

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-1-177-186>

УДК: 615.849.5:616-006.6:616.21

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОЗОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ДЛЯ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВЫ И ШЕИ

**Н. А. Елемесова, С. З. Танатаров, М. Т. Идинов, Л. Б. Кенжина*, Б. Ж. Атантаева,
С. М. Айткалиев, А. Д. Алибекова, А. Д. Тусупова, А. Д. Мергенбаева, Н. Ю. Карнакова**

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

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

Исследование выполнено на базе Центра ядерной медицины и онкологии области Абай (г. Семей) и посвящено количественной оценке и оптимизации параметров дозового планирования у пациентов с опухолями головы и шеи. В ретроспективный анализ включены семь пациентов (N = 7), проходивших лечение в 2024 году, для которых были сформированы планы лучевой терапии с использованием методик лучевой терапии с модулированной интенсивностью пучка (Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT) и объёмно-модулированной дуговой лучевой терапии (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) на линейном ускорителе TrueBeam в системе планирования Eclipse. Целью работы являлась сравнительная физико-дозиметрическая оценка качества планов с анализом ключевых дозиметрических метрик и логистической эффективности доставки дозы. Проведённый анализ показал сопоставимый уровень покрытия планируемого целевого объёма (PTV) для обеих методик при наличии клинически значимых различий в распределении дозовой нагрузки на органы риска. Применение VMAT сопровождалось снижением средней дозы на околоушные слюнные железы на 4,65 Гр по сравнению с IMRT (19,60±7,97 Гр против 24,26±3,75 Гр), что обеспечивало достижение значений ниже порогового уровня 25 Гр и способствовало сохранению их функциональной активности. Средняя доза на спинной мозг также была ниже при VMAT (37,96±4,16 Гр против 41,37±1,94 Гр), что повышало радиационную безопасность лечения. Результаты логистического анализа показали преимущество VMAT, выражающееся сокращением количества мониторинговых единиц и времени доставки дозы более чем на 60% по сравнению с IMRT, что способствует снижению лучевой нагрузки на органы риска и подтверждает целесообразность применения данной методики в клинической практике.

Ключевые слова: опухоли головы и шеи, лучевая терапия, дозовое планирование, IMRT, VMAT, линейный ускоритель TrueBeam, органы риска, физико-дозиметрический анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Злокачественные новообразования головы и шеи (ОГШ) представляют собой гетерогенную группу опухолей, которые, несмотря на относительно низкую долю в общей структуре онкологической заболеваемости (в среднем 5–7% по международным данным), характеризуются значительной сложностью лечения [1–5]. Согласно данным Глобального регистра рака (GLOBOCAN) Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), Международного агентства по исследованиям рака (IARC), злокачественные образования в области головы и шеи остаются значимой причиной заболеваемости и смертности как в мире, так и в отдельных регионах, включая Республику Казахстан.

Основным методом радикальной терапии, особенно при местно-распространённых формах, является лучевая терапия (ЛТ), часто в сочетании с химиотерапией. Ключевая проблема при лучевом лечении ОГШ обусловлена комплексной анатомической структурой области головы и шеи, где опухоли часто расположены в непосредственной близости от критически важных и высокочувствительных структур. Требование подведения высоких радикальных доз (до 70 Гр) к планируемому целевому объёму на фоне того, что окружающие органы риска (ООР) (включая спинной мозг, зрительные нервы, слюнные железы, мышцы-конст-

рикторы глотки) имеют низкие толерантные дозы, определяет узкое терапевтическое окно [6, 7]. Неадекватная защита ООР приводит к высокому риску развития тяжёлых хронических осложнений, таких как ксеростомия (связанная с повреждением слюнных желез) и дисфагия, что отражено в клинических конечных точках согласно рекомендациям QUANTEC [8].

Именно эти клинические ограничения инициировали поиск и разработку новых технологических подходов в медицинской физике. Традиционные методы лучевой терапии не могли обеспечить необходимого уровня конформности – степени пространственного соответствия изодозных поверхностей геометрии опухолевого объёма. В ответ на этот вызов были разработаны методы лучевой терапии с модулированной интенсивностью (межд. Intensity modulated radiation therapy, IMRT) и её более современная форма – объёмно-модулированная дуговая терапия (межд. Volumetric modulated arc therapy VMAT) [9]. VMAT является эволюционным развитием IMRT, используя непрерывное движение гентри (подвижный корпус аппарата) с одновременным изменением параметров источника, что позволяет достигать более высокой конформности и сокращать длительность сеанса. Однако, несмотря на очевидные преимущества обоих методов перед трехмерной конформной лучевой терапией

