

ЛИТЕРАТУРА

1. IAEA-TECDOC-1652 Small Reactors without On-site Refuelling: Neutronic Characteristics, Emergency Planning and Development Scenarios. – Vienna, IAEA, 2010. – 96 p.
2. Quarterly Progress Report to the Joint Committee on Atomic Energy, April-June 1958, U.S. Atomic Energy Commission.
3. *Сергеев Ю.А.* О малой ядерной энергетике / История атомной энергетике Советского Союза и России в 5 вып. / Под ред. В.А. Сидоренко: - Вып.5, История малой ядерной энергетике, М. ИздАТ, 2004, с. 5–21.
4. Advances in small modular Reactor Technology Developments. – Vienna, IAEA, 2020. – 354 p.
5. *Муратов О.Э.* АЭС малой мощности в Якутии // Атомная стратегия XXI. – 2020. – № 180. – С. 10–12.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ ПО ДЫХАНИЮ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

APPLICATION OF RESPIRATORY GATING SYSTEMS FOR DIAGNOSIS AND TREATMENT OF ONCOLOGICAL DISEASES

**Я. Э. Ермольчик^{1,2}, Т. С. Чикова^{1,2}, Е. В. Емельяненко^{1,2}, М. Н. Петкевич^{1,2}
Y. Yarmolchy^{1,2}, T. Chikova^{1,2}, E. Emelianenko^{1,2}, M. Piatkevich^{1,2}**

¹Белорусский государственный университет, БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

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, cookiebad@outlook.com

¹Belarusian State University, BSU, Minsk, Republic of Belarus

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

Системы синхронизации по дыханию успешно применяются для диагностики и лечения онкологических заболеваний. Их применение увеличивает точность при проведении лучевой терапии, что особенно важно при подведении высоких доз к раковым опухолям, как это происходит при стереотаксической лучевой терапии. Применение систем синхронизации по дыханию совместно с КТ позволяет более точно определить положение опухоли и очертить ее границы, что снижает погрешность при дальнейшем лечении посредством лучевой терапии. Системы синхронизации по дыханию используют при лечении опухолей левой молочной железы, так как их применение снижает дозовую нагрузку на сердце.

Respiratory gating systems are successfully used for the diagnosis and treatment of oncological diseases. Their use increases the accuracy of radiation therapy, which is especially important when delivering high doses to cancerous tumors, as is the case with stereotactic radiation therapy. The use of respiratory gating systems systems in cooperation with CT allows you to more accurately determine the position of the tumor and outline its boundaries, which reduces the error in further treatment with radiation therapy. Respiratory gating systems are used in the treatment of tumors of the left breast, since their use reduces the dose load on the heart.

Ключевые слова: респираторный гейтинг, лучевая терапия, 4D КТ, 4D МРТ, 4D КТ артефакты.

Keywords: respiratory gating, radiation therapy, 4D CT, 4D MRI, 4D CT artifacts.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-223-226>

Системы синхронизации по дыханию позволяют учесть дыхательные движения пациента при проведении диагностических и терапевтических процедур. Их применение целесообразно в тех областях, где от дыхательных движений пациента зависит эффективность проведения процедуры. Для компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии и лучевой терапии целесообразность их применения состоит в том, что дыхательные движения пациента могут оказывать существенное влияние на положение его внутренних органов. Применение систем синхронизации по дыханию позволяет увеличить точность диагностических процедур и наиболее правильно спланировать дальнейшее лучевое лечение пациента, а также сделать сеансы лучевой терапии более безопасными для здоровых органов и тканей, располагающихся вблизи облучаемой области.

