15

Тестирование натуральных и синтетических слюд в качестве детекторов ускоренных тяжелых ионов

© Е.В. Андреев,[1] П.Ю. Апель,[1,2] Т.М. Бубликова,[3] И.И. Засавицкий,[2] Н.С. Коновалова,[2] Н.М. Окатьева,[2] Н.Г. Полухина,[2] Т.В. Сеткова,[3] Н.И. Старков,[2] Е.Н. Старкова,[2] М.М. Чернявский,[2] Т.В. Щедрина[2]

[1] Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская обл., Россия
[2] Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия
[3] Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: starkovaen@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2025 г.
В окончательной редакции 5 сентября 2025 г.
Принято к публикации 26 сентября 2025 г.

Проанализированы результаты тестирования различных слюд, облученных ускоренными ионами Xe и Bi с энергиями от 83 до 670 MeV. Показано, что два типа природных слюд сохраняют треки ионов при нагревании после облучения до 300 °C и 500 °C, что означает их принципиальную применимость в эксперименте по изучению свойств сверхтяжелых ядер.

Ключевые слова: регистрирующие свойства природных и синтетических слюд при разных температурах, облучение ускоренными тяжелыми ионами, обработка изображений треков на автоматизированном микроскопе.

DOI: 10.61011/JTF.2026.01.62050.106-25

Введение

Проблема синтеза сверхтяжелых элементов непосредственно связана с вопросом их регистрации. В Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) изучение свойств сверхтяжелых ядер осуществляется по результатам сепарации продуктов их деления методом газовой термохроматографии на основе химических процессов в газовой среде [1,2]. Регистрация продуктов распада ядер с атомным номером более 112 в условиях термохроматографической колонки происходит при высоких температурах, достигающих 500 °C. В таких условиях использование кремниевых и эмульсионных детекторов для регистрации продуктов распада невозможно, и материалом детекторов могут быть диэлектрики, в частности, стекла и слюды.

В Лаборатории элементарных частиц ФИАН изучается возможность использования различных диэлектриков в качестве материалов для детекторов тяжелых ядер, способных сохранять треки при нагревании. В условиях высоких температур может происходить отжиг (полное или частичное исчезновение) треков в диэлектрическом детекторе, степень которого зависит, в первую очередь, от температуры и времени термического воздействия.

Авторами была проведена серия работ по исследованию регистрирующих свойств стекол различного состава в разных температурных условиях облучения и обработки [3–7]. Согласно полученным результатам, при высоких температурах в некоторых стеклах происходят изменения регистрирующих свойств, ограничивающие возможность их использования в этих условиях. Так, фосфатное стекло марки КНФС-3 и кварцевое стекло марки КУ-2 способны сохранять треки ионов, однако геометрические параметры треков в условиях высоких температур меняются, что затрудняет идентификацию ионов.

В экспериментальной ядерной физике широкое применение в качестве детекторов тяжелых ионов получили природные минералы и их синтетические аналоги, в частности, слюды (см., например, [8–11]). В настоящей работе приводятся результаты исследований нескольких слюд, облученных в ионном пучке резонансного циклотрона U-400 ЛЯР ОИЯИ и обработанных в различных температурных режимах. Анализировалась возможность использования этих материалов в качестве детекторов тяжелых ионов в условиях термохроматографической колонки.

1. Образцы для исследований

1.1. Химический состав исследуемых слюд

Одно из ценных свойств слюд — их высокая химическая устойчивость. Кроме того, многие слюды характеризуются оптической прозрачностью и более высокой, чем у стекол, устойчивостью по отношению к воздействию высоких температур. Эти факторы определили интерес к слюдам в данных исследованиях. Были протестированы образцы четырех различных слюд, химический

Химический состав протестированных слюд (mass%)

Компонент, %	Мусковит-лепидолит Ms-Lpd		„Индийский“ мусковит Ms-In		Слюда Ms		Фторфлогопит CM-310
	$n = 9$	2σ	$n = 9$	2σ	$n = 14$	2σ	
SiO_2	42.5	0.5	44.1	0.5	46.3	0.5	39.0 – 43.0
TiO_2	0.0	0.0	0.6	0.2	0.3	0.2	0.0
Al_2O_3	32.1	0.5	33.8	0.5	33.4	0.5	9.0 – 12.0
FeO	2.2	0.3	1.3	0.3	1.8	0.3	0.0
MnO	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
MgO	0.0	0.0	0.7	0.2	1.0	0.2	27.0 – 30.0
K_2O	9.9	0.4	10.5	0.4	10.8	0.4	7.0 – 9.0
Na_2O	0.7	0.3	0.8	0.2	0.8	0.2	0.0
F	3.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0 – 12.0
Li_2O_{cal}	3.4	–	–	–	–	–	–
$H_2O_{cal.}$	2.4	–	4.3	–	4.5	–	–
Сумма	97.1		96.0		98.8		100.0

состав которых представлен в таблице (где n — количество проведенных анализов, σ — среднеквадратичное отклонение): мусковит Ms, мусковит-лепидолит Ms-Lpd, так называемый „индийский“ мусковит Ms-In (название взято по месту добычи в Бихарском слюдоносном районе, Индия [12]) и синтетическая слюда фторфлогопит CM-310 производства НПО „Луч“.

Химический состав природных слюд Ms-Lpd, Ms-In и Ms определялся в рамках данного исследования с использованием электронно-зондового рентгеноспектрального анализа на цифровом сканирующем микроскопе Tescan Vega II XMU с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450, снабженным полупроводниковым Si(Li) детектором INCA x-sight и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ИЭМ РАН. Измерения выполнялись при ускоряющем напряжении 20 kV. Для установления зональности распределения элементов в образцах, сканирование проводилось по площадям размером $65 \times 65\,\mu$m, что позволило получить детальные сведения о вариациях химического состава. Для обеспечения проводящего слоя, необходимого для анализа, перед съемкой на образцы наносилась углеродная пленка толщиной 15 nm. Электронно-зондовый рентгеноспектральный анализ не определяет литий и водород, в связи с чем содержание Li_2O и H_2O в образцах было установлено из расчетов формульных единиц на $22(-)$ заряда по разнице.

Точный состав фторфлогопита марки CM-310 является коммерческой информацией производителя и приводится в виде диапазонов содержаний основных элементов.

1.2. Условия эксперимента

Химический состав слюды мусковит-лепидолит (Ms-Lpd) характеризуется высоким содержанием фтора и низким содержанием железа и магния. Ms-Lpd является маложелезистой литиево-алюминиевой слюдой, составляющей мусковит-лепидолитовую серию твердых растворов. Мусковит ($KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$) плавится с трудом, устойчив к воздействию кислот: соляная кислота практически не разлагает его даже при нагревании до 300 °C, серная кислота действует только при продолжительном нагревании. Лепидолит менее тугоплавкий, чем мусковит, в кислотах растворяется с трудом, только после плавления. Толщина отделяемых слоев Ms-Lpd составляет $50\,\mu$m. Степень его прозрачности позволяет просматривать на оптическом микроскопе образцы, образованные двумя пластинами минерала.

„Индийский“ мусковит Ms-In характеризуется равномерным распределением элементов по всему образцу. Минерал обладает высоким структурным совершенством. Слои прилегают плотно, что препятствует проникновению травящего раствора внутрь образца.

Химический состав слюды Ms отвечает составу минерала мусковита, по составу и содержанию элементов минерал схож со слюдой Ms-In. Распределение элементов равномерное по всему образцу. Слои минерала имеют толщину $\sim 40\,\mu$m и, как и в случае слюды Ms-In, прилегают друг к другу плотнее, чем у Ms-Lpd, не отделяясь друг от друга. При травлении химический раствор не проникает вглубь образца, и образец только

немного расслаивается по краям. Площадь тестируемых образцов слюд составляла от 1 до 5 cm^2.