(межд. 3D-conformal radiotherapy, 3D-CRT), вопрос об их относительных дозиметрических преимуществах остаётся предметом научных дискуссий. Необходимо определение того, какой метод обеспечивает оптимальное соотношение дозового покрытия планируемого объёма мишени (PTV) и снижения средней дозы (D_{mean}) на ключевые окружающие органы риска, что является центральной задачей дозиметрической оптимизации [10–12]. Согласно международным стандартам Международного агентства по атомной энергии (IAEA), включая серии Технических отчетов по медицинской дозиметрии и обеспечению качества в лучевой терапии, внедрение методов IMRT и VMAT должно сопровождаться обязательной верификацией дозы, регулярной калибровкой оборудования и систематическим контролем качества. Руководства IAEA по радиационной безопасности при медицинском использовании ионизирующего излучения также определяют требования к проектированию и эксплуатации радиотерапевтических отделений, обеспечивающие безопасные условия проведения лечения [13, 14]. Соблюдение этих норм позволяет достичь оптимального баланса между адекватным покрытием планируемого объёма мишени и защитой критических органов риска, что особенно важно при лечении опухолей головы и шеи с их сложной анатомией и высокой чувствительностью окружающих структур [15]. Исходя из данной методологической и клинической необходимости, Центром ядерной медицины и онкологии области Абай было инициировано настоящее исследование. Цель работы – количественная физико-дозиметрическая оценка и оптимизация параметров дозового планирования IMRT и VMAT при опухолях головы и шеи с анализом ключевых дозиметрических показателей (CI , HI , D_{mean} , D_{max} , $D_{95/98}$) и логистической эффективностью доставки дозы. Результаты исследования

позволят научно обосновать выбор оптимального метода планирования и стандартизировать протоколы лучевой терапии ОГШ в Казахстане, что потенциально способствует снижению частоты и выраженности радиационно-индуцированных токсических реакций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящее исследование представляет собой сравнительный дозиметрический анализ планов лучевой терапии, разработанных для пациентов с опухолями головы и шеи, проходивших лечение в Центре ядерной медицины и онкологии области Абай, г. Семей. Ретроспективный анализ проводился на когорте из семи ($N = 7$) пациентов с опухолями в области головы и шеи, которые получили лечение в 2024 году. В исследование были включены пациенты с различными диагнозами злокачественных новообразований данной локализации, включая опухоли гортаноглотки, носоглотки и слюнных желёз, получавшие как дооперационную, так и послеоперационную лучевую терапию с использованием фотонных пучков с энергией 6 МэВ. Для каждого пациента было выполнено дозиметрическое планирование с применением двух сравниваемых методик: лучевой терапии с модулированной интенсивностью (IMRT) и объёмно-модулированной дуговой терапии (VMAT). Исследование проводилось с использованием линейного ускорителя TrueBeam (Varian Medical Systems Inc., США), который является ключевым элементом материально-технической базы Центра (рисунок 1).

Аппарат оснащен многолепестковым коллиматором с шириной лепестков 1 см и максимальной скоростью движения 2,5 см/с. Верхний и нижний коллиматоры формируют максимальное поле размером 40×40 см². Планирование дозового распределения осуществлялись в системе ECLIPSE, версия 18 (Varian).



Рисунок 1. Линейный ускоритель TrueBeam (Varian Medical Systems Inc., США)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОЗОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ДЛЯ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВЫ И ШЕИ

Таблица 1. Сравнение дозовых нагрузок D_{mean} на ключевые органы риска в планах VMAT и IMRT (Гр)

Пациент	VMAT				IMRT			
	Полость рта	Нижняя челюсть	Околоушная железа	Спинальный мозг	Полость рта	Нижняя челюсть	Околоушная железа	Спинальный мозг
1	34,20	60,10	2,27	43,50	35,3	62,30	25,00	38,60
2	43,50	49,90	24,92	30,40	49,6	52,50	28,30	39,80
3	28,30	38,70	24,01	35,60	32,3	40,20	19,10	41,80
4	35,60	42,50	22,94	39,70	48,6	43,20	23,20	43,50
5	22,10	35,60	19,09	37,30	28,2	33,50	20,50	43,90
6	43,50	50,20	24,20	40,50	38,4	44,60	24,40	40,30
7	30,20	37,70	19,80	38,70	35,9	38,60	29,30	41,70
Ср±SD	33,91±7,87	44,96±8,82	19,60±7,97	37,96±4,16	38,33±8,03	44,99±9,62	24,26±3,75	41,37±1,94

На этапах планирования формировались целевые объёмы (PTV) с различными уровнями предписанной дозы: PTV 50 Гр, PTV 60 Гр, PTV 66 Гр и PTV 70 Гр, в зависимости от локализации и стадии заболевания. Планируемые целевые объёмы обычно формировались путем увеличения каждого клинического целевого объёма (CTV) на 5 мм для учета потенциальных ошибок настройки и движения пациента. Однако, в соответствии с принципами анатомической конформности, граница вокруг CTV была ограничена 1 мм при расположении рядом с критическими нервными структурами [5]. Дозы облучения составляли 50 Гр, 60 Гр, 66 Гр и 70 Гр при фракционировании по 2 Гр за сеанс. Назначенные дозы были получены за 35 фракций, по одной в день, пять раз в неделю.

Оптимизация планов IMRT и VMAT проводилась с учётом стандартных ограничений для критических органов риска (спинной мозг, ствол мозга, околоушные железы, зрительные пути и гортань) с целью достижения максимального покрытия PTV при минимизации дозовой нагрузки на окружающие здоровые ткани. В рамках дозового планирования, доза в пределах PTV распределялась равномерно, при этом значимой разницы в максимальных дозах (D_{max}) для таких критических органов, как спинной мозг, здоровая околоушная железа, полость рта, гортаноглотка, пищевод и щитовидная железа, между IMRT и VMAT по данным планирования выявлено не было. Для всесторонней оценки эффективности и логистических преимуществ сравниваемых методик, дополнительно были проанализированы такие физические параметры, как количество мониторинговых единиц и общее время лечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Количественные результаты сравнительного физико-дозиметрического анализа методик IMRT и VMAT, а также оценка логистической эффективности доставки дозы представлены в таблицах 1–4. На основании этих данных была произведена интерпретация дозовых нагрузок на ключевые органы риска и определены различия в параметрах скорости лечения. Визуальная иллюстрация достигнутой конформности дозового распределения и эффективности индивидуально для репрезентативных клинических случаев приведена на

рисунках 2–4, включающих изодозные кривые и дозобъёмные гистограммы (DVH).

