

УДК 616.65-002-006.615-849

<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2025-16-1-95-106>

ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОСУДОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ РАКА ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ: ПРОСПЕКТИВНОЕ СИМУЛЯЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

^{1,2}Р. В. Новиков[✉], ³Г. А. Лясевич[✉], ¹Е. С. Быкова[✉], ¹О. И. Пономарева[✉], ²В. К. Карандашев[✉],
¹А. И. Арсеньев[✉], ¹С. Н. Новиков[✉], ²В. В. Протошак[✉]

¹Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н. Н. Петрова, Санкт-Петербург, Россия

²Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

³Клинический госпиталь, Медико-санитарная часть Министерства внутренних дел Российской Федерации
по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области, Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Разработка новых методов радикального лечения рака предстательной железы (РПЖ), направленных на сохранение высокого качества жизни, является важнейшей задачей современной онкоурологии. Лучевая терапия со снижением дозы на область критических сосудистых эректильных структур входит в число таких методов.

ЦЕЛЬ: Определение оптимальных параметров дозиметрического планирования сосудосберегающей стереотаксической лучевой терапии (СС-СТЛТ) РПЖ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: В исследование вошли 20 пациентов с верифицированным РПЖ групп низкого и промежуточного риска (NCCN 2023). Лучевое лечение было представлено стереотаксической лучевой терапией (СТЛТ) в виде пяти фракций облучения по 7,25 Гр. Помимо стандартных критических органов, идентифицировались критические сосудистые структуры, связанные с эректильной функцией (эректильные критические органы — ЭрКО): луковица полового члена (ЛПЧ), ножки кавернозных тел (НКТ) и внутренние половые артерии (ВПА). Для каждого пациента рассчитывалось четыре дозиметрических плана (ДП): сосудосберегающий (ДП-СС); стандартный (ДП-С); сосудосберегающий план, рассчитанный при формировании общепринятого анизотропического отступа в 5 мм для планируемого объема облучения и отступом в сторону прямой кишки — 3 мм (ДП-5/3); сосудосберегающий план для облучения с использованием 0,5-сантиметрового многолепесткового коллиматора (ДП-0,5). Все планы, за исключением ДП-0,5, были сгенерированы для линейного ускорителя с 0,25-сантиметровым многолепестковым коллиматором.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Во всех дозиметрических планах удалось достигнуть требуемых значений показателей, характеризующих качество покрытия мишени, равно как и уложиться в предписываемые лимиты по основным критическим органам. Оптимальное распределение с точки зрения снижения дозы на ЭрКО достигнуто в ДП-СС. ДП-СС в сравнении с ДП-С позволил существенно снизить лучевую нагрузку на область НКТ и ВПА — D_{2%} уменьшилось на 30% (p<0,0001). Увеличение ширины лепестка коллиматора с 0,25 до 0,5 см при СС-СТЛТ приводило к незначительному снижению дозы на сосудистые структуры, ответственные за эректильную функцию (p>0,05).

ОБСУЖДЕНИЕ: Полученные результаты свидетельствуют, что СС-СТЛТ реализуема у подавляющего числа пациентов, страдающих РПЖ. Значимое снижение подводимой дозы на область ЭрКО может быть достигнуто на большинстве линейных ускорителей электронов, оснащенных современными многолепестковыми коллиматорами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: В Наибольший вклад в снижение лучевой нагрузки на ЭрКО при СС-СТЛТ РПЖ вносит сокращение стандартных отступов при формировании РТВ, в то время как ширина лепестков коллиматора не оказывает существенного влияния на величину подводимой к этой области дозы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рак предстательной железы; радиационно-индуцированная эректильная дисфункция; внутренняя половая артерия; луковица полового члена; ножки кавернозных тел, сосудосберегающая лучевая терапия

* Для корреспонденции: Новиков Роман Владимирович, e-mail: novikov-spb@mail.ru

Для цитирования: Новиков Р.В., Лясевич Г.А., Быкова Е.С., Пономарева О.И., Карандашев В.К., Арсеньев А.И., Новиков С.Н., Протошак В.В. Дозиметрические аспекты сосудосберегающей стереотаксической лучевой терапии рака предстательной железы: проспективное симуляционное исследование // *Лучевая диагностика и терапия*. 2025. Т. 16, № 1. С. 95–106, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2025-16-1-95-106>.

DOSIMETRIC ASPECTS OF VESSEL-SPARING STEREOTACTIC RADIATION THERAPY FOR PROSTATE CANCER: PROSPECTIVE SIMULATION STUDY

^{1,2}Roman V. Novikov[✉], ³Georgy A. Liasovich[✉], ¹Ekaterina S. Bykova[✉], ¹Olga I. Ponomareva[✉],
²Vladimir K. Karandashev[✉], ^{1,3}Andrey I. Arsenyev[✉], ¹Sergey N. Novikov[✉], ²Vasily V. Protoshchak[✉]

¹N. N. Petrov National Medical Research Center of Oncology, St. Petersburg, Russia

²S. M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia

³Clinical hospital, Medical unit of the Ministry of internal affairs of the Russian Federation for St. Petersburg and the Leningrad Region, St. Petersburg, Russia

INTRODUCTION: The development of new methods of radical treatment of prostate cancer (PCa) aimed at maintaining a high quality of life is the most important task of modern oncurology. Radiation therapy with a dose reduction to the area of critical vascular erectile structures is one of them.

OBJECTIVE: Compare different approaches for «vessel-sparing» stereotactic radiation therapy (VS-SRT) PCa.

MATERIALS AND METHODS: The study included 20 patients with histologically confirmed PCa of low and intermediate risk of recurrence (NCCN). SRT was planned at five fractions of 7.25 Gy. During planning we added to the standard critical organs, vascular structures that are responsible for erectile function (ErOAR): penile bulb (PB), crura of the cavernous bodies (CCB) and internal pudendal arteries (IPA)). For each patient, four dosimetric plans (DP) were calculated: «vessel-sparing» (DP-VS); standard (DP-S); «vessel-sparing» plan calculated in the formation of the generally accepted anisotropic indent of 5 mm for the planned volume of irradiation and a step towards the rectum — 3 mm (DP-5/3); «vessel-sparing» plan for irradiation using a 0.5-centimeter multi-leaf collimator (DP-0.5). All dosimetry plans, with the exception of DP-0.5, were generated for a linear accelerator with a 0.25 cm multi-leaf collimator.

RESULTS: All dosimetry plans, were characterized by excellent target coverage and meet the prescribed limits for the critical organs. Most efficient sparing of ErOAR was achieved in DP-VS. The advantages of DP-VS in comparison with DP-S was significant reduction (30%) of D_{2%} for CCB (IPA) ($p < 0.0001$). We didn't mention significant impact of the width of collimator leaves (0.25 cm vs 0.5 cm) on the dose absorbed by the vascular structures responsible for erectile function ($p > 0.05$).

DISCUSSION: The obtained results indicate that VS-SRT is feasible in the vast majority of patients suffering from PCa. A significant reduction in the dose delivered to the ErOAR can be achieved at most linear electron accelerators equipped with modern multi-leaf collimators.

CONCLUSION: The greatest contribution to the reduction of radiation dose to ErOAR in VS-SRT PC is made by the reduction of standard PTV, while the width of the collimator leaf does not have a significant effect on the dose prescribed to this region.

KEYWORDS: prostate cancer; radiation-induced erectile dysfunction; internal pudendal artery; penile bulb; crura cavernous bodies, vessel-sparing radiation therapy

* For correspondence: Roman V. Novikov, e-mail: novikov-spb@mail.ru

For citation: Novikov R.V., Liasovich G.A., Bykova E.S., Ponomareva O.I., Karandashev V.K., Arsenyev A.I., Novikov S.N., Protoshchak V.V. Dosimetric aspects of vessel-sparing stereotactic radiation therapy for prostate cancer: prospective simulation study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 95–106, <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2025-16-1-95-106>.

