

Рис. 6 – Погрешность по трем координатным осям для T1-взвешанных изображений МРТ

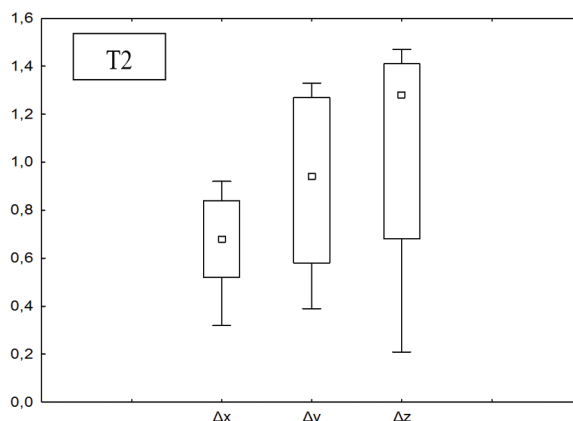


Рисунок 7 – Погрешность по трем координатным осям для T2-взвешанных изображений МРТ

ЛИТЕРАТУРА

1. Kim, H.Y. Reliability of Stereotactic Coordinates of 1.5-Tesla and 3-Tesla MRI in Radiosurgery and Functional Neurosurgery/ H.Y. Kim, Sun-il Lee, Seong Jin Jin // Journal of Korean Neurosurgical Society, 2014.–P.136–141
2. Price, R.R. Quality assurance methods and phantoms for magnetic resonance imaging: report of AAPM nuclear magnetic resonance Task Group No. 1 / R.R. Price, L. Axel, T. Morgan //The International Journal of Medical Physics Research and Practice, 1990. –P. 287–295
3. Firbank, M. J. Quality assurance for MRI: practical experience / M.J. Firbank, R.M. Harrison, E.D. Williams // The British Journal of Radiology, 2000.–P. 376–383

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОБЛУЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ, СТРАДАЮЩИХ РАКОМ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ COMPARATIVE ANALYSIS OF IRRADIATION METHODS FOR PATIENTS WITH PROSTATE CANCER

М. В. Калевич^{1,2}, М. Н. Петкевич^{1,2}

M. Kalevich^{1,2}, M. Piatkevich^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, БГУ

²Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь
kfm@iseu.by, maxkalevich@gmail.com

¹Belarusian State University, BSU

²International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU,
Minsk, Republic of Belarus

С появлением современных медицинских ускорителей электронов значительно увеличилось количество методик облучения. Новые методики направлены на сокращение длительности курса лучевой терапии, точность подведения дозы излучения к опухоли и снижение дозовых нагрузок на окружающие ткани и органы. Внедрение новой методики облучения в конкретном медицинском учреждении связано с рядом организационных мероприятий, адаптацией оборудования и имеющихся приспособлений к новому подходу, подготовкой персонала. Перед внедрением новой методики в клиническую практику учреждения необходимо произвести анализ всех параметров лучевого лечения путем компьютерного моделирования плана лучевой терапии с учетом всех условий облучения. Цель работы – произвести количественный анализ дозиметрических и временных параметров методик лучевого лечения пациентов, страдающих раком предстательной железы с применением разных схем фракционирования (последовательный boost, интегрированный boost).

To select the optimal treatment method, it is important to use the full range of radiation therapy parameters. The aim of the work is to assess and quantitatively analyze the dosimetric and time parameters of radiation therapy plans using different fractionation schemes (sequential boost, integrated boost).

Ключевые слова: лучевая терапия, последовательный буст, интегрированный буст, линейно-квадратичная модель.

Keywords: radiation therapy, sequential boost, integrated boost, linear-quadratic model.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-352-356>

Рак предстательной железы (РПЖ) на сегодняшний день представляет актуальную проблему в онкологии ввиду неуклонного роста числа вновь выявленных случаев. В настоящее время он занимает первое место по темпам прироста среди всех злокачественных новообразований. За последние десять лет в Республике Беларусь число ежегодно регистрируемых случаев рака простаты увеличилось в два раза. В настоящее время рак предстательной железы составляет 9,2 % в структуре онкологической заболеваемости в РБ и занимает 4 место после рака легкого, кожи и желудка.