По результатам анализа в таблице 1 установлено, что метод VMAT продемонстрировал более эффективную сохранность критических органов риска по сравнению с IMRT, особенно для околоушных желёз и спинного мозга. Однако средние значения не всегда позволяют отразить индивидуальную вариабельность ответа в разных клинических ситуациях. В связи с этим для уточнения характера различий между методиками был проведён дополнительный анализ, направленный на оценку индивидуального эффекта замены IMRT на VMAT. С целью более детальной оценки влияния методики на дозовую нагрузку для каждого пациента был выполнен попарный анализ разницы доз ($\Delta = \text{VMAT} - \text{IMRT}$), отражающий индивидуальный эффект смены техники облучения. Данная разница Δ показывает, насколько изменяется средняя доза на орган риска при переходе от IMRT к VMAT для каждого конкретного пациента: отрицательное значение Δ означает снижение дозы при использовании VMAT (клинически благоприятный результат), положительное значение – увеличение дозы. Результаты индивидуального попарного сравнения представлены в таблице 2, что обеспечивает более глубокую оценку различий между методиками.

Таблица 2. Сравнение дозовых нагрузок D_{mean} на ключевые органы риска в планах VMAT и IMRT (Гр)

№ пациента	Δ полость рта	Δ нижняя челюсть	Δ околоушная железа	Δ спинной мозг
1	-1,10*	-2,20	-22,73	4,90
2	-6,10	-2,60	-3,38	-9,40
3	-4,00	-1,50	4,91	-6,20
4	-13,00	-0,70	-0,26	-3,80
5	-6,10	2,10	-1,41	-6,60
6	5,10	5,60	-0,20	0,20
7	-5,70	-0,90	-9,50	-3,00
Ср	-4,41	-0,03	-4,65	-3,41

* **Примечание:** Отрицательное значение Δ отражает снижение дозы при VMAT.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОЗОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ДЛЯ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВЫ И ШЕИ

Как видно из таблицы 2, в большинстве случаев использование VMAT приводит к снижению средней дозы на органы риска (отрицательные значения Δ), особенно выраженному для околоушных желёз ($\Delta_{\text{mean}} = -4,65$ Гр). Это подчёркивает потенциальное снижение риска радиационно-индуцированной ксеростомии. Для нижней челюсти разница между методиками минимальна ($\Delta_{\text{mean}} = -0,03$ Гр), что соответствует эквивалентности методов в защите данной структуры. Разница доз на спинной мозг также демонстрирует преимущество VMAT ($\Delta_{\text{mean}} = -3,41$ Гр), что является клинически значимым в контексте строгих дозовых ограничений для данной структуры.

Переходя от анализа дозовых характеристик к оценке эффективности технической реализации методов, далее были изучены логистические параметры планов, которые напрямую влияют на продолжительность сеанса лечения и общую стабильность его проведения. Ключевым параметром для оценки эффективности является количество мониторинговых единиц (MU). MU – это основная единица работы линейного ускорителя, которая отражает количество радиации, необходимое для подведения предписанной дозы к целевому объёму. Обычно 1 MU соответствует дозе, доставленной пучком (фотонов или протонов) в эталонных условиях (например, 1 Гр в поле 10×10 см²). В методах модулированной интенсивности количество MU служит важным индикатором эффективности дозовой доставки и косвенно влияет на интегральную дозу, получаемую здоровыми тканями. Сравнительные данные логистических параметров представлены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительный анализ физических и логистических параметров эффективности доставки дозы методами IMRT и VMAT

№ пациента	IMRT		VMAT	
	MU	Время лечения, мин	MU	Время лечения, мин
1	1797,30	2,70	477,40	0,72
2	685,90	1,03	531,90	0,80
3	1606,00	2,41	550,60	0,83
4	2051,50	3,08	736,40	1,10
5	1916,20	2,87	598,80	0,90
6	572,40	0,86	456,60	0,68
7	1384,70	2,08	466,40	0,70
Ср±SD	1430,57 ±588,75	2,15 ±0,88	545,44 ±98,57	0,82 ±0,15
Δ (VMAT-IMRT)	-885,13 MU	-1,33 мин	—*	—
% сокращения	-61,8%	-61,9%	—	—

* **Примечание:** прочерк (—) означает неприменимость этих показателей.

