

НОВЫЙ ПОДХОД К ВНЕДРЕНИЮ И ЭКСПЛУАТАЦИИ В БРАХИТЕРАПИИ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА

А.Т. ТУЛЕГЕНОВА^{1,2}, Д.А. МУСАХАНОВ^{1,3}, Н.М. ТУЛБАЕВА¹,
М.С. ОМИРЗАК¹, О.К. СЕЙТОВ¹, К.Д. ДАТБАЕВ¹

¹АО «Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии», Алматы, Республика Казахстан;

²НАО «КазНУ им. аль-Фараби», Алматы, Республика Казахстан;

³НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», Астана, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

Актуальность: Научная новизна данного исследования заключается в разработке метода оценки дозовых распределений вокруг аппликатора с использованием радиохромной пленки Gafchromic RTQA2 и твердотельного фантома толщиной 1 см. Предлагаемая методика позволяет минимизировать отклонения между фактическим и планируемым дозовым распределением вокруг источника. Использование радиохромной пленки и твердотельных фантомов обеспечивает возможность детального анализа дозовых профилей, что позволяет оптимизировать позиционирование источников и повысить точность лечения, особенно в условиях трёхмерного планирования в высокодозной брахитерапии.

Цель исследования – повысить точность дозиметрических измерений и улучшить качество планирования процедур в брахитерапии.

Методы: В исследовании использовались радиохромная пленка Gafchromic RTQA2 и твердотельный фантом из полиметилметакрилата (30×30×1 см³, плотность 1,05 г/см³). Для анализа изодозных кривых вокруг аппликатора были выбраны дозы: 0,6 Гр, 1 Гр, 1,7 Гр, 2 Гр, 2,5 Гр, 3 Гр и 4 Гр.

Результаты: По результатам эксперимента было выявлено, что радиохромная пленка после облучения темнеет прямо пропорционально поглощенной дозе. Результаты эксперимента показывают отклонения измеренных данных от планировочной системы в пределах 4,2–10,6%. Более низкое отклонение на второй пленке указывает на более точное и стабильное дозовое распределение в её области, что может объясняться оптимальным её расположением относительно источника и уменьшенным эффектом рассеяния и поглощения.

Заключение: Предложенный метод, сочетающий планшетное сканирование с применением Epson Expression 10000XL, твердотельного фантома с радиохромной пленкой и программы ImageJ, обеспечивает удобную и недорогую оценку дозовых распределений вокруг аппликатора. С помощью программного обеспечения мы создали графики, отображающие связь между расстоянием и уровнями цвета по трем каналам. Результаты демонстрируют изменения уровней цвета в профилях изодозы от центра аппликатора к его краю. Построенные графики дозы излучения по профилям изодозы демонстрируют зависимость от расстояния. Изменения уровней цвета по каналам RGB точно отображают плотность излучения, что способствует улучшению визуализации и валидации дозиметрических расчетов. Этот метод важен для брахитерапии, так как позволяет оптимизировать положение источников и повысить точность моделирования дозы вокруг аппликатора, обеспечивая надежный контроль качества.

Ключевые слова: Контроль качества, радиохромная пленка, дозовое распределение, изодоза.

Введение: Высокодозная брахитерапия с использованием источников Ir-192 и Co-60 применяется для лечения различных типов опухолей, таких как рак шейки матки, предстательной железы, молочный железы, головы и шеи и т.д. В трехмерной брахитерапии положение первого источника определяется либо рентгеновскими катетерами на КТ-снимках, либо маркерами на МРТ-снимках [1-4]. Это критический шаг, поскольку положение каждого последующего источника определяется относительно первого. Таким образом, распределение дозы формируется на основе положения первого и последующих источников, представляя собой кумулятивную дозу от каждого положения источника. Существуют методы определения положений источника и пленочной дозиметрии, которые применяются при замене источника. Эти методы позволяют проводить послойную оценку распределения дозы, то есть можно определить зависимость расстояния от источника до кумулятивной дозы. Следовательно, существует необходимость в разработке нового подхода к обеспечению качества для проверки распределения дозы.