Материал фторфлогопит (идеальная формула: $KMg_3(AlSi_3O_{10})F_2$) представляет собой синтетический аналог природной слюды флогопита, превосходящий ее по термостойкости. Несколько тестовых образцов размером $3 \times 5 \times 10$ mm были изготовлены для данных исследований в рамках научно-технического сотрудничества авторов с НПО „Луч". Фторфлогопит марки СМ-310 представляет собой легкую в обработке прочную керамику и обладает высокими изоляционными свойствами.

В некоторых случаях для получения более низких энергий ионов на пути частиц устанавливалась пленка полиэтилентерефталата (ПЭТФ) толщиной 7 μm, в результате чего энергия ионов, падающих на поверхность образца под углом 45°, составляла ~ 83 MeV (согласно расчетам по программе SRIM10 [14]). Всего в данных исследованиях 6 образцов слюд были облучены ионами Xe с энергией 83 MeV и 6 образцов — ионами Xe с энергией 160 MeV; 12 образцов были облучены ионами Bi с энергией 670 MeV; 4 образца фторфлогопита СМ-310 — ионами Xe с энергией 160 MeV.

Для визуализации радиационных повреждений, производимых заряженными частицами в диэлектрике, применялось травление химическими реагентами. Облученные образцы природных слюд подвергались травлению в 40 % растворе плавиковой кислоты HF с шагом от 5 до 15 min, а образцы фторфлогопита — в 2.5 % HF и в 10 % NaOH. Протравленные каналы, сформированные ускоренными ионами при проникновении в материал детектора, измерялись с увеличением $40^{\times}$ на оптическом микроскопе автоматизированного измерительного комплекса ПАВИКОМ в ФИАН [15].

Результаты аналогичных исследований для различных стекол представлены в [7]. В работе со стеклами при определении длины протравленного трека вводилась поправка на толщину стравленного слоя [16]. В составе природных слюд содержится большой процент алюминия, что придает этим минералам большую химическую устойчивость, в результате чего скорости их травления плавиковой кислотой составляют от 0.3 до 0.5 μm/h. Таким образом, за час травления толщина стравленного слоя не превышает 0.5 μm, что почти на порядок меньше этого показателя для стекол. Поскольку длина протравленных треков превышает 10 μm, толщиной стравленного слоя при определении длин треков в природных слюдах можно пренебречь.

Максимальная длина треков в этом эксперименте составляет $\sim 35\,\mu$m; при угле падения пучка 45° такие треки проникают в минерал на глубину $\sim 25\,\mu$m. С помощью компьютерной программы, установленной на измерительном комплексе ПАВИКОМ, выделялись изображения протравленных каналов, имеющих под микроскопом форму эллипса, и определялись их длина (большая ось эллипса) и ширина (малая ось эллипса). Глубина фокуса микроскопа при увеличении $40^{\times}$ составляет $\sim 20 - 22\,\mu$m, и на сфокусированном изображении начала трека его конец обычно несколько размыт в поле зрения микроскопа. Авторская программа выделения изображений отдельных треков включает процедуру увеличения контрастности, при которой размытый конец трека также включается в единый кластер (изображение проекции трека, сформированное в результате компьютерной обработки). В результате длина кластера полностью соответствует проекции протравленного канала, что позволяет с высокой точностью определить полную длину протравленного трека.

Важной характеристикой, позволяющей определить заряд иона, является величина его пробега в материале детектора. Поскольку размеры образцов значительно превышают длину полного пробега ускоренных ионов до остановки, точка остановки иона практически всегда находится в объеме образца. В результате на графике экспериментальной зависимости длины проекции трека от времени травления можно выделить точку перегиба, соответствующую остановке иона в материале детектора. Более крутой участок в начале травления соответствует области повреждений материала ионом (область трека) и имеет большую скорость травления по сравнению со скоростью травления основного материала, после точки перегиба происходит травление неповрежденного материала уже с меньшей скоростью [17,18]. Используя эту закономерность, можно определить величину пробега иона в минерале.

Часть образцов после облучения подвергалась нагреванию при 300 °C и 500 °C в муфельной печи ОИЯИ с последующей выдержкой 10 min и 3 h при этих температурах с целью оценить степень отжига треков. Ниже представлены результаты исследования облученных образцов четырех разных слюд с нагреванием и без него.

2. Результаты

2.1. Тестирование без нагрева

Один образец слюды Ms-Lpd был облучен пучком ионов Xe с энергией 160 MeV, прошедшим через слой ПЭТФ. Необходимо отметить, что работа со слюдами имеет свою специфику, отличную от аналогичных экспериментов со стеклами. Так, при обезжиривании и травлении образцов Ms-Lpd за счет проникновения жидкости между слоями слюды образуются пузыри (рис. 1, *a*), что, однако, не препятствует наблюдению протравленных треков под микроскопом. Треки ионов хорошо просматривались, начиная с 20 min травления.

На рис. 2, представляющем зависимость длины проекции трека на плоскость образца Ms-Lpd от времени травления, при времени травления 100 min наблюдается излом, после которого кривая имеет менее крутой наклон, что указывает на достижение ионом точки остановки в материале детектора [6]. Длина проекции трека в этой точке составляет $(9 \pm 1)\,\mu$m. С учетом угла

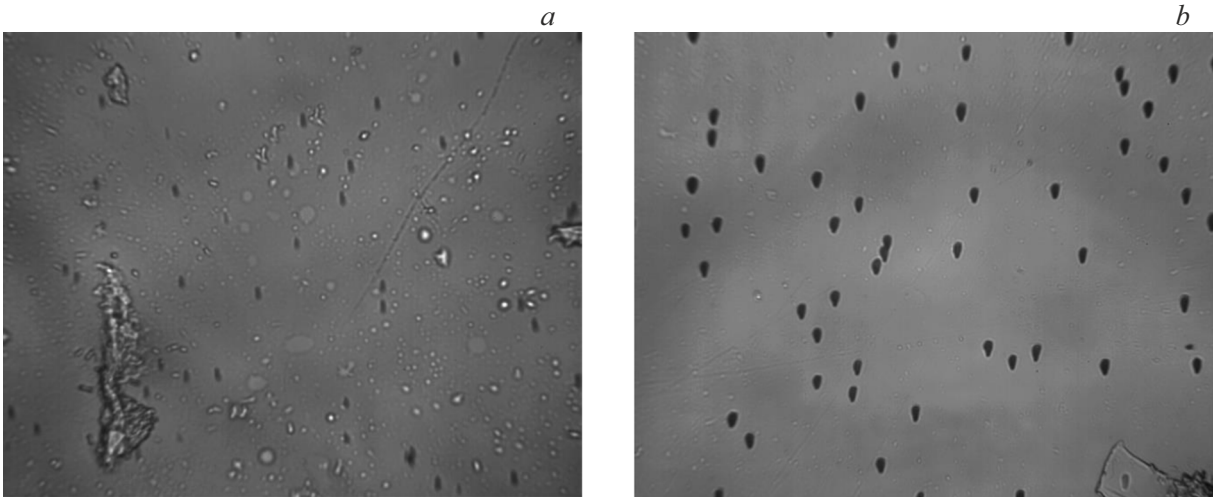

Рис. 1. Фотографии треков ионов Xe с энергией 83 MeV, полученных в образце слюды Ms-Lpd после травления в 40 % HF в течение 20 (a) и 80 (b) min. Размер кадра $220 \times 280\,\mu$m, увеличение $40^{\times}$.

