



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2025–3

А.П. Воробьёв, С.Н. Головня, К.В. Сухарев, С.А. Клименко,
С.К. Шаров, А.А. Янович

**Результаты испытания российской радиохромной
плёнки ПОР-2**

Протвино 2025

Аннотация

Воробьёв А.П., Головня С.Н., Сухарев К.В., Клименко С.А., Шаров С.К., Янович А.А. Результаты испытания российской радиохромной плёнки ПОР-2: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2025–3. – Протвино, 2025. – 13 с., 7 рис., 5 табл., библиогр.: 8.

В работе представлены результаты исследований характеристик отечественной радио-хромной плёнки ПОР-2, предназначенной для регистрации поглощённых доз ионизирующего излучения. Проведено сравнение оптических свойств плёнки ПОР-2 с зарубежным аналогом ЕВТ до и после облучения. Выполнено экспериментальное облучение плёнок в пучке протонов с энергией 1,3 ГэВ на синхротроне У-1,5 ускорительного комплекса ИФВЭ. Установлено, что плёнка ПОР-2 не пригодна для клинической дозиметрии с пучками адронов и гамма-квантов из-за высокой пороговой чувствительности к ионизирующему излучению. Исследованы изменения оптической плотности плёнок в различных цветовых каналах сканирования (красном, зелёном, синем) после облучения, показавшие стабильность полученных результатов во времени.

Abstract

Vorobiev A.P., Golovnya S.N., Sukharev K.V., Klimenko S.A., Sharov S.K., Yanovich A.A. Title: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2025–3. – Protvino, 2025. – 13 p., 7 fig., 5 tab., bibliogr.: 8.

The paper presents the results of studying the characteristics of the domestic radiochromic film POR-2, designed for recording absorbed doses of ionizing radiation. A comparison of the optical properties of the POR-2 film with the foreign analog EBT before and after irradiation was performed. Experimental irradiation of the films was carried out in a proton beam with the energy of 1.3 GeV at the U-1.5 synchrotron of the IHEP accelerator complex. It was established that the POR-2 film is not suitable for clinical dosimetry with hadron and gamma-ray beams due to its high threshold sensitivity to ionizing radiation. Changes in the optical density of the films in various color scanning channels (red, green, blue) after irradiation were investigated, showing stability of the obtained results over time.

Введение

На протяжении уже нескольких десятилетий происходит активное внедрение метода радиохромной дозиметрии в различных областях науки и техники, включая радиационную медицину [1]. Радиохромные плёнки (РХП) широко используются, как для определения параметров пучка частиц (размера, формы), поглощённой дозы облучения, так и для контроля однородности дозовых полей, формируемых пучками частиц. В радиационной медицине в настоящее время широкое применение нашли, в том числе и в России, различные типы РХП, выпускаемые под брендом GafChromic (плёнка EBТ) фирмой International Speciality Products Inc, входящей в компанию Ashlend (США), получившие рекомендации Американской ассоциации медицинских физиков и рабочей группы МАГАТЭ [2].

В России имеются радиохромные плёнки отечественного производства, которые в настоящее время используются для целей дозиметрического контроля облучения персонала и оборудования на объектах атомной промышленности. Выпускаются эти плёнки в виде стандартных образцов [3] ФГУП Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений [4] для измерения поглощённых доз в диапазоне 1-200 кГр. Известно несколько публикаций по исследованию РХП российского производства для использования в пищевой промышленности и в сельском хозяйстве [5, 6].

В работе приводятся результаты первых исследований характеристик радиохромных плёнок российского производства ПОР-2 [4] для регистрации поглощённых доз в широком диапазоне, с целью их возможного использования в клинической дозиметрии.

Используемые материалы

Радиохромные плёнки состоят из прозрачной полимерной матрицы и активного слоя, содержащего радиационно-чувствительный мономер с включением монокристаллов хромофора – вещества способного изменять цвет под действием излучения. При облучении плёнки запускается процесс полимеризации мономеров в активном слое, что

приводит к образованию окрашенного полимера. Интенсивность окраски и количество образовавшегося полимера напрямую зависят от дозы поглощенного излучения. Поглощение этих плёнок растёт с ростом дозы, достигает плато, а затем падает. Это происходит из-за радиационного разрушения красителя и (или) их радиационно-окрашенных продуктов, что делает эти плёнки непригодными для дальнейших измерений.

В основе действия радиохромных плёночных дозиметров лежат процессы полимеризации многомерных молекул в монокристаллах хромофора под действием ионизирующего излучения. При облучении хромофор меняет степень потемнения в своём цветовом диапазоне. Степень потемнения зависит от величины поглощённой энергии. Радиохимическая реакция вызывает образование новых полимерных цепей, приводящих к увеличению поглощающей способности активного вещества. Чувствительность плёнки к облучению определяется минимальным значением поглощённой энергии, необходимой для протекания радиохимической реакции.

