

ВЛИЯНИЕ НАСТРОЕК КОНТРОЛЛЕРА ФОРМЫ АПЕРТУРЫ (ASC) НА ПЛАНЫ В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ VMAT В РАЗЛИЧНЫХ АНАТОМИЧЕСКИХ ЗОНАХ

А.О. Серик, К.Д. Датбаев

ТОО “Национальный Научный Онкологический Центр”, Астана, Казахстан

IMPACT OF APERTURE SHAPE CONTROLLER (ASC) SETTINGS ON VMAT TREATMENT PLANS IN DIFFERENT ANATOMICAL SITES

A. Serik, K.D. Datbayev

“National Research Oncology Center”, Astana, Kazakhstan

Реферат

Цель: Комплексный анализ влияния настроек ASC (Aperture Shape Controller) направлен на оценку влияния параметров ASC с целью определения, оказывает ли их использование положительный эффект на качество плана VMAT и надежность доставки дозы без значительного ухудшения конформности и градиента дозы.

Методы: В исследование включены 30 пациентов, лечившихся с использованием VMAT, рассчитанные в системе Eclipse v18.00.10 (Varian, США), распределённых по трём анатомическим группам: голова и шея ($n=10$), молочная железа ($n=10$) и область малого таза ($n=10$).

Результаты: Применение ASC не ухудшает точность доставки лечения и в ряде случаев способствует незначительному улучшению показателей гамма-индекса при одновременном снижении числа мониторинговых единиц, что повышает эффективность планов VMAT. При этом дозиметрические характеристики, включая покрытие мишени и конформность, остаются клинически приемлемыми, несмотря на небольшое увеличение неоднородности распределения дозы.

Заключение: Использование ASC в планах VMAT позволяет контролировать сложность апертур и снижать количество мониторинговых единиц без значительного влияния на точность доставки и качество дозиметрического покрытия, что делает применение ASC целесообразным в клинической практике.

Ключевые слова: VMAT, Aperture Shape Controller (ASC), сложность плана, дозиметрическая точность, анатомические области

Abstract

Purpose: A comprehensive analysis of the impact of Aperture Shape Controller (ASC) settings on VMAT planning aims to evaluate whether the use of ASC parameters has a positive effect on plan quality and treatment delivery reliability.

Methods: The study included 30 patients treated using VMAT in the Eclipse v18.00.10 treatment planning system (Varian, USA). Patients were divided into three anatomical groups: head and neck ($n=10$), breast ($n=10$), and pelvic region ($n=10$).

Results: The use of ASC did not compromise treatment delivery accuracy and, in some cases, resulted in a slight improvement in gamma passing rates, along with a reduction in monitor units (MU), thereby increasing the efficiency of VMAT plans. Dosimetric characteristics, including target coverage and conformity, remained clinically acceptable despite a slight increase in dose inhomogeneity.

Conclusion: The application of ASC in VMAT plans allows for control of aperture complexity and reduction of monitor units without significant impact on delivery accuracy and dosimetric quality, supporting its use in clinical practice.

Key words: VMAT, Aperture Shape Controller (ASC), plan complexity, dosimetric accuracy, anatomical regions

E-mail: aidana.serik.02@bk.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2026-110-2-5-14>

Введение

Онкологические заболевания продолжают занимать ведущие позиции среди глобальных проблем здравоохранения. Дистанционная лучевая терапия является одним из основных методов лечения, обеспечивающим доставку терапевтических доз к опухолевым объемам при максимальном сохранении окружающих критических структур [1, 2].

Современным этапом развития дистанционной лучевой терапии является технология VMAT (Volumetric Modulated Arc Therapy), обеспечивающая высокую конформность дозового распределения за счёт динамического изменения положения многолепесткового коллиматора, скорости вращения гантри и мощности дозы [3]. Однако высокая степень модуляции таких планов сопровождается увеличением их сложности, что может негативно влиять на точность доставки дозы и результаты процедур контроля качества.

Одним из инструментов управления сложностью планов является контроллер формы апертуры ASC (Aperture Shape Controller), реализованный в системе планирования Eclipse. Данный алгоритм направлен на сглаживание формы апертур и ограничение их избыточной вариативности положений лепестков MLC. Несмотря на наличие ряда исследований, влияние различных уровней ASC на комплексные показатели качества планов остается недостаточно изученным, особенно при сравнении различных анатомических областей и при рассмотрении как показателей сложности, так и результатов лечения, таких как частота прохождения гамма-индекса.

Таким образом, целью данного исследования является оценка дозиметрических эффектов, сложности планирования и точности выполнения планов VMAT, разработанных с учетом различных настроек ASC в нескольких лечебных учреждениях, что предоставляет доказательства клинической полезности ASC на практике.

Материал и методы

В исследование были включены 30 пациентов, ранее получавших лечение по технологии VMAT с системой планирования Eclipse v18.00.10 (Varian Medical Systems, Palo Alto, Калифорния, США). Все пациенты были распределены по трём анатомическим группам:

- ✓ Голова и шея ($n=10$)
- ✓ Молочная железа ($n=10$)
- ✓ Область таза ($n=10$)

Для каждого пациента были созданы планы лечения с одинаковыми целями оптимизации, чтобы оценить влияние Aperture Shape Controller (ASC) на качество плана, его сложность и точность доставки дозы.

Пациент-специфическая верификация планов проводилась с использованием портальной дозиметрии. Оценка точности доставки выполнялась методом анализа гамма-индекса с критериями 3 %/3 мм и 2 %/2 мм. Анализ проводился с использованием глобальной нормализации дозы с порогом отсека низкодозной области 10 %.

Для повышения достоверности результатов выполнялась сравнение планов с использованием различных уровней ASC (Low, Moderate, High) относительно базового варианта без применения ASC (OFF).

