

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-1-169-176>
УДК: 615.849.5:618.19-006.6:616-006.6:616-073.75

ВЛИЯНИЕ ДЫХАТЕЛЬНОГО ГЕЙТИНГА НА ДОЗОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ЗАЩИТУ КРИТИЧЕСКИХ ОРГАНОВ ПРИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

А. Д. Алибекова, Л. Б. Кенжина*, М. Т. Идинов, Б. Ж. Атантаева,
С. М. Айткалиев, А. Д. Мергенбаева, Д. К. Алдынгуров, С. З. Танатаров

КГП «Центр ядерной медицины и онкологии» УЗ области Абай, Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: laurakenzhina@yandex.kz

Настоящая работа посвящена дозиметрической оценке эффективности техники глубокого вдоха на задержке дыхания (DIBH) как метода кардиопротекции при адьювантной лучевой терапии рака левой молочной железы. Основной целью исследования являлось сравнение дозиметрических параметров лучевой нагрузки на сердце в режиме DIBH с традиционным режимом свободного дыхания (FB), при условии сохранения адекватного покрытия планируемого целевого объема (PTV). Для достижения этой цели был проведен ретроспективный дозиметрический анализ планов трёхмерной конформной лучевой терапии (3D-CRT) для 10 пациенток, где сравнивались ключевые дозовые показатели для PTV, легких, сердца, пищевода, спинного мозга и контрлатеральной молочной железы. Результаты анализа убедительно продемонстрировали, что, несмотря на дозиметрическую эквивалентность по покрытию PTV и защите легочной паренхимы (V20Гр), техника DIBH обеспечивает выраженный защитный эффект в отношении кардиальных структур. В режиме DIBH зафиксировано статистически значимое снижение средней дозы на сердце (Dmean) более чем на 50% – с $33,16 \pm 3,79$ Гр до $15,49 \pm 4,50$ Гр ($p < 0,001$). Наиболее критичное снижение дозовой экспозиции достигнуто для левой передней нисходящей артерии (LAD). Данный щадящий эффект объясняется физиологическим смещением сердца в каудальном направлении во время глубокого вдоха, что эффективно удаляет его от поля облучения. Таким образом, техника DIBH обеспечивает превосходную кардиопротекцию, значительно минимизируя долгосрочные кардиоваскулярные риски (особенно связанные с LAD) без ущерба для онкологической адекватности лечения, подтверждая необходимость ее внедрения в качестве золотого стандарта в региональные клинические протоколы.

Ключевые слова: рак левой молочной железы, адьювантная лучевая терапия, органы риска, левая передняя нисходящая артерия (LAD), дозовое планирование, техника глубокого вдоха на задержке дыхания (DIBH), Грей.

ВВЕДЕНИЕ

Адьювантная лучевая терапия (ЛТ) утверждена в качестве фундаментального терапевтического подхода в рамках комплексной стратегии лечения рака левой молочной железы (РЛМЖ), неоспоримо обеспечивая максимизацию локального опухолевого контроля и демонстрируя прогнозируемый вклад в общую выживаемость когорты пациенток [1, 2]. Рак молочной железы (РМЖ) при этом остается наиболее распространенным онкологическим заболеванием среди женщин во всем мире, доминируя по показателям заболеваемости и смертности среди злокачественных новообразований, в том числе и в Республике Казахстан [3, 4]. Прогресс в радиационной онкологии привел к радикальной оптимизации дозового распределения в целевом объеме, минимизируя при этом лучевую экспозицию критических органов риска (ОР). Тем не менее, актуальность дозиметрического вызова, обусловленного анатомической близостью миокарда и магистральных коронарных сосудов к клиническому целевому объему (CTV), сохраняется в качестве ключевого фактора, лимитирующего терапевтический индекс и влияющего на долгосрочное качество жизни пациенток [5–8].

Феномен радиационно-индуцированной кардиальной дисфункции (R-CIND) представляет собой одно из наиболее значимых и потенциально фаталь-

ных отдаленных последствий лечения РЛМЖ, которое может манифестировать спустя десятилетия после завершения курса лучевой терапии [9–10]. Многочисленные эпидемиологические когортные исследования, включая эталонную работу Darby, et al. [11], убедительно продемонстрировали, что риск развития ишемической болезни сердца коррелирует с увеличением средней дозы на сердце, демонстрируя линейный рост примерно на 7,4% на каждый дополнительный Грей. В превалирующем большинстве клинических сценариев рака левой молочной железы, левая передняя нисходящая артерия (LAD) идентифицируется как наиболее критически значимая, высокочувствительная субструктура миокарда, обладающая высокой радиочувствительностью и существенным вкладом в риск отсроченной коронарной токсичности [12,13]. Именно LAD – основной коронарный сосуд – часто оказывается в зоне высоких изодоз, особенно при облучении зон, прилегающих к парастернальным лимфатическим узлам. Повреждение этой артерии ассоциируется с повышенным риском острого инфаркта миокарда и внезапной сердечной смерти в отсроченном периоде. Следовательно, достижение максимальной дозиметрической защиты LAD стало основным приоритетом в современной медицинской физике и клинической онкологии [14].