Визуально необлучённая плёнка имеет бледно-жёлтый цвет. Наличие жёлтого компонента плёнки уменьшает чувствительность плёнки к ультрафиолету и позволяет реализовать многоканальное сканирование в трёх цветовых каналах, на сканерах RGB типа. При облучении цвет плёнки меняется на тёмный сине-зелёный.

Молекулы-мономеры, составляющие хромофор в микрокристаллах, как правило, имеют направление преимущественной ориентации в плоскости плёнки. Это явление приводит к линейному дихроизму - различной поглощаемости света поляризованным светом в зависимости от его направления. Так как современные планшетные сканеры используют поляризованный свет, измеряемая оптическая плотность может из-за этого меняться в зависимости от ориентации плёнки относительно направления сканирования. Поэтому ориентация плёнки (ландшафтная или портретная) должна быть определена и учитываться при её использовании.

Структура российской РХП, получившей наименование ПОР-2, состоит из одного активного слоя с номинальной толщиной 28 мкм. Активный слой располагается на прозрачной подложке из полиэстера толщиной 98 мкм. Между подложкой и активным слоем наносится специальный адгезионный (связующий) подслой толщиной несколько микрон.

Химический состав чувствительного слоя плёнки ПОР-2 отличается от состава плёнок семейства GafChromic.

Основным параметром, характеризующим дозиметрические свойства РХП, является оптическая плотность (ОП), которая линейно возрастает с увеличением поглощенной дозы.

$$\text{ОП} = \lg_{10} (I/I_0), \text{ где}$$

I – интенсивность света, прошедшего через плёнку (Лк);

I_0 – интенсивность света, падающего на плёнку (Лк);

Единицей измерения оптической плотности почернения является бел (Б), это такая плотность чувствительного слоя РХП, которая пропускает 1/10 падающего на него излучения и ослабляет его в 10 раз ($\lg 10 = 1$).

Для измерения оптической плотности радиохромных пленок используют настольные сканеры, которые освещают пленку светом определенной длины волны и позволяют измерить интенсивность прошедшего света. До и после облучения плёнка сканируется в режиме «на просвет». В данной работе проводилось сканирование с разрешением 75 dpi (точек на дюйм) и глубиной цвета 48 бит. Результаты 48 битного сканирования изображений сохранялись в несжатом формате TIFF (три канала цветности, 16 бит на канал). Качество получаемых цифровых радиографических изображений зависит от характеристик, используемого сканера [7]. В представленной работе использовался планшетный сканер EPSON EXPRESSION 10000 XL, характеристики которого (контрастная чувствительность, характеристическая кривая, диапазон измеряемых оптических плотностей допустимый для измерений) специально не измерялись. Для устранения неоднородностей освещенности в оптической плотности все образцы пленок устанавливались в сканер в одно место, с отступом 3 см по горизонтали от левого края сканируемой области.

Сравнение характеристик радиохромных плёнок ЕВТ и ПОР-2 до облучения

Оптические плотности плёнок, полученные при сканировании на планшетном сканере, приведены в таблице 1. Плёнки одного размера 10x10см² сканировались в одном и том же месте сканера до их облучения.

Табл. 1. Оптические плотности плёнок до облучения. В таблице не приводятся относительные ошибки измерения оптической плотности. Для всех РХП они меньше 1,2%.

Тип плёнки	Позиционирование	Оптическая плотность плёнки в цветовом диапазоне		
		красный	зелёный	синий
		К	З	С
ЕВТ- 2	портрет	0,113	0,128	0,349
	ландшафт	0,100	0,115	0,337
ЕВТ- 3	портрет	0,182	0,192	0,400
	ландшафт	0,171	0,183	0,391
ПОР-2	портрет	0,035	0,100	0,626
	ландшафт	0,035	0,101	0,613
Белое поле		0,004	0,003	0,003
Чёрное поле (бумага)		1,951	1,9161	1,948

Как видно из таблицы: плёнки ПОР-2 более прозрачны для красного света, чем плёнки ЕВТ; сравнимы по прозрачности с плёнкой ЕВТ-2 для зелёного света; и в два раза хуже пропускают синий свет, чем плёнки ЕВТ.

Сканированием плёнок ПОР-2 и ЕВТ-3 формата А4 были оценены однородности плёнок по оптической плотности на большой площади.