Целью лучевой терапии является необходимость доставить максимальную дозу излучения до целевого объема однородно, при этом избегая чрезмерного облучения нормальных окружающих тканей. Достижения в области медицинской визуализации и медико-физического программного обеспечения позволили приблизиться к достижению этой цели путём визуализации пространственного распределения доставляемой поглощенной дозы в мишени. В результате этих разработок теперь возможно легко и быстро получить значительное количество различных дозиметрических планов лечения для одного и того же пациента.

Методика облучения одновременного интегрированного бустинга позволяет одновременно доставлять разные уровни дозы к разным целевым объемам в рамках одной лечебной фракции. Наиболее значительный аспект, связан со стратегией фракционирования, касающейся двух параметров зависимости времени от дозы: сокращение общего времени лечения, увеличение размера фракции.

Линейно-квадратичная модель (ЛКМ) широко используется для прогнозирования контроля опухоли и токсичности после традиционной лучевой терапии и для определения оптимального плана лечения. В лучевой терапии при выборе эффективного плана лечения из ряда альтернативных обычно используются определенные радиобиологические модели с целью количественной оценки уровней лучевого воздействия на нормальные и опухолевые ткани. При этом допустимое множество планов должно обеспечивать такие условия облучения очага опухолевого заболевания, которые приведут к необратимому разрушению опухолевого процесса без серьезных лучевых осложнений в нормальных органах и тканях. Относительная радиочувствительность опухолевых клеток зависит от ряда факторов: способности клеток устранять повреждение, гипоксии, периода клеточного цикла и доли растущих клеток. Кроме того, возможность ликвидации опухоли определяется ее начальным объемом.

Эти модели сохраняют свое значение в радиологии, но не позволяют конкретизировать характер реакции различных тканей и опухоли на облучение, учесть неполную репарацию при двух и более фракциях в день, откорректировать дозу, если первая фракция выполнена неверно. Более широкие возможности в этом плане имеет линейно-квадратичная модель (ЛКМ), основанная на теории клеточной выживаемости. Базовое уравнение, определяющее фракцию клеток S , выживших после облучения, имеет вид:

$$S(d) = \prod_{i=1}^N \exp(-\alpha d_i - \beta d_i^2) = \exp(-\sum_{i=1}^N (\alpha d_i + \beta d_i^2)), \quad (1)$$

где d_i – доза в i -ом сеансе, а α и β – параметры модели; α характеризует начальный наклон кривой выживаемости и соответствует одно мишенной и одноударной гибели клеток, а β характеризует сублетальное повреждение клеток.

Для выжившей фракции клеток S эффект E от облучения рассматривается как:

$$E = -\ln \ln(S) = \sum_{i=1}^N (\alpha d_i + \beta d_i^2). \quad (2)$$

Пусть d – разовая доза (доза за сеанс), N – число сеансов облучения. Тогда суммарная доза:

$$D = Nd. \quad (3)$$

Уравнение примет вид:

$$E = N(\alpha d + \beta d^2) = \alpha D + \beta dD = D(\alpha + \beta d), \quad (4)$$

где E – безразмерная величина и, следовательно, параметр α должен иметь размерность Гр⁻¹, а β , соответственно, Гр⁻².

Применение данной модели в ряде случаев позволяет определять толерантные дозы при равномерных схемах терапии. В радиологии хорошо известны трудности, связанные с идентификацией параметров ЛКМ. В основном они связаны с тем, что исходная клиническая информация в большинстве случаев соответствует стандартной схеме фракционирования дозы (5 фракций в неделю с разовой дозой $d = 2$ Гр).