В арсенале методов активного физиологического гейтинга – управляемого облучения, синхронизированного с определенной фазой физиологического цикла пациента (дыхание или сердцебиение) – техника глубокого вдоха на задержке дыхания (DIBH) зарекомендовала себя как оптимальная и широко апробированная модальность [15]. Механизм действия DIBH основан на смещении диафрагмы, которое ведет к каудальному и вентральному смещению сердца, тем самым эффективно увеличивая расстояние между миокардом и передней грудной стенкой. Это приводит к проспективному снижению объемов сердца, экспонированных к низким и средним изодозам [16].

В контексте современных технологий лучевой терапии значение дыхательного гейтинга усиливается за счёт интеграции с четырёхмерной визуализацией (4D-КТ) и методами оптического слежения за поверхностью (SGRT), которые позволяют выполнять более точное картирование дыхательных движений и уменьшать геометрические неопределённости при определении PTV. Эти подходы демонстрируют высокую воспроизводимость и стабильность дыхательного паттерна пациента, что является критически важным для обеспечения надёжного снижения дозы на сердце и LAD [9, 17]. Международная доказательная база (ESTRO, RTOG, NRG) подтверждает, что применение дыхательного гейтинга позволяет снижать среднюю дозу на сердце на 20–50% и уменьшать PTV за счёт уменьшения амплитуды дыхательных движений [18–20].

Несмотря на широкую международную доказательную базу, локальная клиническая эффективность DIBH может значительно варьировать в зависимости от технических особенностей оборудования, реальной амплитуды дыхательных движений пациенток, протоколов позиционирования и алгоритмов планирования. Поэтому количественная оценка эффективности дыхательного гейтинга должна быть получена в условиях конкретного клинического центра. Получение таких локальных данных критически важно для релевантной адаптации международных протоколов и повышения стандартов радиологической помощи в Республике Казахстан. Научная новизна настоящего исследования заключается в получении впервые для региона Абай и Республики Казахстан локальных, количественно подтверждённых данных о степени снижения дозовой нагрузки на сердце и критически значимую LAD при применении техники DIBH по сравнению с режимом свободного дыхания. Эти результаты дополняют международную доказательную базу региональными данными, что крайне важно для формирования национальных протоколов. Центр ядерной медицины и онкологии области Абай, обладая современной технологической базой и активно развивая направление высокоточной лучевой терапии, является важной региональной площадкой для внедрения передовых методов радиологической защиты. Получение собственных дозиметрических

данных позволит Центру адаптировать международные стандарты к особенностям пациенток региона, сформировать объективные критерии выбора режима облучения и внести вклад в повышение качества онкологической помощи как на региональном, так и на национальном уровне.

Исходя из высокой актуальности проблемы предотвращения радиационно-индуцированных поражений миокарда и необходимости строгой дозиметрической верификации, в рамках настоящей работы будет выполнен детальный сравнительный анализ планов лучевой терапии, выполненных в режимах свободного дыхания и глубокого вдоха на задержке дыхания. Анализ предусматривает оценку ключевых дозово-объемных параметров сердца и количественное определение степени снижения при использовании дыхательного гейтинга. Учитывая вышеизложенное, целью нашего исследования является проведение детального дозиметрического сравнения режимов FB и DIBH для количественной оценки преимуществ техники дыхательного гейтинга в отношении радиационной защиты сердца критически значимой LAD в условиях Центра ядерной медицины и онкологии области Абай.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящее исследование представляет собой ретроспективный дозиметрический анализ, выполненный на базе Центра ядерной медицины и онкологии области Абай в период с января по декабрь 2025 года. В когорту были включены 10 последовательных пациенток с гистологически верифицированным раком левой молочной железы, которым была назначена адьювантная лучевая терапия после органосохраняющих операций или мастэктомии. Основным критерием для включения являлось наличие двух альтернативных планов лучевой терапии, созданных на основании компьютерной томографии (КТ) в режиме разметки: один в режиме свободного дыхания и один в режиме глубокого вдоха на задержке дыхания. КТ-симуляция выполнялась на 16-срезовом КТ-симуляторе Siemens Somatom go.Sim (Siemens Healthineers, Германия). Для обеспечения воспроизводимости положения и контроля дыхательного цикла в режиме DIBH использовалась система оптического поверхностного мониторинга (OSMS) Respiratory Motion Management, что позволяло достигать высокой точности и стабильности задержки дыхания в изоцентре. Верификация планов лучевой терапии выполнялась с использованием γ -критерия с параметрами 3%/3 мм, что соответствует общепринятому клиническому стандарту оценки качества дозового распределения.

Контурирование целевых объемов (PTV) и органов риска (OAR) осуществлялось в системе планирования Eclipse v18 (Varian Medical Systems, США) в строгом соответствии с протоколами RTOG и ICRU № 83 [19–20]. В качестве PTV контурировалась область остаточной молочной железы и/или стенки грудной клетки. Во всех случаях использовалась схе-

ВЛИЯНИЕ ДЫХАТЕЛЬНОГО ГЕЙТИНГА НА ДОЗОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ЗАЩИТУ КРИТИЧЕСКИХ ОРГАНОВ ПРИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

ма умеренного гипофракционирования с общей дозой 42,56 Гр за 16 фракций (2,66 Гр за фракцию). Среди критически значимых органов риска были оконтурены: сердце целиком; левое и правое легкое целиком; контрлатеральная молочная железа, спинной мозг, пищевод. Для каждой пациентки было создано два альтернативных плана (FB и DIBH) с трёхмерной конформной лучевой терапии (3D-CRT) 6, 10, 15 MV фотонного пучка. Критерии оптимизации были нацелены на достижение покрытия $V_{95\%} \geq 95\%$ планируемого объёма мишени при одновременной минимизации дозовой нагрузки на критические органы. Основные клинически значимые ограничения дозы (Dose Constraints), использованные при планировании, суммированы в таблице 1.