В то время как многие исследования сосредоточены на определении начальных положений источника и обеспечении контроля качества источника [5-7], немногие из них рассматривали распределение дозы вокруг аппликатора. Однако это в равной степени важно для обеспечения контроля качества в высокодозных брахитерапии.

Цель исследования – повысить точность дозиметрических измерений и улучшить качество планирования процедур в брахитерапии.

Материалы и методы: Для данного исследования использовались радиохромные пленки Gafchromic RTQA2 и твердотельные фантомы толщиной 1 см (2 единицы). Размеры твердотельного фантома составляют 30×30×1 см³, они изготовлены из полиметилметакрилата плотностью 1,05 г/см³. Твердотельные фантомы располагались вертикально друг над другом, как показано на рисунке 1. Прозрачный аппликатор был надежно закреплен на верхнем фантоме в центре. Затем с помощью компьютерной томографии было получено КТ-изображение твердого фантома.

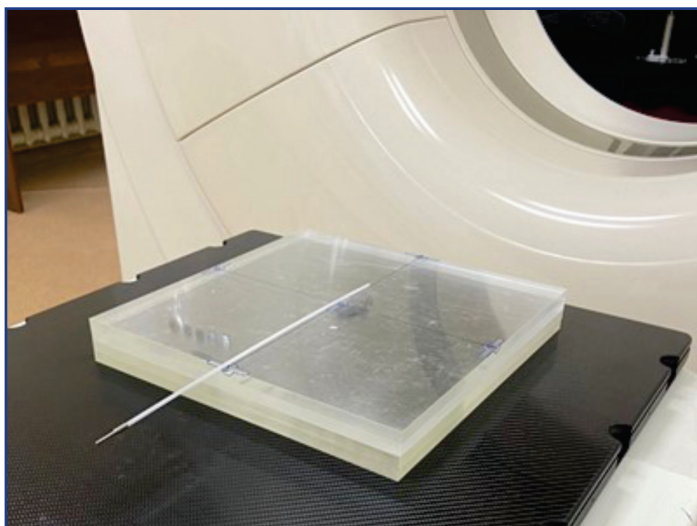


Рисунок 1 – Два твердотельных фантома, расположенные вертикально один над другим

Радиоохромные пленки расположены с интервалом в 1 см, что соответствует толщине твердотельного фантома. Схема расположения представлена на рисунке 2. Заводские параметры плёнки составляют 25x25 см. В исследовании использовались цельные плён-

ки без дополнительных механических обработок, чтобы избежать возникновения дефектов. Полная толщина плёнки составляет стандартные 0,23 мм, из которых активный слой, согласно литературным данным, равен 20 мкм [8].

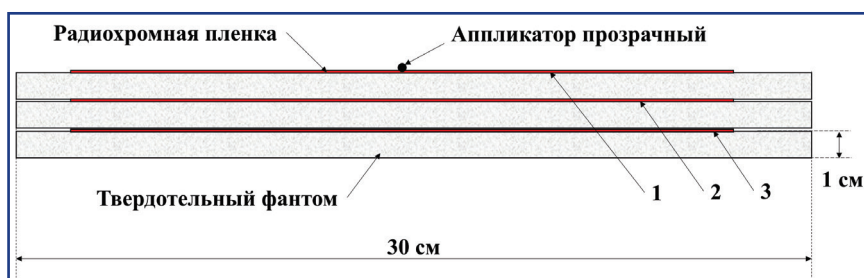


Рисунок 2 – Схема расположения твердотельного фантома, радиоохромной пленки и прозрачного аппликатора (1, 2, 3-расположение пленки)

После эксперимента пленки были отсканированы с разрешением 600 точек на дюйм с использованием оборудования Epson Expression 10000XL. В планирующей системе на пленку №3 (рисунок 2) была задана доза в 200 сГр. При планировании была выбрана активная длина 10 см, так как данная длина часто используется в тестовом режиме и при определении активности.

В исследовании использовался аппарат GammaMedPlus (Medical Systems, Калифорния, США), оснащенный ионизирующим источником излучения Ir-192 с периодом полураспада 74 дня [9, 10].

