

ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА: АНАЛИЗ КЛИНИЧЕСКИХ ПЛАНОВ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИЙ ГОЛОВЫ И ШЕИ И МАЛОГО ТАЗА

Т.Ж. ЖАНТАСОВА^{1,2}, К.Д. ДАТБАЕВ²

¹НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», Астана, Республика Казахстан;

²ТОО «Национальный научный онкологический центр», Астана, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

Актуальность: Дозиметрическое планирование при лучевой терапии пациентов с опухолями головы и шеи, а также малого таза осложняется анатомической сложностью и близким расположением органов риска (Organ at Risk, OARs) к целевому объему. Это требует применения современных методов оптимизации для повышения качества планов лечения.

Цель исследования – провести сравнительный анализ дозиметрических планов лучевой терапии с модуляцией интенсивности по объему с использованием и без использования мультикритериальной оптимизации у пациентов с опухолями головы и шеи и малого таза, оценив показатели покрытия и дозовую нагрузку на органы риска.

Методы: В исследование были включены 34 пациента, из них 17 с опухолями головы и шеи и 17 с опухолями малого таза. Для каждого случая были созданы два варианта плана: с применением мультикритериальной оптимизации (Multi-Criteria Optimization, MCO) и без MCO. Планирование выполнялось в системе Eclipse (Varian Medical Systems, США). Сравнительный анализ проводился по показателям покрытия (Planning Target Volume, PTV) (D95%, D2%) и дозовой нагрузки на OARs.

Результаты: Использование MCO позволило достичь более равномерного и полного PTV при одновременном снижении дозовой нагрузки на OARs. Наибольший эффект был отмечен в планах пациентов с опухолями головы и шеи, где анатомическая близость OARs затрудняет стандартное планирование.

Заключение: MCO является эффективным инструментом в улучшении качества дозиметрического планирования, особенно в случаях высокой сложности анатомического расположения, и может быть рекомендована для клинической практики при планировании лучевой терапии.

Ключевые слова: мультикритериальная оптимизация (MCO), лучевая терапия с модуляцией интенсивности по объему (VMAT), дозиметрия, дозовая нагрузка на органы риска, голова и шея, малый таз.

Введение: Лучевая терапия с модуляцией интенсивности по объему (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) в последние годы стала одним из ключевых методов современной лучевой терапии, позволяя создавать высококонформные дозные распределения за счет одновременной модуляции скорости вращения гентри, положения коллиматорных лепестков и дозовой скорости пучка. Применение VMAT обеспечивает высокую эффективность лечения как по времени облучения, так и по качеству дозиметрических характеристик, что особенно важно при лечении сложных анатомических локализаций [1, 2].

Процесс планирования VMAT, основанный на инверсной оптимизации, требует поиска баланса между планируемым объемом мишени (Planning Target Volume, PTV) и минимизацией дозовой нагрузки на органы риска. В традиционном подходе этот процесс часто занимает значительное время и требует многократных итераций для достижения приемлемого компромисса [3].

Мультикритериальная оптимизация (Multi-Criteria Optimization, MCO) представляет собой современный метод, позволяющий в интерактивном режиме исследовать множество решений, формирующих фронт Парето. MCO обеспечивает возможность быстрой навигации

между планами с различными приоритетами по PTV и OAR, что сокращает общее время планирования и повышает воспроизводимость качества итогового плана [4, 5].

Эффективность MCO может различаться в зависимости от анатомической области. В локализациях головы и шеи высокая плотность функционально значимых OAR (спинной мозг, ствол мозга, околоушные железы, зрительный аппарат) создает сложные условия для оптимизации. В области малого таза при планировании VMAT также требуется учитывать чувствительные структуры (прямая кишка, мочевой пузырь, тонкий кишечник), однако их пространственное расположение и геометрия отличаются, что может влиять на потенциал выигрыша от MCO [6].

Цель исследования – провести сравнительный анализ дозиметрических планов лучевой терапии с модуляцией интенсивности по объему с использованием и без использования мультикритериальной оптимизации у пациентов с опухолями головы и шеи и малого таза, оценив показатели покрытия и дозовую нагрузку на органы риска.

Материалы и методы: В исследование были включены дозиметрические планы 34 пациентов, соответствующих следующим критериям включения:

– Возраст >18 лет.

– Диагноз злокачественной опухоли в области головы и шеи или малого таза, требующий дистанционной лучевой терапии.

– Наличие полного объёма данных для дозиметрического анализа (КТ-планирование, контурирование PTV и OAR).

Включенные в исследование пациенты были разделены на две группы по локализациям:

Группа 1 – область головы и шеи: 17 пациентов, у которых опухоли локализовались в гортани, носоглотке, ротоглотке. Основные OARs: спинной мозг, зрительный аппарат, слюнные железы, мозг.

Группа 2 – область малого таза: 17 пациентов, у которых опухоли локализовались в шейке матки, простате, прямой кишке. Основные OARs: мочевой пузырь, прямая кишка, бедренные головки, тонкий кишечник.

Планирование выполнялось в системе Eclipse v18.00.10 (Varian Medical Systems, Palo Alto, Калифорния, США) с использованием техники VMAT. Для каждого пациента создавались два варианта плана:

Первый вариант – традиционный инверсный план без применения МСО. Оптимизация осуществлялась вручную с последовательной настройкой приоритетов и итерациями для достижения клинических целей.

Второй вариант – план с применением МСО, которая представляет собой метод планирования, при котором оптимизация выполняется с учётом нескольких конкурирующих критериев одновременно, что позволяет находить оптимальные по Парето решения – такие планы, где улучшение одного параметра невозможно без ухудшения другого. В настоящем исследовании использован апостериорный подход, реализованный в системе Eclipse v18.00.10, при котором создается набор оптимальных по Парето планов, а затем проводится интерактивная навигация по фронту Парето для выбора клинически приемлемого компромисса между достижением необходимого уровня покрытия PTV и снижением дозовой нагрузки на OAR. При навигации минимальные и максимальные значения каждого критерия отображались в связке с распределением дозы и гистограммой «доза-объём» (Dose-Volume Histogram, DVH), что позволяло в режиме близком к реальному времени оценивать влияние изменений на качество плана [7].

Расчёт дозы производили с использованием алгоритмов AAA и Acuros XB при энергии пучка 6 MV.

Оценка качества планов включала анализ следующих параметров:

Для PTV: минимальная доза, покрывающая 95% объёма (D95%), и максимальная доза на 2% объёма (D2%).

Для OAR: средняя доза (Dmean), максимальная доза (Dmax), а также соблюдение рекомендуемых дозовых ограничений в соответствии с протоколами QUANTEC 2010 и RTOG 0614.

Сравнение дозиметрических показателей между планами с МСО и без МСО выполнялось отдельно для каждой группы локализаций.

Результаты: В ходе исследования были проведены сравнительные анализы дозиметрических параметров для клинических планов облучения.

Область головы и шеи: Для локализации гортани (Larynx) применение МСО позволило повысить покрытие целевых объемов. Для PTV 54/1.8 Гр показатель объёмного покрытия V95% увеличился с 98,74% до 99,42%, а для PTV 60/2 Гр – с 93,56% до 94,65%. При этом отмечено повышение D2% с 101,66% до 104,55% и рост максимальной дозы с 103,01% до 109,64%, что указывает на перераспределение дозы в пользу высокодозных областей. Значительно улучшилась защита критических структур центральной нервной системы: максимальная доза на спинной мозг снизилась с 40,78 Гр до 33,77 Гр, а на PRV спинного мозга – с 42,48 Гр до 37,01 Гр. Снизилась средняя доза на пищевод (с 10,54 Гр до 9,88 Гр) и полость рта (с 29,54 Гр до 27,94 Гр), а превышение дозы V60 Гр для нижней челюсти было полностью исключено (0,10%→0,00%). Дозовые показатели для глаз, хрусталиков, зрительных нервов и улиток изменились незначительно. При этом отмечено незначительное увеличение средней дозы околушных слюнных желез, что требует дальнейшего клинического анализа [8] (Рисунок 1).

Анализ DVH-кривых для плана облучения носоглотки (Рисунок 2 и 3) показал высокое качество покрытия PTV при эффективной защите OARs. Кривая PTV (красная линия) формирует выраженную «высокодозовую полку» с резким спадом, что указывает на оптимальную конформность и однородность распределения дозы: большая часть объёма PTV получает дозы, близкие к предписанной, а переход к низким дозам происходит стремительно и без выраженных хвостов. Значения D95% и D2% сохраняются в клинически допустимых пределах, подтверждая надёжное покрытие опухолевого объёма.

Кривые OARs демонстрируют характерное снижение доз, соответствующее анатомическим особенностям носоглоточной локализации. Наиболее выраженное снижение дозовой нагрузки наблюдается на улитки: средняя доза уменьшилась почти в два раза по сравнению с исходным планом. Значимое улучшение отмечается и для ствола мозга, где максимальная доза снижена более чем на 3 Gy. Для хиазмы максимальная доза уменьшена более чем на 1 Gy, что возвращает показатель в более благоприятный диапазон. Существенно снижены значения на хрусталики обоих глаз – почти в два раза уменьшены высокодозовые параметры. Эти изменения показывают, что при использовании МСО происходит заметное снижение дозы на наиболее чувствительные структуры.

На Рисунке 4 представлено сравнение усредненных значений дозовых параметров OARs для области головы и шеи при планировании с применением МСО и без МСО. Для наглядности использована столбчатая диаграмма: синие столбцы соответствуют планам без МСО, а оранжевые – планам с МСО.