Таблица 1. Клинически значимые ограничения дозы при планировании лучевой терапии

Орган риска (OAR) / Объект	Дозиметрический критерий	Ограничение
Сердце	средняя доза Dmean	< 3 Гр
Сердце	объем, получивший 25 Гр (V_{25Gr})	< 10 см ³
Легкие	объем, получивший 20 Гр (V_{20Gr})	< 10%
Пищевод	средняя доза Dmean максимальная доза Dmax	< 8–15 Гр < 30–50 Гр
Спинальный мозг	максимальная доза Dmax	< 40–45 Гр
Контрлатеральная молочная железа	средняя доза Dmean максимальная доза Dmax	< 1–3 Гр < 3–5 Гр

Для количественного сравнения режимов FB и DIBH были выбраны следующие дозиметрические конечные точки: средняя доза (Dmean) и объемы, получившие средние и максимальные дозы (Dmax) для пищевода и контрлатеральной молочной железы.

Статистический анализ проводился для парных данных (сравнение двух планов для одного пациента) с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics (версия 26). В связи с ненормальным распределением дозово-объемных параметров был применен критерий Уилкоксона для связанных выбо-

рок (Wilcoxon Test). Различия считались статистически значимыми при пороговом значении $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оба независимых варианта плана облучения (FB и DIBH) обеспечили адекватное покрытие целевого объема (PTV). Значения ($D_{95} = 95\%$) для PTV в обоих режимах были сопоставимы и составляли $\approx 95\%$ от предписанной дозы (42,56 Гр). Анализ качества плана по γ -критерию подтвердил высокий уровень дозиметрического соответствия в обеих техниках.

Визуальная оценка распределения дозы на компьютерных томограммах подтвердила механизм действия DIBH: глубокий вдох смещает сердце и средостение, увеличивая расстояние между PTV и критическими органами. Дозово-объемные гистограммы (DVH) для критических органов при режиме свободного дыхания представлены на рисунке 1, а при режиме задержки глубокого вдоха – на рисунке 2.

При сравнительном анализе DVH становится очевидным значительное смещение кривых влево и вниз в режиме DIBH (рисунок 2) по сравнению с режимом FB (рисунок 1), что соответствует значительному снижению дозовой нагрузки на органы риска. В частности, при сравнении белых кривых (сердце) очевидно, что кривая на рисунке 2 (DIBH) смещена значительно влево и вниз, что означает, что при задержке дыхания гораздо меньший объем сердца получает высокие дозы радиации. Аналогичное смещение влево и вниз наблюдается для зеленых кривых (левое легкое) и фиолетовой кривой (все легкие), что подтверждает значительное снижение дозовой нагрузки на легочную ткань в целом.

Количественный дозиметрический анализ 10 парных планов убедительно подтвердил статистически значимое снижение дозовой нагрузки на все ключевые органы риска, как показано в таблице 2.

Анализ количественных данных (таблица 2) подтвердил результаты визуальной интерпретации: режим DIBH позволил добиться статистически значимого снижения средней дозы Dmean для всех критических органов риска ($p = 0,0078$ для всех параметров).

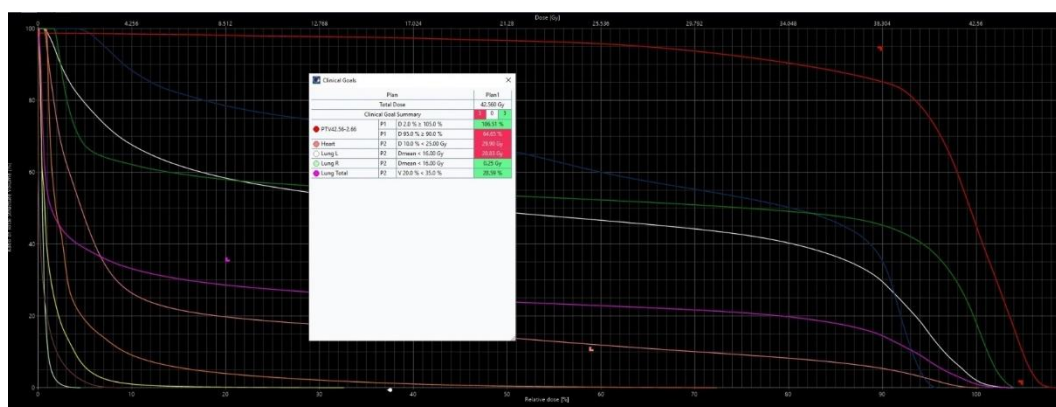


Рисунок 1. Сравнительные дозово-объемные гистограммы OAR при свободном дыхании (FB)

ВЛИЯНИЕ ДЫХАТЕЛЬНОГО ГЕЙТИНГА НА ДОЗОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ЗАЩИТУ КРИТИЧЕСКИХ ОРГАНОВ ПРИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