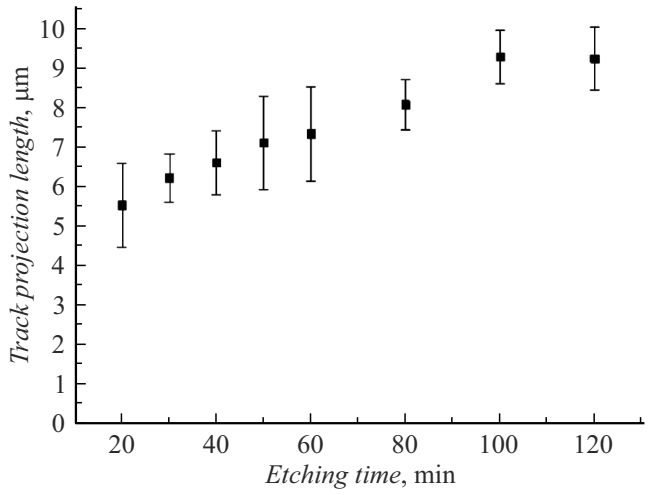

Рис. 2. Зависимость длины проекций треков ионов Xe с энергией 83 MeV на поверхность образца слюды Ms-Lpd от времени травления.

падения экспериментально полученная длина пробега иона в минерале $L_{path} = (13 \pm 1)\,\mu$m и, следовательно, скорость травления материала в области трека составляет $(8 \pm 1)\,\mu$m/h. Пробег ионов Xe с энергией 83 MeV, полученный с помощью программы SRIM10, составляет $11.5\,\mu$m, что согласуется с полученным экспериментальным значением в пределах ошибок измерения.

Второй образец слюды Ms-Lpd был облучен под углом 45° ионами Bi с энергией 670 MeV. На рис. 3 показаны фотографии облученной поверхности образца при разном времени травления.

Излом на экспериментальной кривой, представляющей зависимость длины проекции трека на плоскость образца от времени травления, в этом случае наблюдается при времени травления 40 min (рис. 4). Длина проекции трека при этом достигает $(22 \pm 1)\,\mu$m, что соответствует длине пробега $L_{path} = (31 \pm 1)\,\mu$m и скорости травления трека $(47 \pm 1)\,\mu$m/h. Величина пробега этих ионов, рассчитанная по программе SRIM10, составляет $32.3\,\mu$m.

Первая партия образцов слюды Ms-In была облучена ионами Xe с энергией 160 MeV под углом 45°. Треки появлялись после первых 10 min травления; после 70 min травления длины треков заметно увеличились (рис. 5).

Точка перегиба экспериментальной кривой наблюдается на 80 минуте травления (рис. 6); длина проекций треков в этой точке составляет $(13 \pm 1)\,\mu$m, длина пробега — $L_{path} = (18 \pm 1)\,\mu$m (расчетная длина пробега $17.3\,\mu$m), скорость травления в области трека — $(13 \pm 1)\,\mu$m/h.

Вторая партия образцов слюды Ms-In была облучена пучком ионов Bi с энергией 670 MeV под углом 45° (рис. 7). Точка перегиба на экспериментальной зависимости (рис. 8) появляется после 45 min травления, когда длина проекции трека составляет $(21 \pm 1)\,\mu$m, что соответствует длине пробега $L_{path} = (31 \pm 1)\,\mu$m (расчетная длина пробега $32.3\,\mu$m) и скорости травления в области трека $(41 \pm 1)\,\mu$m/h.

Одна партия образцов слюды Ms облучались пучком ионов Xe с энергией 160 MeV, прошедших через ПЭТФ толщиной $7\,\mu$m, в результате чего энергия ионов, падающих на образец под углом 45°, составила 83 MeV. Треки, появившиеся после первых 20 min травления в 40 % HF, оказались короче, чем в слюдах Ms-Lpd и Ms-In. На рис. 9 представлены изображения треков, а на рис. 10 — зависимость длины проекции трека на поверхность образца от времени травления. Перегиб в ходе точек происходит на 80 min травления, длина проекции трека при этом составляет $(9 \pm 1)\,\mu$m, что соответствует длине пробега $L_{path} = (14 \pm 1)\,\mu$m (расчетная длина пробега $11.5\,\mu$m) и скорости травления в области трека $(7 \pm 1)\,\mu$m/h.

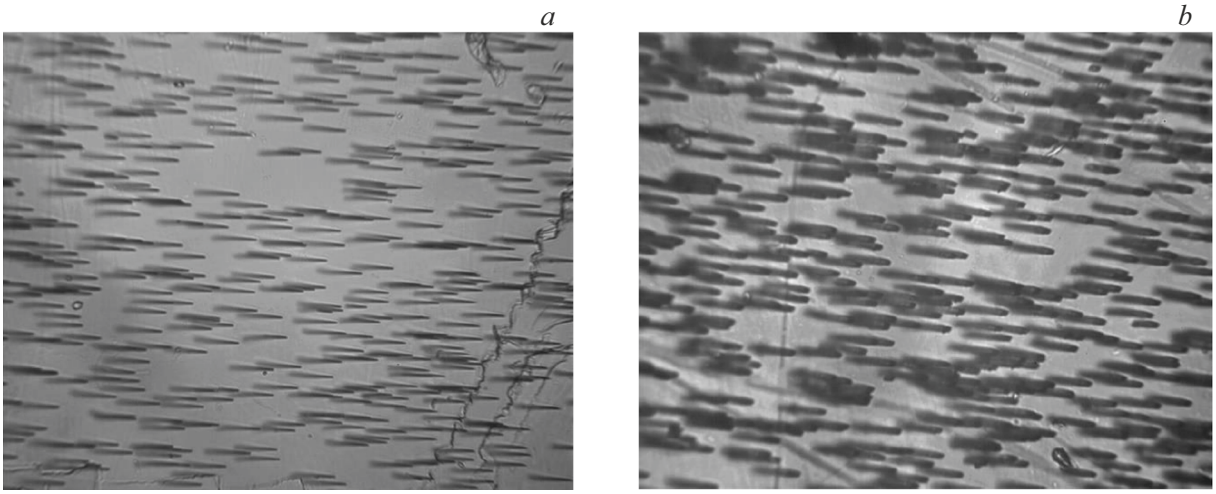

Рис. 3. Фотографии треков ионов Bi с энергией 670 MeV, полученных в образце слюды Ms-Lpd после травления в 40 % HF в течение 20 (a) и 70 (b) min. Размер кадра $220 \times 280\,\mu$m.

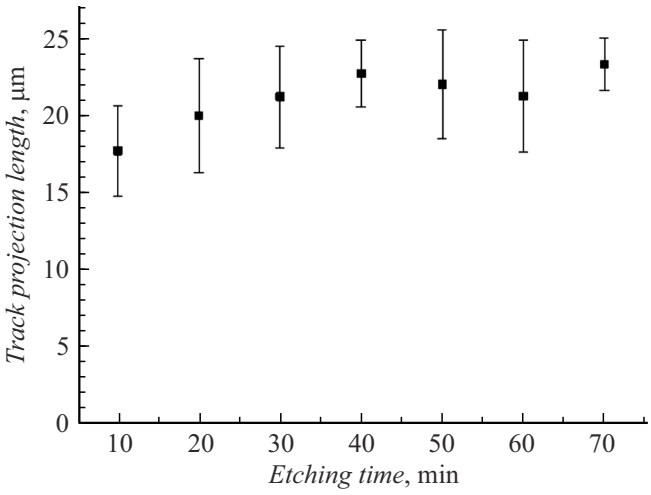

Рис. 4. Зависимость длины проекций треков ионов Bi с энергией 670 MeV на поверхность образца слюды Ms-Lpd от времени травления.

Вторая партия образцов слюды Ms облучались пучком ионов Bi с энергией 670 MeV. При энергии 670 MeV пробег ионов Bi в слюде Ms составляет $\sim 35\,\mu$m. Согласно оценке, полученной с помощью программы SRIM10, ион, проходящий через образец Ms толщиной $30\,\mu$m, выходит из него с энергией ~ 45 MeV. В результате травление происходит с двух сторон образца. Толщина и прозрачность образца позволяют просматривать на микроскопе треки с обеих сторон (рис. 11). В этом случае точка перегиба функции отсутствует (рис. 12), и поскольку длина проекции треков ионов Bi $\sim 20 - 22\,\mu$m достигается за первые 10 min травления, можно получить только оценку нижней границы скорости травления, которая составляет $70 - 90\,\mu$m/h.