Анализ показал, что внедрение МСО позволило снизить дозовую нагрузку на все OAR при сохранении клинически значимого покрытия планируемого объёма. Средние значения дозовых показателей продемонстрировали улучшение дозного распределения, особенно в отношении структур, наиболее чувствительных к воздействию радиации.

Overview		Plan			■ Larynx		▲ Larynx MCO			
Clinical goals: All Plans		Total Dose			60.000 Gy		60.000 Gy			
		Clinical Goal Summary			3	0	26	2	0	27
● PTV_54/1.8Gy	P1	V 51.30 Gy \geq 95.0 %			98.74 %			99.42 %		
	P1	D 2.0 % $<$ 57.78 Gy			55.27 Gy			55.67 Gy		
	P1	Dmax \leq 59.40 Gy			60.82 Gy			59.26 Gy		
● PTV_60/2Gy	P1	V 95.0 % \geq 95.0 %			93.56 %			94.65 %		
	P1	D 2.0 % $<$ 107.0 %			101.66 %			104.55 %		
	P1	Dmax \leq 110.0 %			103.01 %			109.64 %		
● PTV_opti	P1	V 51.30 Gy \geq 95.0 %			99.55 %			99.81 %		
	P1	D 2.0 % $<$ 57.78 Gy			55.09 Gy			55.50 Gy		
	P1	Dmax \leq 59.40 Gy			58.17 Gy			58.23 Gy		
● Cochlea_L	P2	Dmean $<$ 45.00 Gy			1.97 Gy			1.98 Gy		
	P2	V 55.00 Gy $<$ 5.0 %			0.00 %			0.00 %		
● Cochlea_R	P2	Dmean $<$ 45.00 Gy			2.37 Gy			2.39 Gy		
	P2	V 55.00 Gy $<$ 5.0 %			0.00 %			0.00 %		
● Esophagus	P2	Dmean $<$ 35.00 Gy			10.54 Gy			9.88 Gy		
	P2	Dmean $<$ 35.00 Gy			1.05 Gy			1.03 Gy		
● Eye_L	P2	Dmean $<$ 50.00 Gy			1.63 Gy			1.62 Gy		
	P2	Dmean $<$ 50.00 Gy			1.04 Gy			1.03 Gy		
● Eye_R	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy			1.71 Gy			1.68 Gy		
	P2	D 0.03 cm ³ $<$ 6.00 Gy			1.03 Gy			1.01 Gy		
● Lens_L	P2	D 0.03 cm ³ $<$ 6.00 Gy			1.00 Gy			0.98 Gy		
	P2	V 56.00 Gy $<$ 30.0 %			0.10 %			0.00 %		
● Lens_R	P2	V 60.00 Gy $<$ 14.0 %			0.00 %			0.00 %		
	P2	Dmax $<$ 54.00 Gy			1.25 Gy			1.25 Gy		
● Mandible	P2	D 0.03 cm ³ $<$ 6.00 Gy			1.47 Gy			1.48 Gy		
	P2	V 60.00 Gy $<$ 14.0 %			29.54 Gy			27.94 Gy		
● OpticNerve_L	P2	Dmax $<$ 54.00 Gy			37.84 Gy			38.94 Gy		
	P2	D 0.03 cm ³ $<$ 6.00 Gy			31.00 Gy			33.49 Gy		
● OpticNerve_R	P2	Dmax $<$ 54.00 Gy			42.48 Gy			37.01 Gy		
	P2	D 0.03 cm ³ $<$ 6.00 Gy			40.78 Gy			33.77 Gy		
● OralCavity	P2	Dmean $<$ 30.00 Gy								
	P2	Dmean $<$ 26.00 Gy								
● Parotids	P2	Dmean $<$ 26.00 Gy								
	P2	Dmean $<$ 50.00 Gy								
● PharynxConst	P2	Dmean $<$ 50.00 Gy								
	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy								
● PRV_spinal cord	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy								
	P2	Dmax $<$ 45.00 Gy								

Легенда: PTV_54/1.8Gy – Планируемый объем мишени для дозы 54 Гр; PTV_60/2Gy – Планируемый объем мишени для дозы 60 Гр; PTV_opti – Оптимизированный планируемый объем мишени; Cochlea_L – Улитка левая; Cochlea_R – Улитка правая; Esophagus – Пищевод; Eye_L – Левый глаз; Eye_R – Правый глаз; Lens_L – Хрусталик левый; Lens_R – Хрусталик правый; Mandible – Нижняя челюсть; OpticNerve_L – Левый зрительный нерв; OpticNerve_R – Правый зрительный нерв; OralCavity – Полость рта; Parotids – Околоушные слюнные железы; PharynxConst – Констрикторы глотки; PRV_spinal cord – Планируемый объем органа риска спинного мозга; SpinalCord – Спинной мозг

Рисунок 1 – Выполнение клинических ограничений для целевого объема и органов риска с мультикритериальной оптимизацией (МКО) и без МКО для плана облучения гортани (Larynx) с фракционированием 54 Гр/1,8 Гр и 60 Гр/2 Гр

Overview		Plan			■ Nasopharynx		▲ MCO			
Clinical goals: All Plans		Total Dose			54.000 Gy		54.000 Gy			
		Clinical Goal Summary			1	0	22	0	0	23
● PTV 54Gy/2.0gy/27fr	P1	D 2.0 % $<$ 57.78 Gy			54.94 Gy			54.90 Gy		
	P1	D 95.0 % \geq 51.30 Gy			53.08 Gy			53.35 Gy		
	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy			55.79 Gy			55.16 Gy		
● Brain	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy			43.67 Gy			40.39 Gy		
	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy			22.94 Gy			14.34 Gy		
● BrainStem	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy			19.12 Gy			10.70 Gy		
	P2	Dmean $<$ 45.00 Gy			19.35 Gy			10.30 Gy		
● Chiasm	P2	Dmax $<$ 54.00 Gy			16.59 Gy			8.55 Gy		
	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy			54.57 Gy			53.13 Gy		
● Cochlea_L	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy			17.88 Gy			15.85 Gy		
	P2	Dmean $<$ 35.00 Gy			17.20 Gy			5.12 Gy		
● Cochlea_R	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy			19.79 Gy			7.11 Gy		
	P2	Dmean $<$ 35.00 Gy			8.37 Gy			2.69 Gy		
● Eye_L	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy			19.79 Gy			14.34 Gy		
	P2	Dmean $<$ 50.00 Gy			17.88 Gy			10.70 Gy		
● Eye_R	P2	Dmax $<$ 50.00 Gy			17.20 Gy			5.12 Gy		
	P2	Dmean $<$ 35.00 Gy			5.80 Gy			2.13 Gy		
● Lens_L	P2	D 0.03 cm ³ $<$ 10.00 Gy			7.50 Gy			3.65 Gy		
	P2	D 0.03 cm ³ $<$ 10.00 Gy			53.44 Gy			51.22 Gy		
● Lens_R	P2	Dmax $<$ 54.00 Gy			46.77 Gy			43.35 Gy		
	P2	Dmax $<$ 54.00 Gy			48.92 Gy			47.30 Gy		
● OpticNerve_L	P2	Dmax $<$ 54.00 Gy			55.05 Gy			55.05 Gy		
	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy			55.28 Gy			54.54 Gy		
● OpticNerve_R	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy			55.17 Gy			54.57 Gy		
	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy			1.05 Gy			1.09 Gy		
● PRV_brainstem	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy			0.95 Gy			0.97 Gy		
	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy								
● PRV_chiasm	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy								
	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy								
● PRV_OpticNerve_L	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy								
	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy								
● PRV_OpticNerve_R	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy								
	P2	Dmax $<$ 60.00 Gy								
● PRV_spinal cord	P2	Dmax $<$ 45.00 Gy								
	P2	Dmax $<$ 45.00 Gy								
● SpinalCord	P2	Dmax $<$ 45.00 Gy								

Легенда: PTV 54Gy/2.0Gy/27fr – Планируемый объем мишени для дозы 54 Гр; Brain – Головной мозг; BrainStem – Ствол мозга; Chiasm – Хиазма; Cochlea_L – Улитка левая; Cochlea_R – Улитка правая; Eye_L – Левый глаз; Eye_R – Правый глаз; Lens_L – Хрусталик левый; Lens_R – Хрусталик правый; OpticNerve_L – Левый зрительный нерв; OpticNerve_R – Правый зрительный нерв; PRV_brainstem – Планируемый объем органа риска ствола мозга; PRV_chiasm – Планируемый объем органа риска хиазмы; PRV_OpticNerve_L – Планируемый объем органа риска левого зрительного нерва; PRV_OpticNerve_R – Планируемый объем органа риска правого зрительного нерва; PRV_spinal cord – Планируемый объем органа риска спинного мозга; SpinalCord – Спинной мозг

Рисунок 2 – Выполнение клинических ограничений для целевого объема и органов риска с использованием мультикритериальной оптимизации (МКО) и без МКО для плана облучения носоглотки (Nasopharynx) при фракционировании 54 Гр/2 Гр