Сравнение плёнок стандартного размера (лист А4) по однородности оптической плотности до облучения

Плёнка ПОР-2 в синем свете:

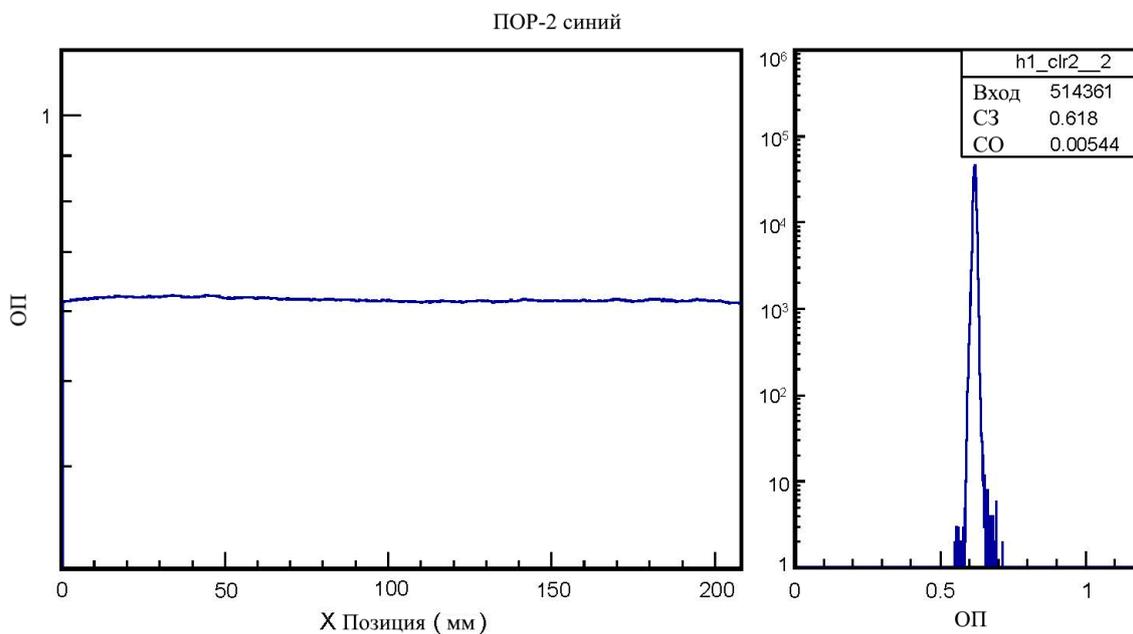


Рис. 1. Результат сканирования плёнки ПОР-2 в синем свете.

Плёнка ЕВТ-3 в синем свете:

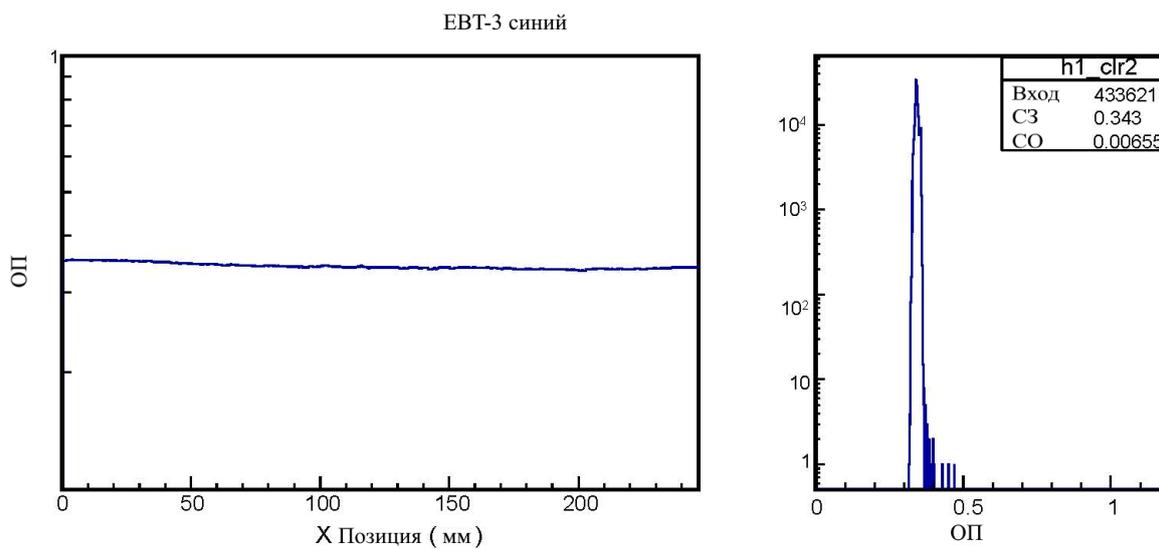


Рис. 2. Результат сканирования плёнки ЕВТ-3 в синем свете.

Табл. 2. Результаты сканирования плёнок формата А4 для оценки однородности оптической плотности.