Результаты

При критерии 3 %/3 мм показатели гамма-индекса были высокими (>97 %) для всех уровней ASC и анатомических областей, что соответствует клиническим требованиям. Для более строгого критерия 2 %/2 мм наблюдалась большая вариабельность, особенно для высокомодулированных планов (например, головы и шеи). Сравнение с планами без ASC/OFF показало:

- ✓ Low ASC вызывал минимальные изменения гамма-индекса (различия от -7,6 % до +5,9 %).

- ✓ Moderate ASC демонстрировал небольшое улучшение или минимальное снижение показателей (–4,5 % до +6,8 %).
- ✓ High ASC чаще приводил к незначительному улучшению гамма-индекса по сравнению с OFF (–5,1 % до +7,1 %).

Полученные данные указывают на то, что использование ASC, особенно на уровнях Moderate и High, позволяет снизить сложность планов без ухудшения их точности доставки, что подтверждается показателями прохождения гамма-индекса.

Для оценки влияния ASC на точность доставки дозы были рассчитаны медианные различия прохождения гамма-индекса относительно планов без ASC для каждой анатомической области. Результаты показали:

- ✓ Голова и шея (Head & Neck): Low ASC – –0,1 %, Moderate ASC – +0,1 %, High ASC – +0,2 % (рис. 1).
- ✓ Молочная железа (Breast): Low ASC – –0,3 %, Moderate ASC – +0,8 %, High ASC – +0,8 % (рис. 2).
- ✓ Таз (Pelvis): Low ASC – –0,2 %, Moderate ASC – +0,4 %, High ASC – +0,5 % (рис. 3).

Эти данные указывают на то, что применение ASC на любых уровнях не приводит к значимому ухудшению показателей гамма-индекса и может слегка улучшать точность доставки дозы в зависимости от анатомической области.

Медианные показатели прохождения гамма-индекса (%) для критериев 2 %/2 мм и 3 %/3 мм. Сравнение уровней ASC относительно

но планов без ASC показывает влияние на точность доставки дозы в анатомической области молочной железы.

Продолжая исследование влияния уровня Aperture Shape Controller (ASC) на параметры VMAT-планов, мы проанализировали изменения числа мониторинговых единиц (MU) при различных настройках ASC. Данные таблицы демонстрируют абсолютные и относительные дельты MU для уровней Low, Moderate и High по сравнению с планами без ограничений (OFF).

В целом, применение ASC приводит к снижению MU, что отражает упрощение формы апертур MLC и снижение сложности планов. На уровне Low ASC наблюдается умеренное уменьшение MU, медианное значение составляет примерно –5 % по сравнению с OFF, что указывает на небольшую оптимизацию без значительного изменения покрытия мишени. Уровень Moderate ASC демонстрирует вариативность: в некоторых случаях MU уменьшаются, в других остаются почти неизменными, медианное значение около –2 %. High ASC в большинстве случаев снижает MU более заметно, достигая до –10 % и более, что свидетельствует о значительном упрощении апертур и повышении эффективности доставки дозы.

Таким образом, данные показывают, что применение ASC способствует оптимизации планов VMAT за счет уменьшения числа мониторинговых единиц (MU), одновременно сохраняя клинически приемлемое покрытие мишени и защиту органов риска. Этот эффект особенно заметен в сложных анатомических областях,

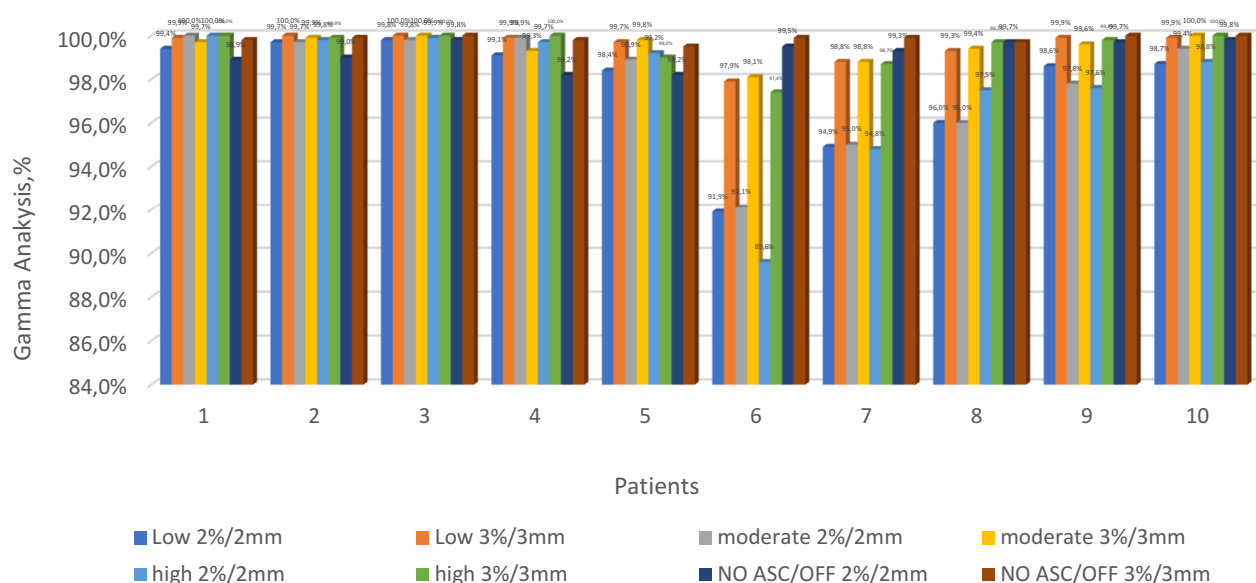


Рис. 1. Прохождение гамма-индекса VMAT-планов для головы и шеи при различных уровнях ASC