Для анализа и обработки изображений применялась программа с открытым исходным кодом ImageJ [11-14]. Результаты исследования изодозовых кривых, полученные с помощью программы «ImageJ», были сопоставлены с данными планирующей системы Eclipse Brachytherapy (Varian). Были определены количественные и качественные характеристики распределения доз вокруг аппликатора с использованием радиоохромной пленки.

Результаты:

Экспозиция радиационного источника. Радиоактивный источник в аппарате был перезаряжен 16 апреля 2024 года с активностью 10000 mCi на тот момент. Эксперимент был проведён 16 мая 2024 года, когда мощ-

ность дозы источника составляла 40700 сГр•см²/час. На рисунке 4 показано время простоя источника, как показано на плане планирования во время эксперимента. Очевидно, что время простоя варьируется в каждой точке, причем значения автоматически рассчитываются системой планирования. Расчеты выполняются в соответствии с протоколом TG-43, установленным Американской ассоциацией физиков в медицине [9]. Сумма дозовых кривых для этого воздействия равномерно распределена по длине аппликатора.

Анализ пленки. Радиоохромные пленки обладают высоким пространственным разрешением и не имеют подобных недостатков, что делает их полезными для определения как абсолютного, так и относительного значения поглощенной дозы облучения [15]. Исследование показало, что после облучения радиоохромная пленка темнеет, и эта изменяющаяся окраска прямо пропорциональна поглощенной дозе. На рисунке 4 (1, 2, 3) представлены изодозные линии, соответствующие определенным дозам, которые были получены после обработки с помощью программы ImageJ. Рисунок 4 (4) демонстрирует план распределения доз, полученный с помощью плановой системы «Brachytherapy».



Рисунок 3 – Экспозиционное время для каждой точки

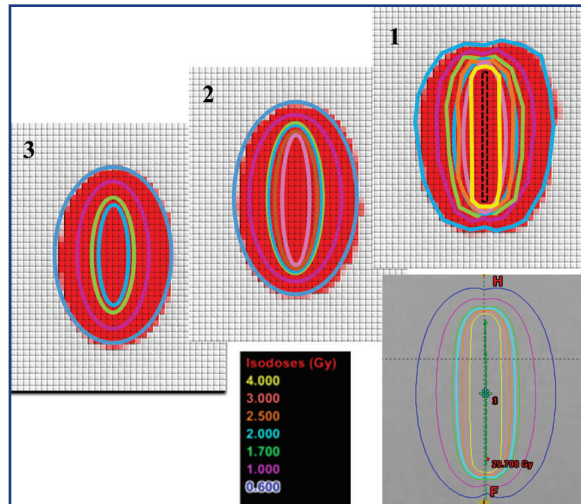


Рисунок 4 – Результаты обработки пленки (1, 2, 3) и система планирования «Brachytherapy» (4)