Введение. Радиационно-индуцированная эректильная дисфункция (РИЭД) является одним из наиболее частых неблагоприятных эффектов лучевой терапии рака предстательной железы (РПЖ). В отличие от радикальной простатэктомии, РИЭД развивается в течение относительно длительного времени, достигая к исходу пятилетнего рубежа уровня в 50–55% [1].

Основной патогенетический механизм постлучевого снижения эрекции окончательно не установлен, однако накопленные экспериментальные данные указывают на базовую роль перфузионных нарушений вследствие лучевого повреждения сосудистых образований [2]. Помимо базальных структур полового члена — луковицы полового члена (ЛПЧ) и ножек кавернозных тел (НКТ), к их числу отнесены и внутренние половые артерии (ВПА),

являющиеся основным источником кровоснабжения эректильной ткани.

Современные методы лучевой терапии характеризуются высокой степенью конформности пространственного распределения дозы и резким градиентом ее падения, что дает возможность значительно снизить лучевую нагрузку на критические органы, в том числе для сохранения исходного уровня потенции. Принципы сосудосберегающей лучевой терапии были предложены в 2005 г. P.W. McLaughlin и соавт. [3]. Последующие работы подтвердили эффективность предложенного подхода в реальной клинической практике [4, 5].

Стереотаксическая лучевая терапия (СТЛТ) является новейшей методикой лучевого лечения РПЖ, демонстрирующей превосходные результаты как в отношении достижения локального контроля

над опухолевым процессом, так и приемлемых уровней лучевой токсичности [6]. Короткий срок лечения (пять фракций облучения) наряду с использованием различных вариантов визуального контроля положения мишени дает возможность подведения дозы к облучаемому объему с субмиллиметровой точностью.

На данный момент имеется весьма ограниченное число работ, посвященных особенностям дозиметрического обеспечения сосудосберегающей лучевой терапии РПЖ [3–5, 7–9]. Остается нерешенным целый ряд важных вопросов, связанных с определением минимально допустимых ограничений на эректильные критические органы (ЭрКО), а также влияния некоторых параметров дозиметрического планирования на финальное распределение дозы. Данная работа является очередным этапом изысканий, направленных на разработку оптимального протокола сосудосберегающей стереотаксической лучевой терапии (СС-СТЛТ) РПЖ и внедрения его в клиническую практику [10].

Цель. Анализ особенностей дозиметрического планирования СС-СТЛТ РПЖ.

Материалы и методы. Исследование носило симуляционный характер без участия человека, что не требовало согласования его проведения с этическим комитетом. В исследование вошло 20 пациентов с верифицированным РПЖ. Помимо клинического стадирования процесса, обследование включало в себя оценку характеристик мочеиспускания (исключение выраженной инфравезикальной обструкции) и исходного статуса эректильной функции. Отсутствие эректильной дисфункции или дисфункция легкой степени (международный индекс эректильной функции (МИЭФ-5) ≥ 15 баллов) давало основание планировать СТЛТ в соответствии с сосудосберегающим протоколом. Все пациенты отнесены к группам низкого и промежуточного риска рецидива по NCCN (2023).

С целью обеспечения визуального контроля за сутки до топометрического исследования в предстательную железу устанавливалось три рентгеноконтрастных маркера (Gold Anchor, Швеция). Планирование и последующее лечение больных не подразумевало катетеризации мочевого пузыря уретральным катетером.

Топометрическая компьютерная томография (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ) выполнялись при опорожненной прямой кишке и умеренно (150–250 мл) заполненном мочевом пузыре. В ходе предлучевой подготовки выполнялась компьютерная томография с толщиной среза 2 мм («SOMATOM Definition AS» Siemens (Германия) и «DISCOVERY RT» General Electric (США)). МРТ производилась на томографе «MAGNETOM Aera 24 CH» 1,5 T Siemens (Германия) с минимальным временным интервалом относительно предшествующей КТ-топометрии. Получали две последователь-

ности бесконтрастных МР-изображений: Т2-ВИ (контуры простаты и критические органы) и Т2-ВИ-*firm* (визуализация хода ВПА). Полученные изображения импортировались в компьютерную планирующую систему Eclipse версии 4.0 (Varian Medical System, США). Посредством имеющихся программных инструментов выполнялось совмещение полученных КТ и МРТ-изображений с последующим оконтуриванием предстательной железы, проксимальной трети семенных пузырьков, прямой кишки, головок бедренных костей, мочевого пузыря, ЛПЧ, НКТ и ВПА [9]. Оконтуривание ВПА осуществлялось маркером 6 мм в диаметре.

Клинический объем облучения (CTV) включал в себя простату и проксимальную треть обеих семенных пузырьков независимо от группы риска по NCCN (2020). Для оценки влияния планируемого объема лечения (PTV) на величину дозы, поглощенной в области ЭрКО, были сформированы два варианта анизотропического PTV: наиболее распространенного в отечественной и зарубежной радиотерапевтической практике — с величиной отступа от CTV 5 мм во всех направлениях и уменьшением отступа в сторону прямой кишки (3 мм) (PTV_{5/3}), и меньшего по объему PTV с величиной отступа в 3 мм во всех направлениях и 2 мм в сторону прямой кишки (PTV_{3/2}). Формирование PTV с меньшими отступами внедрено в рутинную практику в отделении радиотерапии ФГБУ НМИЦ онкологии им. Н.Н.Петрова Минздрава России на основании полученных ранее данных [10].

Параметры дозиметрического планирования. Облучение планировалось в виде пяти фракций по 7,25 Гр, подводимых ежедневно или через день, до суммарной очаговой дозы (СОД) 36,25 Гр. Расчетное значение изоэффективной дозы (EQD₂), эквивалентной дозе, подводимой при лучевой терапии в режиме стандартного фракционирования (разовая очаговая доза (РОД) — 2 Гр), составило 90,6 Гр_(ЭКВ) ($\alpha/\beta=1,5$ Гр независимо от степени дифференцировки опухоли). Величину EQD₂ для критических органов (в том числе ЭрКО) определяли исходя из значения α/β , равного 3 Гр. Доставка энергии облучения планировалась посредством модулированной по объему лучевой терапии (VMAT), с энергией фотонного пучка 6 МэВ. Во всех случаях подведение полной дозы за сеанс планировалось за счет двух полных компланарных арок с противоположным вращением гантри. Изоцентр соответствовал центру PTV.

Все планы были рассчитаны на планирующей системе Eclipse версии 4.0 (Varian Medical System) с использованием расчетных алгоритмов Photon Optimizer и Analytical Anisotropic Algorithm. Углы коллиматора равнялись 30° и 330°. При расчетах ориентировались на общепринятые требования к дозиметрическим планам СТЛТ РПЖ (RTOG 0938) [11], а также рекомендации 2020 года, созданные специалистами ведущих радиотерапевтических

центров США, Великобритании и одобренные NCCN [12].

В условиях нашего отделения лучевое лечение осуществляется на трех линейных ускорителях электронов (ЛУЭ), имеющих свои технологические особенности: «NOVALIS Tx», «TRUEBEAM» и «CLINAC iX» (Varian Medical System) (США). Одна из наиболее важных характеристик ускорителя — минимальная ширина лепестка многолепесткового коллиматора в области изоцентра, характеризующая степень конформности изодозного распределения. С учетом этого параметра было рассчитано два варианта планов: с использованием стандартного многолепесткового коллиматора, имеющего минимальную ширину лепестка 0,5 см в центральной зоне поля (ЛУЭ «CLINAC iX» и «TRUEBEAM»), и микро-многолепесткового коллиматора с минимальной шириной лепестка 0,25 см (ЛУЭ «NOVALIS Tx»). Расчет планов для облучения на ЛУЭ «TRUEBEAM» осуществлялся с учетом дополнительной коллимации в виде движущихся шторок (технология «jaw tracking»), позволяющих дополнительно снижать лучевую нагрузку на нормальные ткани. Таким образом, у каждого из 20 пациентов было рассчитано по четыре дозиметрических плана (всего 80 планов).