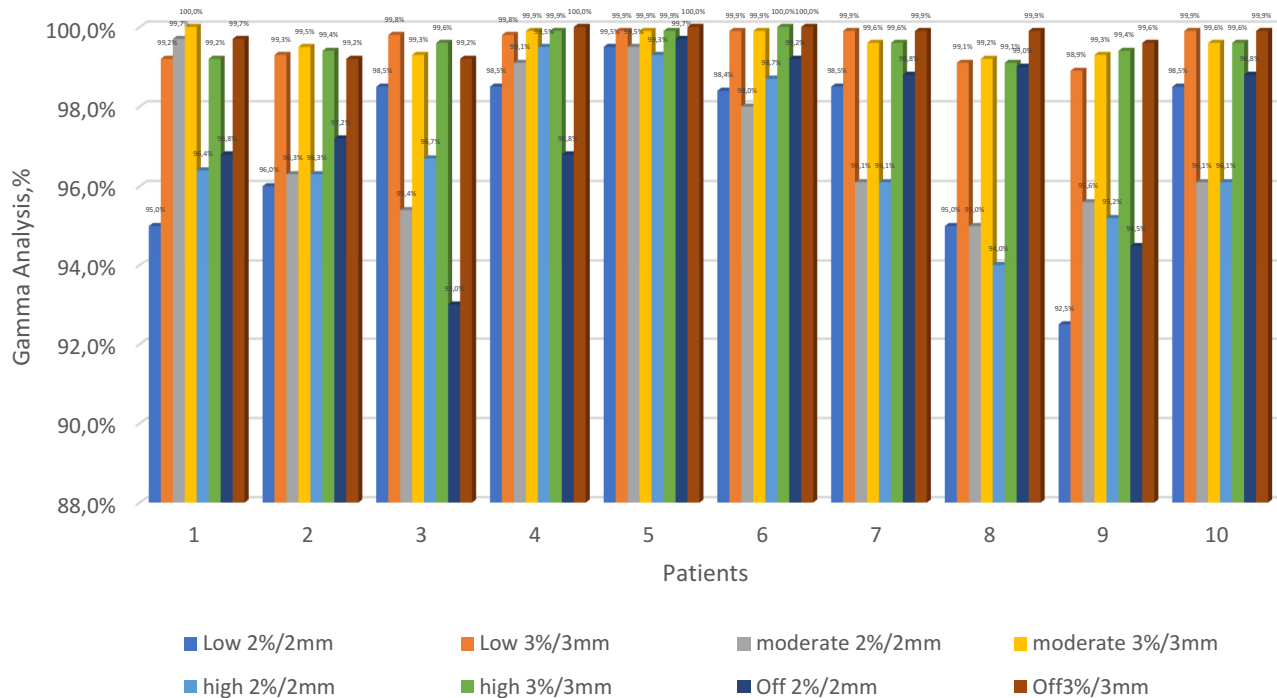


Рис. 2. Прохождение гамма-индекса VMAT-планов для молочной железы при различных уровнях ASC

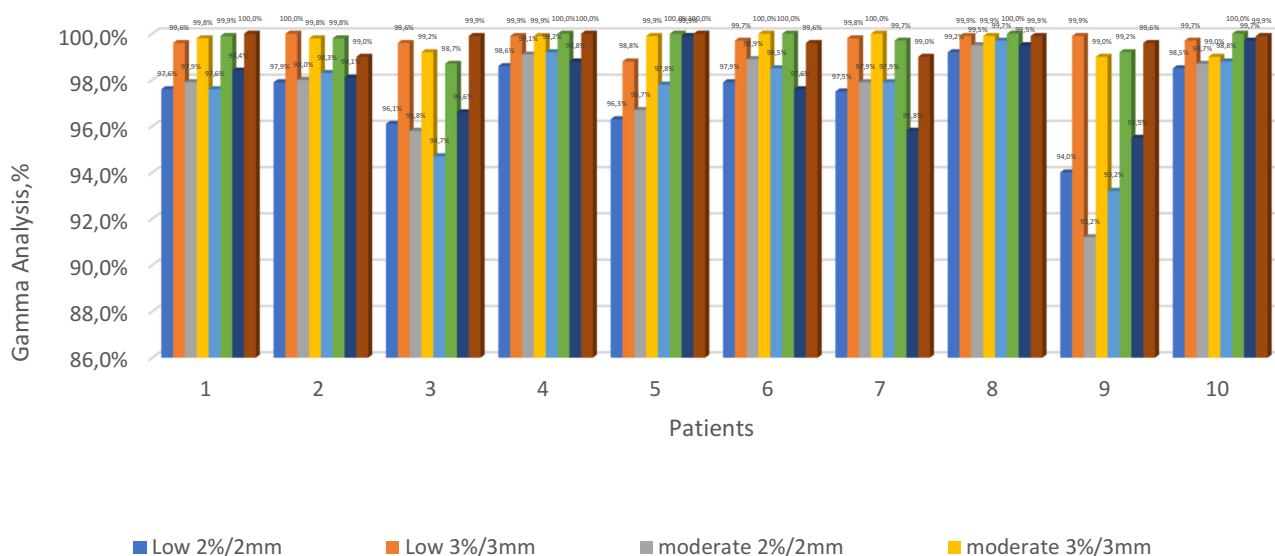


Рис. 3. Прохождение гамма-индекса VMAT-планов для области таза при различных уровнях ASC

где высокая модуляция может приводить к значительным техническим и дозиметрическим сложностям.

Результаты анализа числа MU для выбранной выборки пациентов при различных уровнях ASC представлены на рис. 4. На диаграмме показаны значения MU для уровней Low, Moderate и High по сравнению с планами

без ограничений (OFF). Как видно, применение ASC влияет на количество MU, при этом наблюдаются как уменьшение, так и увеличение по сравнению с OFF, что отражает влияние ASC на сложность и оптимизацию форм апертур MLC.