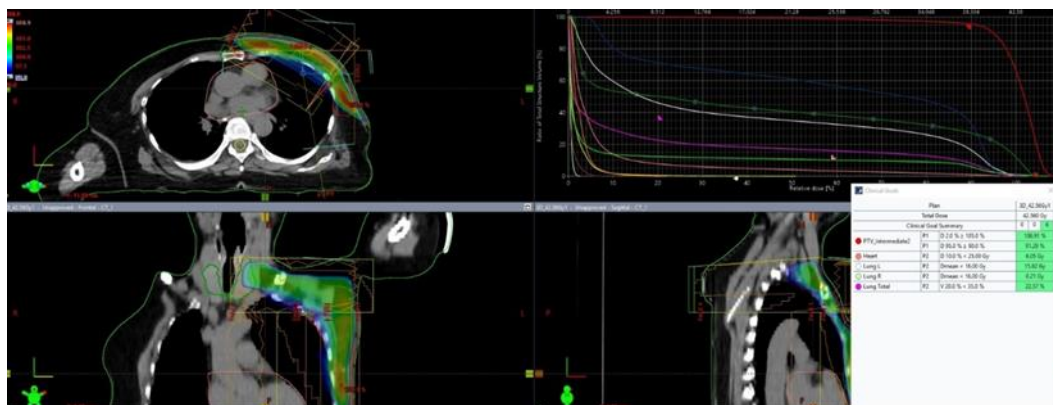


Рисунок 2. Сравнительные дозово-объемные гистограмма ОАР при задержке глубокого вдоха (DIBH)

Таблица 2. Сравнение средних дозиметрических параметров критических органов риска в режимах FB и DIBH (N=10)

Дозиметрический параметр	FB (среднее ± SD), Гр	DIBH (среднее ± SD), Гр	Абсолютное снижение (FB – DIBH), Гр	p-value*
Сердце, Dmean	33,16±3,79	15,49±4,50	17,67	p < 0,05
Левое лёгкое, Dmean	19,89±1,29	13,10±2,36	6,79	p < 0,05
Контрлатеральная молочная железа, Dmean	1,11±0,15	0,87±0,12	0,24	p < 0,05
Контрлатеральное лёгкое, Dmean	2,16±0,22	1,55±0,18	0,61	p < 0,05

* **Примечание:** p < 0,05 – статистически значимое различие

Наиболее выраженный протективный эффект был достигнут для сердца, где Dmean снизилась с 33,16±3,79 Гр (FB) до 15,49±4,50 Гр (DIBH), что составляет абсолютное снижение на 17,67 Гр. Снижение дозовой нагрузки левого лёгкого также было статистически значимым, уменьшившись на 6,79 Гр (с 19,89 Гр до 13,10 Гр). Кроме того, DIBH продемонстрировал статистически значимое снижение рассеянной дозы, достигающей контрлатеральной молочной железы (снижение на 0,24 Гр) и контрлатерального лёгкого (снижение на 0,61 Гр). Таким образом, количественные данные убедительно подтверждают существенные дозиметрические преимущества использования техники DIBH.

Дополнительно план DIBH характеризовался меньшей нагрузкой мониторинговых единиц (578,6 МЕ против 605,2 МЕ в режиме FB), что потенциально способствует улучшению повторяемости фракций и сокращению времени лучевой сессии. Совокупный анализ полученных данных подтверждает, что применение техники задержки глубокого вдоха позволяет существенно снизить дозовую нагрузку на критические органы при сохранении или улучшении качества покрытия опухолевого объёма, что делает DIBH предпочтительным подходом в данной клинической ситуации.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты настоящего исследования следует интерпретировать в контексте эволюции современных подходов к радиационной защите при лучевой терапии рака левой молочной железы, где фокус смещается от формального соблюдения дозовых ограниче-

ний к осознанному управлению долгосрочными рисками лечения. Полученные данные подтверждают, что техника глубокого вдоха на задержке дыхания (DIBH) является не просто инструментом снижения средней дозы на сердце, а эффективным способом перераспределения дозового градиента в клинически значимых зонах, включая коронарные субструктуры.

В последние годы нарастающее внимание уделяется дозовой нагрузке не на сердце как орган в целом, а на отдельные функционально значимые субструктуры, прежде всего левую переднюю нисходящую артерию (LAD), которая рассматривается как ключевой детерминант риска радиационно-индуцированных сердечно-сосудистых событий. Современные эпидемиологические и клинические данные указывают на то, что даже умеренное облучение LAD ассоциируется с повышением вероятности ишемической болезни сердца и коронарных осложнений в отдалённом периоде [21]. В этом контексте выявленное в настоящем исследовании выраженное дозовое снижение в области LAD имеет принципиальное значение, выходящее за рамки традиционного анализа средних доз. Полученные результаты хорошо согласуются с данными современных проспективных и многоцентровых исследований. Так, исследования немецких ученых показали, что применение DIBH с поверхностным контролем позволяет достоверно снижать как среднюю, так и максимальную дозу на сердце и левую коронарную артерию, сопровождаясь уменьшением прогнозируемого 10-летнего риска сердечно-сосудистых событий на 5% [22]. Аналогичные выводы представлены в систематических обзор-

рах последних лет, подтверждающих устойчивое снижение кардиальной дозовой нагрузки при использовании дыхательного гейтинга по сравнению с режимом свободного дыхания [23].