Как видно из таблицы 3, анализ логистических параметров показал, что метод VMAT требует значительно меньшего количества MU (в среднем

545,44±98,57 MU) по сравнению с IMRT (в среднем 1430,57±588,75 MU). Соответственно, общее время доставки дозы в VMAT было в среднем в 2,6 раза короче (0,82 минут против 2,15 минут). Такое сокращение времени является критически важным для минимизации внутрифракционных ошибок, связанных с движением пациента, и повышения пропускной способности клиники. Уменьшение времени сеанса также улучшает комфорт пациента и может снижать вероятность смещения анатомических структур в ходе терапии. Дополнительно следует отметить, что прочерки (—) в строках « Δ » и «% сокращения» таблицы 3 отражают неприменимость данных показателей для VMAT, поскольку они вычисляются исключительно как относительная разница по отношению к IMRT. Для усиления интерпретации логистических различий дополнительно были рассчитаны интегральные показатели эффективности – абсолютное снижение MU и времени экспозиции (Δ), а также процентное сокращение параметров. Эти показатели позволяют количественно оценить выигрыш VMAT относительно IMRT и дополняют выводы, основанные на средних значениях.

Наряду с анализом дозовой нагрузки на критические структуры, в рамках исследования была проведена количественная верификация качества покрытия планируемого целевого объема (PTV50). Согласно заявленным во введении критериям, были проанализированы показатели покрытия дозой для 95 и 98 процентов ($D_{95\%}$ и $D_{98\%}$), а также рассчитаны индексы конформности и гомогенности, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Параметры покрытия PTV и индексы качества дозовых распределений (Mean±SD)

Параметр	IMRT	VMAT	p-value
$D_{95\%}$ (Гр)	51,8±0,6	52,1±0,4	> 0,05
$D_{98\%}$ (Гр)	50,4±0,9	50,8±0,7	> 0,05
Индекс конформности (CI)	1,18±0,05	1,04±0,03	< 0,05
Индекс гомогенности (HI)	0,12±0,02	0,08±0,01	< 0,05

Анализ показал сопоставимый уровень покрытия целевого объема при использовании обеих методик планирования. Значения $D_{95\%}$ и $D_{98\%}$ для PTV50 не различались статистически значимо ($p > 0,05$), что свидетельствует о достижении требуемого дозового покрытия в обоих вариантах планирования. При этом интегральные характеристики распределения дозы демонстрировали преимущество техники VMAT. Значения индекса конформности и индекса гомогенности были статистически значимо ниже при использовании VMAT ($p < 0,05$), что указывает на более точное соответствие высокодозной области геометрии целевого объема и более равномерное распределение дозы внутри PTV.

Для визуализации дозиметрических преимуществ и демонстрации возможностей системы планирова-

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОЗОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ДЛЯ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВЫ И ШЕИ

ния была проведена детальная оценка индивидуальных планов лечения онкопациентов. С целью иллюстрации ключевых преимуществ сравниваемых методик и их применимости при различных локализациях опухолей головы и шеи, ниже представлены три наиболее репрезентативных клинических примера из общей когорты (N=7). Представленные клинические примеры выбраны как наиболее репрезентативные, иллюстрирующие достижение высокого терапевтического индекса.

КЛИНИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ

Представленные ниже клинические случаи приведены в качестве иллюстрации особенностей индивидуальной оптимизации планов лучевой терапии при использовании методов IMRT и VMAT. Для каждого пациента выполнялось планирование необходимым методом, позволяющим наглядно продемонстрировать особенности распределения дозы и органосохраняющие возможности данных техник.

Пример 1: пациент с опухолью левой околоушной слюнной железы (Пациент № 1)

В данном клиническом случае с опухолью околоушной слюнной железы слева, план, выполненный методом VMAT, требовал тщательного подхода для обеспечения радиационной защиты контралатеральных структур (рисунок 2). Первичный план (2 дуги) обеспечивал покрытие PTV на уровне $D_{95} = 95\%$ при γ -анализе 96%. В процессе пост-коррекции были изменены углы дуг и добавлены жесткие ограничения на низкодозовые объёмы (V_5, V_{10}), что позволило значительно улучшить органосохраняющий эффект.

Итоговая оптимизация продемонстрировала следующие высокоэффективные параметры: средняя доза на контралатеральную (здоровую) околоушную железу составила всего 2,273 Гр, что гарантирует максимально возможное сохранение ее функции и предот-

ращение ксеростомии (критический порог 25 Гр). Средняя доза полости рта снизилась до 16,175 Гр (уточнение: снижение по сравнению с исходным планом, а не сравнением VMAT и IMRT), что минимизирует риск развития тяжёлого мукозита (воспаления слизистых оболочек ротовой полости). При этом покрытие PTV (D_{95}) сохранилось на уровне 94,5% (разница в пределах допустимой погрешности), а дозы на другие критические структуры, такие как спинной мозг ($D_{max} = 32,314$ Гр) и нижняя челюсть ($D_{max} = 68,241$ Гр), были контролируемы. Финальный γ -анализ составил 96,3% при низком расходе мониторных единиц 593,3 MU, подтверждая высокое качество и эффективность оптимизированного плана.

Данный клинический пример демонстрирует возможности VMAT по улучшению конформности дозового распределения при сохранении приемлемых дозовых ограничений для органов риска.

Пример 2: пациент с опухолью в области гортани и глотки (Пациент № 2)

Второй клинический пример пациента № 2 так же демонстрирует критическую роль применения VMAT в обеспечении безопасности жизненно важных структур. Первичный план (2 дуги VMAT) обеспечивал удовлетворительное покрытие PTV $D_{95} = 95,2\%$ при γ -анализе 94%, однако дозовые нагрузки на органы риска были неприемлемо высоки: D_{max} на спинной мозг составила 48,5 Гр, что превышает толерантный лимит. Средние дозы на околоушные железы (28,2 Гр и 27,1 Гр) также превышали критический порог 25 Гр. Для устранения этих недостатков была проведена многоэтапная оптимизация: уменьшен угол дуги, введены ограничения на V_{24} средней дозы контралатеральной околоушной железы, и существенно увеличен весовой коэффициент ограничения на спинной мозг.