Для анализа влияния различных уровней Aperture Shape Controller (ASC) на количество мониторинговых единиц (MU) во всех исследуемых

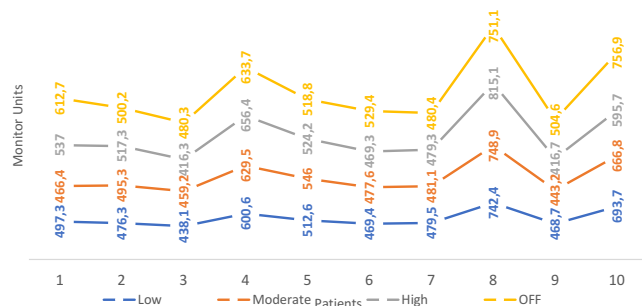


Рис. 4. Число мониторных единиц (MU) для планов VMAT при различных уровнях ASC (Low, Moderate, High) и без ограничений (OFF)

планах VMAT был построен точечный график (рис. 5), отображающий значения MU для уровней Low, Moderate, High и без ограничений (OFF). Этот график позволяет визуальнo оценить, как изменение ASC влияет на эффективность доставки дозы и необходимость использования дополнительных MU.

В большинстве случаев планы с включённым ASC (Low, Moderate и High) демонстрируют снижение MU по сравнению с планами без ограничений (OFF), что указывает на упрощение формы апертур MLC и повышение эффективности дозовой доставки. Наиболее выраженное снижение наблюдается при использовании High ASC, тогда как Low и Moderate ASC приводят к менее значительным изменениям. В отдельных случаях, например при Moderate ASC, наблюдаются незначительные увеличения MU, что может быть связано с особенностями конкретного плана и анатомической области пациента. В целом, график демонстрирует тенденцию к оптимизации количества MU при использовании ASC, сохраняя при этом соответствие клиническим требованиям к покрытию цели и органам риска.

На графике, отражающем данные по области таза (рис. 6), показано влияние различных уровней ASC на количество мониторных единиц (MU) для VMAT-планов. В целом, применение ASC приводит к умеренному снижению MU по сравнению с планами без ограничений (OFF), что свидетельствует о частичной оптимизации формы апертур MLC. Наиболее заметное снижение MU наблюдается при High ASC, тогда как Low и Moderate ASC демонстрируют лишь незначительные изменения. Некоторые плановые случаи показывают минимальное увеличение MU, особенно при Moderate ASC, что может объясняться индиви-

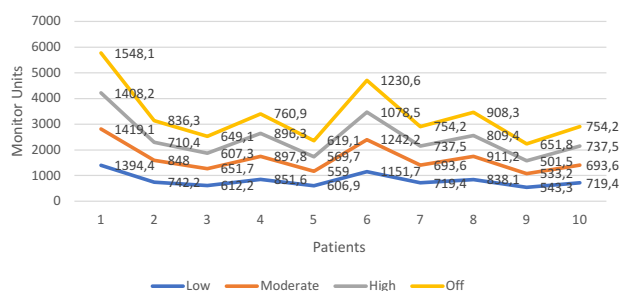


Рис. 5. Число мониторных единиц (MU) для планов VMAT при различных уровнях ASC (Low, Moderate, High) и без ограничений (OFF) для второй группы данных. На представленном графике видно, что применение ASC оказывает заметное влияние на количество мониторных единиц (MU), необходимых для доставки VMAT-планов

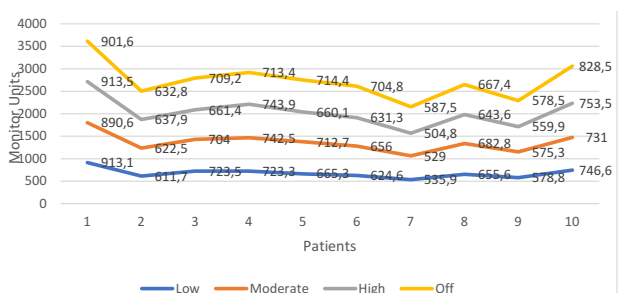


Рис. 6. Влияние уровней ASC на количество мониторных единиц (MU) для VMAT-планов в области таза

дуальными особенностями анатомии пациента или структурой плана. В целом, график подтверждает тенденцию к контролю и снижению MU при использовании ASC, что способствует повышению стабильности и точности доставки дозы при сохранении адекватного покрытия цели и защиты органов риска.

Для оценки дозового покрытия целевой зоны (PTV) у пациентов с опухолями головы и шеи были проанализированы ключевые показатели планов VMAT с различными уровнями Aperture Shape Controller (ASC) и без его применения (OFF). Рассматривались следующие параметры: D95% и D98% (дозы, покрывающие 95% и 98% объема PTV соответственно), индекс конформности (CI) и индекс гомогенности (HI).

Результаты анализа 10 пациентов показали, что применение ASC на высоком уровне (High) приводило к незначительному уменьшению D95% и D98% по сравнению с планами без ASC. Так, медианные относительные различия по D95% составили от -4 % до 1 %, а по D98% – от -5 % до 12 %. Индекс конформности (CI) оставался практически стабильным, изменения не превышали ± 2 %, что указывает на со-