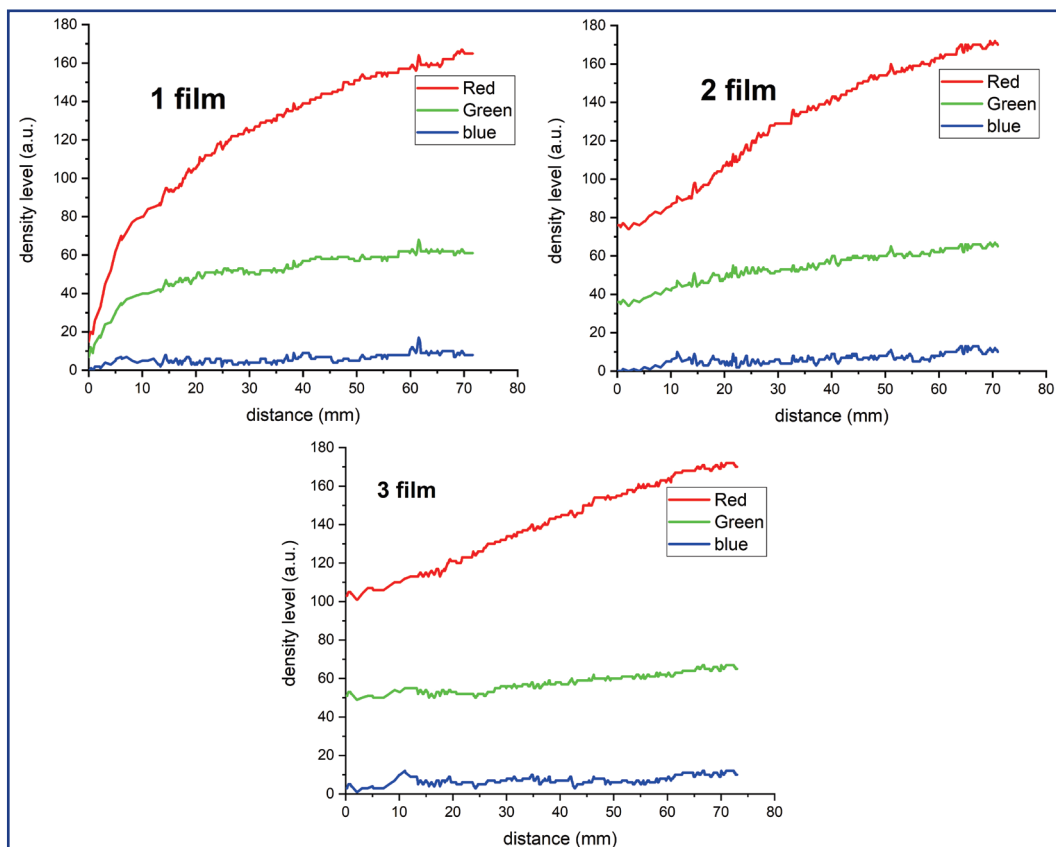


Рисунок 5 – Зависимость уровня цвета от расстояния от центра аппликатора до края

Традиционно, при работе с радиоохромными пленками используемый метод включал анализ данных исключительно из красного канала сканированных изображений. Затем эти данные обрабатывались для получения распределения дозы. Однако существуют методы, которые предлагают использовать все три канала изображения: красный, зеленый и синий (RGB) [16]. Такой подход позволяет повысить точность дозиметрии пленки. В нашем исследовании с помощью программного обеспечения мы создали графики, отображающие связь между расстоянием и уровнями цвета по трем каналам (рисунок 5). Результаты демонстри-

руют изменения уровней цвета в профилях изодозы от центра аппликатора к его краю. Данные по трем пленкам показывают меньшую зависимость от зеленого и синего каналов по сравнению с красным каналом. Это свидетельствует о том, что для оценки распределения дозы с помощью радиоохромной пленки RTQA2 красный канал обеспечивает наиболее надежные и точные результаты.

Оценка распределений изодоз. Для оценки распределения дозы данные, полученные с помощью системы планирования, сравнивались с экспериментальными результатами облучения радиоохромной пленки.

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных результатов со значениями плановой системы

Доза, Гр	1 пленка			Доза, Гр	2 пленка			Доза, Гр	3 пленка		
	Расстояние, мм	Расстояние в плане, мм	Отклонение, %		Расстояние, мм	Расстояние в плане, мм	Отклонение, %		Расстояние, мм	Расстояние в плане, мм	Отклонение, %
0,6	47,5	44,4	6,5	0,6	45,5	43,2	5,1	0,6	42,3	39,8	5,9
1	33,9	31,6	6,8	1	31,7	30	5,4	1	26,5	25,1	5,3
1,7	23,1	21,4	7,4	1,7	19,9	18,8	5,5	1,7	10,4	9,3	10,6
2	19,9	18,6	6,5	2	16,8	16,1	4,2				
2,5	17,2	15,8	8,1	2,5	12,5	11,9	4,8				
3	14,4	13,5	6,3	3	9,5	9,1	4,2				
4	11	10,5	4,6								