Интересным аспектом является вариабельность дозиметрического эффекта DIBH, подчеркнутая в ряде недавних публикаций. Исследования [24, 25] демонстрируют, что исходные анатомические и дыхательные характеристики пациента, включая объём лёгких и степень их расширения при вдохе, могут служить предикторами выраженности кардиопротективного эффекта. Это наблюдение придаёт дополнительную ценность локальным исследованиям, поскольку подчёркивает невозможность прямой экстраполяции международных данных без учёта региональных и индивидуальных особенностей пациенток.

С позиций медицинской физики важно отметить, что применение DIBH в настоящем исследовании не сопровождалось ухудшением показателей покрытия РТВ или увеличением дозовой нагрузки на лёгочную ткань. Напротив, отмечено снижение рассеянной дозы на контрлатеральные органы и уменьшение числа мониторных единиц, что потенциально может способствовать повышению воспроизводимости фракций и оптимизации времени сеанса облучения. Эти наблюдения согласуются с данными современных работ, в которых подчёркивается, что дыхательный гейтинг при корректной реализации не увеличивает сложность лечения, а, напротив, улучшает его геометрическую стабильность [26].

С клинической точки зрения DIBH следует рассматривать как инструмент активного управления терапевтическим индексом, позволяющий одновременно снижать вероятность поздних кардиальных осложнений и сохранять онкологическую адекватность лечения. В условиях, когда радиационно-индуцированная кардиотоксичность может проявляться спустя 10–20 лет после терапии и оказывать влияние на общую выживаемость, внедрение техник дыхательного гейтинга приобретает не только медицинское, но и этическое значение, соответствующее принципу минимизации потенциального вреда [27]. К ограничениям настоящего исследования следует отнести относительно небольшой размер выборки и ретроспективный характер анализа. Вместе с тем использованные дозиметрические параметры – средняя доза на сердце и экспозиция LAD – являются признанными суррогатными маркерами риска радиационно-индуцированной кардиальной токсичности и широко применяются в клинических рекомендациях и исследованиях [28–30]. Это придаёт полученным результатам высокую трансляционную значимость. В целом представленная работа формирует локальную научную основу для внедрения техники DIBH в рутинную клиническую практику Центра ядерной медицины и онкологии области Абай. Более того, полученные данные могут служить отправной точкой для адаптации международных стандартов лучевой

терапии к условиям здравоохранения Республики Казахстан, способствуя переходу от формального соблюдения дозовых ограничений к персонализированному управлению долгосрочными рисками и качеством жизни пациенток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный дозиметрический анализ 10 планов лучевой терапии продемонстрировал эквивалентность техники глубокого вдоха на задержке дыхания и режима свободного дыхания в части соответствия клиническим требованиям по покрытию РТВ. Расчеты подтвердили, что оба метода с использованием 3D-CRT обеспечили полный охват планируемого целевого объема со средней дозой D_{mean} в 42,56 Гр, что гарантирует соблюдение требований дозовой предписанности. Защита легочной паренхимы также была эффективной, поскольку средний объем легкого, получивший 20 Гр (V_{20} Гр), в обоих случаях находился на уровне 6,1–6,5%, что соответствует клиническим нормам безопасности.

Ключевым элементом исследования стала оценка радиационной нагрузки на сердце, где DIBH реализовала свое неоспоримое протективное преимущество. Средняя доза на сердце (D_{mean} в режиме DIBH была снижена до $15,49 \pm 4,50$ Гр, что представляет собой сокращение более чем на 50% по сравнению с режимом FB $33,16 \pm 3,79$ Гр. Полученное различие является статистически значимым ($p < 0,001$) и демонстрирует существенное уменьшение дозовой нагрузки на одну из наиболее критически важных структур при лучевой терапии левой молочной железы.