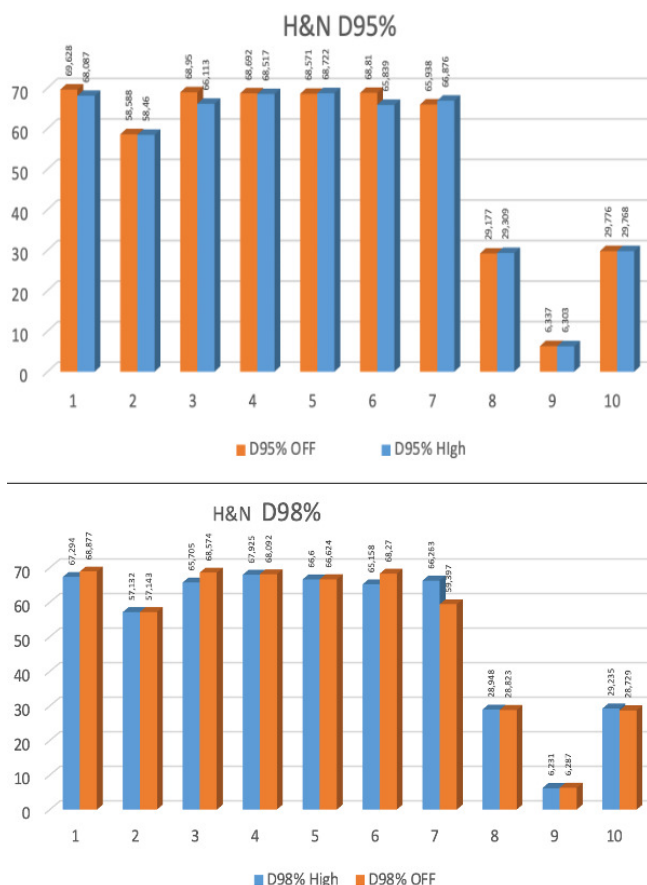


Рис. 7. Сравнение ключевых дозовых показателей (D95%, D98%) у пациентов с опухолями головы и шеи при планах VMAT с использованием ASC (High) и без него (OFF)

хранение качества охвата целевой зоны. Индекс гомогенности (HI) продемонстрировал более выраженные колебания: у некоторых пациентов HI увеличивался до 10 %, а у других снижался до -26 %, отражая вариабельность распределения дозы внутри PTV в зависимости от использования ASC.

Таким образом, внедрение ASC оказывает умеренное влияние на дозовые показатели D95% и D98%, незначительно меняет CI, однако может вызывать заметные изменения гомогенности (HI) в планах для пациентов с опухолями головы и шеи. Эти наблюдения подчеркивают необходимость индивидуального подхода к оптимизации VMAT-планов с учетом анатомических особенностей пациента (рис. 7, 8).

Для более детального анализа качества планов лучевой терапии пациентов с опухолями молочной железы были рассмотрены основные дозовые показатели, такие как D95%, D98%, индекс покрытия (CI) и индекс гетерогенности (HI). Эти показатели позволяют оце-

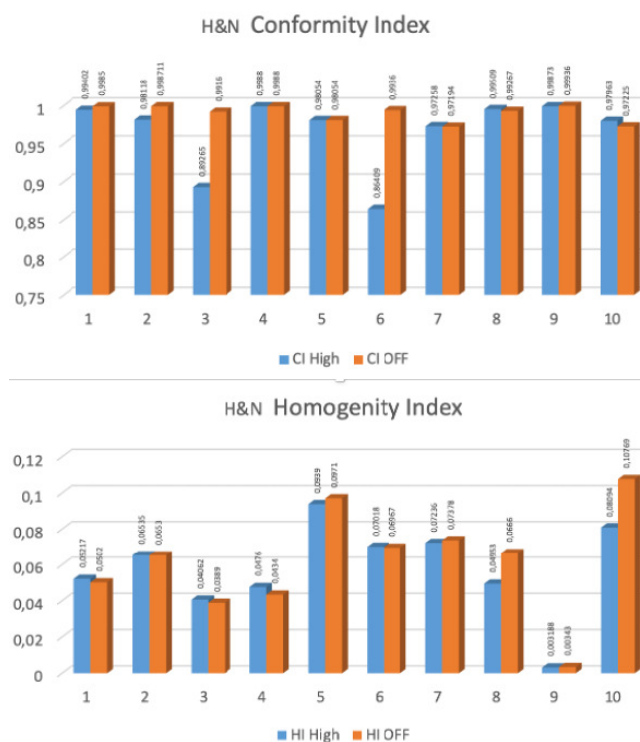


Рис. 8. Сравнение ключевых дозовых показателей (CI, HI) у пациентов с опухолями головы и шеи при планах VMAT с использованием ASC (High) и без него

нить степень соответствия доставленной дозы целевому объему и однородность распределения дозы внутри опухоли. Сравнение планов с использованием высокого уровня ASC (High) и без его применения (OFF) позволяет выявить влияние контроллера формы апертуры на точность и качество планирования.

На следующем рисунке представлены результаты анализа этих дозовых показателей для 10 пациентов с опухолями молочной железы (рис. 9, 10).

Результаты сравнения между планами с высоким уровнем контроля формы апертуры (High ASC) и планами без использования ASC (OFF) показали, что D95% и D98% практически не отличаются между двумя группами, с максимальной разницей в пределах ± 2 %. Это свидетельствует о том, что использование ASC не приводит к значительным изменениям в обеспечении минимальной дозы для целевой зоны.

Для более детальной оценки качества планов использовались также индекс конформности (CI) и индекс однородности (HI). CI отражает, насколько форма изодозного объема совпадает с формой целевой зоны, а HI характеризует равномерность распределения дозы внутри ПЗ.

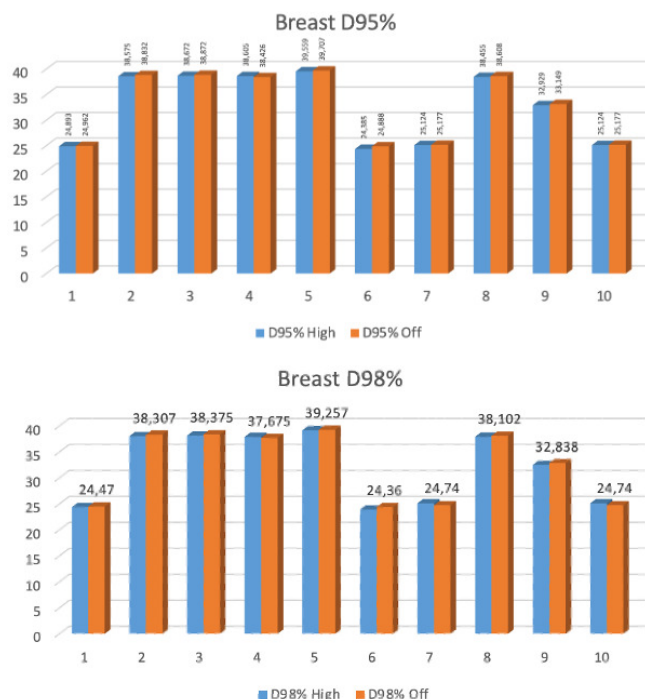


Рис. 9. Сравнение дозовых показателей D95%, D98% для пациентов с опухолями молочной железы с использованием высокого уровня ASC (High) и без ASC (Off)