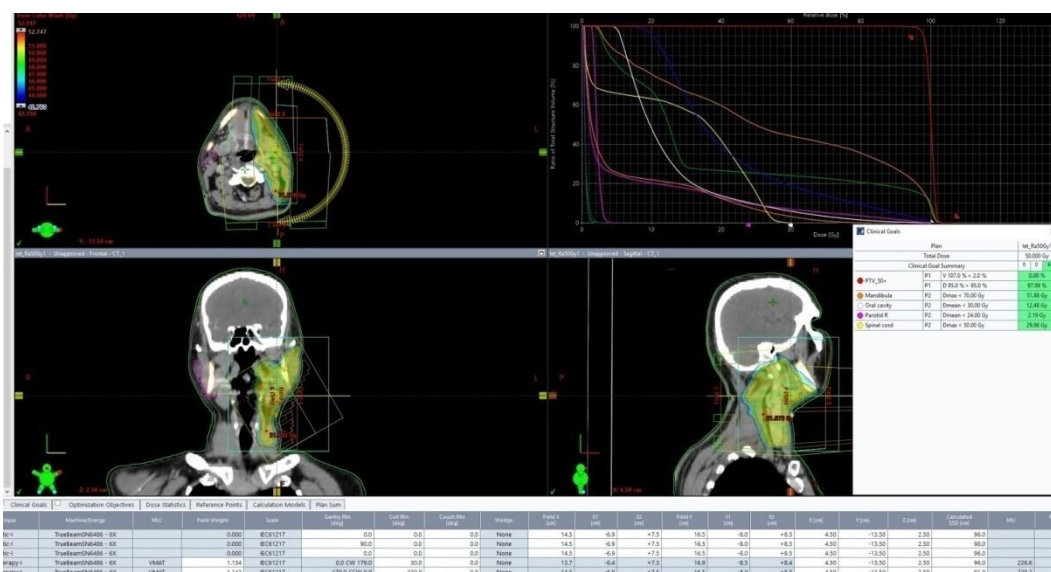


Рисунок 2. Дозовое распределение и DVH-кривые для плана VMAT у пациента с опухолью околоушной слюнной железы слева (Пациент № 1)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОЗОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ДЛЯ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВЫ И ШЕИ

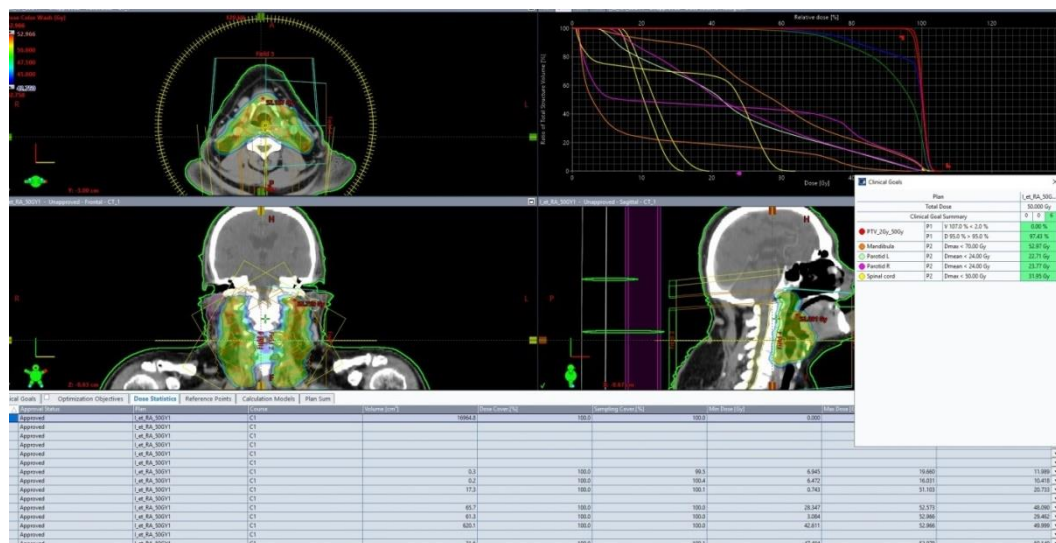


Рисунок 3. Дозовое распределение и DVH-кривые для плана VMAT у пациента с опухолью в области гортани и глотки (Пациент № 2)

В результате удалось добиться значительного улучшения радиационной защиты спинного мозга: D_{max} снижена до 39,91 Гр (снижение на $\approx 17,7\%$), что переводит план в безопасную зону. Дополнительно средняя доза на контралатеральную околоушную железу снизилась до 24 Гр (снижение $\approx 11\%$), достигнув требуемого органосохраняющего эффекта. При этом покрытие PTV осталось стабильным ($D_{95} = 94,9\%$), а качество плана, оцененное γ -анализом, улучшилось с 94% до 95,7%. Этот пример убедительно показывает, что VMAT, за счет гибкости в оптимизации, позволяет достигнуть высокого терапевтического индекса даже в сложных анатомических случаях, что визуально подтверждает рисунок 3.