Процесс оптимизации осуществлялся до тех пор, пока не был достигнут один из следующих критериев [7]:

1) появление «пережогов» в области PTV, превышающих 107% от величины предписанной дозы ($D_{0,03cc} > 38,79$ Гр);

2) достижение уровня стабилизации (снижение в пределах менее 0,25 Гр) или последующее повышение величины средней дозой нагрузки (D_{mean}) на ЭрКО (ВПА, НКТ и ЛПЧ) по сравнению с результатами предшествующей оптимизации.

Все дозиметрические планы были сформированы и оптимизированы одним медицинским физиком. Основные характеристики анализируемых дозиметрических планов представлены в табл. 1.

звалась среднее, стандартное отклонение и минимальное — максимальное значение ($M \pm SD$ (min-max)). С учетом относительно небольшого числа наблюдений в выборке значимость величины изменений в сравниваемых ДП определялась при помощи непараметрического метода статистики Wilcoxon signed-rank test для зависимых переменных.

Результаты. Средний возраст пациентов составил $60,7 \pm 7,8$ (47–74) года. Относительно групп риска (NCCN) пациенты распределились следующим образом: низкого — 8 (40%), промежуточного благоприятного 4 (20%) и промежуточного неблагоприятного — 8 (40%).

Во всех случаях удалось достигнуть требуемых значений показателей, характеризующих качество покрытия PTV. Наибольшие значения D_{min} , $D_{95\%}$, $V_{100\%}$ и $D_{0,03cc}$ получены при расчете ДП-5/3. Анализ величины радиационной нагрузки на критические органы показывает, что при расчете всех планов у каждого из пациентов удалось уложиться в предписываемые лимиты.

Значения основных дозиметрических параметров, характеризующих дозу на область сосудистых ЭрКО при различных вариантах дозиметрических планов, представлены в табл. 2. При величине суммарной поглощенной дозы выше 10 Гр (в тех случаях, когда разовая доза превышала 2 Гр) рассчитывалась EQD_2 ($\alpha/\beta = 3$ Гр).

В процессе оптимизации были достигнуты рекомендуемые ($D_{2\%} \leq 28,5$ Гр (50 Гр_{ЭКВ}) и $D_{mean} \leq 16$ Гр (20 Гр_{ЭКВ})) значения радиационной нагрузки на область ЛПЧ во всех анализируемых планах. Наименьшие значения получены при расчете ДП-СС и ДП-0,5, отличающихся друг от друга минимальной шириной лепестка коллиматора в области изоцентра. Дозиметрические преимущества использования микро-многолепесткового коллиматора (HD-collimator) имели несущественный характер, что может быть обусловлено дополнительной коллимацией (технология «jaw tracking») реализуемой

Параметры дозиметрических планов

Таблица 1

Table 1

Parameters of dosimetric plans			
Вариант дозиметрического плана	Сосудосбережение	Отступы PTV, мм	Ширина лепестка коллиматора, см
ДП-С	–	3/2	0,25
ДП-СС	+	3/2	0,25
ДП-5/3	+	5/3	0,25
ДП-0,5	+	3/2	0,5

Для статистических расчетов применялось программное обеспечение STATISTICA v.12.0 фирмы Statsoft Inc., USA. Основная масса показателей не имела значимых отклонений от нормальности (критерий Колмогорова–Смирнова; $p < 0,05$). При не отличающимся от нормального распределения ука-

в ЛУЭ «TRUEBEAM» ($D_{2\%}$ ($p = 0,09$); D_{mean} ($p = 0,98$)). Примечательно, что по показателю $D_{2\%}$ рассчитанные значения радиационной нагрузки на область ЛПЧ в случае ДП-СС и ДП-0,5 соответствовали допустимым лимитам даже у пациентов с неблагоприятной для сосудосбережения индивиду-

альной анатомией (максимальные значения переменных) (табл. 2). Различия величины подводимой дозы на область ЛПЧ при вариантах дозиметрических планов графически представлены на рис. 1.

Таблица 2

Значения основных дозиметрических переменных, характеризующих радиационную нагрузку на область сосудистых эректильных критических органов (Гр)

Table 2

Values of the main dosimetric parameters discribed the radiation dose on the area of vascular ErOAR (Gy)

Структура (орган)	Показатель	ДП-С	ДП-СС	ДП-5/3	ДП-0,5
Луковица полового члена	D ₂ %	10,81±9,54 (2,21–29,6)	8,75±7,29 (2,2–26,59)	13,12±11,75 (2,38–35,4)	9,92±8,97 (2,21–26,96)
	D _{mean}	2,99±1,34 (1,35–5,97)	2,7±1,05 (1,34–5,6)	3,64±1,82 (1,47–7,33)	2,74±1,23 (1,36–6,16)
	D _{max}	15,32±12,68 (2,49–36,6)	13,56±12,31 (2,48–36,5)	16,83±12,54 (2,67–37,77)	14,29±12,48 (2,51–35,83)
Правая ножка кавернозных тел	D ₂ %	6,35±4,98 (1,8–21,67)	4,29±1,99 (1,77–10,16)	6,2±3,89 (1,98–17,9)	4,43±2,32 (1,78–10,15)
	D _{mean}	2,95±1,61 (1,37–8,46)	2,57±0,95 (1,35–5,4)	3,27±1,45 (1,49–7,84)	2,5±1,0 (1,37–5,47)
	D ₁₀₀ %	1,59±0,48 (1,0–2,7)	1,53±0,44 (0,98–2,51)	1,79±0,52 (1,1–2,9)	1,52±0,44 (1,03–2,75)
Левая ножка кавернозных тел	D ₂ %	6,19±4,87 (1,67–19,19)	4,28±2,07 (1,66–9,79)	5,73±2,96 (1,83–12,51)	4,49±2,55 (1,66–10,87)
	D _{mean}	2,93±1,57 (1,29–7,35)	2,57±0,98 (1,29–5,03)	3,23±1,34 (1,42–6,83)	2,53±1,12 (1,3–5,52)
	D ₁₀₀ %	1,57±0,47 (0,96–2,75)	1,51±0,43 (0,93–2,58)	1,79±0,57 (1,06–3,5)	1,51±0,44 (0,98–2,63)
Правая внутренняя половая артерия	D ₂ %	18,46±4,53 (12,35–31,28)	13,04±3,61 (8,63–25,59)	15,49±6,29 (8,16–35,18)	13,81±4,1 (8,21–27,22)
	D _{mean}	12,04±2,49 (6,62–16,05)	9,4±1,53 (6,04–11,9)	10,89±2,49 (5,93–14,88)	9,83±1,87 (5,82–13,97)
	D ₁₀₀ %	2,45±1,12 (0,92–5,28)	2,38±1,1 (0,88–5,39)	3,03±1,49 (1,07–6,84)	2,37±1,19 (0,9–6,1)
Левая внутренняя половая артерия	D ₂ %	17,64±2,82 (13,1–26,0)	12,88±2,34 (8,77–17,76)	14,86±3,87 (8,39–24,1)	13,72±2,65 (8,28–18,53)
	D _{mean}	12,04±2,79 (8,27–19,5)	9,52±1,54 (6,59–13,6)	10,98±2,37 (6,31–16,51)	9,93±1,8 (6,16–14,22)
	D ₁₀₀ %	2,46±1,02 (1,14–4,99)	2,36±0,98 (1,12–5,06)	2,88±1,27 (1,35–6,44)	2,29±1,0 (1,14–5,29)