Респираторный гейтинг, является одним из наиболее широко применяемых методов при лечении раковых опухолей, положение которых подвержено изменению при дыхательных движениях пациента. К таким опухолям в частности относятся опухоли молочной железы. Наиболее целесообразно применение респираторного гейтинга

при лечении опухолей левой молочной железы, т.к. при облучении данной области часть дозовой нагрузки приходится на сердце. Доза, получаемая сердцем, значительно снижается за счет того, что легочная ткань на высоте фиксированного вдоха отодвигает сердце от зоны высокой дозы. Применение данной методики позволяет снизить дозовую нагрузку не только на сердце, но и в левой передней нисходящей ветви коронарной артерии, уменьшить объем облучаемой ткани [1]. Дыхательные движения пациента могут смещать положение облучаемой области на расстояние до двух сантиметров, в зависимости от облучаемой области. При планировании лучевого лечения с применением метода с задержкой на вдохе это смещение учитывается. При проведении самой процедуры лучевой терапии облучение происходит только в определенном фиксированном при планировании интервале в дыхании пациента.

Респираторный гейтинг совместно с компьютерной томографией применяется для точной компенсации движения опухоли в процессе планирования. В иностранной литературе такая технология носит название 4D CT. На рис. 1 показано как может отличаться положение опухоли брюшной полости в зависимости от фазы дыхания в фронтальной и аксиальной проекциях. На данном обозначен GTV (gross tumor volume), это видимый или общий объем опухоли. Также помимо 4D CT в медицине применяется 4D MRI или 4D MPT (магнитно-резонансная томография). Сейчас 4D MRI является новым направлением. По сравнению с 4DCT, 4D MRI обеспечивает лучшую пространственную визуализацию мишеней лучевой терапии в области живота и таза с улучшенной визуализацией движения мягких тканей. Успешное внедрение 4D MRI требует интеграции оптимизированных протоколов сбора данных, передовых методов реконструкции изображений и достаточных аппаратных возможностей.

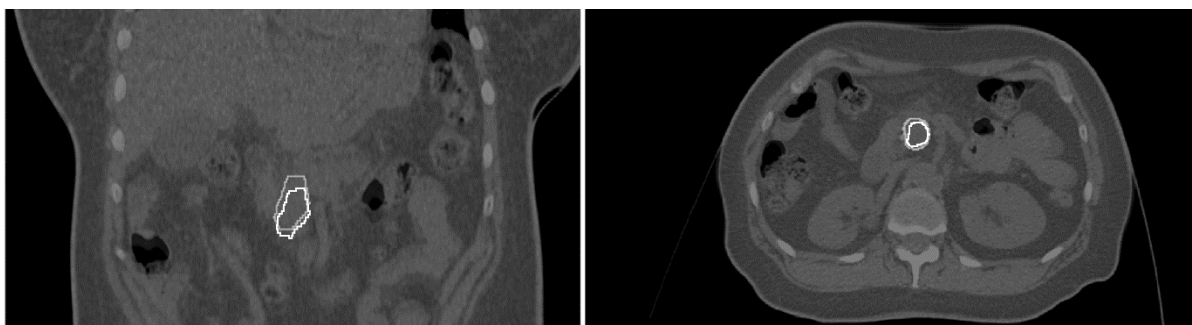


Рисунок 1 – Фронтальный и аксиальный виды дыхательных фаз конца выдоха (серый) и конца вдоха (белый) с соответствующими контурами GTV [2]

Система синхронизации по дыханию, а конкретно система RPM (Real-time Position Management) состоит из инфракрасного источника, блока с двумя маркерами, отражающими инфракрасное излучение, ПЗС-камеры (ПЗС – прибор с зарядовой связью), монитора для позиционирования камеры и консоли, на которой след дыхания визуализируется. Также сейчас актуальна система под названием RGSC (Revolutionary Gating for SCanners). У RGSC принцип работы и основные составляющие те же, однако по сравнению с RPM обновлено аппаратное и программное обеспечение.