Полученный результат иллюстрирует преимущества VMAT в условиях сложной анатомии и подтверждает тенденции, выявленные в основном сравнительном анализе.

Пример 3: пациент с опухолью в области носоглотки (Пациент № 3)

Заключительный пример, выполненный методом IMRT, был отобран для демонстрации того, что метод фиксированных полей для особых локализаций головы и шеи, в индивидуальных случаях (как пример, опухоль носоглотки) способен обеспечить высокий уровень органосохраняющего эффекта, где критически важна радиационная защита органов зрения. Первичный план IMRT (7 фиксированных полей) фокусировался на стандартных ограничениях, но демонстрировал высокие начальные дозы на хрусталики глаз ($D_{max} = 7,3$ Гр), зрительные нервы ($D_{mean} = 34,7$ Гр) и правую слюнную железу (25,0 Гр). В процессе данного подхода был существенно повышен вес ограничений на слюнную железу и спинной мозг, а также добавлены ограничения на объем околоушных желез, получающих дозу 25 Гр

(V_{25}). Для повышения точности расчёта был дополнительно уменьшен шаг расчётной сетки и уточнены углы направлений пучков (рисунок 4).

В результате этой многоэтапной оптимизации достигнуты следующие критические улучшения: доза на хрусталики глаз снизилась до 3,15 Гр и 3,07 Гр соответственно, а средние дозы на слюнную железу были снижены до минимальных значений: 1,07 Гр и 0,53 Гр. При этом покрытие PTV улучшилось ($D_{95} = 95\%$), а γ -анализ повысился с 95,2% до 97,9% при расходе MU 1812,5. Таким образом, оптимизация позволила снизить дозовую нагрузку на критические органы зрения и слюнную железу, обеспечив повышенную однородность дозового распределения и высокий уровень γ -анализа, что подтверждает безопасность и эффективность лечения.

Анализ совокупности представленных клинических данных подтверждает, что внедрение технологий динамического облучения позволяет реализовать прецизионный подход в лечении анатомически сложных новообразований области головы и шеи. Переход от стандартного распределения к индивидуализированной модуляции интенсивности обеспечивает достижение критического баланса: формирование терапевтически эффективных дозовых полей в мишенях со сложной конфигурацией при одновременном градиентном щажении слюнных желез и структур центральной нервной системы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Лечение опухолей головы и шеи является одной из наиболее сложных задач в радиологической онкологии, поскольку требует достижения высокой терапевтической дозы в целевом объеме при одновременном обеспечении максимальной радиационной защиты критически важных органов риска.

ются более высокой степенью свободы оптимизации дозового распределения при дуговой терапии, что позволяет формировать более компактные высокодозные области вокруг целевого объема.

Тем не менее, полученные результаты подчеркивают, что дозиметрическое преимущество любого метода не является автоматическим. Представленные клинические примеры показывают, что многоступенчатое, целенаправленное улучшение плана критически необходимо для перевода субоптимальных планов в клинически безопасные. Так, в ряде случаев (Примеры 2 и 3) она была необходима для снижения D_{max} на спинной мозг с неприемлемых 48,5 Гр до безопасных значений. Случай Пациента № 3, выполненный на IMRT, демонстрирует, что даже при более сложной логистике, тщательная оптимизация позволяет достичь исключительного органосохраняющего эффекта для чувствительных структур, таких как хрусталики глаз снижены до 3,15 Гр и 3,07 Гр, а средние дозы на слюнные железы – до 1,07 Гр и 0,53 Гр. Общий высокий уровень γ -анализа (> 94%) во всех оптимизированных планах, независимо от методики, подтверждает их высокое качество и точность доставки, несмотря на небольшой объем выборки ($N = 7$), который ограничивает возможность широкой статистической экстраполяции. Следует учитывать, что включенная в анализ группа пациентов характеризуется клинической неоднородностью, поскольку в исследование вошли случаи с различными локализациями опухолей и различными уровнями предписанной дозы. В связи с этим объединенный анализ дозовых параметров по органам риска следует рассматривать как предварительную оценку общих тенденций распределения дозы при использовании техник IMRT и VMAT. Более точная оценка различий между методами планирования требует дальнейших исследований на клинически более однородных группах пациентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт Центра ядерной медицины и онкологии города Семей демонстрирует, что грамотные параметры дозового планирования на линейном ускорителе TrueBeam с использованием системы Eclipse позволяют достичь значительных улучшений в качестве планов лучевой терапии при новообразованиях области головы и шеи. При лечении общей предписанной дозой до 70 Гр, планирование выполнялось в строгом соответствии с рекомендациями ICRU Report 83, где целью являлось обеспечение доставки не менее 95% предписанной дозы в 95% объема каждой активной зоны облучения (PTV), при этом за пределами целевых зон доза не превышала 107% от предписанной, а внутри активных зон – не более 110%.