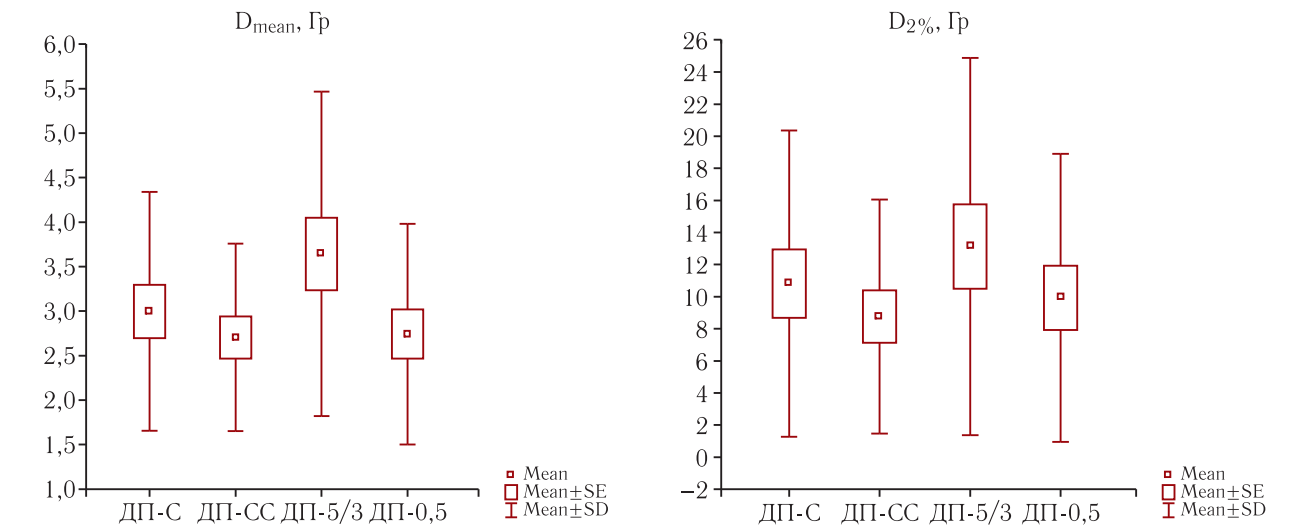


Рис. 1. Сравнительная характеристика подводимой дозы на область луковицы полового члена, выраженная показателями D₂% и D_{mean}

Fig. 1. Comparative characteristics of the prescribed dose to the PB, expressed by the values of D₂% and D_{mean}

Значимых различий в показателях, характеризующих лучевую нагрузку на область правой и левой НКТ, учитывая симметричный характер анатомии этих структур, не выявлено ($p > 0,05$). Близкая взаимная топография НКТ и ЛПЧ может объяснить отсутствие достоверных различий D_{mean} при всех анализируемых планах (ДП-С ($p=0,66$); ДП-СС ($p=0,82$);

стиков коллиматора, как и в случае других ЭрКО, оказались не столь существенными ($p=0,03$ и $p=0,11$ соответственно) (см. рис. 2).

Из четырех вариантов исследуемых лечебных планов (см. табл. 2) оптимальные параметры, с точки зрения снижения дозы, подводимой к ЭрКО, достигнуты в ДП-СС (рис. 3).

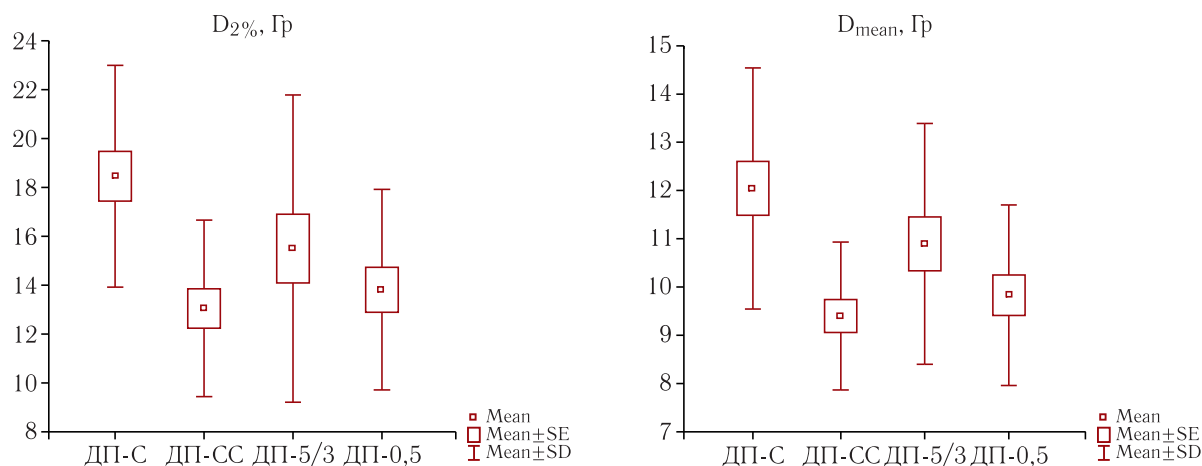


Рис. 2. Сравнительная характеристика подводимой дозы на область правой внутренней половой артерии, выраженная показателями $D_2\%$ и D_{mean}

Fig. 2. Comparative characteristics of the prescribed dose to the right IPA, expressed by the values $D_2\%$ and D_{mean}

ДП-5/3 ($p=0,87$); ДП-0,5 ($p=0,6$)), в то время как по показателю $D_2\%$ изменения носят достоверный характер (ДП-С ($p=0,02$); ДП-СС ($p=0,001$); ДП-5/3 ($p=0,03$); ДП-0,5 ($p=0,002$)), демонстрируя практически двукратное снижение дозы на проксимальные отделы кавернозных тел (см. табл. 2).

По аналогии с ЛПЧ ширина лепестков коллиматора оказывает минимальное влияние на параметры распределения дозы при сосудосберегающем подходе (ДП-СС/ДП-0,5 ($D_2\%$ ($p=0,91$); D_{max} ($p=0,46$); D_{mean} ($p=0,02$)). Наибольшая величина подводимой дозы на область НКТ отмечена при расчете ДП-5/3 ($p < 0,0001$). Во всех планах удалось достигнуть низких значений $D_{100\%}$, не превышающих суммарно 4 Гр за весь курс лечения.

Большой практический интерес в рамках реализации СС-СТЛТ РПЖ представляет информация о величине радиационной нагрузки на область половых артерий. Пространственные и объемные характеристики правой и левой ВПА близки, что определяет фактическую схожесть анализируемых дозиметрических закономерностей (рис. 2).

Выигрыш в снижении дозы на область правой ВПА в ДП-СС относительно ДП-С составил $5,41 \pm 2,42$ (1,37–9,21) Гр по показателю $D_2\%$ ($p < 0,0001$), по величине средней нагрузки (D_{mean}) — $2,64 \pm 1,4$ (0,56–5,59) Гр ($p < 0,0001$). Увеличение отступа при формировании РТВ (ДП-СС против ДП-5/3) также приводит к повышению дозы на ВПА: $D_2\%$ увеличивается на $2,45 \pm 3,19$ (0,47–9,59) Гр ($p < 0,0006$); D_{mean} на $1,49 \pm 1,4$ (0,19–5,07) Гр ($p < 0,0001$). Различия по показателям $D_2\%$ и D_{mean} при расчете дозиметрических планов с различной шириной лепе-

Средний дозиметрический выигрыш, полученный при попарном сравнении анализируемых планов,

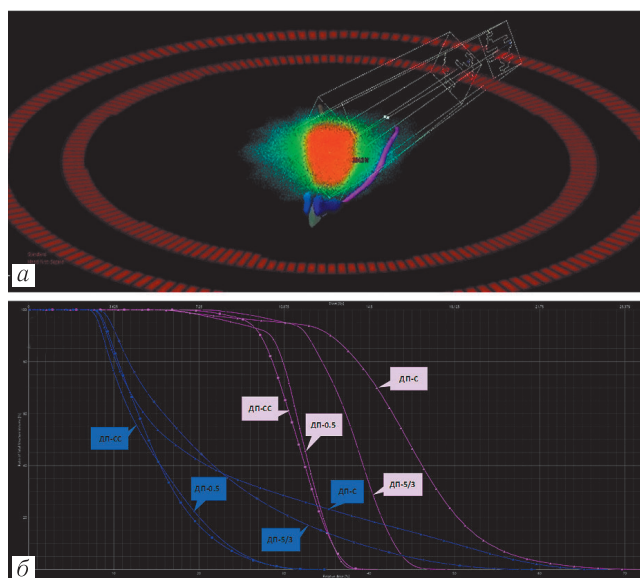


Рис. 3. Пример дозиметрического плана в режиме 3D-визуализации с максимальным снижением дозы на эректильные критические органы (подведение дозы осуществляется посредством двух динамических арков (технология RapidArc)) (а); гистограммы доза-объем, описывающие величину дозной нагрузки на правую ВПА (розовый цвет) и правую НКТ (синий цвет) при различных лечебных планах (б)

Fig. 3. Example of a dosimetric plan in 3D imaging mode with maximum dose reduction on the ErOAR (dose delivery by two dynamic arcs (RapidArc technology)) (a); dose-volume histograms, describing the dose on the right IPA (pink) and right CC (blue) in different treatment plans (b)

на примере переменных $D_{2\%}$ и D_{mean} представлен в табл. 3.