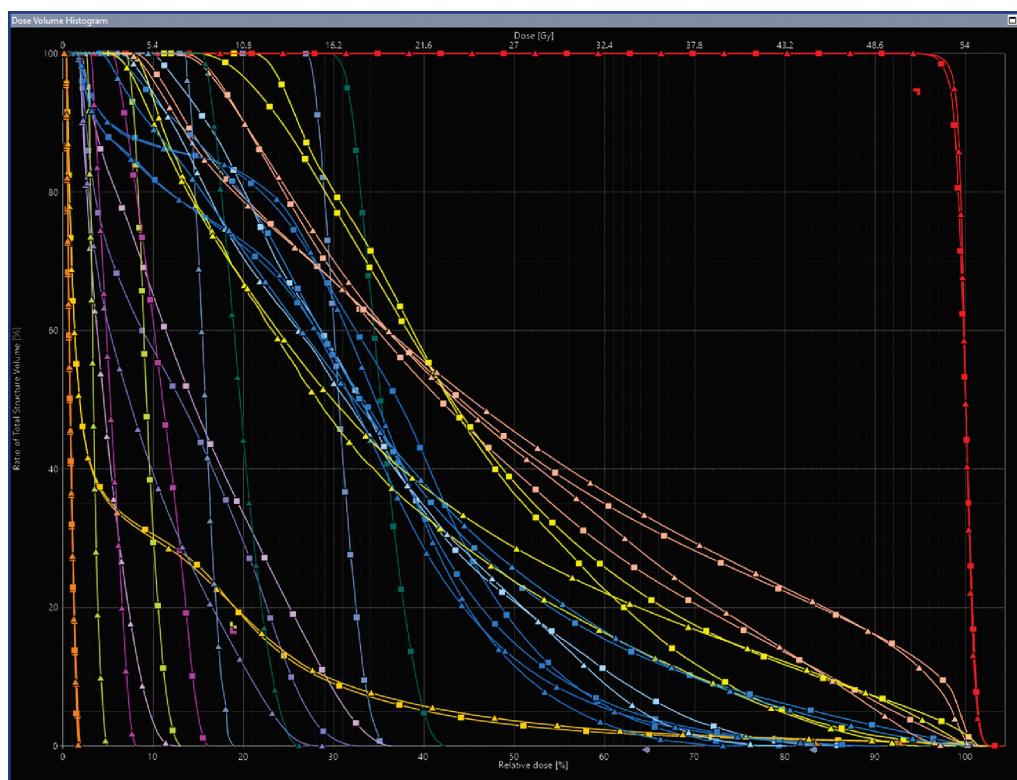
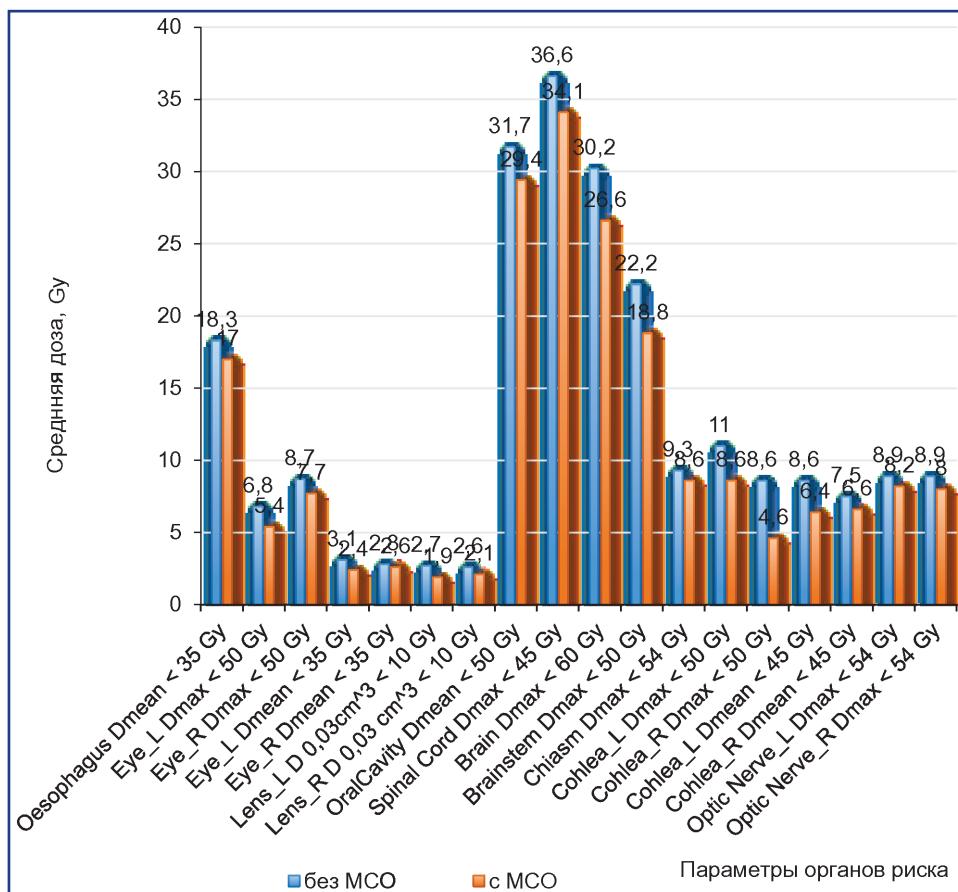


Рисунок 3 – DVH-кривые для плана облучения носоглотки (Nasopharynx), демонстрирующие различия в дозовом распределении между планами с МСО и без МСО



Легенда: *Oesophagus* – Пищевод; *Eye_L* – Левый глаз; *Eye_R* – Правый глаз; *Lens_L* – Хрусталик левый; *Lens_R* – Хрусталик правый; *OralCavity* – Полосы рта; *SpinalCord* – Спинной мозг; *Brain* – Головной мозг; *Brainstem* – Ствол мозга; *Chiasm* – Хиазма; *Cochlea_L* – Улитка левая; *Cochlea_R* – Улитка правая; *OpticNerve_L* – Левый зрительный нерв; *OpticNerve_R* – Правый зрительный нерв

Рисунок 4 – Усредненные значения дозовых параметров органов риска области головы и шеи при планировании с мультикритериальной оптимизацией (МСО) и без МСО (столбчатая диаграмма)

Наиболее выраженное снижение дозы наблюдалось для:

- ствола мозга – D_{max} уменьшилась с 22,2 Гр до 18,8 Гр;
- спинного мозга – D_{max} снизилась с 36,6 Гр до 34,1 Гр;
- улитки – D_{max} уменьшилась с 8,6 Гр до 4,6 Гр и с 11 Гр до 8,6 Гр;

– головного мозга – D_{max} снизилась с 30,2 Гр до 26,6 Гр.

Также отмечено снижение дозовых значений для зрительных органов:

- для глазных яблок – максимальная доза на глаза снизилась в среднем на 1-1,4 Гр;
- для хрусталиков – D_{0,03cm³} снизилась с 2,7 до 1,9 Гр и с 2,6 до 2,1 Гр, соответственно;
- для зрительных нервов и хиазмы наблюдается умеренное снижение D_{max} примерно на 0,7-0,9 Гр.

В целом, полученные результаты подтверждают, что применение МСО позволяет достоверно уменьшить до-

зовую нагрузку на ОАР без ухудшения показателей РТВ, что свидетельствует о повышении качества и сбалансированности дозиметрического плана.

На Рисунке 5 представлены относительные значения дозы для планируемого объёма (РТВ), выраженные в долях от предписанной дозы. Как видно, при использовании МСО показатели D95% и D2% практически идентичны планам без оптимизации: D95% составила 0,97 против 0,98; D2% – 1,02 против 1,03. Это говорит о том, что покрытие мишени осталось стабильным и клинически эквивалентным, то есть качество облучения РТВ не ухудшилось. При этом лёгкое снижение D2% свидетельствует о небольшом улучшении однородности дозного распределения внутри мишени, что является положительным результатом. Таким образом, МСО позволила уменьшить дозу на ОАР, при сохранении высоких параметров покрытия и однородности дозы в РТВ.

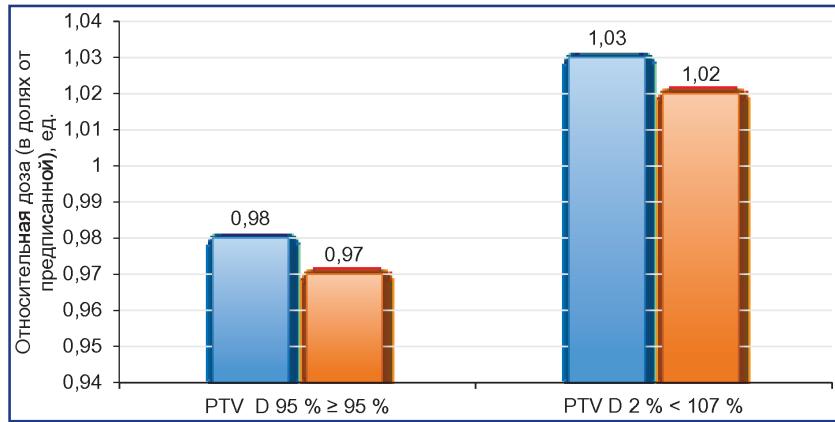


Рисунок 5 – Относительные значения дозы (в долях от предписанной дозы, %) для планируемого объёма мишени (РТВ) при использовании мультикритериальной оптимизацией (МСО) и без МСО. Столбцы синего цвета отражают показатели планов без МСО, столбцы оранжевого цвета – планов с МСО

На Рисунке 6 показана величина улучшения и ухудшения дозовых параметров при применении МСО. Улучшение и ухудшение дозовых параметров рассчитывалось как относительное изменение значения параметра по сравнению с планом без МСО согласно формуле, приведенной ниже.