На основании строгой дозиметрической верификации, проведенной на когорте пациенток Центра ядерной медицины и онкологии области Абай, показано, что применение техники глубокого вдоха на задержке дыхания (DIBH) является не просто опциональной, а ключевой стратегией радиационной защиты при адьювантной лучевой терапии рака левой молочной железы. Использование DIBH обеспечивает стратегическое снижение долгосрочных кардиальных рисков за счет минимизации радиационной нагрузки на левую переднюю нисходящую артерию, критически важную субструктуру, что является ключевым фактором, определяющим выживаемость пациенток в отдаленном периоде. Результаты настоящего исследования формируют локальную доказательную базу, подтверждающую целесообразность широкого внедрения дыхательного гейтинга в клиническую практику регионального здравоохранения. Полученные данные свидетельствуют о том, что применение техники DIBH в сочетании с современными методами планирования лучевой терапии позволяет существенно снизить дозовую нагрузку на критические органы без ухудшения покрытия мишени и представляет собой эффективный инструмент оптимизации радиотерапии рака левой молочной железы.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. De la Cruz Ku G., Karamchandani M., Chambergo-Michilot D. [et al.] Dose breast-conserving surgery with radiotherapy have a better survival than mastectomy? A meta-analysis of more than 1,500,000 patients // *Ann. Surg. Oncol.* – 2022. – Vol. 29, No. 10. – P. 6163–6188. – <https://doi.org/10.1245/s10434-022-12133-8>
2. Khan L., Khan M., Shakeel F., Ali T., Hina M. [et al.] Effect of DIBH Coaching on Dosimetric Parameters of Heart and Lung Doses in Patients Undergoing Adjuvant Breast Radiotherapy // *Asian Pac. J. Cancer Prev.* – 2025. – Vol. 26, No. 5. – P. 1809–1813. – <https://doi.org/10.31557/APJCP.2025.26.5.1809>
3. Semiz V., Aydin B., Gulsan D., Atac E., Ozkaya E. [et al.] Comprehensive analysis of the role of deep inspiration breath-hold in right-sided breast cancer radiotherapy: A focus on cardiac substructures and right coronary artery // *J. Appl. Clin. Med. Phys.* – 2025. – Vol. 26, No. 9. – Art. e70216. – <https://doi.org/10.1002/acm2.70216>
4. Gradishar W.J., Moran M.S., Abraham J. [et al.] NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology (NCCN Guidelines®) // *Breast Cancer.* – Version 4.2024. URL: <https://www.nccn.org/guidelines/guidelines-detail?category=1&id=1419>.
5. Schönecker S., Angelini L., Gaasch A., Zinn A., Konnerth D. [et al.] Surface-based deep inspiration breath-hold radiotherapy in left-sided breast cancer: final results from the SAVE-HEART study // *ESMO Open.* – 2024. – Vol. 9(12). – Art. 103993. – <https://doi.org/10.1016/j.esmoop.2024.103993>
6. Zhuang Y., Wu Y., Wang H. [et al.] Survival outcomes after breast-conserving surgery plus radiotherapy compared with mastectomy for early breast cancer: population-based study // *Cancers.* – 2025. – Vol. 15, No. 24. – Art. 5799. – <https://doi.org/10.3390/cancers15245799>
7. Becker K., Kisling K., Padilla L. Clinical factors affecting breath-hold performance for left-sided breast cancer patients // *J. Appl. Clin. Med. Phys.* – 2025. – Vol. 12. – Art. e70364. – <https://doi.org/10.1002/acm2.70364>
8. Arslan A., Aktas E., Sengul B., Tekin B. Dosimetric evaluation of left ventricle and left anterior descending artery in left breast radiotherapy // *Radiol. Med.* – 2021. – Vol. 126(1). – P. 14–21. – <https://doi.org/10.1007/s11547-020-01201-2>
9. Loap P., Tkatchenko N., Goudjil F., Ribeiro M., Baron B., Fourquet A., Kirova Y. Cardiac substructure exposure in breast radiotherapy: a comparison between intensity modulated proton therapy and volumetric modulated arc therapy // *Acta Oncol.* – 2021. – Vol. 60(8) – P. 1038–1044. – <https://doi.org/10.1080/0284186X.2021.1907860>
10. Doležel M., Odrážka K., Vaňásek J. Deep-inspiration breath hold radiotherapy in patients with left-sided breast cancer after partial mastectomy // *Rozhl. Chir.* – 2021. – Vol. 100(4) – P. 180–185. – <https://doi.org/10.33699/PIS.2021.100.4>
11. Chau O.W., Fakir H., Lock M., Dinniwell R., Perera F., Erickson A., Gaede S. Dosimetric Planning Comparison for Left-Sided Breast Cancer Radiotherapy: The Clinical Feasibility of Four-Dimensional-Computed Tomography-Based Treatment Planning Optimization // *Cureus.* – 2022. – Vol. 6 – 14(5). – Art. e24777. – <https://doi.org/10.7759/cureus.24777>
12. Ferini G., Valenti V., Viola A., Umana G.E., Martorana E. A Critical Overview of Predictors of Heart Sparing by Deep-Inspiration-Breath-Hold Irradiation in Left-Sided Breast Cancer Patients // *Cancers (Basel).* – 2022. – Vol. 18 – 14(14). – Art. 3477. – <https://doi.org/10.3390/cancers14143477>
13. Desai N., Currey A., Kelly T., Bergom C. Nationwide Trends in Heart-Sparing Techniques Utilized in Radiation Therapy for Breast Cancer // *Adv. Radiat. Oncol.* – 2019. – Vol. 30 – 4(2). – P. 246–252. – <https://doi.org/10.1016/j.adro.2019.01.001>
14. Wolf J., Stoller S., Lübke J., Rothe T., Serpa M., Scholber J., Zamboglou C., Gkika E., Baltas D., Juhasz-Böss I., Verma V., Krug D., Grosu A.L., Nicolay N.H., Sprave T. Deep inspiration breath-hold radiation therapy in left-sided breast cancer patients: a single-institution retrospective dosimetric analysis of organs at risk doses // *Strahlenther. Onkol.* – 2023. – Vol. 199(4) – P. 379–388. – <https://doi.org/10.1007/s00066-022-01998-z>
15. Mahmoud A.A., Sadaka E.A., Aboueglyah M., Amin S.A., Elmansy H., Asal M.F., Köksal M.A., Gawish A. Impact of breath-hold technique on incidence of cardiac events in adjuvant left breast cancer irradiation // *J. Cancer. Res. Clin. Oncol.* – 2023. – Vol. 149(9) – P. 5853–5859. – <https://doi.org/10.1007/s00432-022-04551-8>
16. Nair S., Devi V.N.M., Sharan K., Nagesh J., Nallapati B., Kotian S. A Dosimetric Study Comparing Different Radiotherapy Planning Techniques With and Without Deep Inspiratory Breath Hold for Breast Cancer // *Cancer Manag. Res.* – 2022. – Vol. 29 – 14. – P. 3581–3587. – <https://doi.org/10.2147/CMAR.S381316>
17. Vander Veken L., Van Ooteghem G., Razavi A., Da Rita Quaresma S. [et al.] Voluntary versus mechanically-induced deep inspiration breath-hold for left breast cancer: A randomized controlled trial // *Radiother. Oncol.* – 2023. – Vol. 183. – Art. 109598. – <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2023.109598>
18. Hussein S.H., Kassem L., Adrosy M.I., Metwally H. Comparison Between Breath-Hold and the Inspiratory Phase of Free Breathing in Left Breast Cancer Radiotherapy: Target Volume Coverage and Organ Sparing // *Asian Pac. J. Cancer Prev.* – 2025. – Vol. 26(3) – P. 969–975. – <https://doi.org/10.31557/APJCP.2025.26.3.969>
19. Busschaert S L., Kimpe E., Barbé K., Gevaert T., De Ridder M., Putman K. Deep inspiration breath-hold for breast cancer radiotherapy: a modelling study of targeted versus non-targeted strategy for clinical and operational optimisation. // *Lancet Reg. Health Eur.* – 2025. – Vol. 1. – Iss. 60. – Art. 101509. – <https://doi.org/10.1016/j.lanepe.2025.101509>
20. Jiang S., Shi H., Ye X., Yang J., Zheng J., Wu P., Ye Q., Qin S., Liu W., Hu Z., Cai Y. A three-day coaching protocol for deep inspiration breath hold in left breast radiotherapy using active breathing control // *Sci. Rep.* – 2025. – Vol. 4 – 15(1). – Art. 43661. – <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30484-6>
21. Moisander M., Tuohinen S., Lahdeaho H., Huhtala H. [et al.] The evolution of cardiac changes after breast cancer adjuvant radiotherapy – A six-year follow-up study // *Clin. Transl. Radiat. Oncol.* – 2025. – Vol. 56. – Art. 101078. – <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2025.101078>
22. Schonecker S., Angelini L., Gaasch A., Zinn A., Konnerth D., Heinz C. [et al.] Surface-based deep inspiration breath-hold radiotherapy in left-sided breast cancer: final results from the SAVE-HEART study // *ESMO Open.* – 2024. –