давления в кавернозных телах. Таким образом, из-за близкого контакта ЛПЧ с НКТ и дистальными отде-

Различия в радиационной нагрузке на эректильные критические органы в анализируемых планах (%)

Таблица 3

Differences in radiation dose on ErOAR in the analyzed plans (%)				
Структура (орган)	Показатель	ДП-СС/ДП-С	ДП-СС/ДП-5/3	ДП-СС/ДП-0,5
Луковица полового члена	$D_{2\%}$	19	33	11,7
	D_{mean}	9,7	—*	1,4
Ножки кавернозных тел	$D_{2\%}$	32	30,8	1,4
	D_{mean}	8,5	21	—
Внутренняя половая артерия	$D_{2\%}$	29	15,8	5,5
	D_{mean}	21,9	13,6	4,3

* Различия менее 1 % либо носят незначительный обратный характер.
* Differences are less than 1 % or have a slight inverse nature.

Обсуждение. В качестве основной анатомической структуры, имеющей отношение к планированию сосудосберегающей лучевой терапии РПЖ, долгое время рассматривалась ЛПЧ [13]. Совершенствование методик дистанционного облучения привело к постепенному снижению рекомендуемого порога величины средней дозы на эту область с 50 до 20 Гр. В нескольких рандомизированных исследованиях была доказана значимая корреляция подводимой к ЛПЧ дозы и риском развития РИЭД [14, 15]. В других работах, включая опубликованные в 2023 г. результаты проспективного исследования III фазы, подобная связь не подтверждена [16, 17]. Эти противоречия могут быть объяснены отсутствием унифицированных подходов по оконтуриванию ЛПЧ, что ведет к погрешностям в дозиметрических расчетах, а также методиках планирования (величина отступа при формировании РТВ) и реализации (технологии визуального контроля) лучевого лечения. Наглядным подтверждением этих предположений являются существенные различия средних значений объема ЛПЧ по данным ряда опубликованных исследований, которые варьируют от $3,5 \pm 1,8 \text{ см}^3$ (ЛПЧ определена как проксимальная утолщенная часть губчатого тела) [16], $7,12 \pm 2,91 \text{ см}^3$ [18] до $18,0 \pm 9,0$ [19] см^3 . В рандомизированном исследовании V. Achard и соавт. величина дозы, подводимой на область ЛПЧ, не оказывала влияния на статус сохранности эректильной функции [20]. Исследователи объясняют этот феномен тем, что у подавляющего числа пациентов значения D_{mean} и $D_{2\%}$ на эту область при использовании современной СТЛТ РПЖ были ниже общепринятых пороговых значений.

Непосредственное участие ЛПЧ в реализации эректильной функции весьма спорно. В отличие от кавернозных тел, обеспечивающих необходимую для совершения полового акта ригидность, основной функцией губчатого тела является сохранение проходимости мочеиспускательного канала, так как в состоянии полной тумесценции максимальное давление в нем не превышает одной трети значения

лами ВПА, подводимая к ЛПЧ доза играет в основном референсную роль, позволяя оценить величину радиационной нагрузки на эти структуры. Систематический обзор 2023 г., в котором анализируются работы, посвященные лучевой терапии с сохранением эректильной функции, оставил общепринятый рекомендуемый лимит радиационной нагрузки на ЛПЧ неизменным ($D_{mean} \leq 20 \text{ Гр}$) [21]. В нашем исследовании показатель D_{mean} был существенно ниже допустимого максимума (см. табл. 2). Предельные значения величины $D_{2\%}$ ($\leq 28,5 \text{ Гр}$ или $50 \text{ Гр}_{\text{экв}}$) не были превышены ни у одного пациента в случае расчета ДП-СС и ДП-0,5. На практике оценку соответствия дозиметрических планов СТЛТ принципам сосудосбережения целесообразно осуществлять относительно пороговых значений эквивалентной дозы на область ЛПЧ, определенной исходя из опыта лечения РПЖ при помощи стандартного и гипофракционного облучения.

Влияние дозы на область НКТ в качестве фактора риска РИЭД более очевидно и обусловлено постлучевыми фиброзными изменениями, приводящими к венозной утечке вследствие развития веноокклюдивной дисфункции [22]. В данном исследовании D_{mean} на область ЛПЧ и НКТ фактически не различались, что подтверждает роль ЛПЧ в качестве общепринятой референсной структуры (см. табл. 2). При этом показатель $D_{2\%}$ был практически в два раза ниже. Наиболее отчетливо это различие демонстрируется в дозиметрических планах, оптимизированных с целью сосудосбережения.

Результаты рандомизированного исследования 2-й фазы продемонстрировали существенную корреляцию частоты РИЭД и дозы на область НКТ [20]. В постлучевой период нарушения эрекции практически не развивалось при значениях $D_{mean} < 4,7 \text{ Гр}$ и $D_{2\%} < 12 \text{ Гр}$. Представленные нами результаты дозиметрического анализа подтвердили возможность планирования СТЛТ РПЖ в соответствии с предложенными ограничениями у подавляющего числа пациентов, особенно при расчете ДП-СС

и ДП-0,5, что дает основание использовать их в качестве лимитов подведения дозы на область этой анатомической структуры.

ВПА — основной источник кровоснабжения эректильной кавернозной ткани. В исследовании D. E. Spratt и соавт., оценивающим результаты сосудосберегающей лучевой терапии в режиме стандартного фракционирования, в качестве лимита на область ВПА определено значение $D_{\max} \leq 36$ Гр [4]. V. Achard и соавт. определили среднее значение $D_{2\%}$, близкое к $D_{\max}$, на область ВПА равное 23,4 Гр, что соответствовало 36 Гр ($EQD2(\alpha/\beta=3 \text{ Гр})$) [20]. В нашей работе среднее значение $D_{2\%}$ в ДП-СС и ДП-0,5 было фактически в два раза ниже.

М. Jaccard и соавт., считают, что маленький диаметр ВПА снижает прогностическую ценность показателя $D_{2\%}$ и большую репрезентативность имеет средняя величина подводимой дозы [7]. Они оценили влияние эндоректального баллона на изменение пространственной топографии ВПА и предстательной железы при планировании пятифракционной СС-СТЛТ РПЖ (РОД 7,25 Гр). В оптимальном сосудосберегающем плане без установки эндоректального баллона D_{mean} составило 5,7 (3,2–9,9) Гр. По нашим данным этот показатель равнялся $9,4 \pm 1,53$ (6,04–11,9) Гр (ДП-СС). Выявленное отличие может быть обусловлено методикой оконтуривании ВПА, что подтверждается полученными объемными характеристиками сосуда, как критической структуры: $2,06$ (0,9–3,2) см^3 [18] против $4,95$ (3,8–7,0) см^3 [7].

Данное исследование показало, что подводимая доза на область ВПА, как единой анатомической структуры, достаточно низка, особенно в случае ДП-СС и ДП-0,5. При этом расстояние от облучаемой мишени до ВПА существенно разнится и является наименьшим в области апекса (апикально-артериальное расстояние), составляя $2,49 \pm 0,62$ (1,31–4,28) см [18]. Это позволяет рассматривать дистальную треть артерии в качестве дополнительной базальной структуры полового члена и оценивать величину нагрузки на этот сегмент сосуда в соответствии с дозой подводимой к области ЛПЧ и НКТ. В практическом плане, для оптимизации СС-СТЛТ РПЖ целесообразно ориентироваться на значение $D_{\max} \leq 20$ Гр (28 Гр_{экв} ($EQD2(\alpha/\beta=3 \text{ Гр})$)), которое используется в проводимом рандомизированном исследовании POTEN-C [9].