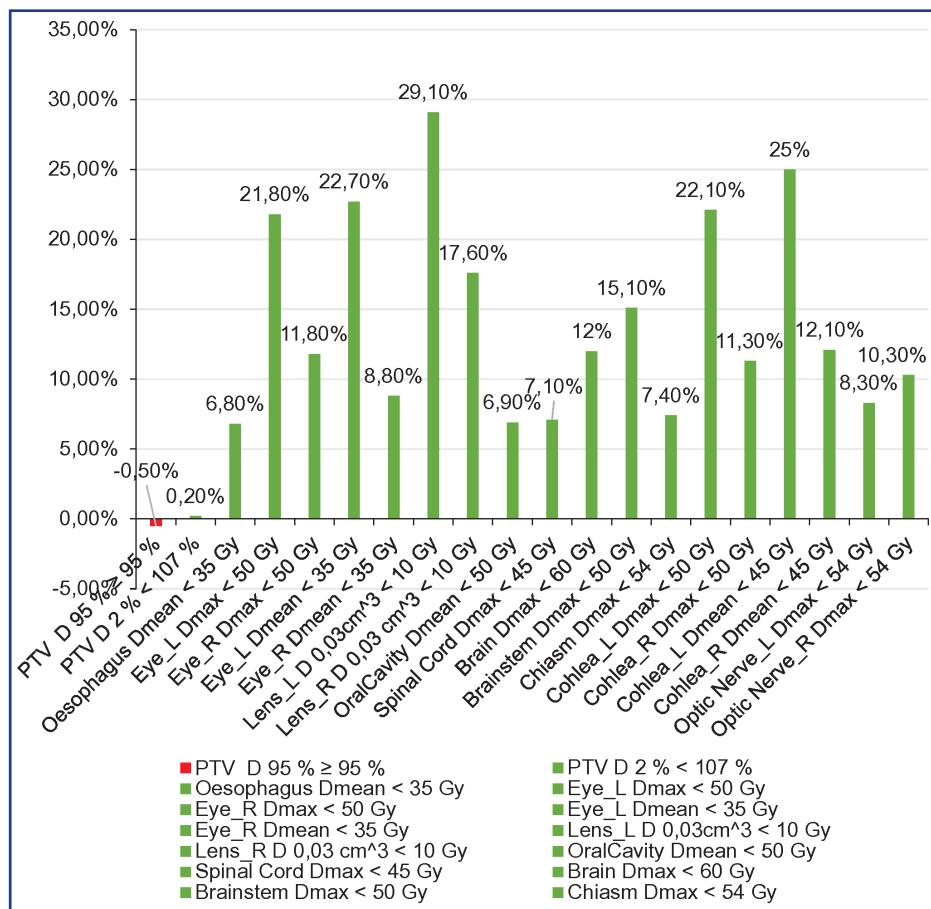
$$\Delta(\%) = \frac{D_{\text{без МСО}} - D_{\text{МСО}}}{D_{\text{без МСО}}} \cdot 100\%$$

где D без МСО означает дозу без применения МСО, а D_{МСО} – дозу с применением МСО. Положительные значения на Рисунке 6. Положительные значения отражают улучшение показателей – то есть снижение дозовой нагрузки на ОАРs, а отрицательные значения соответствуют небольшому ухудшению, связанному с уменьшением РТВ; значение 0% соответствует отсутствию изменений между двумя вариантами плана. Для интерпретации величины изменений использована следующая классификация: 0-5% – минимальное изменение; 5-15% – умеренное изменение; >15% – выраженное, клинически значимое изменение дозовых параметров.

Для большинства ОАР наблюдается выраженное улучшение, проявляющееся в снижении дозовой нагрузки по сравнению с базовыми планами. Наибольший эффект отмечен для хрусталиков (до 29%), улиток (до 22%), глаз

(до 22%), а также для ствола мозга и головного мозга, где улучшение составило 12-15%. Для спинного мозга и пищевода снижение дозы достигло около 7%, что также имеет клиническую значимость. При этом дозовые параметры для РТВ остались практически неизменными: показатель D95% ухудшился лишь на 0,5%, а D2% улучшился на 0,2%. Таким образом, применение МСО позволяет существенно снизить дозовую нагрузку на ОАР при сохранении качества покрытия мишени, обеспечивая более сбалансированное и безопасное дозиметрическое планирование.

Область малого таза: Анализ DVH показывает, что покрытие РТВ в обоих планах остаётся сопоставимым, при этом МСО-план демонстрирует более выраженную конформность и более крутой дозовый градиент за пределами мишени, что свидетельствует о более эффективном ограничении дозы в окружающих тканях. Для органов риска наблюдается систематическое смещение кривых МСО-плана вниз и влево, отражающее снижение интегральной и высокодозовой нагрузки, особенно для структур, расположенных в непосредственной близости к РТВ. Кривые МСО-плана характеризуются более ранним спадом в высокодозовом диапазоне и уменьшенной площадью под кривой, что подтверждает повышение эффективности распределения дозы при сохранении требуемого уровня покрытия мишени.



Легенда: PTV – Планируемый объем мишени; Oesophagus – Пищевод; Eye_L – Левый глаз; Eye_R – Правый глаз; Lens_L – Хрусталик левый; Lens_R – Хрусталик правый; OralCavity – Полость рта; SpinalCord – Спинной мозг; Brain – Головной мозг; BrainStem – Ствол мозга; Chiasm – Хиазма; Cochlea_L – Улитка левая; Cochlea_R – Улитка правая; OpticNerve_L – Левый зрительный нерв; OpticNerve_R – Правый зрительный нерв

Рисунок 6 – Величина улучшения и ухудшения дозовых параметров при применении мультикритериальной оптимизации (%)

Сравнительный анализ числовых параметров согла-сается с визуальными выводами DVH: применение МСО обеспечивает более эффективное соблюдение клинических ограничений по сравнению с планом без МСО. Для целевого объёма (PTV) значения D2% и D95% остались сопоставимыми (51,20/48,81 Гр против 51,23/48,81 Гр), что подтверждает сохранение адекватного покрытия. В то же время для OAR отмечено систематическое снижение дозовой нагрузки: для мочевого пузыря Dmax снизилась с 51,18 Гр до 49,97 Гр, D40% – с 28,98 Гр до 26,03 Гр; для головок бедренных костей снижение Dmax составило с 33,65 Гр до 27,72 Гр (левая) и с 35,92 Гр до 33,50 Гр (правая). Для тонкой кишки максимальная доза уменьшилась с 50,87 Гр до 48,62 Гр. Таким образом, использование МСО позволило существенно сократить высокодозовую нагрузку на OARs без ухудшения PTV (Рисунки 7 и 8).

Для облучения матки с дозой 46 Гр по 2 Гр МСО способствовала сохранению высокого покрытия PTV, при этом объем мочевого пузыря, получающий дозу выше 45 Гр, увеличился, что требует дополнительного мониторинга. Защита конского хвоста и тазобедренных головок оставалась на хорошем уровне, а объемы облучения прямой и тонкой кишки уменьшились, что свидетельствует о преимущественном эффекте МСО в снижении дозовой нагрузки на OARs (Рисунок 9).

На Рисунке 10 представлены усреднённые значе-

ния дозовых параметров для OAR малого таза при планировании с применением и без применения МСО. Полученные результаты показывают, что применение МСО способствует снижению дозовой нагрузки на такие OAR, как мочевой пузырь, его стенки, область конского хвоста, а также шейка и головка бедренной кости, при сохранении приемлемого уровня покрытия мишени.

Как видно из Рисунка 10, применение МСО существенно уменьшает дозу, получаемую значительной частью объёма органа, делая распределение дозы более щадящим. Например, для мочевого пузыря средняя доза, получаемая 35% его объёма, снизилась примерно с 38 до 35,2 Гр. Для стенки мочевого пузыря средняя доза снизилась с 29,5 до 22,7 Гр. Таким образом, применение МСО снижает дозовую нагрузку на все OARs без ухудшения покрытия целевого объёма.

На Рисунке 11 представлены относительные значения доз в долях от предписанной дозы для параметров PTV D95% и PTV D2%. Покрытие мишени (D95%) остаётся практически неизменным – около 97-98% предписанной дозы. При этом максимальная доза (D2%) снижается с 103% до 102% от предписанной дозы. Применение МСО сохраняет однородность и достижение PTV, одновременно снижая зоны передозировки, что положительно отражается на клиническом качестве плана.