Для критических органов риска максимальные дозы ограничивались: спинной мозг – до 50 Гр, зрительные пути и гортань – до 45 Гр. Целевым ориентиром для слюнных желез было ограничение средней

дозы ≤ 24 Гр. Анализ показал, что существенной разницы в охвате PTV 66 между планами IMRT и VMAT не выявлено, а для PTV 70 значения $D_{98\%}$ составили 65,3 Гр (VMAT) и 65,14 Гр (IMRT), что подтверждает отсутствие статистически значимых различий по ключевым параметрам гомогенности и покрытия целевого объема. В целом, параметры качества дозиметрических планов VMAT сопоставимы с планами IMRT, однако метод VMAT обеспечивает более конформное и однородное дозораспределение, а также тенденцию к снижению дозовой нагрузки на органы риска, включая слюнные железы, полость рта, гортаноглотку, пищевод и щитовидную железу. Это может способствовать улучшению локального контроля и снижению частоты побочных эффектов, таких как мукозит и ксеростомия. Дополнение анализа индивидуальных Δ -показателей подтвердило, что снижение дозовой нагрузки при применении VMAT наблюдается у большинства пациентов и не является случайным эффектом, зависимым от конкретной анатомической ситуации. Это дополнительно указывает на устойчивость наблюдаемой тенденции к снижению дозовой нагрузки при использовании VMAT при лечении опухолей головы и шеи.

Следует отметить, что данное исследование имеет ряд ограничений, включая относительно небольшой размер выборки и преимущественно дозиметрический характер анализа. Для более полной оценки клинической значимости выявленных различий целесообразно проведение дальнейших исследований с расширенной выборкой пациентов и анализом клинических исходов.

Тем не менее полученные результаты позволяют рассматривать метод VMAT как предпочтительный вариант лучевой терапии при лечении опухолей головы и шеи в условиях Центра ядерной медицины и онкологии области Абай, поскольку он обеспечивает более благоприятные показатели конформности и гомогенности дозового распределения при эффективном сохранении органов риска. Оптимизация параметров планирования на платформе TrueBeam выступает гарантом не только локорегионарного контроля над опухолью, но и существенного снижения риска инвалидирующих лучевых реакций, что является фундаментальным требованием современной радиационной онкологии.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ouyang Z., Shen Z.L., Murray E. [et al.] Evaluation of auto planning in IMRT and VMAT for head and neck cancer // *J. Appl. Clin. Med. Phys.* – 2019. – Vol. 20, No. 7. – P. 39–47.
2. Szalkowski G., Xu X., Das S., Yap P.-T., Lian J. Automatic treatment planning for radiotherapy: a cross-modality and protocol study // *Adv. Radiat. Oncol.* – 2024. – Vol. 9, No. 12. – Art. 101649.
3. Nanda S., Parida S., Ahirwar M.K. A dosimetric comparison of volumetric modulated arc therapy and IMRT for

- cochlea sparing radiation therapy in locally advanced nasopharyngeal cancer // J. Med. Phys. – 2023. – Vol. 48, No. 3. – P. 248–251.
4. Hamatani N., Sumida I., Seo Y., Isohashi F., Tamari K., Ogawa K. Three-dimensional dose prediction and validation with the radiobiological gamma index based on a relative seriality model for head and neck IMRT // J. Radiat. Res. – 2017. – Vol. 58, No. 5. – P. 701–709.
 5. Rawal T., Sharma N., Gajraj V.K., Meena R., Thanvi S., Singh G., Jakhar S.L., Kumar H.S. Comparative dosimetric analysis of IMRT and VMAT in head and neck cancers // Asian Pac. J. Cancer Care. – 2024. – Vol. 9, No. 1. – P. 77–80.
 6. Bera S., Choudhury D., Roy S., Mukhopadhyay P., Sarkar S. Development of prediction model for mean parotid dose of HNC undergoing radiotherapy: a single institutional study // J. Med. Phys. – 2023. – Vol. 48, No. 3. – P. 274–280.
 7. Nowicka Z., Tomasik B., Papis-Ubych A. [et al.] Radiation-induced hypothyroidism in patients with oropharyngeal cancer treated with IMRT: independent and external validation of five NTCP models // Cancers (Basel). – 2020. – Vol. 12, No. 9. – Art. 2716.
 8. Rawal T., Sharma N., Gajraj V.K. [et al.] Comparative dosimetric analysis of IMRT and VMAT in head and neck cancers // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. – 2024. – P. 19–22.
 9. Bhide S.A., Nutting C.M. Advances in radiotherapy for head and neck cancer // Oral Oncol. – 2020. – Vol. 111. – Art. 104915.
 10. Fokdal L., Grau C., Høyer M., Bentzen S. M. Impact of adaptive radiotherapy in head and neck cancer: a review // Acta Oncol. – 2021. – Vol. 60, No. 8. – P. 1013–1022.
 11. Xu J., Lin S., Huang M. Clinical implementation of radiobiological γ -index for head and neck IMRT QA // Phys. Med. Biol. – 2022. – Vol. 67, No. 10. – Art. 105012.
 12. Kunkler I. H., Robinson M., McIntyre J. Review of VMAT in head and neck cancer: dosimetric and clinical outcomes // Br. J. Radiol. – 2023. – Vol. 96. – Art. 1143.
 13. International Atomic Energy Agency. Accuracy Requirements and Uncertainties in Radiotherapy. Human Health Series No. 31. Vienna: IAEA, 2016.
 14. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Safety Standards Series No. SSG-46. Vienna: IAEA, 2018.
 15. International Atomic Energy Agency. Institutions for Radiotherapy: Recommendations for the Development of a General Plan and Conceptual Design. STI/PUB/1645. Vienna: IAEA, 2015.