- Vol. 9(12). – Art. 103993. – <https://doi.org/10.1016/j.esmooop.2024.103993>
23. Falco M., Masojc B., Macała A., Lukowiak M., Wozniak P., Malicki J. Deep inspiration breath hold reduces the mean heart dose in left breast cancer radiotherapy // *Radiol. Oncol.* – 2021. – Vol. 55(2). – P. 212–220. – <https://doi.org/10.2478/raon-2021-0008>
24. Gaal S., Kahan Z., Rarosi F., Fodor H. G., Tolnai J. Individual benefit in heart sparing during DIBH-supported left breast radiotherapy. // *Clinical and Translational Radiation Oncology.* – 2024. – Vol. 46 – Art. 100746. – <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2024.100746>
25. J. Lai, S. Hu, Y. Luo, R. Zheng, Q. Zhu, P. Chen [et al.] Meta-analysis of deep inspiration breath hold (DIBH) versus free breathing (FB) in postoperative radiotherapy for left-side breast cancer // *Breast Cancer.* – 2020. – Vol. 27 – P. 299–307. – <https://doi.org/10.1007/s12282-019-01023-9>
26. Aldaly M., Hussien A., El-Nadi I.M., Laz N.I., Said A.S.A. [et al.] Comparison of 3D Conformal and Deep Inspiratory Breath Holding vs. 4D-CT Intensity-Modulated Radiation Therapy for Patients with Left Breast Cancer // *Cancers (Basel).* – 2023. – Vol. 15(24). – Art. 5799. – <https://doi.org/10.3390/cancers15245799>
27. Taylor C.W., Wang Z., Macaulay E., Jagsi R., Duane F., Darby S.C. Exposure of the Heart in Breast Cancer Radiation Therapy: A Systematic Review of Heart Doses Published During 2003 to 2013 // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* – 2015. – Vol. 93. – Iss. 4. – P. 845–853. – <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2015.07.2292>
28. Aznar M.C. [et al.] ESTRO-ACROP guideline: Recommendations on implementation of breath-hold techniques in radiotherapy // *Radiother. Oncol.* – 2023. – Vol. 185. – Art. 109734. – <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2023.109734>
29. G. Loganadane [et al.] Comparison of Nodal Target Volume Definition in Breast Cancer Radiation Therapy According to RTOG Versus ESTRO Atlases: A Practical Review From the TransAtlantic Radiation Oncology Network (TRONE) // *International Journal of Radiation Oncology Biology. Physics.* – Elsevier Inc. – 2020. – Vol. 107. – No. 3. – P. 437–448. – <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2020.04.012>
30. Beaton L., Bergman A., Nichol A., Aparicio M., Wong G., Gondara L. Cardiac death after breast radiotherapy and the QUANTEC cardiac guidelines. // *Clin. Transl. Radiat Oncol.* – 2019. – Vol. 13(19) – P. 39–45. – <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2019.08.001>

ТЫНЫС АЛУ ГЕЙТИНГИ ӘДІСІНІҢ СҮТ БЕЗІ ОБЫРЫНЫҢ СӘУЛЕЛІК ТЕРАПИЯСЫ КЕЗІНДЕГІ ДОЗАНЫҢ ТАРАЛУЫНА ЖӘНЕ КРИТИКАЛЫҚ МҮШЕЛЕРДІ ҚОРҒАУҒА ӘСЕРІ