Тип плёнки		ЕВТ-3			ПОР-2			Примечание
		Ширина распр. (σ)			Ширина распр. (σ)			
Цветовой канал		красный	зелёный	синий	красный	зелёный	синий	
Ландшафт	1-я сторона	0,0047	0,0052	0,0065	0,0021	0,0031	0,0054	ЕВТ-3 – симметричная конструкция. Подложка с двух сторон.
	2-я сторона				0,0021	0,0032	0,0051	
Портрет	1-я сторона	0,0035	0,0038	0,0061	0,0023	0,0036	0,0075	ПОР-2 – не симметричная конструкция. Подложка с одной стороны.
	2-я сторона				0,0022	0,0030	0,0052	

Как видно из Рис. 1-2 и таблицы 2 плёнка ПОР-2 до облучения по оптической однородности не уступает плёнке ЕВТ-3. Такой результат получен для всех цветовых каналов сканера.

Облучение плёнки ПОР-2 в пучке протонов с энергией 1,3 ГэВ

На синхротроне У-1,5 (бустер) ускорительного комплекса ИФВЭ было выполнено облучение плёнок РХП ПОР-2 на пучке протонов с энергией 1,3 ГэВ. Использовались образцы плёнки размером 50 x 60 мм² из которых было сформировано 5 «сэндвичей» сложенных из пары плёнок чувствительными слоями к друг другу. На пучке протонов устанавливалась сборка из образцов РХП плёнок и образцов «свидетелей» из полиэстера (подложка ПОР-2) и алюминиевой фольги. В такой последовательности по пучку: «сэндвич» ПОР-2; полиэстер подложка; плёнка ЕВТ-3; алюминиевая фольга толщиной 445±0,005мм. Все образцы материалов одного поперечного размера. Общее число экспозиций сборок на пучке протонов было пять. Содержание алюминия в использованной фольге 99,97%.

Интегральный поток протонов в каждой экспозиции, оценивался по наработке изотопов ²⁴Na (T1/2 = 14,95660ч, E(γ) = 1368кэВ), оцененных по измерениям на спектрометрической установке. Измерения активности облученных алюминиевых фольг выполнены в стационарной радиометрической лаборатории на полупроводниковом

спектрометре СЕГ-1КП с детектором из особо чистого германия. Детектор на основе германия охлаждается жидким азотом, окружен защитой из стали толщиной 100 мм. Спектрометр энергии гамма-излучения полупроводниковый СЕГ-1КП [<https://iftp.ru>]. Госреестр №66003-16, №120. Использовалось программное обеспечение SpectraLineGP (Gamma Precision). ПО SpectraLineGP (Gamma Precision) предназначено для проведения спектрометрических измерений и прецизионной обработки гамма-спектров от полупроводниковых и сцинтилляционных спектрометров. Сечение реакции $p + {}^{27}\text{Al} \rightarrow {}^{24}\text{Na}$ для энергии протонов 1,3 ГэВ бралось равным $\sigma = (9,9 \pm 8,1\%)$ мб [8]. В таблице 3 приведены данные, полученные по измерениям фольги на спектрометрической установке.

Табл. 3. Результаты измерения радиоактивности фольги по изотопу ${}^{24}\text{Na}$, интегральной интенсивности протонов в экспозициях и поглощённой дозы в фольге.

Номер экспозиции	Активность фольги ^{*)} , Бк	Ошибка оценки активности, %	Интегральный поток протонов, $\times 10^{12}$	Ошибка потока протонов, %	Поглощённая доза в алюминиевой фольге ^{**)} , Гр
1	1287,4	4,7	3,743	9,3	132.4
2	2354,2	4,7	6,834	9,2	241.74
3	2946,5	4,4	8,554	9,2	302.58
4	3647,7	4,3	10,59	9,2	374.6
5	4757,8	4,2	13,81	9,1	488.51

*) Активность фольги на момент облучения, которое длится менее 1мкс.

***) Оценка поглощённой дозы в алюминиевой фольге с использованием пакета GEANT-4 для диаметра пучка протонов 30мм.

Подложки из полиэстера плёнок ПОР-2 показали устойчивость к облучению в пучке протонов во всех экспозициях. Их измеренные оптические плотности до и после облучения в пределах ошибок (стандартного отклонения) совпадают для всех цветовых каналов сканирования.

В таблице 4 приведены оптические плотности плёнок до и после облучения в пучке протонов.

Табл. 4. Оптические плотности плёнок ПОР-2 до и после облучения.