Процентное отклонение (у) рассчитывали по формуле (1), где x_0 представляет собой фактическое измеренное значение, а x_1 обозначает значение из системы планирования:

$$y = \frac{x_0 - x_1}{x_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

Обсуждение: В данном исследовании была исследована радиоохромная пленка типа RTQA2 для потенциального применения в контроле качества брахитерапии. В качестве источника излучения использовался радионуклид Ir-192, применяемый в брахитерапевтических системах GammaMedPlus (Varian). Разработан метод оценки дозовых распределений с использованием радиоохромной пленки. Пленки были размещены относительно аппликатора с шагом 1 см, как показано на рисунке 2. Первая пленка располагалась непосредственно вблизи аппликатора. Между радиоохромными пленками был размещен бесцветный твердотельный фантом из полиметилметакрилата. Основные результаты показали, что красный цветовой канал дает наиболее точные данные о дозовом распределении, превышая другие каналы по уровню отклика в два раза. Это говорит о значительных расхождениях между цветами, особенно в сравнении с синим каналом, который дал наименьший уровень отклика. Результаты данного исследования демонстрируют, что радиоохромная пленка RTQA2, особенно с использованием красного цветового канала, может улучшить контроль качества в брахитерапии за счёт повышения точности дозиметрических измерений. Однако это решение не является идеальным, поскольку отклик пленки варьируется между цветовыми каналами, что может привести к потенциальным погрешностям. Несмотря на это, метод является

полезным для оценки дозовых распределений, особенно рядом с аппликатором.

Заключение: Предложенный метод, сочетающий планшетное сканирование с использованием Epson Expression 10000XL, твердотельного фантома с радиоохромной пленкой Gafchromic RTQA2 и бесплатной программы ImageJ, обеспечивает удобный и экономически эффективный подход к оценке распределения дозы вокруг аппликатора с движущимся источником и заданным временем экспозиции.

В исследовании изодозовых кривых вокруг аппликатора были выбраны дозы: 0,6Гр, 1Гр, 1,7Гр, 2Гр, 2,5Гр, 3Гр и 4Гр. Отклонение значений, полученных в эксперименте, со значениями, рассчитанными планировочной системой, составляет от 4,2 до 10,6. Однако если сравнить пленки, то отклонение значения для первой пленки, расположенной ближе к аппликатору, составляет 6,6%, для второй – 4,9% и для третьей – 7,3%. Отклонение величины на второй пленке, которое ниже, чем у первой и третьей, указывает на более стабильное и точное дозовое распределение в её области. Этот факт может свидетельствовать о том, что дозовая однородность в зоне второй пленки лучше соответствует расчётным значениям. Это может объясняться оптимальным расположением пленки относительно источника и меньшими эффектами рассеяния и поглощения.

С помощью программного обеспечения мы создали графики, отображающие связь между расстоянием и уровнями цвета по трем каналам. Результаты демонстрируют изменения уровней цвета в профилях изодозы от центра аппликатора к его краю. Построенные графики позволяют оценить распределение дозы излучения, исходящей от аппликатора, по профилям изодозы в зависимости от расстояния. Изме-

нение уровней цвета по каналам RGB напрямую отражает изменения плотности излучения, что важно для точной визуализации и валидации дозиметрических расчетов. Такой подход особенно полезен при планировании брахитерапии, так как позволяет оптимизировать положение источников и более точно моделировать распределение доз в тканях вокруг аппликатора, обеспечивая улучшенный контроль качества.

Методика с радиохромной пленкой показала хорошую согласованность с планируемыми дозовыми распределениями, особенно при учете цветности, что подтверждает её потенциальную применимость для контроля качества в брахитерапии.

Список использованных источников:

1. Awunor O.A. Assessment of a source position checking tool for the quality assurance of transfer tubes used in HDR ¹⁹²Ir brachytherapy treatments // *Brachytherapy*. – 2018. – Vol. 17. – P. 628–633. <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2017.12.001>
2. Rickey D.W., Sasaki D., Bews J. A quality assurance tool for highdose rate brachytherapy // *Med. Phys.* – 2010. – Vol. 37. – P. 2525–2532. <https://doi.org/10.1118/1.3425786>
3. Otani Y., Sumida I., Nose T. High-dose rate intracavitary brachytherapy pretreatment dwell position verification using a transparent applicator // *J. Appl. Clin. Med. Phys.* – 2018. – Vol. 19. – P. 428–434. <https://doi.org/10.1002/acm2.12405>
4. Collins T., Ogilvy A., Hare W., Hilt M., Jirasek A. Iterative image reconstruction algorithm analysis for optical CT radiochromic gel dosimetry // *Biomed. Phys. Eng. Express*. – 2024. – Vol.10. – Art. no. 035031. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ad3afe>
5. Mehrara E. Thermoluminescence dosimetry (TLD) in a 3 T magnetic resonance imaging (MRI) environment: implications for personnel exposure monitoring // *Biomed. Phys. Eng. Express*.