Применение систем синхронизации по дыханию совместно с КТ и при проведении сеансов лучевой терапии влечет за собой некоторые дополнительные трудности. Дыхание пациента не всегда бывает равномерным и достаточно глубоким, особенно это актуально в условиях пандемии COVID-19. Перед проведением процедур с применением систем синхронизации по дыханию лечащий врач должен проводить с пациентом инструктаж по поводу того, как правильно дышать во время процедуры. Пациент, в свою очередь, обязуется тренировать свое дыхание, его равномерность и правильное положение грудной клетки при входе. Таким образом мы видим, что проведение процедур с применением респираторного гейтинга накладывает на врача и пациента дополнительные обязанности.

При проведении компьютерной томографии совместно с системой синхронизации по дыханию возможно появления артефактов на полученных изображениях. Природа их появления – это несовпадение периода дыхания пациента с периодом, установленным программно при подготовке к процедуре, а также неравномерное дыхание пациента. Пример такого артефакта можно увидеть на рис. 2.

Стереотаксическая лучевая терапия или Stereotactic body radiation therapy (SBRT), применяется на данный момент как предпочтительный метод лечения рака легких на ранней стадии. При проведении стереотаксической лучевой терапии высокая доза облучения, от 50 до 60 Гр, доставляется к опухоли небольшим количеством фракций, порядка 4, 5. Окружающие здоровые ткани меньше подвергаются воздействию радиации за счет использования узких полей и резких градиентов дозы. Использование узких полей возможно за счет сочетания хорошей фиксации пациента, ежедневного визуального контроля мягких тканей и учетом дыхательных движений пациента. Стереотаксическая лучевая терапия может применяться и только в сочетании с хорошей фиксацией пациента и ежедневным визуальным контролем, без управления дыхательными движениями пациента. Однако респираторно индуцированное движение опухоли является ограничивающим фактором при доставке высокой дозы к опухолям в грудном и брюшном отделе.

Применение респираторного гейтинга совместно со стереотаксической лучевой терапией является предпочтительным вариантом по ряду причин. Одной из таких причин является максимальное разделение между общим объемом опухоли (GTV) и близлежащими критическими структурами. На рисунке 3 приведены результаты стереотаксической лучевой терапии. GTV опухоли первой недели обрисован белым контуром. По данным снимкам можно сказать, что имеет место значительный регресс объема опухоли.

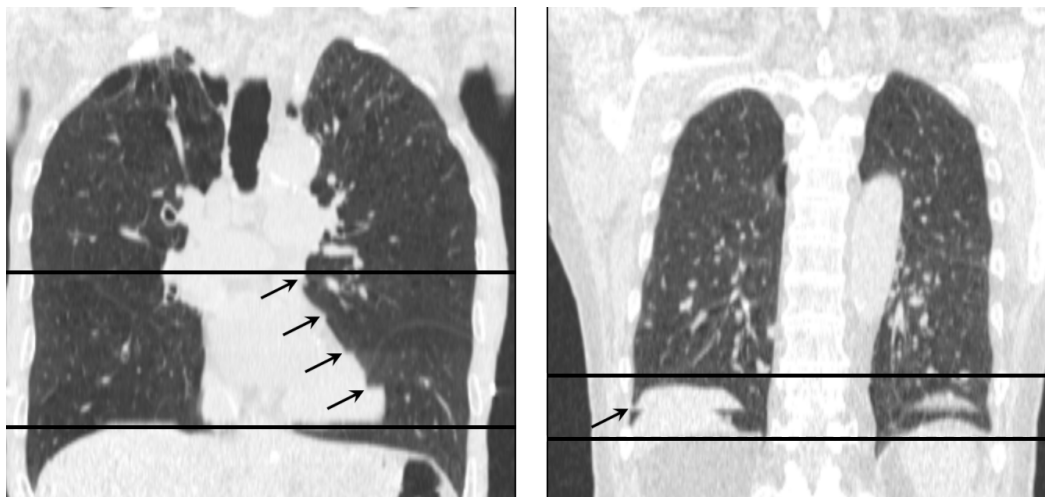


Рисунок 2 – Артефакты изображений полученные при проведении процедуры КТ совместно с системой синхронизации по дыханию [3]