Plan		■ Rectum_			▲ Rectum_MCO		
Total Dose		50.000 Gy			50.000 Gy		
Clinical Goal Summary		3	0	18	1	0	20
● PTV_50/2Gy	P1	D 2.0 % ≤ 53.50 Gy	51.20 Gy		51.23 Gy		
	P1	D 95.0 % ≥ 47.50 Gy	48.81 Gy		48.81 Gy		
● Bladder	P2	Dmax < 50.00 Gy	51.18 Gy		49.97 Gy		
	P2	D 40.0 % < 40.00 Gy	28.98 Gy		26.03 Gy		
● BladderWall	P2	V 45.00 Gy < 35.0 %	41.03 %		38.92 %		
	P2	Dmax < 50.00 Gy	30.50 Gy		31.82 Gy		
● CaudaEquina	P2	Dmax < 50.00 Gy	33.65 Gy		27.72 Gy		
	P2	D 40.0 % < 40.00 Gy	19.62 Gy		14.21 Gy		
● FemoralHead_L	P2	V 30.00 Gy < 15.0 %	1.71 %		0.00 %		
	P2	V 50.00 Gy < 10.0 %	0.00 %		0.00 %		
● FemoralHead_R	P2	V 45.00 Gy < 50.0 %	0.00 %		0.00 %		
	P2	Dmax < 50.00 Gy	35.92 Gy		33.50 Gy		
● FemoralHead_R	P2	D 40.0 % < 40.00 Gy	18.56 Gy		16.95 Gy		
	P2	V 30.00 Gy < 15.0 %	3.28 %		1.85 %		
● PRV_CaudaEquina	P2	V 50.00 Gy < 10.0 %	0.00 %		0.00 %		
	P2	V 45.00 Gy < 50.0 %	0.00 %		0.00 %		
● SmallBowel	P2	Dmax < 50.00 Gy	33.49 Gy		33.67 Gy		
	P2	Dmax < 50.00 Gy	50.87 Gy		48.62 Gy		
● SmallBowel	P2	V 45.00 Gy < 195.00 cm ³	2.317 cm ³		0.779 cm ³		
	P2	V 40.00 Gy < 30.0 %	0.53 %		0.40 %		

Легенда: PTV_50/2Gy – Планируемый объем мишени для дозы 50 Гр; Bladder – Мочевой пузырь; Bladder Wall – Стенка мочевого пузыря; Cauda Equina – Конский хвост; Femoral Head_L – Левая головка бедренной кости; Femoral Head_R – Правая головка бедренной кости; PRV_Cauda Equina – Планируемый объем органа риска для конского хвоста; Small Bowel – Тонкая кишка

Рисунок 7 – Выполнение клинических ограничений для целевого объема и органов риска с использованием мультикритериальной оптимизации (МКО) и без МКО для плана облучения прямой кишки (Rectum) при фракционировании 50 Гр/2 Гр

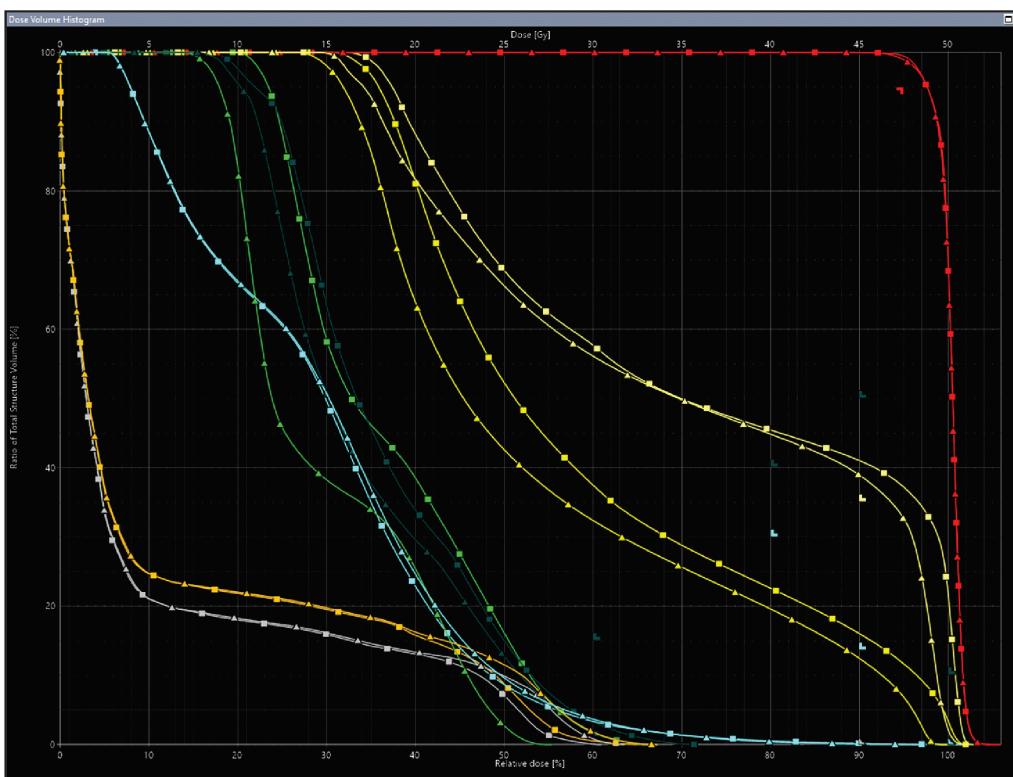


Рисунок 8 – DVH-кривые для плана облучения прямой кишки (Rectum), демонстрирующие различия в дозовом распределении между планами с МКО и без МКО

На Рисунке 12 показаны процентные изменения дозовых параметров при применении МКО. Как видно из графика, наибольшие положительные изменения отмечаются для OAR, в том числе:

- для правой головки бедренной кости по параметру D15%<30 Гр улучшение составило до 33,5%,
- для левой головки бедренной кости по тому же параметру – около 7,9%,

– для области конского хвоста – порядка 7%,
– для стенки мочевого пузыря – 8%.

Это свидетельствует о заметном снижении дозовой нагрузки на костные структуры и органы малого таза, что особенно важно при сохранении функции мочевого пузыря и снижении риска поздних осложнений. Для параметров, характеризующих мишень, наблюдаются минимальные отрицательные изменения (<1%). Это

подтверждает, что качество покрытия целевого объёма остаётся стабильным, несмотря на перераспределение дозы в пользу защиты OARs.

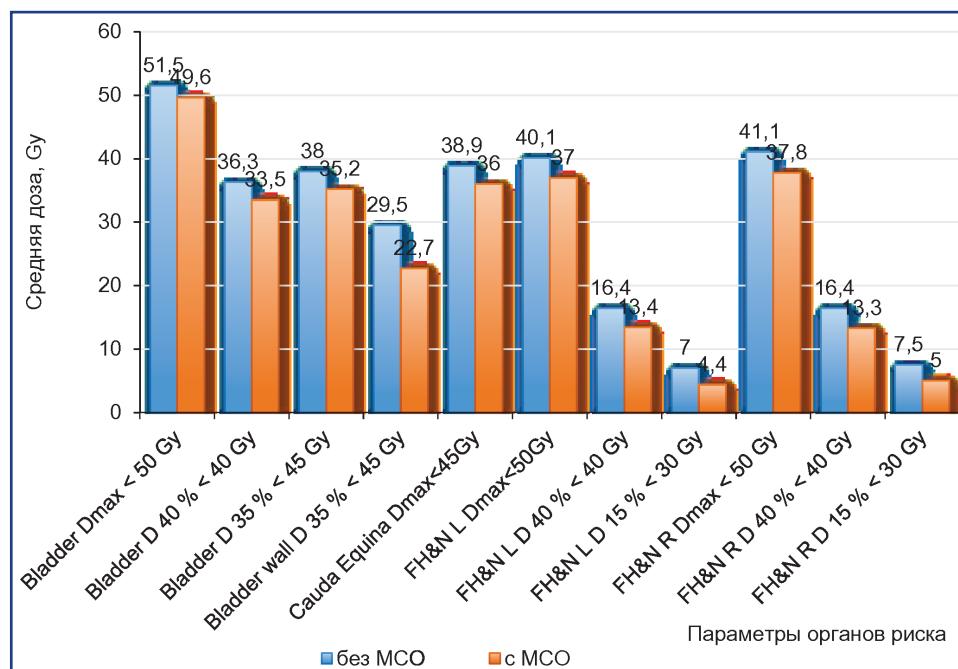
Для дополнительной оценки эффективности мультикритериальной оптимизации было проведено сравнение дозовых параметров между двумя клиническими группами пациентов: «голова и шея» и «малый таз» (Таблица 1 и 2). Это позволило определить, насколько выражено влияние MCO в анатомически различных областях и при-

сутствуют ли статистически значимые различия между ними. Для каждой группы были рассчитаны средние изменения (Mean Δ), процент улучшения, стандартное отклонение и 95% доверительный интервал, что обеспечило возможность объективной оценки вариабельности и значимости выявленных изменений. Доверительный интервал использовался как критерий статистической значимости: если его границы не пересекали нулевое значение, эффект считался достоверным ($p < 0,05$).