Синтетическая слюда фторфлогопит в контексте поставленной задачи обнаруживает ряд технологических недостатков (рис. 13). Облученные образцы фторфлогопита были подвергнуты травлению плавиковой кислотой (2.5 % по объему по схеме $20 \times 30 \times 40$ min) и раствором гидроксида натрия 10 % NaOH. При травлении в 2.5 % HF потери образцов по весу в 20 раз превысили потери по весу у фосфатных стекол при травлении в 20 % HF [5]. После каждого этапа травления поверхность образцов становилась более рыхлой и менее прозрачной. При травлении в 10 % NaOH, напротив, потери массы не было обнаружено, и структура поверхности не менялась, что означало отсутствие взаимодействия материала с щелочным растворителем. Эти результаты свидетельствуют о невозможности использования фторфлогопита марки СМ-310 для решения поставленных задач.

2.2. Тестирование при нагревании до 300 °C

После облучения ионами Bi с энергией 670 MeV часть образцов слюды Ms была отожжена при температуре 300 °C с выдержкой при этой температуре в течение 10 min. После отжига видимые треки появились через 50 min травления в 40 % HF. Треки оказались сильно отожжены (рис. 14, a, b), глубина трека после температурной обработки образца не превысила $8 - 10\,\mu$m. На глубине $15\,\mu$m следы были совсем короткие и сопровождались дифракционной картиной, возможно, от тонкой части трека, не видимой в оптический микроскоп (эффект „залечивания“ дефектов, вызванных прохождением ионов). С обратной стороны образца следы треков были еще бледнее и существенно короче (рис. 14, c), что может быть связано с уменьшением энергии ионов в результате прохождения через образец. Таким образом, результаты тестирования слюды Ms при температуре 300 °C показали, что этот минерал очень чувствителен

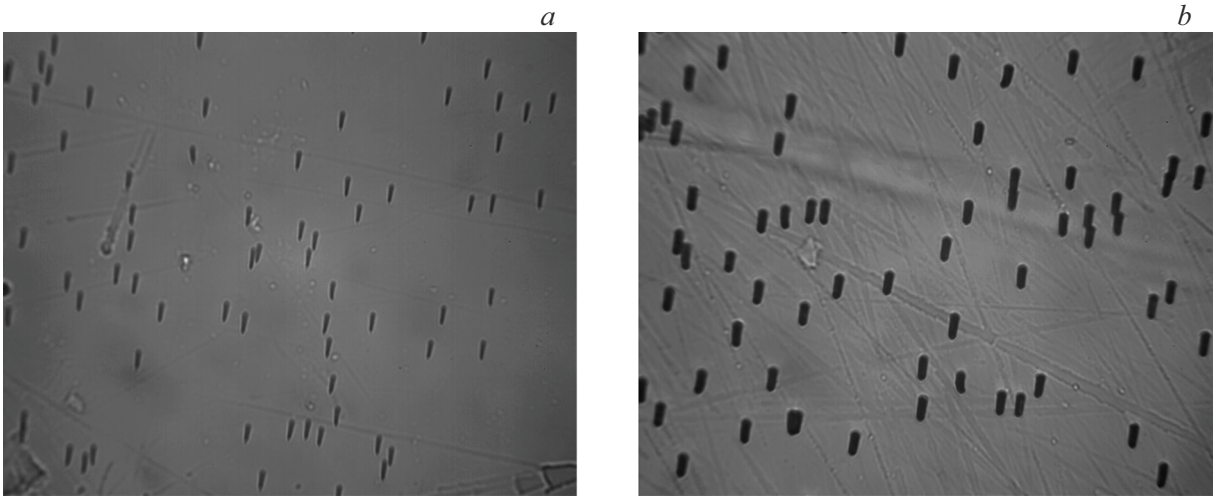

Рис. 5. Фотографии треков ионов Xe с энергией 160 MeV, полученных в образце слюды Ms-In после травления в 40 % HF в течение 20 (a) и 70 (b) min. Размер кадра $220 \times 280\,\mu$m.

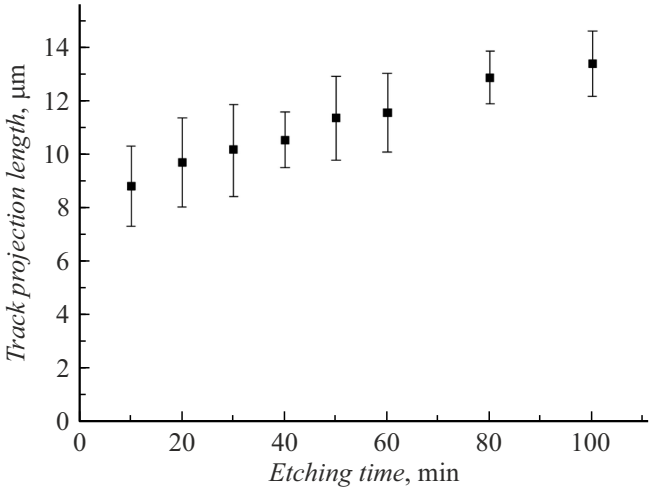

Рис. 6. Зависимость длины проекций треков ионов Xe с энергией 160 MeV на поверхность образца слюды Ms-In от времени травления.

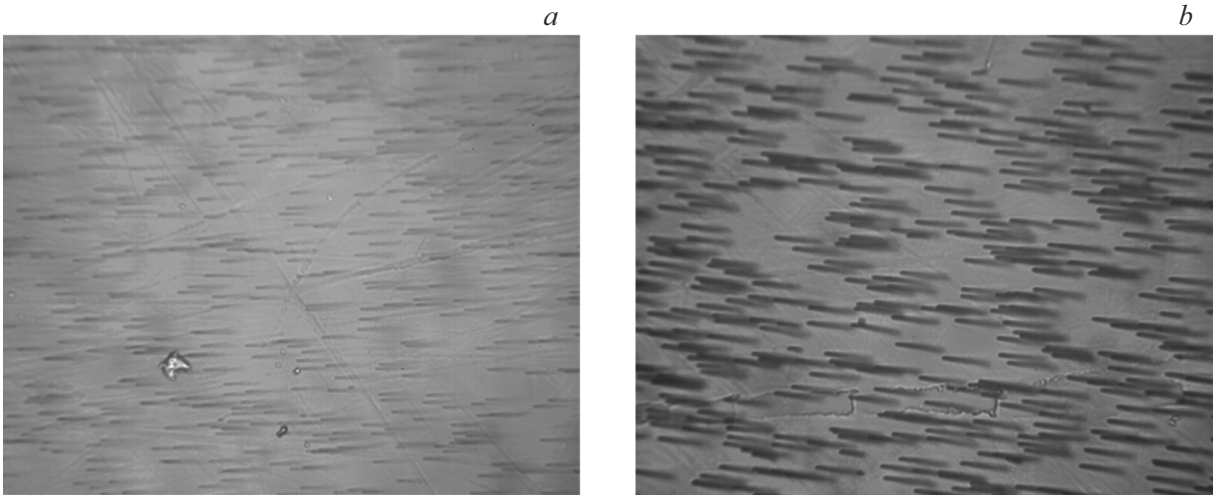

Рис. 7. Фотографии треков ионов Bi с энергией 670 MeV, полученных в образце слюды Ms-In после травления в 40 % HF в течение 20 (a) и 60 (b) min. Размер кадра $220 \times 280\,\mu$m.