Анализ показал, что значения CI для планов с использованием ASC и без него остаются близкими, что указывает на высокую конформность распределения дозы независимо от уровня контроля формы апертур. Средние различия между планами High ASC и OFF не превышают 1–2 %, что свидетельствует о стабильном покрытии мишени.

Индекс однородности HI также демонстрирует небольшие изменения при использовании ASC. В большинстве случаев HI остается в пределах 0,05–0,10, что указывает на равномерное распределение дозы внутри целевой зоны. Локальные отклонения не превышают 5 %, что не оказывает существенного влияния на качество планирования и клинические исходы.

Таким образом, использование ASC позволяет сохранять как высокую конформность, так и однородность дозового распределения при планировании лучевой терапии молочной железы, не ухудшая основные дозовые показатели.

Для анализа качества планов лучевой терапии тазовой области были рассмотрены ключевые дозовые показатели, включая D95% и D98%, а также индексы конформности (CI) и однородности (HI). В исследовании сравнивались планы с использованием функции автома-

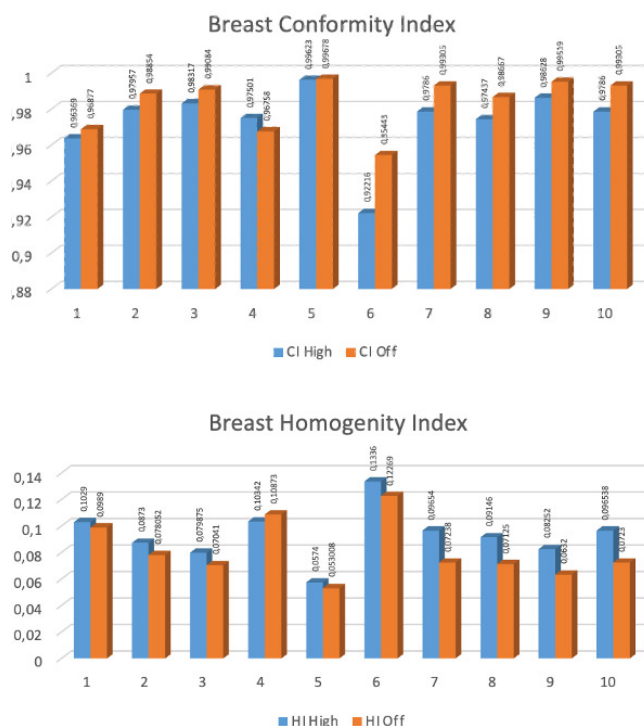


Рис. 10. Сравнение дозовых показателей CI, HI для пациентов с опухолями молочной железы с использованием высокого уровня ASC (High) и без ASC (Off)

тической коррекции апертур (High) и планы без её применения (Off), что позволило оценить влияние данной функции на покрытие целевой зоны и распределение дозы внутри ПЗ. На рисунке представлены значения D95%, D98%, CI и HI для всех пациентов тазовой группы, а также их сравнительные различия между планами High и Off (рис. 11, 12).

Для тазовой области были рассчитаны значения D95% и D98%, которые отражают дозу, покрывающую 95% и 98% объема целевой зоны, соответственно. D95% демонстрирует, насколько эффективно план обеспечивает покрытие основной части объема ПЗ, а D98% позволяет оценить минимальную дозу, получаемую практически всем объемом цели. Анализ данных показывает, что планы с использованием функции автоматической коррекции апертур (High) в большинстве случаев обеспечивают сопоставимое или слегка улучшенное покрытие по D95% и D98% по сравнению с планами без применения коррекции (Off). При этом разница между планами по D95% варьирует от –4 % до 1 %, а по D98% – от –5 % до 2 %, что указывает на относительно стабильное поддержание дозового покрытия при использовании High.

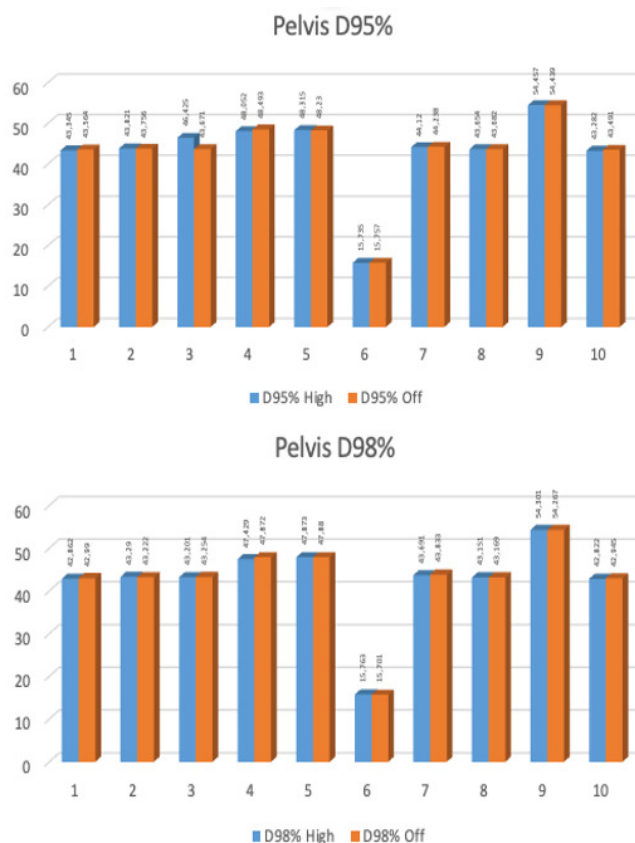


Рис. 11. Сравнение показателей D95% и D98% для тазовой области при планах High и OFF