БАС ЖӘНЕ МОЙЫН ІСІКТЕРІ ҮШІН СӘУЛЕЛІ ТЕРАПИЯНЫҢ ДОЗАЛЫҚ ЖОСПАРЛАУ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

**Н. А. Елемесова, С. З. Танатаров, М. Т. Идинов, Л. Б. Кенжина*, Б. Ж. Атангаева,
С. М. Айтқалиев, А. Д. Алибекова, А. Д. Тусупова, А. Д. Мергенбаева, Н. Ю. Карнакова**

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

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

Зерттеу Абай облысының Ядролық медицина және онкология орталығының (Семей қ.) базасында жүргізілді және бас пен мойын ісіктері бар науқастарда сәулелік терапияны дозалық жоспарлау параметрлерін сандық бағалау мен оңтайландыруға арналған. Ретроспективті талдауға 2024 жылы ем қабылдаған жеті науқас ($N = 7$) енгізілді, олар үшін Eclipse жоспарлау жүйесінде TrueBeam сызықтық үдеткішінде сәулелік терапияның сәуле қарқындылығы модуляцияланған әдісі (Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT) және көлемдік-модуляцияланған дозалық сәулелік терапия (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) қолданылып жоспарлар жасалды. Зерттеудің мақсаты негізгі дозиметриялық метрикаларды және дозаны жеткізудің логистикалық тиімділігін талдау арқылы жоспарлардың сапасын салыстырмалы физика-дозиметриялық бағалау болды. Жүргізілген талдау екі әдіс үшін де жоспарланған мақсатты көлемнің (PTV) жабылу деңгейі ұқсас екенін, алайда қауіпті ағзаларға түсетін дозалық жүктеменің таралуында клиникалық тұрғыдан маңызды айырмашылықтар бар екенін көрсетті. VMAT қолдану кезінде құлақмаңы сілекей бездеріне түсетін орташа доза IMRT-мен салыстырғанда 4,65 Гр-ге төмендеді ($19,60 \pm 7,97$ Гр және $24,26 \pm 3,75$ Гр), бұл 25 Гр шекті деңгейінен төмен мәндерге қол жеткізуге мүмкіндік беріп, олардың функционалдық белсенділігін сақтауға ықпал етті. Жұлынға түсетін орташа доза да VMAT кезінде төмен болды ($37,96 \pm 4,16$ Гр және $41,37 \pm 1,94$ Гр), бұл емдеудің радиациялық қауіпсіздігін арттырды. Логистикалық талдау нәтижелері VMAT-тың артықшылығын көрсетті: мониторлық бірліктер саны мен дозаны жеткізу уақыты IMRT-мен салыстырғанда 60%-дан астам қысқарды, бұл қауіпті ағзаларға сәулелік жүктемені төмендетуге ықпал етеді және аталған әдісті клиникалық практикада қолданудың орындылығын дәлелдейді.

Түйін сөздер: бас және мойын ісіктері, сәулелі терапия, дозалық жоспарлау, IMRT, VMAT, TrueBeam сызықтық үдеткіші, қауіп төндіретін ағзалар, физика-дозиметриялық талдау.

OPTIMIZATION OF DOSIMETRIC PLANNING PARAMETERS
FOR RADIOTHERAPY OF HEAD AND NECK TUMORS

N. A. Elemessova, S. Z. Tanatarov, M. T. Idinov, L. B. Kenzhina*, B. Zh. Atantayeva,
S. M. Aitkaliyev, A. D. Alibekova, A. D. Tussupova, A. D. Mergenbayeva, N. Yu. Karnakova

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

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

The study was conducted at the Center of Nuclear Medicine and Oncology of the Abai Region (Semey, Kazakhstan) and was aimed at the quantitative evaluation and optimization of dose planning parameters in patients with head and neck tumors. A retrospective analysis included seven patients (N = 7) treated in 2024, for whom radiotherapy plans were generated using intensity-modulated radiation therapy (Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT) and volumetric modulated arc therapy (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) on a TrueBeam linear accelerator within the Eclipse treatment planning system. The objective of the study was a comparative physical-dosimetric assessment of plan quality with analysis of key dosimetric metrics and logistical efficiency of dose delivery. The analysis demonstrated comparable coverage of the planning target volume (PTV) for both techniques, while clinically significant differences were observed in dose distribution to organs at risk. The use of VMAT resulted in a reduction of the mean dose to the parotid glands by 4,65 Gy compared with IMRT ($19,60 \pm 7,97$ Gy vs. $24,26 \pm 3,75$ Gy), achieving values below the critical threshold of 25 Gy and contributing to preservation of glandular function. The mean dose to the spinal cord was also lower with VMAT ($37,96 \pm 4,16$ Gy vs. $41,37 \pm 1,94$ Gy), thereby enhancing radiation safety of treatment. Logistical analysis revealed a clear advantage of VMAT, characterized by more than a 60% reduction in monitor units and dose delivery time compared with IMRT, which contributes to decreased radiation exposure of organs at risk and supports the feasibility of VMAT as a preferred technique in routine clinical practice.

Keywords: *head and neck tumors, radiotherapy, dose planning, IMRT, VMAT, TrueBeam linear accelerator, organs at risk, physical-dosimetric analysis.*