	Plan		■ Plan_Uterus 4	▲ Uterus MCO				
	Total Dose			46.000 Gy				
	Clinical Goal Summary			1	0	12	0	0
● PTV_2*23	P1	D 95,0 % ≥ 95,0 %	97,52 %	46.000 Gy	97,77 %	0	0	13
	P1	D 2,0 % ≤ 107,0 %						
● BladderWall	P2	V 45,00 Gy < 35,0 %	13,36 %	46.000 Gy	24,20 %	0	0	13
● CaudaEquina	P2	Dmax < 45,00 Gy	45,27 Gy	46.000 Gy	44,29 Gy	0	0	13
	P2	V 30,00 Gy < 15,0 %						
● FemoralHead_L	P2	V 45,00 Gy < 10,0 %	2,45 %	46.000 Gy	1,74 %	0	0	13
	P2	V 45,00 Gy < 50,0 %	0,00 %	46.000 Gy	0,00 %	0	0	13
● FemoralHead_R	P2	V 30,00 Gy < 15,0 %	2,13 %	46.000 Gy	1,85 %	0	0	13
	P2	V 50,00 Gy < 10,0 %	0,00 %	46.000 Gy	0,00 %	0	0	13
	P2	V 45,00 Gy < 50,0 %	0,00 %	46.000 Gy	0,00 %	0	0	13
● Rectum	P2	V 40,00 Gy < 60,0 %	17,88 %	46.000 Gy	14,66 %	0	0	13
● SmallBowel	P2	V 45,00 Gy < 195,00 cm ³	59,870 cm ³	46.000 Gy	55,702 cm ³	0	0	13
	P2	V 40,00 Gy < 30,0 %	5,94 %	46.000 Gy	5,99 %	0	0	13

Легенда: PTV_2*23Gy – Планируемый объём мишени для дозы 46 Гп; Bladder Wall – Стенка мочевого пузыря; Cauda Equina – Конский хвост; Femoral Head_L – Левая головка бедренной кости; Femoral Head_R – Правая головка бедренной кости; Rectum – Прямая кишка; Small Bowel – Тонкая кишка

Рисунок 9 – Выполнение клинических ограничений для целевого объёма и органов риска с использованием мультикритериальной оптимизации (МCO) и без МCO для плана облучения матки (Uterus) с дозой 46 Гп/2 Гр



Легенда: Bladder – Мочевой пузырь; Bladder Wall – Стенка мочевого пузыря; Cauda Equina – Конский хвост; Femoral Head_L – Левая головка бедренной кости; Femoral Head_R – Правая головка бедренной кости

Рисунок 10 – Усредненные значения дозовых параметров органов малого таза при планировании с MCO и без MCO

Сравнение показало, что в группе малого таза MCO обеспечивает наиболее выраженное и статистически устойчивое снижение дозовой нагрузки на OARs. Для мочевого пузыря, стенки мочевого пузыря и обеих головок тазобедренных костей средние изменения (Mean Δ (MCO–NoMCO)) имели отрицательное значение, а ДИ 95% полностью находился ниже нуля, что от-

ражает однозначно значимые улучшения. Наиболее выраженный эффект отмечен по параметру D15% для правой головки бедренной кости, где улучшение достигало 33,5%. Аналогичная тенденция наблюдалась и для других OAR малого таза, что подтверждает стабильность и воспроизводимость выигрыша от применения MCO в данной локализации.

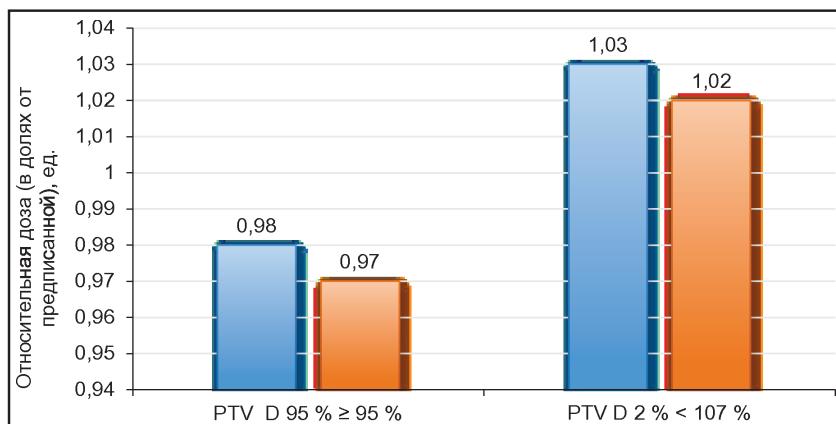
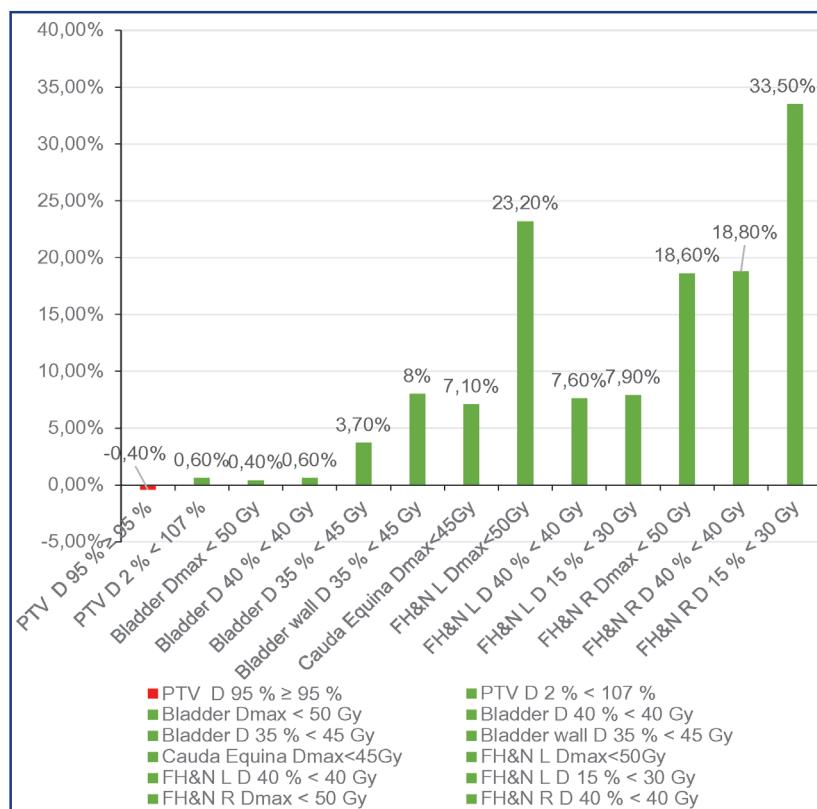


Рисунок 11 – Относительные значения дозы в долях от предписанной дозы для PTV при планировании с МКО и без МКО. Столбцы синего цвета отражают показатели планов без МКО, столбцы оранжевого цвета – планов с МКО



Легенда: PTV – Планируемый объем мишени; Bladder – Мочевой пузырь; Bladder Wall – Стенка мочевого пузыря; Cauda Equina – Конский хвост; Femoral Head_L – Левая головка бедренной кости; Femoral Head_R – Правая головка бедренной кости

Рисунок 12 – Величина улучшения и ухудшения дозовых параметров при использовании МКО (%)

Таблица 1 – Дозовые изменения при использовании МКО для локализации «Малый таз»

Дозовый параметр	Средние изменения (Mean Δ (MCO-NoMCO))	Стандартное отклонение (SD)	95% Доверительный интервал (95% CI)	Нижняя граница 95% ДИ	Верхняя граница 95% ДИ
Планируемый объем мишени D95%≥95%	-0,0034	0,0055	0,0026	-0,0061	-0,0008
Планируемый объем мишени D2%<107%	-0,0062	0,0101	0,0048	-0,0110	-0,0014
Мочевой пузырь Dmax<50Gy	-1,8905	1,2313	0,5853	-2,4759	-1,3052
Мочевой пузырь D 40% < 40Gy	-2,9088	2,9322	1,3938	-4,3027	-1,5149
Мочевой пузырь D 35% < 45Gy	-2,7129	2,7538	1,3091	-4,0220	-1,4038
Стенка мочевого пузыря D 35% < 45Gy	-6,8717	7,2031	3,4241	-10,2959	-3,4476
Конский хвост Dmax<45Gy	-2,94	2,9407	1,3979	-4,3379	-1,542
Левая головка бедренной кости Dmax<50Gy	-3,1852	3,1413	1,4933	-4,6786	-1,6919
Левая головка бедренной кости D 40% < 40Gy	-3,0558	2,2997	1,0932	-4,1491	-1,9626
Левая головка бедренной кости D 15% < 30Gy	-2,5817	2,9268	1,3913	-3,9731	-1,1904
Правая головка бедренной кости Dmax<50Gy	-3,2917	2,4391	1,1594	-4,4512	-2,1322
Правая головка бедренной кости D 40% < 40Gy	-3,0747	2,4919	1,1845	-4,2592	-1,8901
Правая головка бедренной кости D 15% < 30Gy	-2,5117	2,9057	1,3813	-3,893	-1,1304

Таблица 2 – Дозовые изменения при использовании МСО для локализации «Голова и шея»

Дозовый параметр	Средние изменения (Mean Δ (МСО-NoМСО))	Стандартное отклонение (SD)	95% Доверительный интервал (95% CI)	Нижняя граница 95% ДИ	Верхняя граница 95% ДИ
Планируемый объем мишени D95%≥95%	-0,0046	0,0084	0,004	-0,0086	0,0006
Планируемый объем мишени D2%<107%	-0,0023	0,0075	0,0035	-0,0059	0,0011
Пищевод Dmean<35Gy	-1,2423	3,0752	1,4618	-2,7042	0,2195
Левый глаз Dmax<50Gy	-1,4911	3,3861	1,6096	-3,1008	0,1184
Правый глаз Dmax<50Gy	-1,027	1,8506	0,8797	-1,9067	-0,1473
Левый глаз Dmean<35Gy	-0,7076	1,6365	0,7779	-1,4855	0,0702
Правый глаз Dmean<35Gy	-0,2494	0,6303	0,2996	-0,549	0,0502
Хрусталик левый D0,03cm^3<10Gy	-0,7958	1,9977	0,9496	-1,7455	0,1537
Хрусталик правый D0,03cm^3<10Gy	-0,4629	1,24	0,5894	-1,0524	0,1265
Полость рта Dmean<50Gy	-2,1841	3,7161	1,7665	-3,9506	-0,4175
Спинной мозг Dmax<45Gy	-2,5982	2,2437	1,0666	-3,6648	-1,5316
Головной мозг Dmax<60Gy	-3,6158	4,1002	1,9491	-5,565	-1,6667
Ствол мозга Dmax<50Gy	-3,3623	3,8424	1,8265	-5,1889	-1,5357
Хиазма Dmax<54Gy	-0,6929	1,3603	0,6466	-1,3396	-0,0462
Улитка левая Dmax<50Gy	-2,4388	6,1724	2,9341	-5,373	0,4953
Улитка правая Dmax<50Gy	-0,9723	2,4822	1,18	-2,1523	0,2076
Улитка левая Dmean<45Gy	-2,1458	5,1046	2,4265	-4,5724	0,2807
Улитка правая Dmean<45Gy	-0,9076	2,1237	1,0095	-1,9172	0,1019
Левый зрительный нерв Dmax<54Gy	-0,7405	1,4968	0,7115	-1,4521	-0,029
Правый зрительный нерв Dmax<54Gy	-0,9158	1,7988	0,8551	-1,771	-0,0607