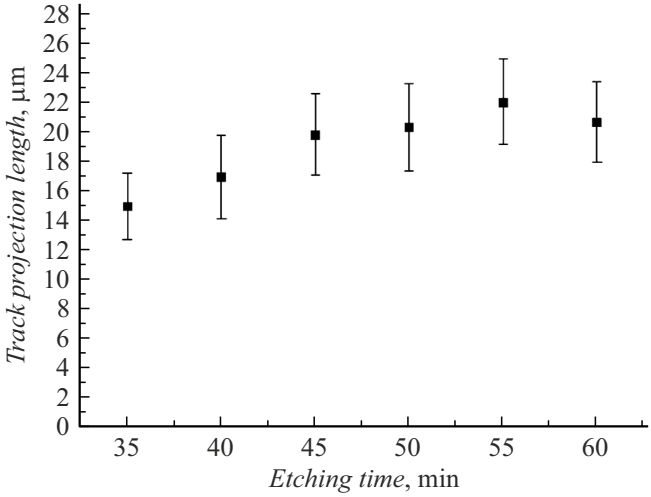

Рис. 8. Зависимость длины проекций треков ионов Bi с энергией 670 MeV на поверхность образца слюды Ms-In от времени травления.

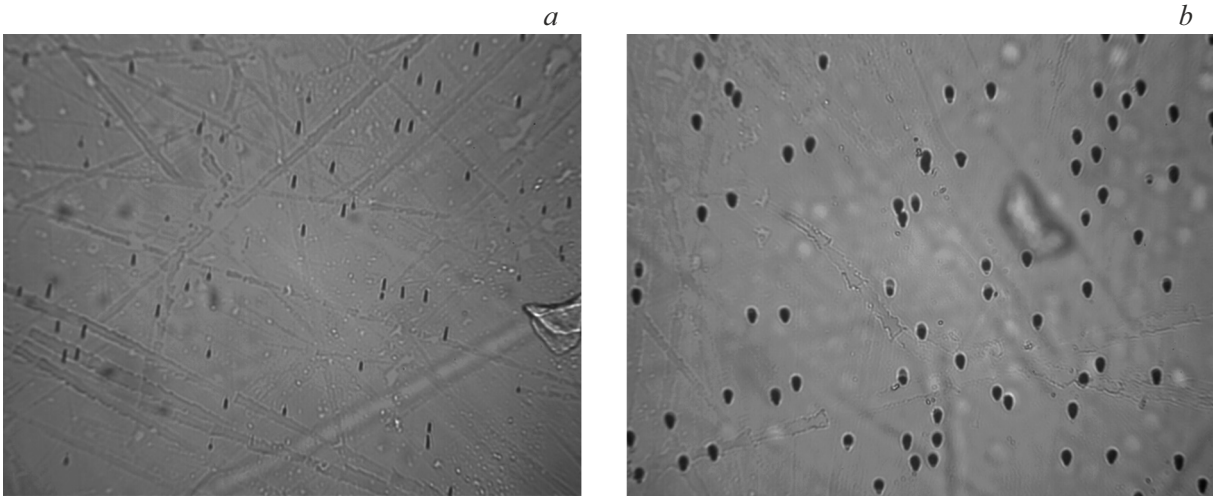

Рис. 9. Фотографии треков ионов Xe с энергией 83 MeV в образцах слюды Ms после травления в 40 % HF в течение 20 (a) и 80 (b) min. Размер кадра $220 \times 280\,\mu$m.

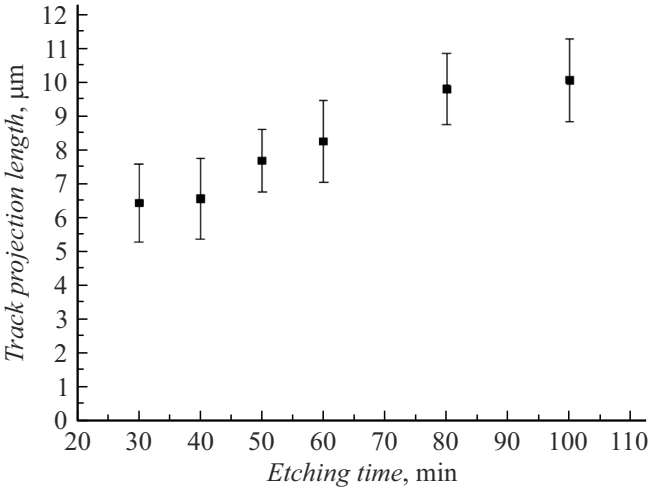

Рис. 10. Зависимость длины проекций треков ионов Xe с энергией 83 MeV на поверхность образца слюды Ms от времени травления.

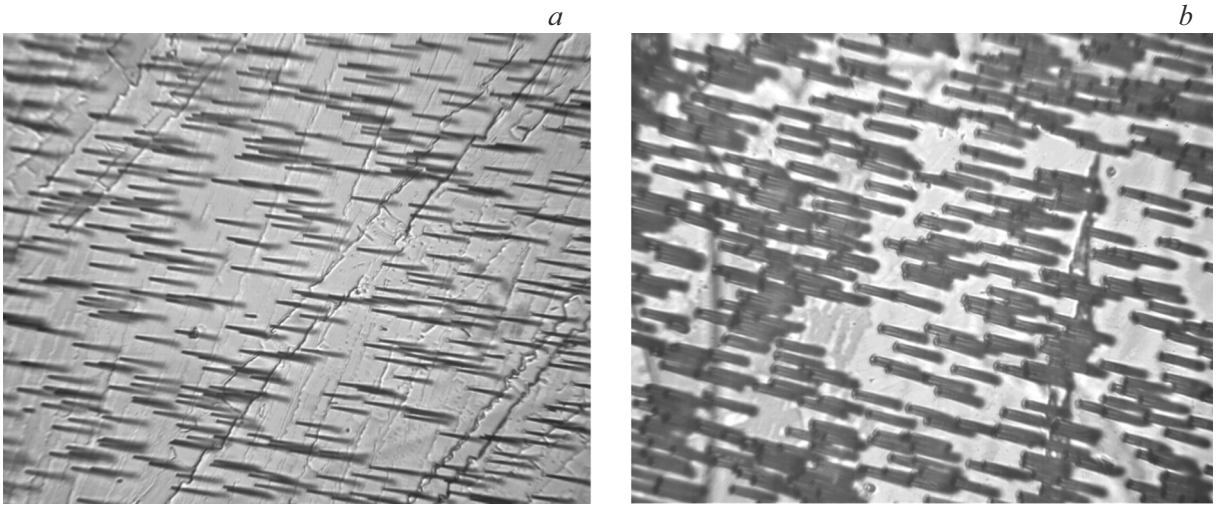

Рис. 11. Фотографии треков ионов Bi с энергией 670 MeV в образцах слюды Ms после травления в 40 % HF. Время травления 20 (*a*) и 70 (*b*) min. Размер кадра $220 \times 280\,\mu$m.

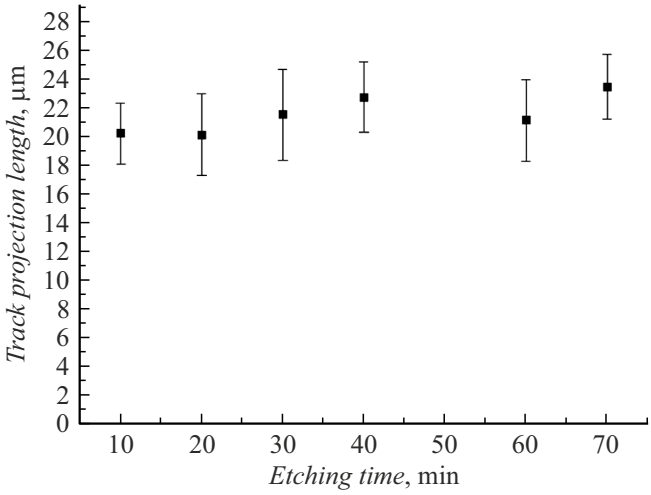

Рис. 12. Длина проекции треков ионов Bi с энергией 670 MeV в образцах слюды Ms как функция времени травления.