№ эксп	Облучение	Красный канал сканера		Зелёный канал сканера		Синий канал сканера	
		ОП	σ	ОП	σ	ОП	σ
1	до	0.067	0.0043	0.179	0.0044	0.758	0.0050
	после	0.066	0.0043	0.184	0.0059	0.767	0.0076
2	до	0.067	0.0035	0.181	0.0039	0.766	0.0046
	после	0.068	0.0032	0.197	0.0095	0.777	0.0106
3	до	0.067	0.0032	0.181	0.0036	0.761	0.0044
	после	0.067	0.0036	0.195	0.0114	0.782	0.0122
4	до	0.067	0.0030	0.175	0.0035	0.764	0.0044
	после	0.067	0.0028	0.200	0.0150	0.779	0.0168
5	до	0.066	0.0035	0.179	0.0037	0.756	0.0045
	после	0.067	0.0046	0.205	0.0212	0.787	0.0234
*)	до	0.066	0.0032	0.176	0.0037	0.753	0.0044
	после	0.067	0.0030	0.184	0.0074	0.763	0.0086

*) Облучение выполнено в пучке ионов углерода при энергии 400 МэВ/нуклон. Геометрия эксперимента была такой же, как и для пучка протонов. Интегральная интенсивность пучка 10^{11} ионов углерода.

В таблице 5 приведены оптические плотности плёнок ПОР-2 в экспозициях, измеренные по истечении разного времени в зелёном свете.

Табл. 5. Оптические плотности плёнок по истечении времени.

№ экс	ДАТА									
	21.11.2024		22.11.2024		25.11.2025		26.11.2024		29.01.2025	
	ОП	σ								
1	0,185	0,0058	0,185	0,0059	—	—	0,184	0,0448	0,182	0,0059
2	0,193	0,0095	0,194	0,0095	—	—	0,197	0,0093	0,190	0,0086
3	0,194	0,0111	0,194	0,0114	—	—	0,195	0,0113	0,190	0,0101
4	—	—	—	—	0,202	0,0152	0,200	0,0149	0,195	0,0130
5	—	—	—	—	0,208	0,0211	0,205	0,0214	0,198	0,0181

Как видно из приведённой таблицы оптическая плотность плёнки ПОР-2 в пределах одного стандартного отклонения не изменяется за время проведённых измерений. Такой же результат наблюдается и для других цветовых каналов сканера.

Полученные выше результаты приведены в графическом виде на рисунке 3. На рисунке приведён также параметр NetOD, равный разности оптических плотностей плёнки до и после облучения. Ошибки на рисунке не видны, т.к. они меньше размеров точек.

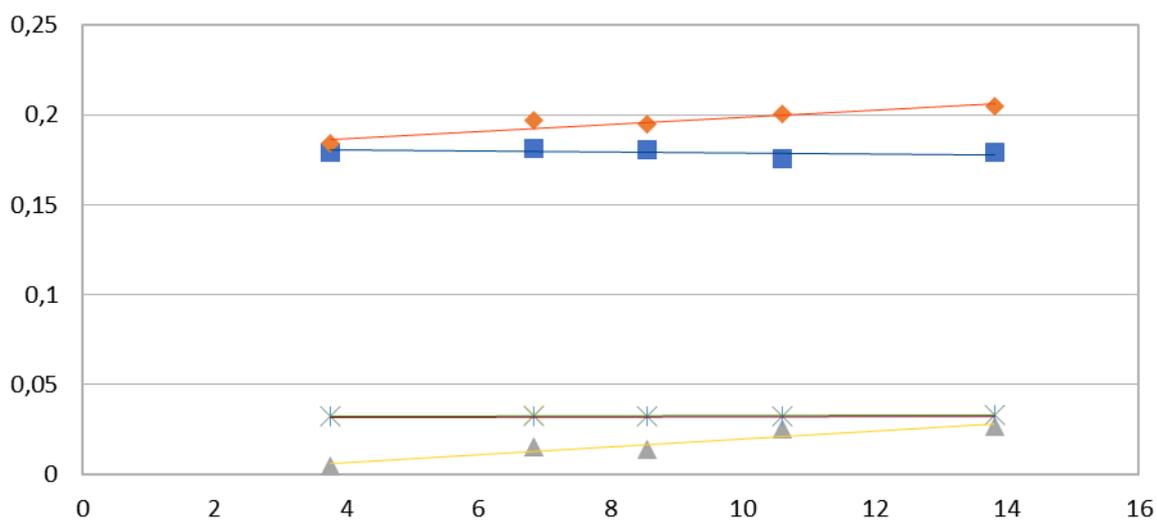


Рис. 3. Оптические плотности плёнок ПОР-2 до и после облучения в зависимости от интегрального потока протонов. Значения интегрального потока протонов по горизонтальной оси нужно умножить на 1012. ■ – ПОР-2 до облучения; ♦ - ПОР-2 после облучения; ▲ - netOD; x – подложки из полиэстера до и после облучения.

Результат облучения плёнок ПОР-2 и ЕВТ-3 для экспозиций №1 и №5 в единицах оптической плотности приведены на рисунках 4-7. Видно, что плёнки ЕВТ-3, применяемые в клинической дозиметрии, имеют более низкий порог чувствительности к облучению пучком протонов и характеризуют значительно более широкую область радиационного облучения.