Один из вариантов линейно-квадратичной модели: LQED2 («Linear-quadratic equivalent dose for 2 Gy fractions»):

Предположим, что используется стандартный режим фракционирования с полной дозой D_{ref} и дозой за фракцию s . Для изо эффекта E является константой, как и α и β для данного типа ткани и данного конечного результата.

$$D \left(1 + \frac{d}{\alpha} \right) = D_{ref} \left(1 + \frac{d_{ref}}{\alpha} \right), \quad (5)$$

где D – новое значение полной дозы. Результирующее изоэффективное соотношение имеет вид:

$$\frac{D}{D_{ref}} = \frac{d_{ref} + \alpha/\beta}{d + \alpha/\beta}. \quad (6)$$

Если в качестве d_{ref} взять стандартную дозу за фракцию, равную 2 Гр, то получим простой метод сравнения эффективности режимов фракционирования, имеющих различные полные дозы за фракцию. Идея метода состоит в конвертировании каждого режима в эквивалентный режим по 2 Гр за фракцию, дающий такой же биологический эффект. Результирующая формула имеет вид:

$$EQD_2 = D \frac{d + \alpha/\beta}{2 + \alpha/\beta}, \quad (7)$$

где EQD_2 – суммарная толерантная доза для стандартной схемы фракционирования дозы (2 Гр на очаг опухолевого поражения за сеанс, 5 сеансов облучения в неделю), которая биологически эквивалентна полной дозе D , передаваемой в режиме с фракционной дозой, равной d_{ref} . Значения EQD_2 могут численно суммироваться для отдельных частей режима облучения, осуществляющихся с разными разовыми дозами. Для того, чтобы найти эквивалент на 2 Гр при дозе на Лос 65Гр, Total Dose=56Гр.

$$EQD_2 = 56 \frac{3,25 + 3}{2 + 3} = 64,96 \text{ Гр.}$$

Индекс гомогенности (HI) и индекс конформности (CI) есть инструменты для анализа плана лечения при конформной лучевой терапии, что, несомненно, делает использование необходимым для повышения качества проводимой лучевой терапии.

Расчетная формула для индекса гомогенности:

$$HI = \frac{D_5}{D_{95}}. \quad (8)$$

D_5 – минимальная доза в 5% от целевого объема и D_{95} – минимальная доза в 95% от целевого объема. Идеальное значение равно 1, и оно увеличивается по мере того, как план становится менее однородным.

Расчетная формула для индекса конформности:

$$CI = \frac{V_{95\%}}{V_{PTV}}. \quad (9)$$

Немаловажный параметр оценки плана лучевой терапии время длительности сеанса:

$$T = \frac{\text{Сумма Мониторных Единиц за все фракции}}{\text{Мощность дозы (монит. } \frac{\text{ед}}{\text{мин}})}. \quad (10)$$

Таблица 1 – Сравнение дозовой нагрузки и индексов конформности, гомогенности с применением разных схем фракционирования (последовательный boost, интегрированный boost)

Пациент №	Bladder,Gr		Rectum,Gr		Femur(right),Gr		Femur(left),Gr		CI	HI
	Послед.	Интегрир.	Послед.	Интегрир.	Послед.	Интегрир.	Послед.	Интегрир.		
1	60	50,6	40,89	49,6	50,1	45,1	43,6	43,4	1,15	0,98
2	74,2	76,5	24,7	39,3	45	52,5	44	48,5	1,08	0,95
3	48	43,4	27	46,4	40,2	35	39	44,1	1,08	0,95
4	73,9	77,2	40,3	47,5	48,6	49	47,3	45,9	1,15	0,98
5	65,3	50,2	55,3	50	40,8	41	44,3	40,6	1,08	0,95
6	71,1	65,3	40,6	38	48	49	39,9	41	1,08	0,95
7	60	48	55,5	60	52,3	45,6	36,1	33,9	1,15	0,98
8	64,4	64,3	47	40,5	43,6	40,1	47,8	44,2	1,15	0,98
9	70,1	70	28,3	27	40,8	45	43,3	43,1	1,15	0,98
10	66,5	58,2	54,9	55,8	51,2	45,9	44,9	48,6	1,08	0,95

Таблица 2 – Оценка времени длительности сеанса с применением разных схем фракционирования (последовательный boost, интегрированный boost).