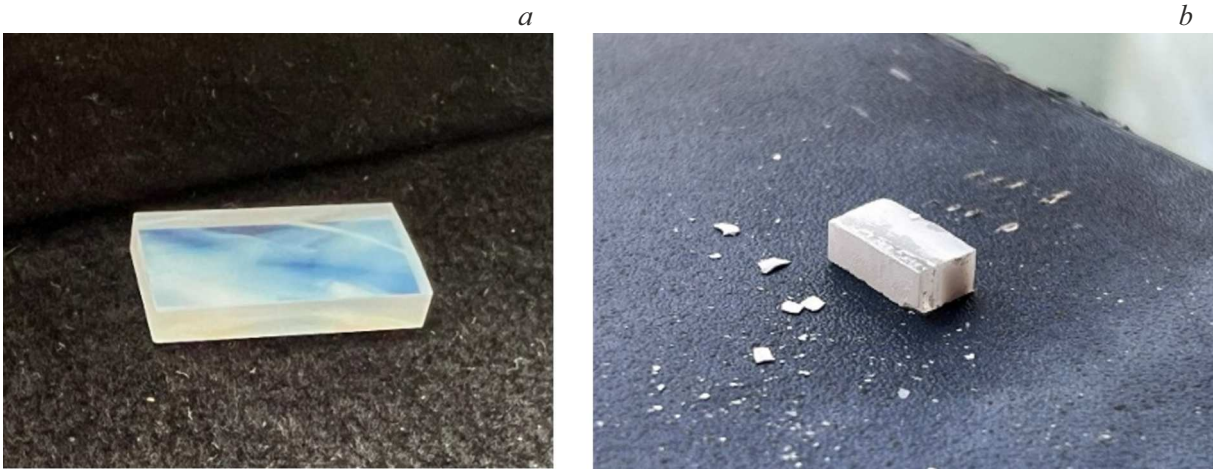

Рис. 13. Образец фторфлогопита марки СМ-310 до травления (*a*), после травления (*b*) в плавиковой кислоте в течение 30 min. Размер образца $3 \times 5 \times 10$ mm.

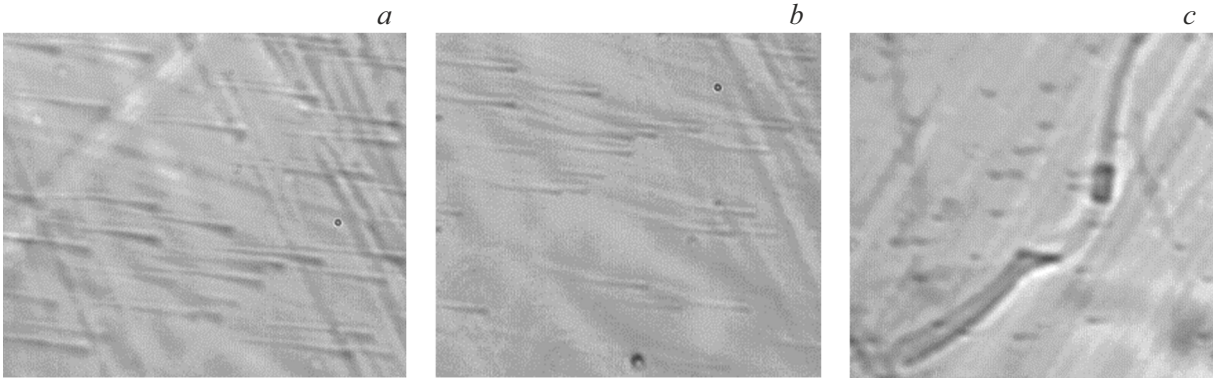

Рис. 14. Фотографии треков ионов Bi с энергией 670 MeV: *a* — падающих на поверхность образца слюды Ms, отожженного в течение 10 min при температуре 300 °C; *b* — на глубине 5 μm от этой поверхности; *c* — выходящих с обратной стороны образца с энергией 45 MeV. Размер поля зрения $66 \times 58\,\mu$m.

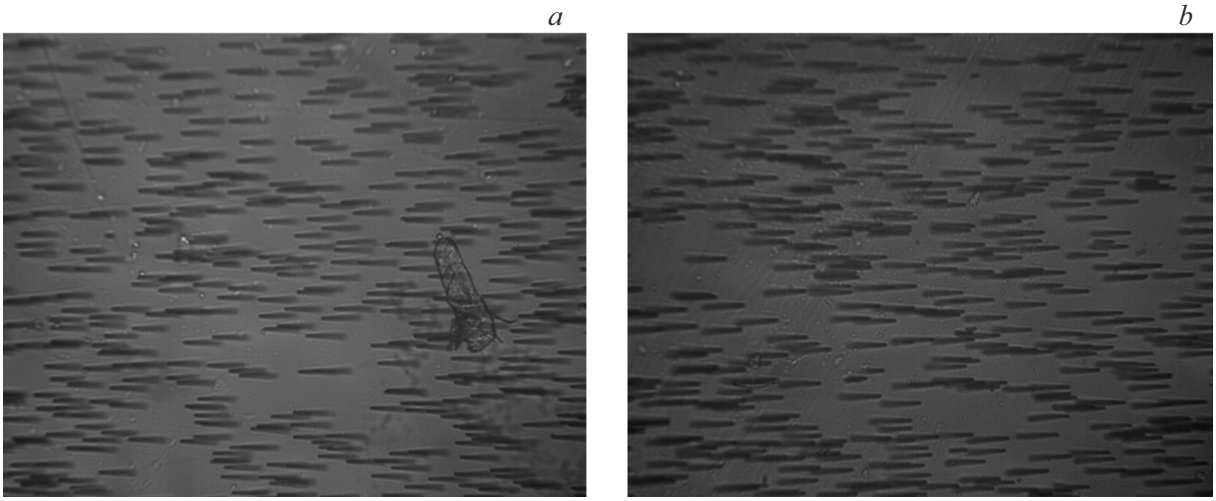

Рис. 15. Фрагменты поверхности образцов слюды Ms-Lpd, облученных ионами Bi с энергией 670 MeV и протравленных в 40 % HF в течение 25 min. Перед травлением образцы были отожжены при 500 °C в течение 10 min (*a*) и 3 h (*b*). Размер кадра $220 \times 280\,\mu$m, увеличение $40^{\times}$.

к отжигу и не может быть использован в условиях высоких температур.

2.3. Тестирование при нагревании до 500 °C

После облучения под углом 45° ионами Bi с энергией 670 MeV два образца Ms-Lpd были подвергнуты нагреванию до 500 °C с выдержкой первого образца в течение 10 min, а второго 3 h при этой температуре. На рис. 15 показаны изображения треков, полученных в результате травления отожженных образцов. Экспериментальная зависимость длины проекции трека на поверхность образца от времени травления представлена на рис. 16. После отжига в течение 10 min перегиб экспериментальной кривой наблюдается на 25 минуте травления (рис. 16, *a*), а после отжига в течение 3 h — на 20 минуте травления (рис. 16, *b*). Длина проекций треков в точках перегиба $(19 \pm 2)\,\mu$m и $(19 \pm 2)\,\mu$m, а полная длина треков до остановки $(28 \pm 2)\,\mu$m и $(27 \pm 2)\,\mu$m соответственно. Расчетное значение длины пробега иона Bi с энергией 670 MeV в данном материале составляет $32.3\,\mu$m.

Скорость травления минерала в области трека при отжиге в течение 10 min составляет $(67 \pm 2)\,\mu$m/h, а при отжиге в течение 3 h — $(81 \pm 2)\,\mu$m/h. Таким образом, отжиг образцов слюды Ms-Lpd при температуре 500 °C не привел к существенному изменению длины треков.