Помимо анализа дозового покрытия, важно учитывать качество распределения дозы внутри целевой области, которое оценивается с помощью индекса конформности (CI) и индекса гомогенности (HI). Индекс конформности (CI, Conformity Index) отражает, насколько точно распределение дозы повторяет форму планируемой целевой зоны: значения CI, близкие к 1, указывают на хорошую конформность, при которой минимально облучаются окружающие здоровые ткани. Индекс гомогенности (HI, Homogeneity Index) характеризует равномерность распределения дозы внутри объема цели: низкие значения HI свидетельствуют о более однородном распределении, тогда как высокие значения указывают на наличие участков с дозовыми пиками или провалами.

В нашем исследовании сравнивались показатели CI и HI для планов с High-уровнем модуляции и без активации ASC (OFF) у пациентов с тазовой областью. Полученные результаты позволили оценить влияние уровня модуляции на качество планирования, выявив, что применение High-плана зачастую улучшает

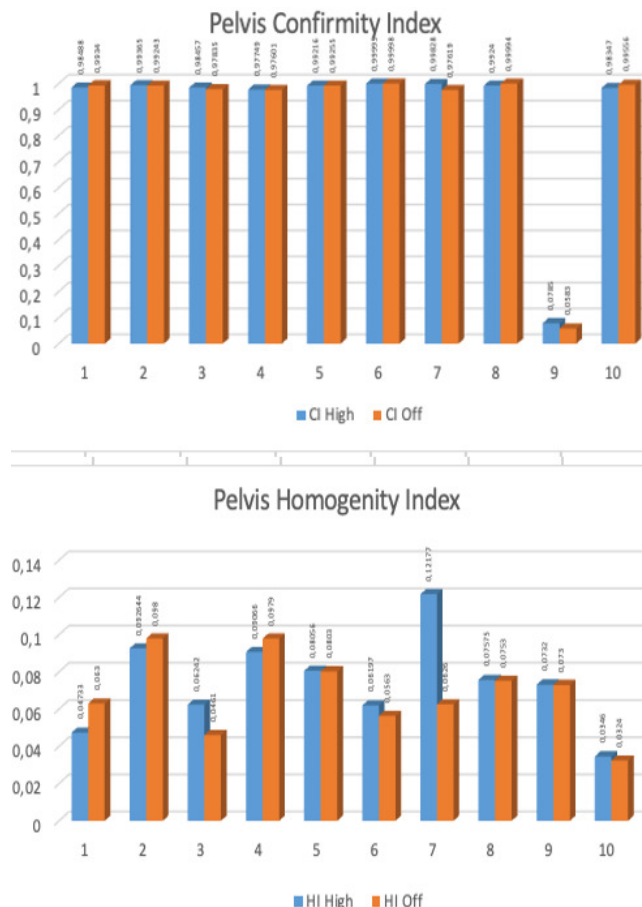


Рис. 12. Сравнение планов лучевой терапии тазовой области: D95%, D98%, CI и HI

конформность (более высокие CI) при умеренном изменении гомогенности (HI), тогда как планы OFF могут демонстрировать менее точное соответствие форме цели и изменчивое распределение дозы.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что применение ASC является эффективным инструментом контроля сложности планов VMAT. Полученные результаты позволяют глубже понять взаимосвязь между сложностью плана, точностью доставки дозы и дозиметрическими характеристиками при использовании современных инструментов оптимизации [4, 6].

Одним из ключевых результатов исследования является то, что применение ASC не приводит к ухудшению дозового покрытия целевого объема. Показатели D95% и D98% во всех исследуемых группах (голова и шея, молочная же-

леза, таз) оставались стабильными с минимальными отклонениями. Это свидетельствует о том, что ограничение формы апертур не нарушает способность планировочной системы обеспечивать адекватное покрытие мишени, даже при снижении сложности плана.

Анализ индексов конформности (CI) показал, что использование ASC не оказывает значительного влияния на пространственное соответствие дозового распределения форме целевого объёма. Во всех анатомических областях значения CI оставались близкими к единице, что указывает на сохранение высокой точности облучения [5]. В то же время индекс гомогенности (HI) продемонстрировал более выраженную вариабельность, особенно в случаях с применением высоких уровней ASC. Это может быть связано с тем, что сглаживание апертур приводит к некоторому перераспределению дозы внутри целевого объёма. Тем не менее, данные изменения не носили клинически значимого характера и не влияли на общее покрытие мишени.

Результаты анализа прохождения гамма-индекса показали, что точность доставки дозы остаётся высокой при всех уровнях ASC. При критерии 3 %/3 мм значения прохождения гамма-индекса превышали 97–100 % для большинства планов, что соответствует клиническим требованиям. При более строгом критерии 2 %/2 мм наблюдалась большая вариабельность, особенно в сложных случаях головы и шеи, что согласуется с данными литературы о повышенной чувствительности высоко модулированных планов к неопределённостям доставки. При этом применение ASC не ухудшало, а в ряде случаев даже незначительно улучшало показатели гамма-индекса, что может свидетельствовать о снижении сложности планов и повышении их воспроизводимости.

Особое значение имеет влияние ASC на количество мониторинговых единиц (MU). В большинстве случаев наблюдалось снижение MU при использовании ASC, особенно на уровне High. Это указывает на уменьшение степени модуляции и упрощение формы апертур MLC, что способствует более эффективной и стабильной доставке дозы для лечения. Данный эффект наиболее выражен в анатомически сложных областях, таких как голова и шея, где высокая модуляция традиционно приводит к увеличению MU и сложности планов.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что использование ASC является

эффективным инструментом для контроля сложности VMAT-планов. Он позволяет снизить количество MU и стабилизировать процесс доставки дозы без ухудшения ключевых дозиметрических показателей. В то же время выявленная вариабельность HI и чувствительность анализа гамма-индекса при строгих критериях подчеркивают необходимость индивидуального подхода к выбору уровня ASC в зависимости от клинической задачи и анатомической области.