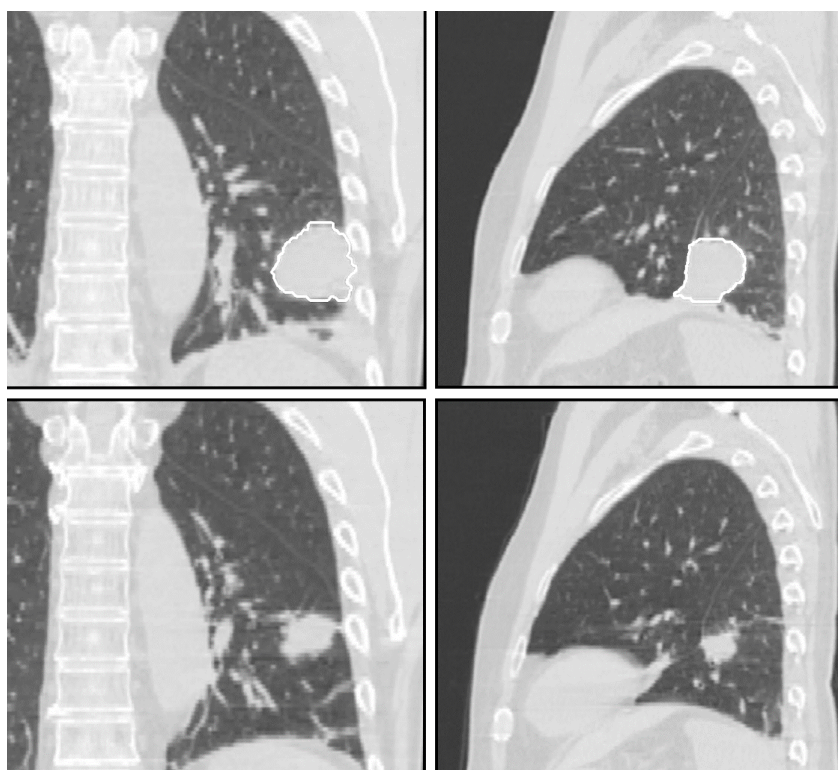


Рисунок 3 – КТ-изображения с задержкой дыхания на первой (верхние изображения) и последней (нижние изображения) неделе [4]

Как видно из рисунка 3, стереотаксическая лучевая терапия весьма эффективный метод лечения. Применение ее совместно с технологией респираторного гейтинга увеличивает ее точность, что приводит к более эффективному лечению и к меньшему повреждению окружающих здоровых тканей.

Метод задержки дыхания на глубоком вдохе или Deep Inspiration Breath Hold (DIBH) стала стандартным методом фотонной лучевой терапии для лечения рака левой молочной железы. Преимущество лучевой терапии совместно с DIBH для лечения данного типа рака в последние годы было многократно подтверждено различными исследованиями, описывающими снижение риска осложнений за счет более низких полученных сердцем и легкими. Метод задержки дыхания на глубоком вдохе включает вдох и задержку дыхания пациента во время проведения компьютерной томографии для получения как геометрического разделения между сердцем и стенкой грудной клетки, так и увеличения объема легких во время сканирования. Планирование продолжается на изображении на задержке дыхания, чтобы получить приемлемое дозиметрическое покрытие опухоли при минимальном воздействии на окружающие здоровые ткани.

Дальнейшее лечение, совместно с методом задержки дыхания на глубоком вдохе, выполняется путем обучения пациента выполнять задержку дыхания, аналогичную той, что он выполнял ранее при симуляции

компьютерной томографии, во время каждого сеанса лечения. Точность и стабильность задержки дыхания во время лечения определяет степень соответствия дозиметрического охвата теоретическому запланированному охвату в системе планирования лечения.