Некоторые образцы слюды Ms-In, облученные под углом 45° ионами Bi с энергией 670 MeV, после облучения также были отожжены при 500 °C с выдержкой при этой температуре в течение 3 h. Изображения треков, полученных в результате травления отожженных образцов, представлены на рис. 17. На рис. 18 дана экспериментальная зависимость длины проекции трека на поверхность отожженного образца от времени травления. Перегиб в зависимости на рис. 18

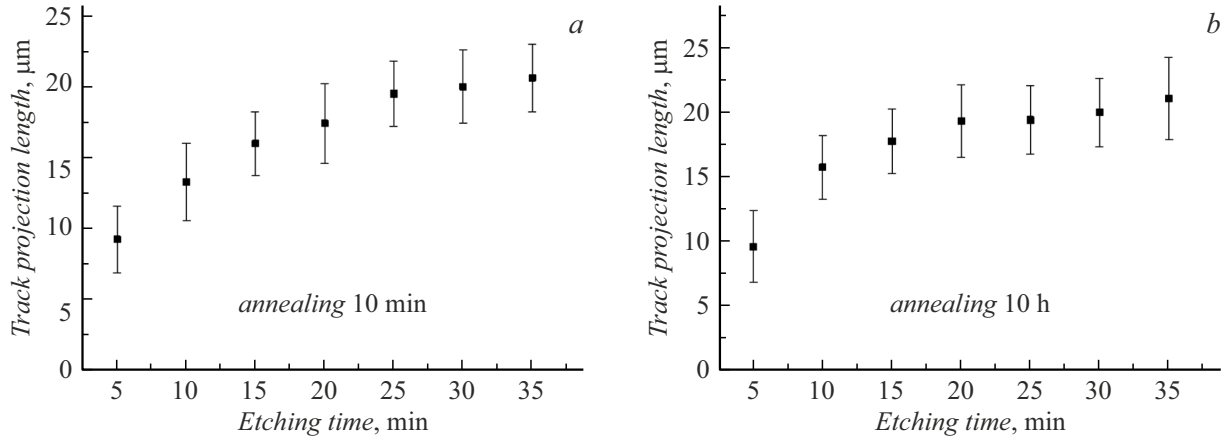

Рис. 16. Зависимость длины проекции треков от времени травления в образцах слюды Ms-Lpd. Время отжига образцов при температуре 500 °C 10 min (*a*) и 3 h (*b*).

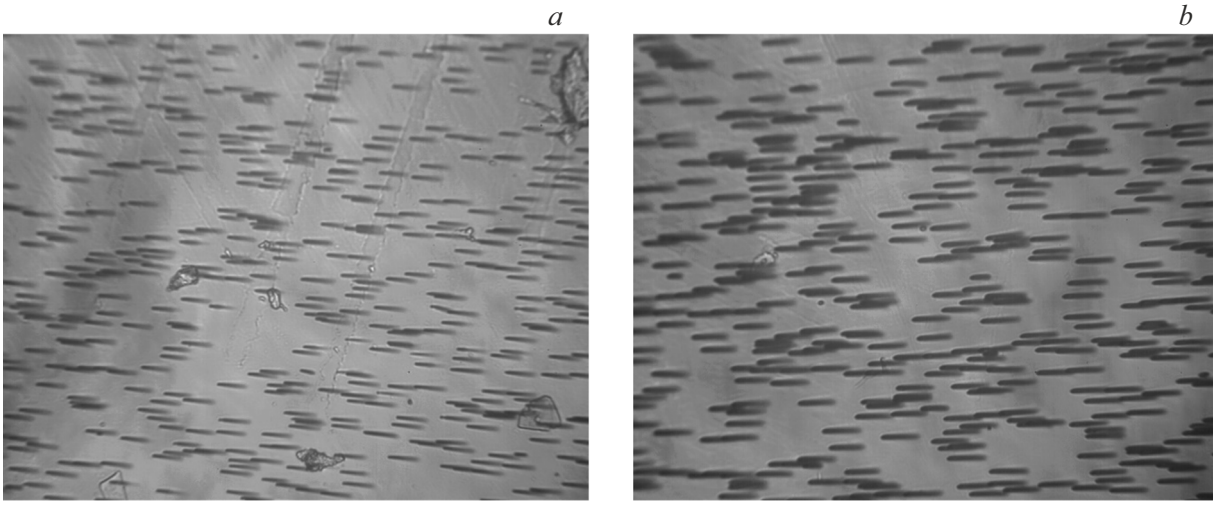

Рис. 17. Фотографии треков ионов Bi с энергией 670 MeV, протравленных 40 % HF в образцах слюды Ms-In, нагретых после облучения до 500 °C и выдержанных при этой температуре в течение 3 h. Время травления 20 (*a*) и 40 (*b*) min. Размер кадра $220 \times 280\,\mu$m.

происходит после травления в течение 30 min. Длина проекции трека в этой точке $(19 \pm 1)\,\mu$m, длина пробега $L_{path} = (27 \pm 1)\,\mu$m (расчетная длина пробега $32.3\,\mu$m) и скорость травления трека $(55 \pm 1)\,\mu$m/h. Таким образом, десятичасовой отжиг образцов „индийского мусковита“ Ms-In при температуре 500 °C приводит к незначительному укорочению треков, но заметному увеличению скорости их травления.

В заключение на рис. 19 приведена зависимость скорости травления в области трека от заряда и энергии для ионов Xe (83 и 160 MeV) и Bi (670 MeV). Данные получены для слюд Ms-Lpd и Ms-In.

Как следует из рис. 19, в слюдах Ms-Lpd и Ms-In имеет место сильная зависимость скорости травления в области трека от заряда и энергии иона. Выраженная зависимость пробега иона от его характеристик позволяет разработать метод определения заряда и энергии иона по скорости травления и пробегу до остановки в материале детектора.

Заключение

Продолжаются исследования различных материалов в качестве детекторов ускоренных тяжелых ионов на Фабрике сверхтяжелых элементов ОИЯИ. В работе представлены результаты исследований четырех слюд, облученных ионами Xe и Bi с энергиями от 83 до 670 MeV. Для имитации условий эксперимента по регистрации фрагментов распада сверхтяжелых ядер в термохроматографической колонке некоторые из облученных образцов нагревались до температур 300 °C и 500 °C.

Анализ показал, что из протестированных слюд мусковит-лепидолит Ms-Lpd и „индийский“ мусковит

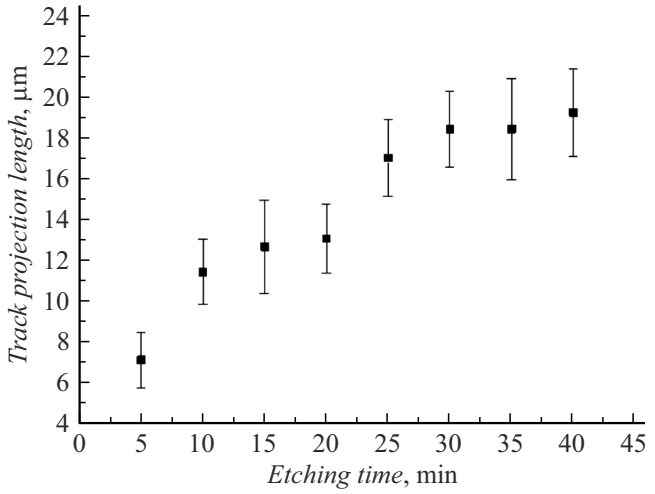

Рис. 18. Зависимость длины проекций треков ионов Bi с энергией 670 MeV на поверхность отожженного образца слюды Ms-In от времени травления.