В целом, полученные данные согласуются с современными представлениями о необходимости балансирования между качеством дозового распределения и сложностью плана, и подтверждают перспективность использования ASC в клинической практике лучевой терапии.

Заключение

В данном исследовании было проведено комплексное сравнительное изучение влияния контроллера формы апертуры (Aperture Shape Controller, ASC) на качество планов лучевой терапии VMAT для различных анатомических областей (голова и шея, молочная железа и таз) [7, 8]. Полученные результаты показали, что применение ASC не приводит к ухудшению дозового покрытия облучаемого объёма, о чём свидетельствуют стабильные значения D95% и D98% во всех исследуемых группах [9, 10].

Анализ показателей прохождения гамма-индекса продемонстрировал, что использование ASC в целом не снижает точность доставки дозы, а в ряде случаев приводит к незначительному улучшению результатов, особенно при менее строгом критерии 3 %/3 мм [13, 14]. При этом для более строгого критерия 2 %/2 мм наблюдалась повышенная чувствительность в сложных клинических случаях, что подчеркивает влияние модуляционной сложности на точность верификации [11, 12].

Применение ASC также способствовало снижению числа мониторинговых единиц (MU), что указывает на уменьшение сложности планов и повышение эффективности доставки дозы для лечения [13, 15]. Наиболее выраженный эффект наблюдался при высоких уровнях ASC, особенно в анатомически сложных областях.

Показатели конформности (CI) оставались стабильными при использовании ASC, тогда как индекс гомогенности (HI) демонстрировал определённую вариабельность, не оказыва-

вая при этом существенного влияния на общее покрытие целевого объёма.

Таким образом, результаты исследования показывают, что использование ASC является эффективным инструментом оптимизации VMAT-планов, позволяющим снизить сложность планирования и улучшить параметры доставки дозы без ухудшения клинически значимых дозиметрических характеристик. Полученные данные подтверждают целесообразность применения ASC в клинической практике с учётом индивидуальных особенностей анатомической области и сложности планов [14, 15].

Список литературы

1. Teoh M, Clark CH, Wood K, Whitaker S, Nisbet A. Volumetric modulated arc therapy: A review of current literature and clinical use in practice. *Brit J Radiol.* 2011; 84 (1007): 967-96. <https://doi.org/10.1259/bjr/32856321>.
2. Kamima T, Sato Y, Murakami Y, et al. Clinical evaluation of the aperture shape controller in volumetric modulated arc therapy: Effects on MLC and jaw motion complexity, plan quality, and deliverability. *Journal of Applied Clinical Med Phys.* 2025; 26 (9): e70215. <https://doi.org/10.1002/acm2.70215>.
3. McNiven AL, Sharpe MB, Purdie TG. Metrics to assess IMRT and VMAT modulation complexity and plan deliverability. *Med Phys.* 2010; 37 (2): 505-15. <https://doi.org/10.1118/1.3279672>.
4. Chiavassa S, Bessieres I, Edouard M, Mathot M, Moignier A. Complexity metrics for IMRT and VMAT plans. *Brit J Radiol.* 2019; 92: 20190270. <https://doi.org/10.1259/bjr.20190270>.
5. Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. *Med Phys.* 2008; 35 (1): 310-7. <https://doi.org/10.1118/1.2818738>.
6. Yu C, Tang G. Intensity-modulated arc therapy: Principles and implementation. *Phys Med & Biol.* 2011; 56 (5), R31-R54. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/5/R01>.
7. Yu C, Tang G, Kwok C. Evaluation of VMAT plan quality and delivery accuracy using Aperture Shape Controller. *Radiother Oncol.* 2020; 145: 120-7. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2020.04.011>.
8. Bedford J, Warrington A, Hansen V. Impact of MLC modulation on VMAT delivery accuracy. *Med Phys.* 2019; 46 (5): 2121-32. <https://doi.org/10.1002/mp.13402>.
9. Popescu CC, Olteanu L, Das IJ. Aperture shape control and its effect on dose conformity in VMAT. *J Appl Clin Med Phys.* 2021; 22 (4): 25-33. <https://doi.org/10.1002/acm2.13256>.
10. International Commission on Radiation Units and Measurements. Prescribing, recording, and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT) (ICRU Report 83). ICRU. 2010.
11. Valdes G, Parikh P, Palta J. Dose homogeneity indices in modern VMAT planning: Influence of MLC modulation. *Med Dosimetry.* 2019; 44 (1): 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2018.09.004>.
12. Bedford J, Hansen V, Warrington A. Clinical evaluation of VMAT plan complexity and its impact on delivery reproducibility. *Radiother Oncol.* 2020; 145: 114-9. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2020.04.010>.
13. Bedford JL, Hanson I, Warrington A.P. Monitoring units and plan complexity in VMAT: Clinical implications. *Phys Med & Biol.* 2017; 62 (1), 23-37. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/62/1/23>.
14. Ling CC, Humerickhouse M, Moran J. Correlation between plan complexity and delivery accuracy in IMRT and VMAT. *Radiother Oncol.* 2018; 129 (3): 467-74. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2018.07.015>.
15. Dzierma Y, Nuesken F, Licht N. Impact of aperture modulation on gamma analysis results in VMAT. *Strahlentherapie und Onkologie.* 2018; 194 (12): 1125-33. <https://doi.org/10.1007/s00066-018-1351-7>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 01.04.2026. Принята к публикации: 17.06.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 01.04.2026. Accepted for publication: 17.06.2026.