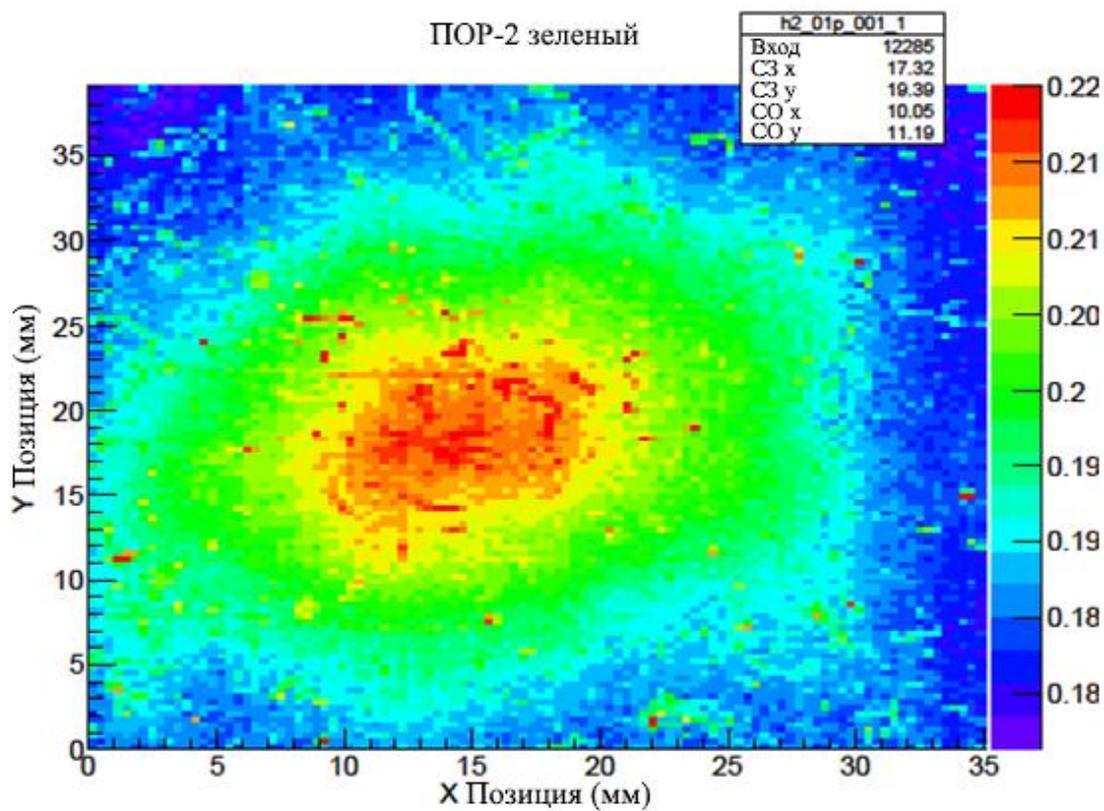


Рис. 4. Плёнка ПОР-2 в зелёном свете, экспозиция 1(цвета в онлайн версии).

