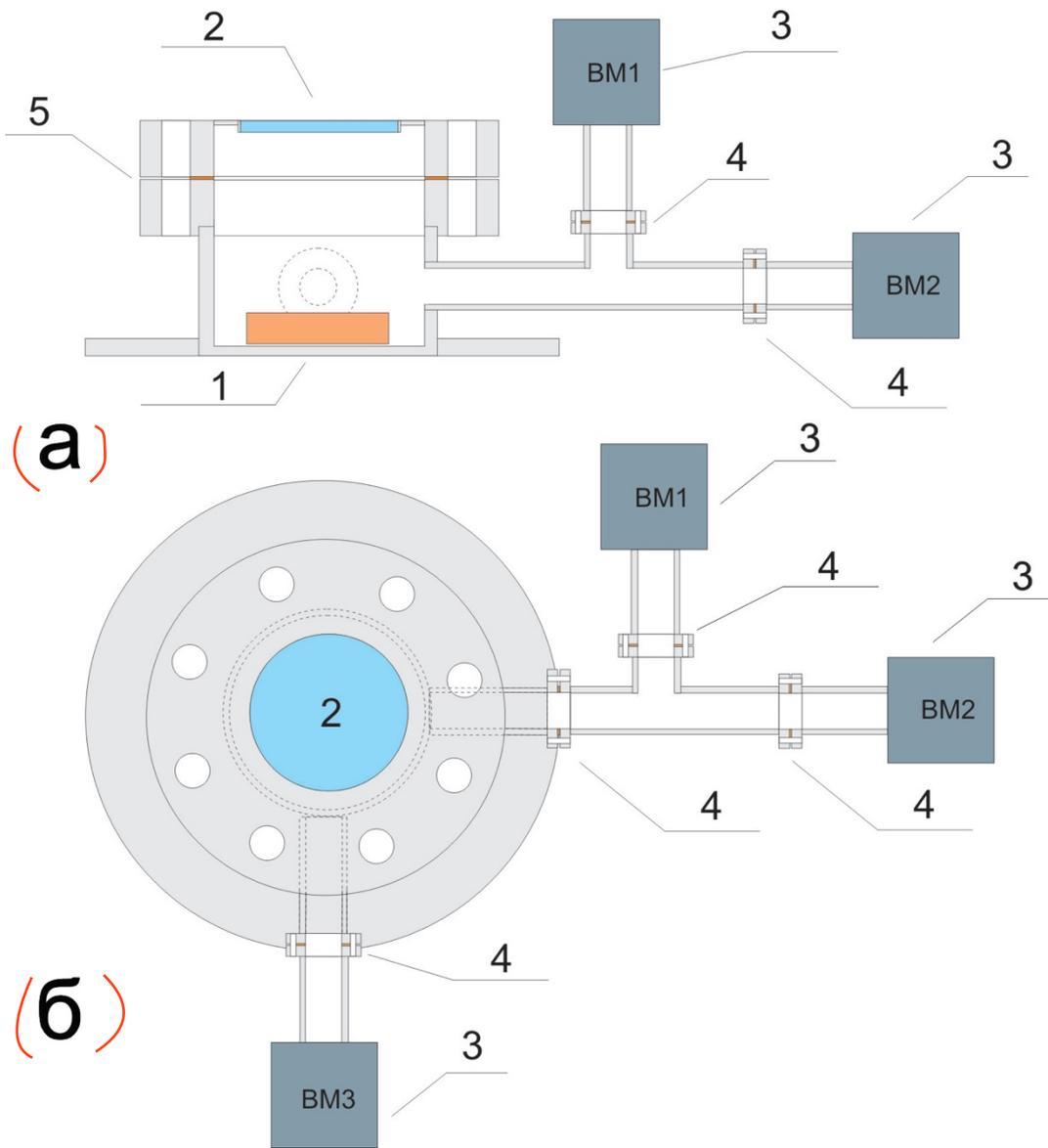


Рис. 1.