- 2024. – Vol. 10. – Art. no. 045020. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ad470c>
6. Kry S. F. AAPM TG 191: clinical use of luminescent dosimeters: TLDs and OSLDs // *Med. Phys.* – 2020. – Vol. 47. – P. e19–51. <https://doi.org/10.1002/mp.13839>
7. Xhaferllari I. Clinical utility of Gafchromic film in an MRI-guided linear accelerator // *Radiation Oncology*. – 2021. – Vol.16. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13014-021-01844-z>
8. Ashland. Gafchromic RTQA2. Дана доцмына: 09.09.2024. <http://www.gafchromic.com/gafchromic-film/radiotherapy-films/RTQA2/index.asp>
9. Mark J. R., Bert M. C., Larry A. D., William F. H., Saiful H.M., Ibbott G., Mitch M.G., Nath R., Williamson J. F. Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations // *Med. Phys.* – 2004. – Vol. 31. – P. 633–674. <https://doi.org/10.1118/1.1646040>
10. Casolaro P. Radiochromic Films for the Two-Dimensional Dose Distribution Assessment // *Appl. Sci.* – 2021. – Vol. 11. – P. 2132 <https://doi.org/10.3390/APP11052132>
11. Mücke A., Lewis D. F., Xiang Yu. Multichannel film dosimetry with nonuniformity correction. // *Med. Phys.* – 2019. – Vol. 38 (5). – P. 2523–2534. <https://doi.org/10.1118/1.3576105>
12. CDC. Radiation Emergencies. Radioisotope Brief: Iridium-192 (Ir-192). Дана нубл.: 18.08.2004. Дана доцмына: 09.09.2024. https://stacks.cdc.gov/view/cdc/151523/cdc_151523_DS1.pdf
13. Delacroix D., Guerre J.P., Leblanc P., Hickman C. Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook // *Radiat. Protect. Dosimetry*. – 2022. – Vol. 98. – P. 168. <http://dx.doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006705>
14. Howard M.E., Herman M.G., Grams M.P. Methodology for radiochromic film analysis using FilmQA Pro and ImageJ // *PLoS ONE*. – 2020. – Vol. 15. – Art. no. e0233562. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233562>
15. Tiantian Y., Luthjens L.H., Gasparini A., Warman J.M. A study of four radiochromic films currently used for (2D) radiation dosimetry // *Radiat. Phys. Chem.* – 2017. – Vol. 133. – P. 37–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.12.006>
16. Collins T.J. ImageJ for Microscopy // *BioTechniques*. – 2018. – Vol. 43. – P. S25–S30. <https://doi.org/10.2144/000112517>

АНДАТПА

БРАХИТЕРАПИЯНЫ ЖАҢА ӘДІСТЕРДІ ЕНГІЗУ МЕН ПАЙДАЛАНУДЫҢ ЖАҢА ТӘСІЛІ: САПАНЫ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ ҮШІН КЕШЕНДІ ТАЛДАУ

А.Т. Тулғенова^{1,2}, Д.А. Мусаханов^{1,3}, Н.М. Тулбаева¹, М.С. Өмірзақ¹, О.Қ. Сейтов¹, К.Д. Датбаев¹

¹«Қазақ онкология және радиология ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Алматы, Қазақстан Республикасы;

²«ел-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті» КеАҚ, Алматы, Қазақстан Республикасы;

³«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан Республикасы

Өзектілігі: Ғылыми жаңалық-Gafchromic RTQA2 радиохромды қабыршағын және қалыңдығы 1 см қатты күйдегі фантомды қолдана отырып, аппликатордың айналасындағы дозаның таралуын бағалау әдісін жасау. Радиохромды пленка мен қатты күйдегі фантомдарды қолдану дозалық профильдерді егжей-тегжейлі талдауға мүмкіндік береді, әсіресе жоғары дозалы брахитерапияда үш өлшемді жоспарлау жағдайында, бұл көздердің орналасуын оңтайландыруға және емдеу дәлдігін жақсартуға мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты – дозиметриялық өлшеулердің дәлдігін арттыру және брахитерапиядағы процедураларды жоспарлау сапасын жақсарту.