При проведении сеансов лучевой терапии совместно с методом задержки дыхания на глубоком вдохе, возникают следующие проблемы, обусловленные уровнем подготовки пациента к процедуре. Пациентам бывает трудно задерживать дыхание на комфортные для проведения процедуры интервалы времени. Также могут возникнуть трудности с попаданием в нужный интервал по амплитуде вдоха и удерживании грудной клетки в нужном положении. Часто возникновение данных проблем связывают с недостаточной подготовкой пациента к процедуре. Чтобы процесс лечения проходил быстро и комфортно для пациента, ему необходимо тренировать дыхание заранее. Как показывает практика, ближе к последним сеансам лучевой терапии, пациенты справляются лучше, что доказывает, что тренировки дыхания и опыт, который пациент получил на предыдущих сеансах лучевой терапии с применением данного метода, дают эффект.

Показателем успешности лучевой терапии, является не только достижение ответа опухоли на лечение, но и сохранение окружающих опухоль здоровых органов и тканей. Современные технологии, такие как система синхронизации по дыханию, в применении совместно с лучевой терапией, уменьшают вероятность появления постлучевых осложнений. Применение системы синхронизации по дыханию позволяет избежать тяжелых радиационно-индуцированных осложнений сердца. Из информации, представленной выше, можно сделать вывод, что использование систем синхронизации по дыханию благотворно влияет на точность диагностических процедур при подготовке к лучевой терапии, и на эффективность самой лучевой терапии, а также уменьшает риск развития постлучевых осложнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лучевая терапия больных раком левой молочной железы I-IIА стадий после органосохраняющих операций / И. А. Гладилина [и др.] // Злокачественный опухоль – 2017. – № 4. – С. 5–12.
2. Investigating the use of virtual 4DCT from 4DMRI in gated carbon ion radiation therapy of abdominal tumors / G. Meschini [et al.] // Z Med Phys – 2022. – Vol. 32. – P. 98–108.
3. 4D CT image artifacts affect local control in SBRT of lung and liver metastases / T. Sentkern [et al.] // Radiotherapy and Oncology – 2020. – Vol. 148. – P. 229–234.
4. Anatomic and pathologic variability during radiotherapy for a hybrid active breath-hold gating technique / C. Glide-Hurst [et al.] // Radiation Oncology Biol. Phys – 2010. – Vol. 77. – No. 3. – P. 910–917.

ДОЗИМЕТРИЧЕСКАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПЛАНОВ ОБЛУЧЕНИЯ В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ С МОДУЛЯЦИЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ DOSIMETRIC VERIFICATION OF TREATMENT PLANS IN INTENSITY-MODULATED RADIATION THERAPY

А. И. Бринкевич¹, Т. С. Чикова^{2,3}, М. Н. Петкевич^{1,2,3}

A. Brynkevich¹, T. Chikova^{2,3}, M. Piatkevich^{1,2,3}

¹Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии
им. Н. Н. Александрова, а-г Лесной, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, БГУ

³Учреждение образования «Международный государственный экологический институт
имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь
chikova.tamara@iseu.by

¹N. N. Alexandrov national cancer centre of Belarus, Lesnoy, Republic of Belarus

²Belarusian State University, BSU

³International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU,
Minsk, Republic of Belarus
annabrijerry@gmail.com

Описан типовой процесс верификации планов облучения в лучевой терапии с модуляцией интенсивности. Рассмотрен наиболее простой способ сравнения дозовых распределений – наложение контуров дозовых распределений друг на друга, приведены его преимущества и недостатки. Описаны основные применяемые в клинической практике геометрии измерений для дозиметрической верификации планов облучения. Дано определение термину «гамма-анализ», а также критериям гамма-анализа – разности доз, критерию расстояния, степени прохождения сравнения по гамма-индексу. Приведены значения критериев гамма-анализа, использующиеся в отечественных клиниках и за рубежом.