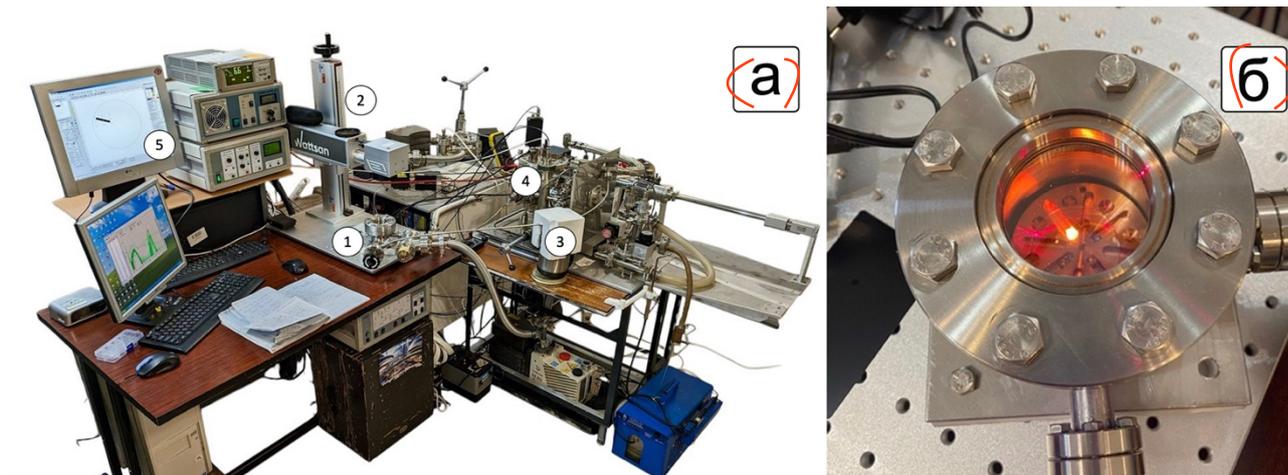


Рис. 2.

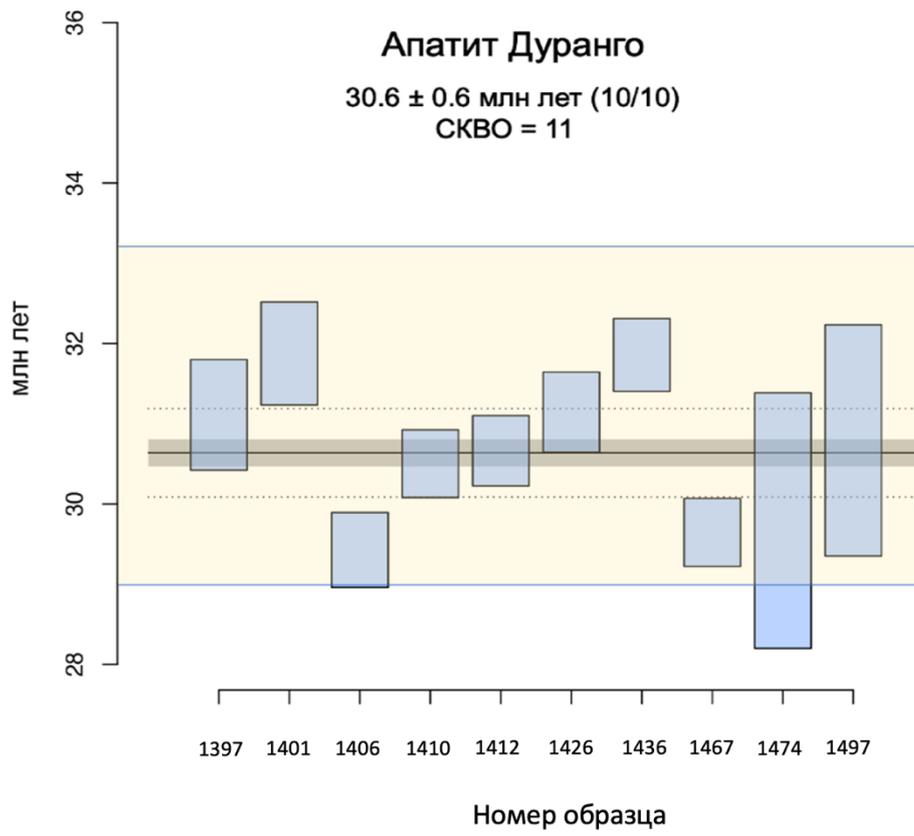


Рис. 3.