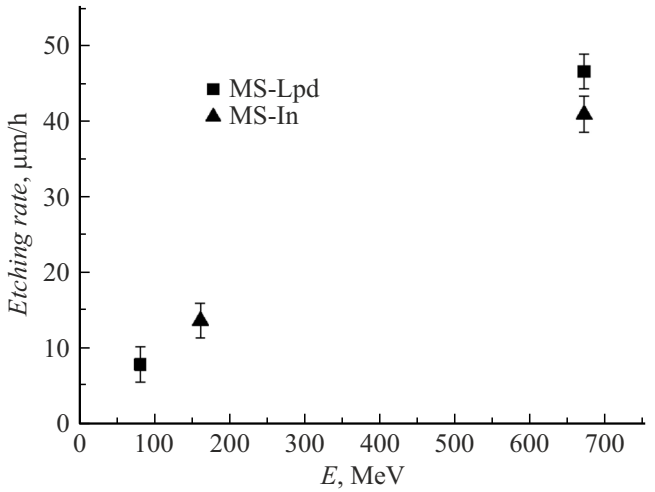

Рис. 19. Зависимость скорости травления в области трека от заряда и энергии для ионов Xe (83 и 160 MeV) и Bi (670 MeV). Данные получены для слюд Ms-Lpd и Ms-In.

Ms-In могут рассматриваться в качестве детекторов ионов в условиях высоких температур. Такой результат, предположительно, может быть обусловлен особенностями строения этих минералов.

Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом по программе „Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами“ (проект № 23-12-00054). Изучение химического состава слюд выполнено в рамках темы НИР РАН № FMUF-2022-0002.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Т.С. Зварова, И. Звара. *Разделение трансурановых элементов при помощи газовой хроматографии хлоридов* (Р6-4911, ОИЯИ, Дубна, 1970)

[2] Б.Л. Жуйков. *Методы разделения летучих элементов и оксидов в поиске сверхтяжелых элементов и при получении радиоизотопов* (Автореф. канд. дисс., МГУ, М., 1982)

[3] N. Burtebayev, M. Chernyavskiy, A. Gippius, G. Kalinina, N. Konovalova, M. Nassurlla, T. Kvochkina, M. Nassurlla, N. Okateva, A. Pan, N. Polukhina, Z. Sadykov, T. Shchedrina, N. Starkov, E. Starkova, I. Zasavitskii. Universe, **8** (9), ID 474 (2022). DOI: 10.3390/universe8090474

[4] Н. Буртебаев, К. Аргынова, М.М. Чернявский, А.А. Гиппиус, Н.С. Коновалова, Т.Н. Квочкина, М. Насурлла, Н.М. Окатьева, А.Н. Пан, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В. Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, И.И. Засавицкий. ЖЭТФ, **161** (4), 616 (2022). DOI: 10.31857/S0044451022040162 [N. Burtebaev, K. Argynova, M.M. Chernyavskiy, A.A. Gippius, N.S. Konovalova, T.N. Kvochkina, M. Nasurlla, N.M. Okateva, A.N. Pan, N.G. Polukhina, Zh.T. Sadykov, T.V. Shchedrina, N.I. Starkov, E.N. Starkova, I.I. Zasavitsky. J. Exp. Theor. Phys., **134**, 528 (2022). DOI: 10.1134/S1063776122040033]

[5] Н. Буртебаев, К. Аргынова, М.М. Чернявский, А.А. Гиппиус, Г.В. Калинина, Н.С. Коновалова, М. Насурлла, Н.М. Окатьева, А.Н. Пан, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В. Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, И.И. Засавицкий. КСФ, **50** (4), 20 (2023). DOI: 10.3103/S106833562304005X [N. Burtebayeva, K. Argynova, M.M. Chernyavskiy, A.A. Gippius, G.V. Kalinina, N.S. Konovalova, M. Nassurlla, N.M. Okateva, A. Pan, N.G. Polukhina, Zh.T. Sadykov, T.V. Shchedrina, N.I. Starkov, E.N. Starkova, I.I. Zasavitskii. Bull. Lebedev Phys. Inst., **50** (4), 133 (2023). DOI: 10.3103/S106833562304005X]

[6] П.Ю. Апель, М.М. Чернявский, А.А. Гиппиус, Г.В. Калинина, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В. Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, И.И. Засавицкий. КСФ, **51** (5), 3 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624600062 [P.Yu. Apel, M.M. Chernyavskiy, A.A. Gippius, G.V. Kalinina, N.S. Konovalova, N.M. Okateva, N.G. Polukhina, Zh.T. Sadykov, T.V. Shchedrina, N.I. Starkov, E.N. Starkova, I.I. Zasavitskii. Bull. Lebedev Phys. Inst., **51** (4), 117 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624600062]

[7] Е.В. Андреев, П.Ю. Апель, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, Д.М. Стрекалина, М.М. Чернявский, Т.В. Щедрина. ЖТФ, **95** (1), 188 (2025). DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59478.272-24 [E. Andreev, P. Apel, N. Konovalova, N. Okateva, N. Polukhina, G. Sadykov, N. Starkov, E. Starkova, D. Strekalina, M. Chernyavskiy, T. Shchedrina. Tech. Phys., **70** (1), 174 (2025). DOI: 10.61011/TP.2025.01.60524.272-24]

[8] А. Капусцик, В.П. Перелыгин, В.И. Свидерский, С.П. Третьякова. *Применение слюды и кварцевого стекла для регистрации деления ядер при повышенных температурах* (Р-2705, ОИЯИ, Дубна, 1966)
[9] С. Дюррани, Р. Балл. *Твердотельные ядерные детекторы* (Энергоатомиздат, М., 1990) [Пер. с англ.: S.A. Durrani, R.K. Bull. *Solid state nuclear track detection: Principles, methods and applications* (Pergamon Press, Oxford, NY., 1987)]
[10] S.R. Hashemi-Nezhad. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, **234** (4), 533 (2005). DOI: 10.1016/j.nimb.2005.02.021
[11] M. Singh, N. Kaur, L. Singh. Radiat. Phys. Chem., **79** (12), 1180 (2010). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2010.07.014
[12] M. Deb, S.C. Sarkar. In: *Minerals and Allied Natural Resources and their Sustainable Development.* (Springer Geology, Singapore, 2017), DOI: 10.1007/978-981-10-4564-6_4
[13] Н.В. Васильев, О.В. Удоратина, Н.В. Скоробогатова, Г.П. Бородулин. Вестник ИМин УрО РАН, **1** (205), 009 (2012). https://sciup.org/149129048
[14] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, **268** (11–12), 1818 (2010). DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091
[15] В.Т. Васильев, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Е.Н. Старкова, Н.И. Старков, М.М. Чернявский, Т.В. Щедрина. Ядерная физика и инжиниринг, **15** (2), 133 (2024). DOI: 10.56304/S207956292301030X [V.T. Vasilev, N.S. Konovalova, N.M. Okatieva, N.G. Polukhina, Zh.T. Sadykov, E.N. Starkova, N.I. Starkov, M.M. Chernyavskiy, T.V. Shchedrina. Phys. Atom. Nucl., **86**, 2251 (2023). DOI: 10.1134/S1063778823090272]
[16] Н. Буртебаев, К. Аргынова, М.М. Чернявский, А.А. Гиппиус, Г.В. Калинина, Н.С. Коновалова, Т.Н. Квочкина, М. Насурлла, Н.М. Окатьева, А.Н. Пан, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В. Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, И.И. Засавицкий. КСФ, **49** (10), 69 (2022). DOI: 10.1134/S2079562920010030 [N. Burtebayev, K. Argynova, M.M. Chernyavskiy, A.A. Gippius, G.V. Kalinina, N.S. Konovalova, T.N. Kvochkina, M. Nassurlla, N.M. Okateva, A. Pan, N.G. Polukhina, Zh.T. Sadykov, T.V. Shchedrina, N.I. Starkov, E.N. Starkova, I.I. Zasavitskii. Bull. Lebedev Phys. Inst., **49** (10), 350 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622100062]
[17] С.П. Третьякова. ЭЧАЯ, **23** (2), 364, 1992.
[18] В.А. Николаев. *Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях* (Изд-во Политех. ун-та, СПб, 2012)