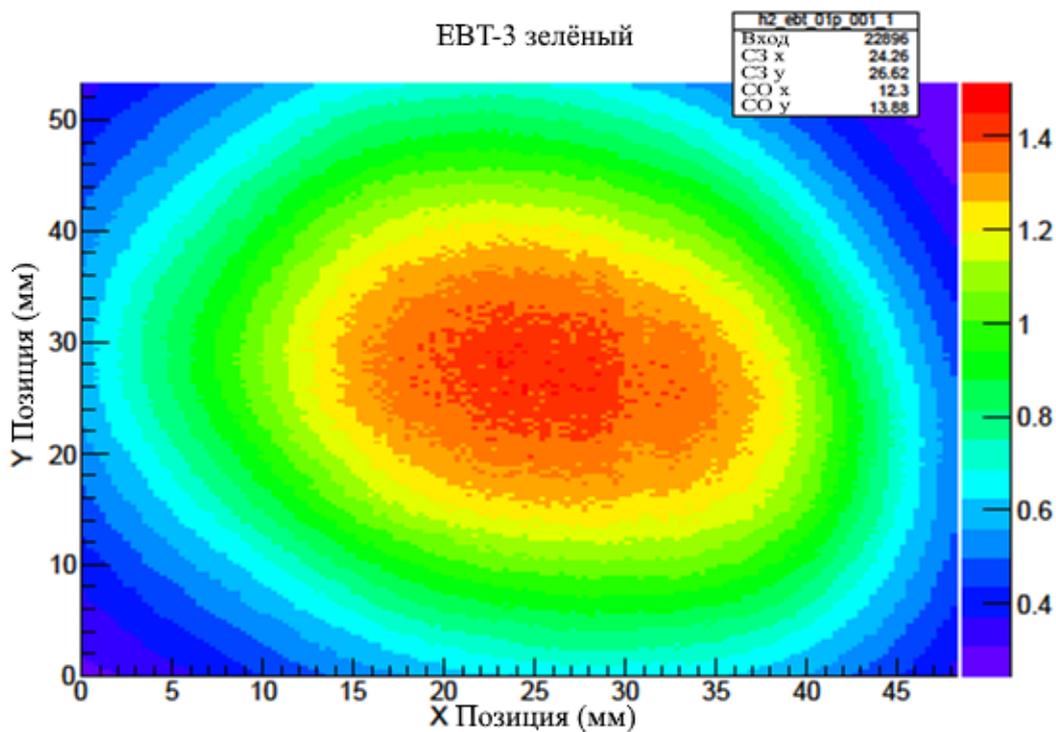


Рис. 5. Плёнка ЕВТ-3 в зелёном свете, экспозиция 1.

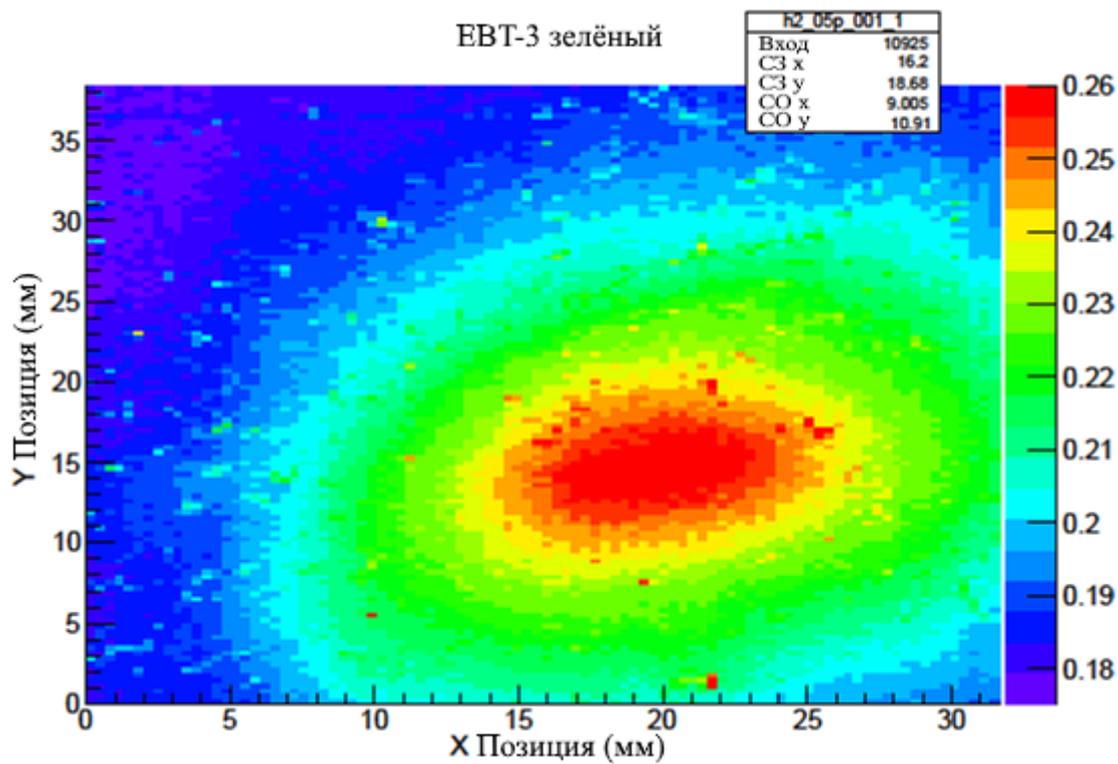


Рис. 6. Плёнка ПОР-2 в зелёном свете, экспозиция 5 (цвета в онлайн версии).