На возможность снижения радиационной нагрузки на область ЭрКО оказывает большое влияние величина отступа при формировании PTV. В настоящее время большинство авторов при проведении СТЛТ рекомендуют отступать от капсулы железы, соответствующей границе CTV, минимум 5 мм [12]. Ранее нами было проведено исследование, показавшее, что среднее смещение предстательной железы в краниокаудальном направлении составляет $0,8 \pm 1,2$ мм, в латеральном — $0,9 \pm 1,0$ мм, в перед-

незадном — $1,3 \pm 1,3$ мм [10]. Моделирование распределения дозы указывает на адекватное облучение мишени при использовании минимальных отступов от CTV (2 мм в сторону прямой кишки и по 3 мм в оставшихся направлениях). Схожие результаты продемонстрированы в работе T. Li и соавт. при помощи реализуемой в современных линейных ускорителях функции контроля интрафракционного смещения предстательной железы в режиме реального времени — dynamic tracking system (Calypso или стандартные киловольтные ортогональные снимки (on board imaging (OBI))) [23]. Величина смещения простаты в ходе сеанса СТЛТ составила: $0,2 \pm 2$ мм вертикально, $0,1 \pm 2,1$ мм продольно и $0,2 \pm 1,4$ мм латерально. Основываясь на этих результатах, авторы рекомендуют использовать изотропический PTV с отступом во всех направлениях равном 2,5 мм. Очевидно, что сокращение объема облучения ведет к снижению лучевой нагрузки на любые критические органы, в том числе ответственные за эректильную функцию. По нашим данным, величина подводимой дозы на базальные структуры полового члена в ДП-5/3, оптимизированных с учетом сосудосбережения превышает аналогичные показатели в стандартных планах, но с меньшим отступом. Широкое внедрение в клиническую практику систем интрафракционного контроля положения мишени, регистрирующих смещения с миллиметровой точностью, способствует переходу на планирование лечебных планов с минимальными отступами при формировании PTV [24].

Представляет практический интерес вопрос о влиянии ширины лепестка коллиматора на изодозное распределение при СС-СТЛТ РПЖ. Такое внимание обусловлено миниатюрными размерами ЭрКО и их близким прилеганием к мишени. Ранее было показано положительное влияние на индекс конформности уменьшения ширины лепестка при СТЛТ интра- и экстракраниальных образований различного объема [25–27]. Q. J. Wu и соавт. определили дозиметрический выигрыш при использовании микролепесткового коллиматора (0,25 см) относительно стандартного (0,5 см) в случае СТЛТ опухолей головного мозга, печени и спинного мозга в 1–4%, 4–11% и 14–19%, соответственно [25]. В настоящем исследовании, которое является первой подобной работой, показано отсутствие значимого влияния ширины лепестка коллиматора на возможность снижения лучевой нагрузки на ЭрКО при планировании СС-СТЛТ РПЖ.

Успешное планирование СС-СТЛТ РПЖ напрямую зависит от индивидуальной анатомии пациента и должно осуществляться исходя из хорошо известного в радиотерапии принципа ALARA (As Low As Reasonable Available). В табл. 4 предоставлены предлагаемые ограничения в радиационной нагрузке на ЭрКО, используемые в основных исследованиях, посвященных разработке оптимальных протоколов сосудосберегающей лучевой терапии РПЖ.

Таблица 4

Опубликованные данные, характеризующие пороговые и средние величины дозой нагрузки на область сосудистых эректильных критических органов при различных режимах фракционирования

Table 4

Published data characterizing the limit and mean values of dose on the area of vascular ErOAR in different fractionation regimes

Структура (орган)	Показатель	Референсное значение	Полученное значение (±SD)	Авторы
Стандартное фракционирование (РОД 1,8–2,0 Гр) до СОД 75–80 Гр				
Внутренняя половая артерия	D5% (Гр)	—	PTV _{10 mm} — 44 PTV _{5 mm} — 30,4	P. W. McLaughlin et al. [3]
	D50% (Гр)	—	PTV _{10 mm} — 28 PTV _{5 mm} — 18,4	
	D100% (Гр)	<36	—	D. E. Spratt et al. [4]
	D5% (Гр)	—	Справа — 50,1 (±14,9) слева — 49,6 (±13,9)	H. Samlali et al. [5]
	D50% (Гр)	—	Справа — 28,9 (±8,1) слева — 31,3 (±8)	
	D100% (Гр)	<40	—	S. Ciabatti et al. [8]
	D _{mean} (Гр)	—	24,6 (±5,9)	
Луковица полового члена	D5% (Гр)	—	PTV _{10 mm} — 49,6 PTV _{5 mm} — 32	P. W. McLaughlin et al. [3]
	D50% (Гр)	—	PTV _{10 mm} — 15,2 PTV _{5 mm} — 11,2	
	D _{mean} (Гр)	—	16,6 (±10,1)	H. Samlali et al. [5]
	D2% (Гр)	<50	52,1 (±63,3)	E. Rasmusson et al. [14]
	D _{mean} (Гр)	<20	24,5 (±20,2)	
Ножки кавернозных тел	D5% (Гр)	—	PTV _{10 mm} — 39 PTV _{5 mm} — 23	P. W. McLaughlin et al. [3]
	D50% (Гр)	—	PTV _{10 mm} — 35 PTV _{5 mm} — 23	
	D100% (Гр)	<30	—	D. E. Spratt et al. [4]
	D _{mean} (Гр)	—	9 (±5,2)	H. Samlali et al. [5]
	D100% (Гр)	<36	—	S. Ciabatti et al. [8]
	D _{mean} (Гр)	—	14,6 (±11,6)	
	Экстремальное гипофракционирование (РОД 6,1–9 Гр) до СОД 35–45 Гр (85–135 Грэкв)			
	D2% (Гр)	—	5,1 (3,6–38,3)	M. Jaccard et al. [7]
Внутренняя половая артерия	D _{mean} (Гр)	—	2,8 (1,8–19,5)	
	D _{max} (Гр)	≤20	PTV _{45 Гр} — 14,3	A. J. Leiker et al. [9]
	V15Гр (см ³)	<3	PTV _{45 Гр} — 0,3	
	D2% (Гр)	—	24,1 (±7,8)	V. Achard et al. [20]
	D _{mean} (Гр)	—	3,9 (±3,9)	
Луковица полового члена	D2% (Гр)	<50(экв)	46,0 (±54,4)	E. Rasmusson et al. [14]
	D _{mean} (Гр)	<20(экв)	18,7 (±13,1)	
	D _{max} (Гр)	—	PTV _{45 Гр} — 10,3	A. J. Leiker et al. [9]
	D _{mean} (Гр)	—	PTV _{45 Гр} — 3,7	
	D2% (Гр)	≤28,5 (50 Гр(экв))	—	N. G. Zaorsky et al. [11]
Ножки кавернозных тел	D _{mean} (Гр)	≤16 (20 Гр(экв))	—	
	D2% (Гр)	—	9,3 (5,4–28)	M. Jaccard et al. [7]
	D _{mean} (Гр)	—	5,7 (3,2–9,9)	
	D2% (Гр)	—	21,5 (±13,6)	V. Achard et al. [20]
	D _{mean} (Гр)	—	9,8 (±7,9)	
Ножки кавернозных тел	D2% (Гр)	≤12 (13 Гр(экв))	15,7 (±12,4)	V. Achard et al. [20]
	D _{mean} (Гр)	≤4,7	8,0 (±7,1)	

Закключение. Проведенные расчеты позволили сделать ряд важных практических выводов.

Максимальное снижение лучевой нагрузки на ЭрКО при сохранении требуемых параметров

покрытия предписанной дозой объема мишени реализуемо на практике у подавляющего числа пациентов.