В группе «голова и шея» также наблюдалось снижение дозовой нагрузки на большинство исследуемых структур, однако выраженность эффекта была менее однородной. Для критических структур центральной нервной системы – ствола мозга и спинного мозга – доверительные интервалы также полностью лежали ниже нулевого значения, что свидетельствует о значимом снижении дозы. Вместе с тем для ряда параметров зрительного аппарата и слуховых структур доверительные интервалы пересекали нулевую отметку, что указывает на повышенную межпациентскую вариабельность дозовых изменений. Это объясняется сложной анатомией головы и шеи, большим количеством мелких органов риска и высокой чувствительностью дозового распределения к индивидуальным особенностям пациента.

При сравнении двух локализаций было установлено, что в области малого таза МСО обеспечивает более выраженный и предсказуемый дозиметрический выигрыш. В то же время в области головы и шеи МСО также демонстрирует клинически значимое улучшение – прежде всего в снижении дозовых параметров спинного мозга, ствола мозга и околоушных желез, – однако характеризуется большей вариабельностью полученных результатов. В обеих группах значения Mean Δ для параметров PTV (D95% и D2%) были минимальны и близки к нулю, что подтверждает отсутствие снижения качества покрытия мишени при применении МСО.

Таким образом, проведённый межгрупповой анализ показал, что МСО демонстрирует устойчивое преимущество в снижении дозовой нагрузки на OARs как в области головы и шеи, так и в малом тазу, при этом наиболее выраженный и статистически значимый эффект наблюдается у пациентов с опухолями малого таза. Эти данные подтверждают высокую клиническую значимость МСО и её потенциал для универсального применения в планировании лучевой терапии для различных локализаций опухолей.

Обсуждение: Современное развитие методов планирования в лучевой терапии неизбежно сталкивается с проблемой поиска оптимального баланса между качественным покрытием целевых объемов и наибольшей защитой OAR. В условиях высокой анатомической сложности и тесного расположения OARs, как это наблюдается при опухолях головы и шеи или в области малого таза, данная задача становится особенно актуальной. При использовании традиционного подхода к планированию VMAT процесс оптимизации нередко оказывается длительным и итеративным. Планировщику приходится многократно корректировать цели и ограничения, стремясь достичь удовлетворительного распределения дозы. При этом заранее определить оптимальный баланс между конкурирующими целями (например, обеспечение покрытия PTV при одновременном ограничении дозы на OARs) крайне сложно. В итоге нередко формируется компромиссный план, который нельзя назвать «идеальным», поскольку он лишь частично удовлетворяет клиническим требованиям. Метод МСО предлагает иной подход. Он позволяет формировать так называемый *фронт Парето*, включающий множество равно оптимальных решений, что позволяет исследовать компромиссы в реальном времени без необходимости повторной оптимизации каждого варианта. Такой интерактивный процесс упрощает выбор наиболее клинически подходящего решения, учитываяющего как обеспечение покрытия PTV, так и ограничения для OAR [9]. Наши результаты демонстрируют улучшенное щажение OAR при сохранении требуемого уровня покрытия PTV при использовании МСО. Эти данные согласуются с публикациями, в которых показано, что МСО-планы для опухолей головы и шеи обеспечивают более низкую дозовую нагрузку на околоушные железы, гортань и спинной мозг при сохранении клинической приемлемости по PTV [6]. Также отмечено, что полностью автоматизированное априорное планирование с приме-

нением МСО позволяет достигать сопоставимого или лучшего качества по сравнению со стандартной оптимизацией, особенно в части снижения доз на OAR [8, 9]. Таким образом, накопленные данные подтверждают, что именно в сложных случаях опухолей головы и шеи МСО наиболее наглядна и клинически оправдана. В локализациях малого таза преимущества МСО проявляются главным образом в улучшении дозового распределения для OAR, тесно прилегающих к PTV. Показано, что при планировании IMRT у пациенток с раком шейки матки МСО позволила значительно снизить дозу на тонкий кишечник, а также уменьшить нагрузку на мочевой пузырь и прямую кишку [10]. Дополнительным преимуществом является возможность внедрения «class solutions», которые повышают воспроизводимость и стандартизацию качества планирования, что особенно важно в условиях большого клинического потока.

Сравнительный анализ различных локализаций позволяет выделить общие преимущества МСО:

- снижение дозовой нагрузки на OARs при сохранении покрытия целевых объемов;
- возможность оценки компромиссов в реальном времени без повторных итераций оптимизации;
- сокращение времени планирования и снижение зависимости от опыта конкретного планировщика;

При этом ряд исследований подчёркивают различие между математически оптимальными и клинически реализуемыми планами. Решение, выбранное на фронте Парето, может потребовать адаптации перед клинической реализацией, что сохраняет ключевую роль врача и медицинского физика даже при высокой степени автоматизации процесса.

Внедрение МСО рассматривается не только как способ улучшения качества отдельных планов, но и как инструмент стандартизации планирования. Комбинация МСО с автоматизированным и знание-ориентированным планированием, а также с использованием системы «scorecards», открывает новые перспективы для контроля качества и индивидуализации терапии [7]. В дальнейшем особое значение будет иметь оценка клинических исходов, включая снижение частоты поздних осложнений, сохранение функций OAR и повышение качества жизни пациентов [11].

Новизна нашего исследования заключается в том, что оно охватывает сразу две клинически сложные локализации – опухоли головы и шеи и опухоли малого таза, и включает детальный анализ качества планов с МСО и без него. В отличие от большинства предыдущих публикаций, где исследовалась одна область или агрегированные данные, мы рассмотрели особенности и преимущества МСО для каждой локализации отдельно. Это позволило выявить не только общие закономерности, но и специфику применения метода в разных клинических условиях.

Таким образом, МСО зарекомендовала себя как мощный инструмент повышения эффективности и воспроизводимости планирования при сложных анатомических условиях. Наши данные, в совокупности с литературными результатами, подтверждают, что использование МСО особенно актуально в случаях, ког-

да OAR тесно прилегают к PTV, и что метод имеет значительный потенциал для интеграции в адаптивные стратегии планирования и для дальнейшей оценки влияния на клинические исходы. В будущем перспективным направлением представляется интеграция МСО с адаптивным планированием, которое учитывает анатомические и биологические изменения между фракциями, что может дополнительно повысить эффективность и персонализацию лучевой терапии.

Заключение: В настоящем исследовании проведён комплексный анализ эффективности применения МСО при планировании дозиметрии для пациентов с опухолями головы и шеи и малого таза. Полученные результаты убедительно демонстрируют, что МСО позволяет достичь оптимального баланса между качественным покрытием планируемого объема и снижением дозовой нагрузки на критически важные органы.

Для локализаций головы и шеи МСО обеспечила стабильное и равномерное покрытие целевых объемов при одновременном снижении дозовой нагрузки на такие чувствительные структуры, как зрительный аппарат, слуховые органы, спинной мозг и ствол мозга. В области малого таза применение МСО позволило эффективно защитить OARs, включая мочевой пузырь, прямую и тонкую кишку, тазобедренные суставы и конский хвост, при сохранении клинически адекватного уровня покрытия PTV. В среднем снижение дозовой нагрузки на OAR составило от 7 до 33,5% в зависимости от локализации, что отражает значительный клинический эффект и повышение радиационной безопасности.

Анализ усреднённых показателей и сравнительных графиков показал, что использование МСО обеспечивает более сбалансированное распределение дозы и улучшает однородность внутри мишени. В то же время интерактивная навигация по фронту Парето позволяет адаптировать план под индивидуальные анатомические особенности пациента, повышая воспроизводимость и качество планирования.

Таким образом, МСО демонстрирует значительные преимущества в клинической практике: она снижает дозовую нагрузку на OARs без ухудшения покрытия целевых объемов, повышает радиационную безопасность пациентов и способствует минимизации вероятности поздних осложнений. Полученные результаты подтверждают, что мультикритериальный подход является мощным инструментом для индивидуализированного и адаптивного планирования лучевой терапии при сложной анатомической конфигурации.

Внедрение мультикритериального подхода в ежедневную практику планирования лучевой терапии может способствовать значительному улучшению клинических исходов, повышению качества жизни пациентов и оптимизации использования ресурсов радиотерапевтических центров. Перспективы дальнейших исследований включают изучение долгосрочных клинических эффектов применения МСО, а также разработку усовершенствованных алгоритмов адаптивного планирования, учитывающих индивидуальные анатомические и биологические особенности пациентов.