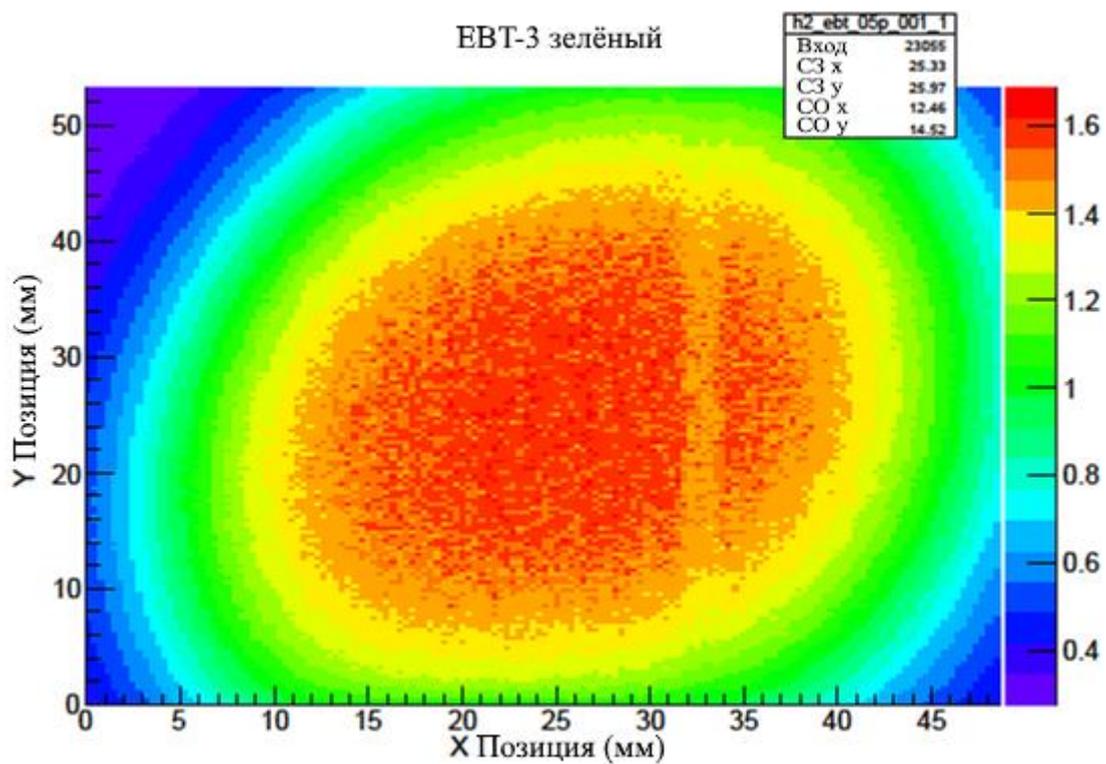


Рис. 7. Плёнка ЕВТ-3 в зелёном свете, экспозиция 5.

Заключение

Проведённые исследования рабочих характеристик радиохромных плёнок российского производства ПОР-2 показали, что в настоящее время они не могут быть использованы для клинической дозиметрии с пучками адронов и гамма-квантов из-за их высокой пороговой чувствительности к ионизирующему излучению. Для эффективного применения в клинической практике необходимо внесение доработок в состав радиохромного чувствительного слоя пленок, повышающего их пороговую чувствительность и позволяющего регистрировать изменения оптической плотности за счет радиохимических реакций при более низких уровнях поглощенной энергии. Работы по повышению чувствительности пленок продолжаются, их результаты будут представлены в будущем.

Список литературы

- [1] Devic Slobodan// Radiochromic film dosimetry: Past, present and future, Physica Medica, 2011v.27, no. 3, p.122-134
- [2] Recommendations of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No.55, AAPM Report No.63, Radiochromic Film Dosimetry, Medical Physics, v.25, no.11, November 1998
- [3] В.П. Тенишев, Стандартные образцы поглощённой дозы: расширение динамического диапазона и улучшение точности измерений// Эталоны. Стандартные образцы, 2023, т.19, №4, с.63-71
- [4] www.vniiftri.ru
- [5] В.П. Тенишев, И.А. Емельяненко, Радиационно-чувствительные плёночные композиции для измерения поглощённых доз в диапазоне 100-1000Гр.// Эталоны. Стандартные образцы, 2019, т.15, №3, с.33-40
- [6] Коваленко О.И., Тенишев В.П., Средства измерений для контроля поглощённой дозы при радиационной обработке пищевой и сельскохозяйственной продукции// Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве: сборник докладов Международной научно-практической конференции, Обнинск, 16-18 сентября 2020г Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020, с.335-337.
- [7] А.Я. Грудский, В.Я. Величко, Оцифровка радиографических снимков – это не очень просто, Журнал «В мире неразрушающего контроля», Радиационный контроль, №4 (54), с.74-76, декабрь 2011.
- [8] Г.И. Крупный, Д.В. Снитко, А.А. Янович. Сечения реакций $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{spall})\ ^7\text{Be}$, $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{ЗрЗn})\ ^{22}\text{Na}$ и $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{Зрn})\ ^{24}\text{Na}$ в диапазоне энергий протонов 37 МэВ – 70 ГэВ. АЭ, 2000, т. 89, вып. 5, с. 418-420. Препринт ИФВЭ 2000-13, Протвино, 2000.

Рукопись поступила 16 мая 2025 г.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2025-3,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2025