Наибольший вклад в снижение лучевой нагрузки на ЭРКО при СС-СТЛТ РПЖ вносит сокращение стандартных отступов при формировании PTV: 3 мм во всех направлениях, 2 мм — в сторону прямой кишки.

Ширина лепестков коллиматора (2,5 мм против 5 мм) не оказывает существенного влияния на радиационную нагрузку на ЭРКО при СС-СТЛТ РПЖ. Таким образом, методика сосудосбережения может быть реализована на большинстве современных ЛУЭ.

Сведения об авторах:

Новиков Роман Владимирович — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник научного отделения радиационной онкологии и ядерной медицины федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Петрова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, Песочный пос., Ленинградская ул., д. 68; профессор кафедры урологии федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID 0000–0003–1873–1293;

Лясович Георгий Александрович — врач-уролог хирургического отделения клинического госпиталя федерального казенного учреждения здравоохранения «Медико-санитарная часть Министерства внутренних дел Российской Федерации по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области»; 194291, Санкт-Петербург, пр. Культуры, д. 2; ORCID 0000–0002–4996–2927;

Быкова Екатерина Сергеевна — медицинский физик отделения радиотерапии федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Петрова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, Песочный пос., Ленинградская ул., д. 68;

Пономарева Ольга Игоревна — врач-рентгенолог отделения радиотерапии федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Петрова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, Песочный пос., Ленинградская ул., д. 68; ORCID 0000–0002–8314–3722;

Карандашов Василий Кириллович — заведующий отделением онкоурологии клиники урологии федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID 0009–0001–5155–9491;

Арсеньев Андрей Иванович — доктор медицинских наук, профессор, врач-радиотерапевт отделения радиотерапии федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Петрова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, Песочный пос., Ленинградская ул., д. 68; ORCID 0000–0002–3100–6451;

Новиков Сергей Николаевич — доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач РФ, ведущий научный сотрудник, заведующий отделением радиотерапии, заведующий научным отделением радиационной онкологии и ядерной медицины федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Петрова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, Песочный пос., Ленинградская ул., д. 68; ORCID 0000–0002–7185–1967;

Протошак Владимир Владимирович — доктор медицинских наук, профессор, начальник кафедры урологии федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID 0000–0002–4996–2927.

Information about authors:

Roman V. Novikov — Dr. of Sci. (Med.), leading researcher, scientific department of radiation oncology and nuclear medicine, N. N. Petrov national medical research center of oncology of the Ministry of Health of the Russian Federation; 197758, Pesochny settlement, St. Petersburg, Leningradskaya str., 68; professor of the department of urology of the Military Medical Academy of the Ministry of Defense of the Russian Federation; 194044, St. Petersburg, Akademika Lebedeva str., 6; ORCID 0000–0003–1873–1293;

Georgy A. Lyasovich — urologist, surgical department, clinical hospital, medical unit of the ministry of internal affairs of the Russian Federation for St. Petersburg and the Leningrad Region; 194291, St. Petersburg, Kultury Ave., 2; ORCID 0000–0002–4996–2927;

Ekaterina S. Bykova — medical physicist of the department of radiotherapy of the N. N. Petrov national medical research center of oncology of the Ministry of Health of the Russian Federation; 197758, Pesochny Settlement, St. Petersburg, Leningradskaya str. 68;

Olga I. Ponomareva — radiologist of the department of radiotherapy of the N. N. Petrov national medical research center of oncology of the Ministry of Health of the Russian Federation; 197758, Pesochny Settlement, St. Petersburg, Leningradskaya str. 68; ORCID 0000–0002–8314–3722;

Vasily K. Karandashov — head of the department of oncology of the Military Medical Academy of the Ministry of Defense of the Russian Federation; 194044, St. Petersburg, Akademika Lebedeva str., 6; ORCID 0009–0001–5155–9491;

Andrey I. Arsenyev — Dr. of Sci. (Med.), professor, radiotherapist of the department of radiotherapy of the N. N. Petrov national medical research center of oncology of the Ministry of Health of the Russian Federation; 197758, Pesochny Settlement, St. Petersburg, Leningradskaya str. 68; ORCID 0000–0002–3100–6451;

Sergey N. Novikov — Dr. of Sci. (Med.), professor, honored doctor of the Russian Federation, leading researcher, head of the department of radiotherapy, head of the scientific department of radiation oncology and nuclear medicine of the N. N. Petrov national medical research center of oncology of the Ministry of Health of the Russian Federation; 197758, Pesochny Settlement, St. Petersburg, Leningradskaya str. 68; ORCID 0000–0002–7185–1967;

Vladimir V. Protoshchak — Dr. of Sci. (Med.), professor, head of the department of urology of the Military Medical Academy of the Ministry of Defense of the Russian Federation; 194044, St. Petersburg, Akademika Lebedeva str., 6; ORCID 0000–0002–4996–2927.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распре-

делен следующим образом: концепция и план исследования — Р.В.Новиков; сбор и математический анализ данных — Г.А.Лясович, Е.С.Быкова, О.И.Пономарева, В.К.Карандашев; подготовка рукописи Р.В.Новиков, Г.А.Лясович, А.И.Арсеньев, С.Н.Новиков, В.В.Протоцак.

Authors' contributions. All authors met the ICMJE authorship criteria. Special contribution: RVN aided in the concept and plan of the study; GAL, ESB, OIP, VKK provided collection and mathematical analysis of data; RVN, GAL, AIA, SNN, VVP manuscript assessment.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure. The authors declare no conflict of interest.

Соответствие принципам этики: исследование носило симуляционный характер без участия человека, что не требовало согласования его проведения с этическим комитетом.

Adherence to ethical standards: the study was simulation in nature without human participation, which did not require coordination with the ethics committee.