№	T, min									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вся зона	3,8	3,9	3,2	2,66	3,5	3,1	3	3,9	3,8	3,2
Локальная зона	2,3	2,88	2,5	2,09	2,7	2,01	2,4	2	2,6	2,04
Boost	2,5	4,3	0,8	4,3	1,1	0,8	0,9	4,1	1	1,1

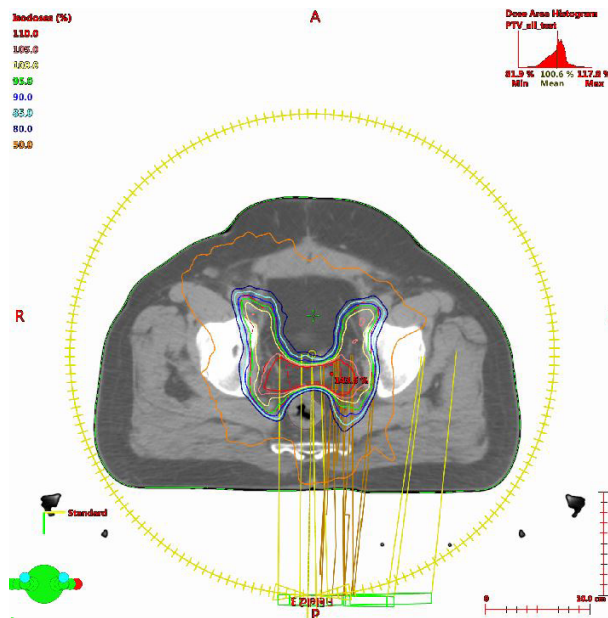


Рисунок 1 – Дозовое распределение с применением интегрированного boost

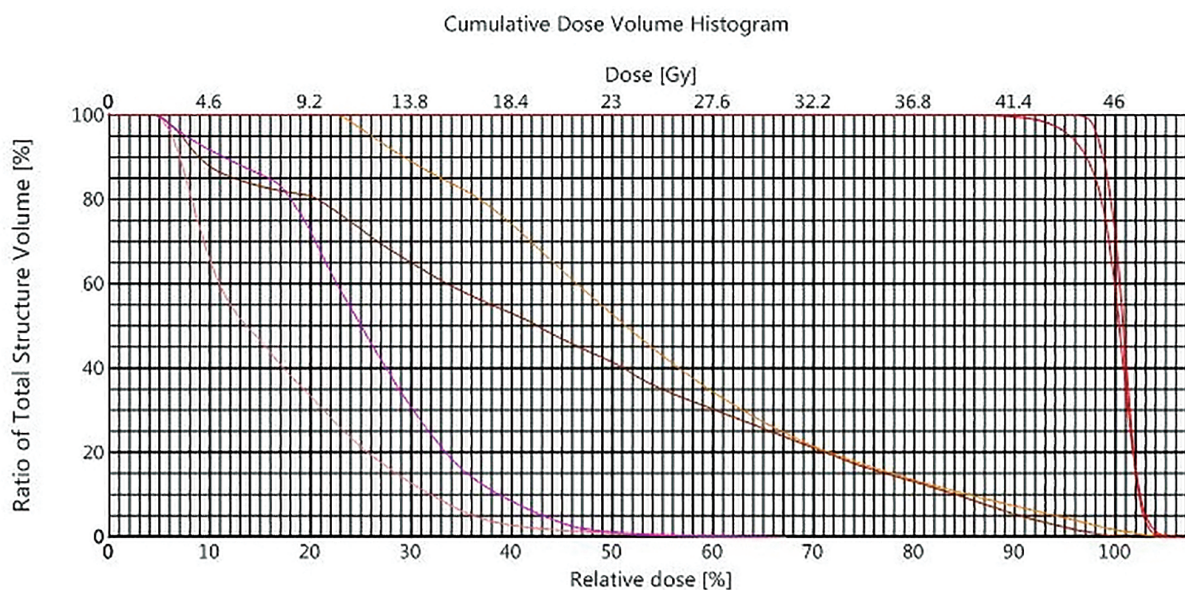


Рисунок 2 – Гистограмма кумулятивного объема дозы

В результате анализа полученных результатов были сделаны следующие заключения. Оптимальной методикой облучения пациентов, страдающих раком предстательной железы, является план лучевой терапии с применением интегрированного boost. Это связано с тем, что, с применением этой схемы фракционирования дозовая нагрузка и время длительности сеанса наименьшие, индекс конформности и гомогенности в пределах допустимости.