А. Д. Алибекова, Л. Б. Кенжина*, М. Т. Идинов, Б. Ж. Атантаева,
С. М. Айткалиев, А. Д. Мергенбаева, Д. К. Алдынгуров, С. З. Танатаров

Абай облысы ДСБ «Ядролық медицина және онкология орталығы» КМК, Семей, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: laurakenzhina@yandex.kz

Бұл зерттеу сол жақ сүт безі обырының адьювантты сәулелік терапиясында кардиопротекция әдісі ретінде қолданылатын терең дем алуды ұстап тұру (Deep Inspiration Breath Hold, DIBH) техникасының тиімділігін дозиметриялық тұрғыдан бағалауға арналған. Зерттеудің негізгі мақсаты – жоспарланған мақсатты көлемнің (PTV) жеткілікті жабылуын қамтамасыз ете отырып, жүрекке түсетін сәулелік жүктеменің дозиметриялық параметрлерін DIBH режимінде дәстүрлі еркін тыныс алу (Free Breathing, FB) режимімен салыстыру. Осы мақсатқа сәйкес 10 пациентке арналған үш өлшемді конформды сәулелік терапия (3D-CRT) жоспарларына ретроспективті дозиметриялық талдау жүргізілді. Талдауда PTV, өкпе, жүрек, өңеш, жұлын және контрлатеральды сүт безі үшін негізгі дозалық көрсеткіштер салыстырылды. Нәтижелер PTV жабылуы мен өкпе паренхимасын қорғаудағы (V20 Gr) дозиметриялық эквиваленттілікке қарамастан, DIBH техникасының жүрек құрылымдарын қорғауда айқын артықшылық беретінін көрсетті. DIBH режимінде жүректің орташа дозасы (Dmean) 50%-дан астам төмендеді – 33,16 ± 3,79 Gr-ден 15,49 ± 4,50 Gr-ге дейін (p ≤ 0,001). Ең маңызды төмендеу сол жақ алдыңғы төмендейтін артерия (LAD) үшін тіркелді. Бұл қорғаныш әсер терең дем алу кезінде жүректің каудальды бағытта физиологиялық жылжуына байланысты, нәтижесінде жүрек сәулелену өрісінен алшақтайды. Осылайша, DIBH техникасы онкологиялық ем тиімділігін төмендетпей, ұзақ мерзімді кардиоваскулярлық қауіптерді (әсіресе LAD аймағында) айтарлықтай азайта отырып, жоғары деңгейлі кардиопротекцияны қамтамасыз етеді және оны өңірлік клиникалық хаттамаларға енгізудің қажеттілігін дәлелдейді.

Түйін сөздер: сол жақ сүт безі обыры, адьювантты сәулелік терапия, қауіпті мүшелер (OAP), сол жақ алдыңғы төмендейтін артерия (LAD), дозаны жоспарлау, терең дем алуды ұстап тұру техникасы (DIBH), Грей.

IMPACT OF RESPIRATORY GATING ON DOSE DISTRIBUTION AND PROTECTION
OF CRITICAL ORGANS IN RADIOTHERAPY FOR BREAST CANCER

A. D. Alibekova, L. B. Kenzhina*, M. T. Idinov, B. Zh. Atantayeva,
S. M. Aitkaliyev, A. D. Mergenbayeva, D. K. Aldyngurov, S. Z. Tanatarov

“Center of Nuclear Medicine and Oncology” of Abay Regional Health Department, Semey, Kazakhstan

* E-mail for contacts: laurakenzhina@yandex.kz

This study is dedicated to the dosimetric evaluation of the Deep Inspiration Breath Hold (DIBH) technique as a cardioprotective method during adjuvant radiotherapy for left-sided breast cancer. The primary objective of the research was to compare the dosimetric parameters of radiation exposure to the heart in the DIBH mode with those obtained in the conventional Free Breathing (FB) mode, while maintaining adequate coverage of the Planning Target Volume (PTV). To achieve this objective, a retrospective dosimetric analysis of three-dimensional conformal radiotherapy (3D-CRT) plans for 10 patients was performed. Key dose–volume metrics for the PTV, lungs, heart, esophagus, spinal cord, and contralateral breast were assessed. The results demonstrated that, despite the dosimetric equivalence in PTV coverage and protection of lung parenchyma (V20 Gy), the DIBH technique provides a pronounced protective effect on cardiac structures. In the DIBH mode, a statistically significant reduction of more than 50% in the mean heart dose (Dmean) was observed – from 33,16±3,79 Gy to 15,49±4,50 Gy ($p \leq 0,001$). The most substantial reduction in radiation exposure was recorded for the left anterior descending coronary artery (LAD). This sparing effect is explained by the physiological caudal displacement of the heart during deep inspiration, effectively increasing the distance between the heart and the irradiation field. Thus, the DIBH technique ensures excellent cardioprotection, significantly reducing long-term cardiovascular risks – particularly those associated with LAD exposure – without compromising the oncological adequacy of treatment. These findings confirm the necessity of implementing DIBH as a gold standard in regional clinical radiotherapy protocols.

Keywords: *left-sided breast cancer, adjuvant radiotherapy, organs at risk (OAR), left anterior descending artery (LAD), dose planning, Deep Inspiration Breath Hold (DIBH), Gray.*