Поступила/Received: 23.01.2024

Принята к печати/Accepted: 28.02.2025

Опубликована/Published: 29.03.2025

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Gaither T.W., Awad M.A., Osterberg E.C. et al. The natural history of erectile dysfunction after prostatic radiotherapy: a systematic review and meta-analysis // *J. Sex. Med.* 2017. Vol. 14, No. 9. P. 1071–1078. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsxm.2017.07.010>.
2. Mahmood J., Shamah A.A., Creed T.M. et al. Radiation-induced erectile dysfunction: Recent advances and future directions // *Adv. Radiat. Oncol.* 2016. Vol. 1, No. 3. P. 161–169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.adro.2016.05.003>.
3. McLaughlin P.W., Narayana V., Meirovitz A. et al. Vessel-sparing prostate radiotherapy: dose limitation to critical erectile vascular structures (internal pudendal artery and corpus cavernosum) defined by MRI // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2005. Vol. 61, No. 1. P. 20–31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2004.04.070>.
4. Spratt D.E., Lee J.Y., Dess R.T. et al. Vessel-sparing radiotherapy for localized prostate cancer to preserve erectile function: a single-arm phase 2 trial // *Eur. Urol.* 2017. Vol. 72, No. 4. P. 617–624. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2017.02.007>.
5. Samlali H., Udrescu C., Lapiere A. et al. Prospective evaluation of a specific technique of sexual function preservation in external beam radiotherapy for prostate cancer // *Br. J. Radiol.* 2017. Vol. 90, No. 1078. 20160877. doi: <https://doi.org/10.1259/bjr.20160877>.
6. Jackson W.C., Silva J., Hartman H.E. et al. Stereotactic body radiation therapy for localized prostate cancer: a systematic review and meta-analysis of over 6,000 patients treated on prospective studies // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2019. Vol. 104, No. 4. P. 778–779. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2019.03.051>.
7. Jaccarda M., Lamannaa G., Dubouloza A. et al. Dose optimization and endorectal balloon for internal pudendal arteries sparing in prostate SBRT // *Med. Phys.* 2019. Vol. 61, No. 1. P. 28–32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.04.008>.
8. Ciabatti S., Ntreta M., Buwenge M. et al. Dominant intraprostatic lesion boosting in sexual-sparing radiotherapy of prostate cancer: a planning feasibility study // *Med. Dosim.* 2019. Vol. 44. P. 356–364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2019.01.008>.
9. Leiker A.J., Rezaeian N.H., Laine A.M. et al. Prostate cancer neurovascular element sparing with stereotactic ablative radiation therapy (SABR): a pilot dosimetric study for the POTEN-C Trial // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2018. Vol. 102, No. 3. P. e125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2018.07.335>.
10. Канаев С.В., Новиков С.Н., Мельник Ю.С. и др. Методология стереотаксической лучевой терапии рака предстательной железы // *Вопросы онкологии*. 2017. Т. 63, № 2. С. 287–293. [Kanaev S.V., Novikov S.N., Melnik Yu.S. et al. Methodology of stereotactic radiation therapy for prostate cancer. *Oncology Issues*, 2017, Vol. 63, No 2, pp. 287–293 (In Russ.).] doi: <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2017-63-2-287-293>.
11. Lukka H.R., Pugh S.L., Bruner D.W. et al. Patient reported outcomes in NRG oncology RTOG 0938, evaluating two ultrahypofractionated regimens for prostate cancer // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2018. Vol. 102, No 2. P. 287–95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2018.06.008>.
12. Zaorsky N.G., Yu J.B., McBride S.M. et al. Prostate cancer radiotherapy recommendations in response to COVID-19 // *Adv. Radiat. Oncol.* 2020. Online ahead of print. PMID: 32292839. doi: <https://doi.org/10.1016/j.adro.2020.03.010>.
13. Roach M. III, Nam J., Gagliard G. et al. Radiation dose–volume effects and the penile bulb // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2010. Vol. 76, No. 3. P. 130–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2009.04.094>.
14. Rasmussen E., Gunnlaugsson A., Wieslander E. et al. Erectile dysfunction and absorbed dose to penile base structures in a randomized trial comparing ultrahypofractionated and conventionally fractionated radiation therapy for prostate cancer // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2020. Vol. 107, No 1. P. 143–151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2020.01.022>.
15. Murray J., Gulliford S., Griffin C. et al. Evaluation of erectile potency and radiation dose to the penile bulb using image guided radiotherapy in the CHHiP trial // *Clin. Transl. Radiat. Oncol.* 2019. Vol. 21. P. 77–84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2019.12.006>.
16. Tøndel H., Lund J.Å., Lydersen S. et al. Dose to penile bulb is not associated with erectile dysfunction 18 months post radiotherapy: A secondary analysis of a randomized trial // *Clin. Transl. Radiat. Oncol.* 2018. Vol. 13. P. 50–56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2018.09.006>.
17. Zhang E., Ruth K.J., Buyyounouski M.K. et al. Long-term results of a phase 3 randomized prospective trial of erectile tissue-sparing intensity-modulated radiation therapy for men with clinically localized prostate cancer // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2023. Vol. 115, No 5. P. 1074–1084. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2022.12.008>.
18. Новиков Р.В., Пономарева О.И., Литинский С.С., Новиков С.Н. Анатомо-топографическое обоснование «сосудосберегающей» лучевой терапии рака предстательной железы // *Экспериментальная и клиническая урология*. 2020. № 2. С. 84–91. [Novikov R.V., Ponomareva O.I., Litinskiy S.S., Novikov S.N. Anatomical and topographic justification of the «vaso-sparing» radiation therapy of prostate cancer. *Experimental and clinical urology*, 2020, Vol. 2, pp. 84–91 (In Russ.).] doi: <https://doi.org/10.29188/2222-8543-2020-12-2-84-91>.
19. Böckelmann F., Hammon M., Lettmaier S. et al. Penile bulb sparing in prostate cancer radiotherapy: dose analysis of an in-house MRI system to improve contouring // *Strahlenther Onkol.* 2019. Vol. 195, No. 2. P. 153–163. doi: <https://doi.org/10.1007/s00066-018-1377-0>.

20. Achard V., Zilli T., Lamanna G. et al. Urethra-sparing prostate cancer stereotactic body radiotherapy: sexual function and radiation dose to the penile bulb, the crura, and the internal pudendal arteries from a randomized phase 2 trial // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2023. S0360–3016(23)08307–4. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2023.12.037>.
21. Le Guevelou J., Sargos P., Ferretti L. et al. Sexual structure sparing for prostate cancer radiotherapy: a systematic review // *Eur. Urol. Oncol.* 2023. S2588–9311(23)00163–3. doi: <https://doi.org/10.1016/j.euo.2023.08.003>.
22. Новиков Р.В., Новиков С.Н., Протошак В.В. и др. Радиационно-индуцированная эректильная дисфункция у больных раком предстательной железы: современный взгляд на патогенез // *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2021. Т. 102, № 1. С. 66–74. [Novikov R.V., Novikov S.N., Protoshchak V.V. et al. Radiation-induced erectile dysfunction in patients with prostate cancer: a modern view of pathogenesis. *Bulletin of Radiology and Radiology*, 2021, Vol. 102, No 1, pp. 66–74 (In Russ.).] doi: <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2021-102-1-66-74>.
23. Li T., Yuan L., Lee W. et al. SU-E-T-406: Online image-guidance for prostate SBRT: dosimetric benefits and margin analysis // *Med. Phys.* 2012. Vol. 39, No 6. P. 3798. doi: <https://doi.org/10.1118/1.4735495>.
24. Kisivan K., Antal G., Gulyban A. et al. Triggered imaging with Auto Beam Hold and pre-/posttreatment CBCT during prostate SABR: analysis of time efficiency, target coverage, and normal volume changes // *Pract. Radiat. Oncol.* 2021. Vol. 11, No 2. E 210-e 218. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pro.2020.04.014>.
25. Wu Q.J., Wang Z., Kirkpatrick J.P. et al. Impact of collimator leaf width and treatment technique on stereotactic radiosurgery and radiotherapy plans for intra- and extracranial lesions // *Radiat. Oncol.* 2009. Vol. 4, No 3. doi: <https://doi.org/10.1186/1748-717X-4-3>.
26. Chang J., Yenice K.M., Jiang K. et al. Effect of MLC leaf width and PTV margin on the treatment planning of intensity-modulated stereotactic radiosurgery (IMSR) or radiotherapy (IMSRT) // *Med. Dosim.* 2009. Vol. 34, No. 2. P. 110–116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2008.06.002>.
27. Abisheva Z., Floyd S.R., Salama J.K. et al. The effect of MLC leaf width in single-isocenter multi-target radiosurgery with volumetric modulated arc therapy // *J. Radiosurg. SBRT*. 2019. Vol. 6, No 2. P. 131–138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2008.06.002>.

VII СЪЕЗД НАЦИОНАЛЬНОГО ОБЩЕСТВА НЕЙРОРАДИОЛОГОВ

МОСКВА, 2025



Дорогие друзья!

От лица Национального общества нейрорадиологов имею честь пригласить вас принять участие в VII съезде, который пройдет 4–6 сентября 2025 года в городе-герое Москве.

Нейрорентгенология наряду с другими нейронауками — это современная, быстро развивающаяся область знаний, поэтому наш форум будет сфокусирован на передовых научных исследованиях: российские научные группы во главе с корифеями нейровизуализации представят данные своих новых научных изысканий. Образовательные лекции и сообщения о современном уровне развития технологий в рентгенологии также будут включены в программу.

Основными темами съезда будут нейроонкология, сосудистые и демиелинизирующие заболевания головного мозга, нейротравма, эпилепсия, молекулярно-генетические исследования, нейробиобанкинг и искусственный интеллект. Лучшие работы молодых ученых будут опубликованы в виде статей в журнале «Радиология — практика».

Этот съезд откроет новые возможности для обмена опытом и внедрения научных достижений в практическую медицину.

Я уверена, что мы вместе подготовим выдающуюся научную программу, а встреча с друзьями в Москве будет незабываемой.

Захарова Наталья Евгеньевна

Президент VII съезда Национального общества нейрорадиологов

Информация о мероприятии — на сайте <http://rusneurorad.ru>