Список использованных источников:

- Hunte S. O., Clark C. H., Zyuzikov N., Nisbet A. *Volumetric modulated arc therapy (VMAT): a review of clinical outcomes—what is the clinical evidence for the most effective implementation?* // *Br. J. Radiol.* – 2022. – Vol. 95. – P. 20201289. <https://doi.org/10.1259/bjr.20201289>
- Chiavassa S., Bessieres I., Edouard M., Mathot M., Moignier A. *Complexity metrics for IMRT and VMAT plans: a review of current literature and applications* // *Br. J. Radiol.* – 2019. – Vol. 92. – P. 20190270. <https://doi.org/10.1259/bjr.20190270>
- He L., Gao X., Li T., Li X., Sun X., Wei Z., Xiao J. *Multicriteria optimization achieves superior normal tissue sparing in volumetric modulated arc therapy for gastric cancer* // *BMC Cancer.* – 2024. – Vol. 24. – No. 1. – P. 1376. <https://doi.org/10.1186/s12885-024-13067-y>
- Park J., Oh S., Yea J. W., Lee J. E., Park J. W. *Multi-criteria optimization for planning volumetric-modulated arc therapy for prostate cancer* // *PLoS One.* – 2021. – Vol. 16. – No. 9. – P. e0257216. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257216>
- Guerrero M., Fellows Z., Mohindra P., Badiyan S., Lamichhane N., Snider J. W., Chen S. *Multicriteria optimization: site-specific class solutions for VMAT plans* // *Med. Dosim.* – 2020. – Vol. 45. – P. 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2019.04.003>
- Harrer C., Ullrich W., Schell S., Wilkens J. *Approximation of dose quality indicator values in multi-criteria optimized (MCO) volumetric modulated arc therapy (VMAT) treatment planning* using trilinear dose interpolation // *Z. Med. Phys.* – 2020. – Vol. 30. – P. 315-324. <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2020.05.002>
- Breedveld S., Craft D., Van Haveren R., Heijmen B. *Multicriteria optimization and decision-making in radiotherapy* // *Eur. J. Oper. Res.* – 2019. – Vol. 277. – P. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2020.05.002>
- Biston M. C., Costea M., Gassa F., Serre A. A., Voet P., Larson R., Grégoire V. *Evaluation of fully automated a priori MCO treatment planning in VMAT for head-and-neck cancer* // *Phys. Med.* – 2021. – Vol. 87. – P. 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.05.037>
- Wüthrich D., Zeverino M., Bourhis J., Bochud F., Moeckli R. *Influence of optimisation parameters on directly deliverable Pareto fronts explored for prostate cancer* // *Physica Medica.* – 2023. – Vol. 114. – P. 103139. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.103139>
- Jiang Z., Zhang G., Sun T., Zhang G., Zhang X., Kong X., Yin Y. *Advantages of IMRT optimization with MCO compared to IMRT optimization without MCO in reducing small bowel high dose index for cervical cancer patients—individualized treatment options* // *Transl. Cancer Res.* – 2023. – Vol. 12. – P. 3255. <https://doi.org/10.21037/tcr-22-2792>
- Cardenas C. E., Cardan R. A., Harms J., Simiele E., Popple R. A. *Knowledge-based planning, multicriteria optimization, and plan scorecards: a winning combination* // *Radiother. Oncol.* – 2025. – Vol. 202. – P. 110598. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2024.110598>

АНДАТПА
МУЛЬТИКРИТЕРИЯЛЫҚ ТӘСІЛДІ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ДОЗИМЕТРИЯЛЫҚ ЖОСПАРЛАУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ: БАС-МОЙЫН ЖӘНЕ ҚІШІ ЖАМБАСТЫҢ ЛОКАЛИЗАЦИЯЛАРЫ ҮШІН КЛИНИКАЛЫҚ ЖОСПАРЛАРДЫҢ ТАЛДАУЫ
T.Ж. Жантасова^{1,2}, К.Д. Датбайев²
¹«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия үлгіттік университеті» КЕАҚ, Астана, Қазақстан Республикасы;

²«Ұлттық ғылыми онкология орталығы» ЖШС, Астана, Қазақстан Республикасы

Озектілігі: Бас пен мойын, сондай-ақ кіші жамбас ісіктері бар науқастарға сәулелік терапияны дозиметриялық жоспарлау анатомиялық құрделілігімен және мақсатты колемге жақын орналасқан критикалық ағзалармен қиындаиды. Бұл емдеу жоспарларының сапасын арттыру үшін заманауи оңтайланадыру әдістерін қолдануды талап етеді.

Зерттеудің мақсаты – бас және мойын, сондай-ақ кіші жамбас ісіктері бар науқастарда мультикритериалды оңтайланадыруды (Multi-Criteria Optimization, MCO) қолданумен және онсыз колем бойынша қарқындылықты модуляциялау әдісімен жүрізілген сәулелік терапияның дозиметриялық жоспарларын салыстырмалы түрде талдау, қамту корсеткіштерін және қауіп тондіретін ағзаларға түсемін дозалық жүктемені бағалау.

Әдістері: Зерттеуге 34 пациенттің енгізілді: 17-інде бас және мойын ісігі, 17-інде кіші жамбас ісігі болды. Әрбір жағдай үшін екі нұсқада жоспар құрылды: мультикритериалды оңтайланадыруды қолданумен және қолданбай. Жоспарлау Eclipse жүйесінде (Varian Medical Systems, АҚШ) орындалды. Салыстырмалы талдау қамту корсеткіштері (Planning Target Volume, PTV) (D95%, D2%) және қауіп тондіретін ағзаларға (Organs at Risk, OARs) түсемін дозалық жүктеме бойынша жүргізілді.

Нәтижелері: MCO қолдану PTV-ны негұрлым біркелкі ері толық қамтуға, сонымен қатар критикалық құрылымдарға түсемін дозалық жүктемені азайтуға мүмкіндік берді. Ең үлкен оң әсер бас және мойын ісіктері бар науқастардың жоспарларында байқалды, себебі OARs-тың анатомиялық жақындығы стандартты жоспарлауды қурделендерді.

Қорытынды: MCO дозиметриялық жоспарлау сапасын жақсартуда тиімді құрал болып табылады, өсіреле анатомиялық орналасу құрделілігі жоғары жағдайларда, және сәулелік терапияны жоспарлауда клиникалық тәжірибеге ұсынуга болады.

Түйінді сөздер: мультикритериалды оңтайланадыру (MCO), колем бойынша қарқындылықты модуляциялау әдісі (VMAT), дозиметрия, қауіп тондіретін ағзаларға түсемін дозалық жүктеме (OAR), бас және мойын, кіші жамбас.

ABSTRACT
OPTIMIZATION OF DOSIMETRIC PLANNING USING A MULTI-CRITERIA APPROACH: ANALYSIS OF CLINICAL PLANS FOR HEAD AND NECK AND PELVIC LOCALIZATIONS
T.Zh. Zhantassova^{1,2}, K.D. Datbayev²
¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, the Republic of Kazakhstan;

²National Research Oncology Center, Astana, the Republic of Kazakhstan

Relevance: Dosimetric planning in radiotherapy for patients with head and neck tumors, as well as pelvic tumors, is complicated by anatomical complexity and the proximity of critical organs to the target volume. This necessitates the use of modern optimization methods to improve the quality of treatment plans.

This study aimed to compare volumetric modulated arc therapy treatment plans with and without multi-criteria optimization in patients with head and neck and pelvic tumors, evaluating target coverage and dose burden to organs at risk.

Methods: The study included 34 patients, including 17 with head and neck tumors and 17 with pelvic tumors. For each case, two treatment plans were generated: one with MCO and one without. Planning was performed in the Eclipse system (Varian Medical Systems, USA). Comparative analysis was conducted based on target coverage indices (Planning Target Volume, PTV) (D95%, D2%) and dose load to organs at risk (Organs at Risk, OARs).

Results: The use of MCO provided more homogeneous and complete PTV coverage while simultaneously reducing dose burden to critical structures. The most pronounced effect was observed in head and neck tumor cases, where the anatomical proximity of OARs complicates standard planning.

Conclusion: MCO is an effective tool for improving dosimetric planning quality, especially in cases with high anatomical complexity, and can be recommended for clinical practice in radiotherapy planning.

Keywords: multi-criteria optimization (MCO), volumetric modulated arc therapy (VMAT), dosimetry, dose burden to organs at risk (OARs), head and neck, pelvis.

Прозрачность исследования: Авторы несут полную ответственность за содержание данной статьи.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии финансирования исследования.

Вклад авторов: Авторы внесли равный вклад в проведение исследования и создание научной статьи.

Сведения об авторах:

Жантасова Т.Ж. (корреспондирующий автор) – магистрант 2 года обучения, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева»; медицинский физик, ТОО «Национальный научный онкологический центр», Астана, Казахстан, e-mail: zhantassova2526@gmail.com, тел. +77761251885, ORCID: 0009-0008-0425-4127;

Датбаев К.Д. – магистр технических наук, начальник отдела медицинской физики, ТОО «Национальный научный онкологический центр», Астана, Казахстан, тел. +77718507486, e-mail: kairdatbayev@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0453-2878.

Адрес для корреспонденции: Жантасова Т.Ж, ТОО «Национальный научный онкологический центр», улица Керей и Жанибек ханов 3/2, Астана 010000, Республика Казахстан.