Таким образом, в данной работе авторами был произведена оценка и количественный анализ дозиметрических и временных параметров планов лучевой терапии с применением разных схем фракционирования (последовательный boost, интегрированный boost). План лучевой терапии с применением интегрированного boost является оптимальной методикой облучения пациентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kutcher, G.J. and al., «Histogram reduction method for calculation complication probabilities for three-dimensional treatment planning evaluation», Int.J. Radiation oncology.
2. Tejinder, K., Kuldeep, S. Homogeneity Index: An objective tool for assessment of conformal radiation treatments / Tejinder K., Kuldeep S. – 2012.
3. Количественный анализ повреждений здоровых органов и тканей при проведении лучевой терапии злокачественных новообразований (Проект QUANTEC). Обзор толерантности нормальных тканей / Пер. с англ.; под об. ред. проф., д-ра мед. наук С.И. Ткачева и к.т.н. Т.Г. Ратнер. – М.: АМФР, 2016. – 250 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК В ЗОНЕ ХРОНИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

USE OF INNOVATIVE INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ASSESSMENT OF DOSE LOADS IN THE ZONE OF CHRONIC RADIATION IMPACT IN THE GOMEL REGION OF THE REPUBLIC OF BELARUS

В. В. Журавков^{1,2}, О. А. Антонович^{1,2}

V. V. Zhuravkov^{1,2}, O. A. Antonovich^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, БГУ

²Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь
eis@iseu.by, zhvl@mail.ru

¹Belarusian State University, BSU

²International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

В статье предоставлены результаты полученные в рамках выполнения задания «Оценить дозовые нагрузки и эффекты ионизирующих излучений в сочетании со стрессом различной природы на биоту в зоне хронического радиационного воздействия», ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограмма 3 «Радиация и биологические системы» на 2021-2025 год.

The article presents conceptual approaches to retrospective assessment and predictive modeling of radioactive contamination of the territory of the Republic of Belarus as a result of the Chernobyl accident. The work was carried out within the framework of project 3.01 «Investigation of the effect of ionizing radiation in a wide range of doses and with the variability of radiation characteristics at different levels of organization of a living organism», GPNI «Natural resources and the environment» of the subprogram «Radiation and biological systems» for 2021-2025.

Ключевые слова: радиационный мониторинг, загрязнение основных компонентов биогеоценозов, дозовые нагрузки.

Keywords: radiation monitoring, contamination of the main components of biogeocenoses, dose.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-356-359>

Введение. Уровни радиоактивного загрязнения основных компонентов экосистемы Беларуси на разных временных этапах после аварии на ЧАЭС во многом определяют приоритеты в прикладных радиоэкологических исследованиях и приоритетных задачах по защите населения. В данной работе представлены результаты многолетних лабораторных исследований по динамике радионуклидного состава загрязнения приземного воздуха и подстилающей поверхности в результате аварии на ЧАЭС.

В настоящий момент времени, по нашим данным, в зоне наблюдения Гомельской, Витебской и Гродненской областях Республики Беларусь радиационная обстановка обусловлена радионуклидами ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Значительно возрастает миграция ⁹⁰Sr в почве в результате деструкции топливных частиц и, как следствие ⁹⁰Sr мигрирует вглубь почвы.

Кроме того, в Гомельской области происходит накопление америция-241 за счет радиоактивного распада плутония-241. Максимальный уровень загрязнения америцием-241 установится к 2060 году и превысит загрязнение плутония в 2,7 раза, при этом территории с уровнем загрязнения ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰Pu + ²⁴¹Am до 1000 Бк/м², возможно, выйдут за пределы 30-км зоны.