Әдістері: Зерттеуде Gafchromic RTQA2 радиохромды қабыршағы және полиметилметакрилаттан жасалған қатты күйдегі фантом (30×30×1 см³, тығыздығы 1,05 г/см³) қолданылды. Аппликатордың айналасындағы изодоздық қисықтарды талдау үшін мынадай дозалар таңдалды: 0,6 Гр, 1 Гр, 1,7 Гр, 2 Гр, 2,5 Гр, 3 Гр және 4 Гр.

Нәтижелері: Эксперимент нәтижелері бойынша радиохромды қабыршақ сәулелену сипірілген дозаға тура пропорционалды түрде қараңғыланатындығы анықталды. Эксперимент нәтижелері өлшенген мәндерді, жоспарлау жүйесімен салыстырғанда 4,2–10,6% ауытқуын көрсетеді. Екінші қабыршақтағы ауытқудың төмен болуы, оның аймағында дәлірек және тұрақты дозаның таралуын көрсетеді, бұл оның көзге қатысты оңтайлы орналасуымен және шашырау мен сипіру әсерінің төмендеуімен түсіндірілуі мүмкін.

Қорытынды: "Epson Expression 10000XL" планшеттік сканерлеуді, қатты күйдегі фантомды радиохромды қабыршағымен және "ImageJ" бағдарламасын біріктіретін ұсынылған әдіс аппликатордың айналасындағы дозаның таралуын ыңғайлы және тиімді бағалауды қамтамасыз етеді. Бағдарламалық жасақтаманың көмегімен біз үш арна арқылы қашықтық пен түс деңгейлері арасындағы байланысты көрсететін графиктер жасадық. Нәтижелер аппликатордың ортасынан оның шетіне дейін изодоза профильдеріндегі түс деңгейлерінің өзгеруін көрсетеді. Изодоздық профильдер бойынша сәулелену дозасының сызбалары қашықтыққа тәуелділікті көрсетеді. RGB арналарындағы түс деңгейлерінің өзгеруі сәулеленудің тығыздығын дәл көрсетеді, бұл дозиметриялық есептеулердің визуализациясы мен валидациясын жақсартуға көмектеседі. Бұл әдіс брахитерапия үшін маңызды, өйткені ол көздердің орналасуын оңтайландыруға және сапаны сенімді бақылауды қамтамасыз ете отырып, аппликатордың айналасындағы дозаны модельдеу дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: Сапаны бақылау, радиохромды қабыршақ, дозаның таралуы, изодоза.

ABSTRACT
A NEW APPROACH TO THE IMPLEMENTATION AND OPERATION IN BRACHYTHERAPY: COMPREHENSIVE ANALYSIS FOR QUALITY ASSURANCE
A.T. Tulegenova^{1,2}, D.A. Mussakhanov^{1,3}, N.M. Tulbayeva¹, M.S. Omirzak¹, O.K. Seitov¹, K.D. Datbayev¹
¹«Kazakh Institute of Oncology and Radiology» JSC, Almaty, the Republic of Kazakhstan;

²«al-Farabi Kazakh National University» NJSC, Almaty, the Republic of Kazakhstan;

³«L.N. Gumilyov Eurasian National University» NJSC, Astana, the Republic of Kazakhstan

Relevance: The scientific novelty consists in developing a method for estimating dose distributions around the applicator using Gafchromic RTQA2 radiochromic film and a 1 cm thick solid phantom. This technique minimizes deviations between the actual and planned dose distributions around the source. The use of radiochromic film and solid phantoms allows for detailed analysis of dose profiles, which can optimize source positioning and improve treatment accuracy, especially in the context of 3D planning in high-dose brachytherapy.

The study aimed to improve the accuracy of dosimetric measurements and the quality of procedure planning in brachytherapy.

Methods: Gafchromic RTQA2 radiochromic film and a solid phantom made of polymethylmethacrylate (30×30×1 cm³, density 1.05 g/cm³) were used in the study. The doses chosen for analyzing isodose curves around the applicator were 0.6 Gy, 1 Gy, 1.7 Gy, 2 Gy, 2.5 Gy, 3 Gy, and 4 Gy.

Results: According to the experiment results, the radiochromic film darkens proportionally to the absorbed dose when irradiated. The experimental results show deviations of the measured data from the planned system in the range of 4.2-10.6%. The lower deviation on the second film indicates a more accurate and stable dose distribution in its region, which can be explained by its optimal location relative to the source and reduced scattering and absorption effects.

Conclusion: The proposed method combines an Epson Expression 10000XL scanner, a solid phantom with radiochromic film, and ImageJ software to efficiently assess dose distributions around the applicator. The resulting graphs demonstrate how radiation dose correlates with distance through isodose profiles, with RGB channel changes accurately reflecting radiation density. This approach enhances the visualization and validation of dosimetric calculations, making it crucial for improving source positioning and ensuring reliable quality control in brachytherapy through optimized dose modeling.

Keywords: Quality control, radiochromic film, dose distribution, isodose.

Прозрачность исследования: Авторы несут полную ответственность за содержание данной статьи.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Данное научное исследование проведено в рамках реализации научной программы ПЦФ «Метрологическое обеспечение дозиметрических измерений в контактной лучевой терапии», ИРН BR12967832 Министерство торговли и интеграции Республики Казахстан.

Вклад авторов: вклад в концепцию – Тулегенова А.Т., Мусаханов Д.А.; научный дизайн – Тулбаева Н. М., Сейтов О.К.; исполнение заявленного научного исследования – Омірзақ М.С., Сейтов О.К., Датбаев К.Д.; интерпретация заявленного научного исследования – Мусаханов Д.А.; создание научной статьи – Тулегенова А.Т., Мусаханов Д.А.

Сведения об авторах:

Тулегенова А.Т. (корреспондирующий автор) – к.ф.-м.н., PhD, Научный руководитель проекта, научный сотрудник АО «Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии», и.о. доцента кафедры физики твердого тела и нелинейной физики КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан, тел: +77079199951, e-mail: tulegenova.aida@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5701-6674;

Мусаханов Д.А. – к.т.н., преподаватель-исследователь кафедры радиотехники, электроники и телекоммуникаций, НАО "ЕНУ им. Л. Н. Гумилева", Астана, Республика Казахстан, тел: +77019989787, e-mail: Mussakhanov_da@enu.kz, ORCID ID: 0000-0002-1823-2526;

Тулбаева Н.М. – Заведующая отделением дозиметрии и физико-технического обеспечения лучевой терапии, АО «Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии», Алматы, Республика Казахстан, +77774897572, e-mail: nurgul.tm@mail.ru;

Омірзақ М.С. – магистр естественных наук, инженер по обслуживанию линейных ускорителей, отделение дозиметрии и физико-технического обеспечения лучевой терапии, АО «Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии», Алматы, Республика Казахстан, тел: +77779124411, e-mail: m.omirzaq@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-5026-6227;

Сейтов О.К. – магистр технических наук, инженер по обслуживанию линейных ускорителей, отделение дозиметрии и физико-технического обеспечения лучевой терапии, АО «Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии»; инженер, отделение лучевой терапии, Алматинский Онкологический Центр, Алматы, Қазақстан, +77074857830, e-mail: olzhas_seitov@mail.ru, ORCID ID: 0009-0004-9477-3262;

Датбаев К.Д. – магистр технических наук, инженер по обслуживанию линейных ускорителей, отделение дозиметрии и физико-технического обеспечения лучевой терапии, АО «Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии»; медицинский физик, отделение лучевой терапии, Алматинский Онкологический Центр, Алматы, Республика Казахстан, +77718507486, e-mail: kairdatbayev@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0453-2878.

Адрес для корреспонденции: Тулегенова А.Т., АО «Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии», пр.Абая 91, 050022, Алматы, Республика Казахстан.