ISSN 1561-8358 (Print) ISSN 2524-244X (Online)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-166-176 УДК 519.876.5 CC) BY 4.0

Оригинальная статья

М. Н. Петкевич^{*}, В. Ю. Юшкевич

Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова, аг. Лесной, 223040, Минский район, Минская область, Республика Беларусь

РАЗРАБОТКА И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ЛЕЧЕНИЯ ECLIPSE

Аннотация. Выполнена автоматизация процесса подготовки к лучевой терапии путем разработки и машинного обучения многокритериальной модели распределения дозы ионизирующего излучения с помощью инструментария искусственного интеллекта, внедренного в модуль RapidPlan компьютерной системы планирования облучения Eclipse v16.1 (Varian Medical Systems). Для машинного обучения модели проведен ретроспективный анализ данных для 40 пациентов с патологиями грудного и поясничного отделов позвоночника. Для каждого пациента создан план распределения дозы излучения методом стереотаксической лучевой терапии с помощью инверсного метода моделирования с дозовым режимом фракционирования 6 Гр по пять фракций. Проведена оценка производительности созданной модели на тестовой выборке из 10 пациентов. Результаты верификации подтверждают пригодность модели для клинического применения в учреждениях здравоохранения онкологического профиля и перспективность ее использования для создания персонализированных планов лечения. Автоматизация процесса предлучевой подготовки позволила сократить временные затраты на компьютерное моделирование трехмерного распределения дозы ионизирующего излучения и повысить качество оказываемой специализированной медицинской помощи методом стереотаксической лучевой терапии.

Ключевые слова: многокритериальная модель, автоматизированное моделирование, трехмерное дозовое распределение, ионизирующее излучение, модуль RapidPlan v16.1, компьютерная система планирования облучения Eclipse v16.1, машинное обучение

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Петкевич Максим Николаевич* – начальник отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова. E-mail: maxpetkevichn@gmail.com; *Юшкевич Виктория Юрьевна* – медицинский физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии и медицинской радиологии и медицинской радиологии и медицинской радиологии имени Виктория *Юрьевна* – медицинский физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии имени Виктория. E-mail: yushkevich.ur@gmail.com

Вклад авторов: авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Для цитирования: Петкевич, М. Н. Разработка и машинное обучение многокритериальной модели распределения дозы ионизирующего излучения в системе планирования лечения Eclipse / М. Н. Петкевич, В. Ю. Юшкевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 166–176. https:// doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-166-176

Поступила в редакцию: 04.03.2025 Доработанный вариант: 05.05.2025 Утверждена к публикации: 12.06.2025 Подписана в печать: 19.06.2025

[©] Петкевич М. Н., Юшкевич В. Ю., 2025

^{*} Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Maksim N. Pietkevich^{*}, Viktoryia Yu. Yushkevich

N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, agro-town Lesnoy, 223040, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus

DEVELOPMENT AND MACHINE LEARNING OF A MULTI-CRITERIA IONIZING RADIATION DOSE DISTRIBUTION MODEL IN THE ECLIPSE TREATMENT PLANNING SYSTEM

Abstract. The automation of the radiotherapy preparation process is demonstrated through the development and machine learning of a multi-criteria ionizing radiation dose distribution model, using artificial intelligence tools embedded in the RapidPlan module of the Eclipse vl6.1 (Varian Medical Systems) treatment planning system. A retrospective data analysis of 40 patients with thoracic and lumbar spine pathologies was performed to train the model. For each patient, a radiation dose distribution model was created using stereotactic radiation therapy with an inverse planning method and a dose fractionation regimen of 6 Gy in 5 fractions. The performance of the developed model was evaluated on a test set of 10 patients. Verification results confirm the model's suitability for clinical application in oncological healthcare facilities and the prospect of using it to create personalized treatment plans. Automation of the pre-radiotherapy preparation process reduced the time spent on computer modeling of the three-dimensional ionizing radiation dose distribution and improved the quality of specialized medical care provided by stereotactic radiation therapy.

Keywords: multi-criteria model, automated modeling, three-dimensional dose distribution, ionizing radiation, RapidPlan v16.1, treatment planning system Eclipse v16.1, machine learning

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Maksim N. Pietkevich* – Head of the Department for Engineering Support of Radiation Therapy at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus. E-mail: maxpetkevichn@gmail.com; *Viktoryia Yu. Yushkevich* – Medical Physicist of the Department for Engineering Support of Radiation Therapy at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus. E-mail: yushkevich.ur@gmail.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to the writing of the article.

For citation: Pietkevich M. N., Yushkevich V. Yu. Development and machine learning of a multi-criteria ionizing radiation dose distribution model in the Eclipse treatment planning system. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 2, pp. 166–176 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-166-176

Received: 04.03.2025 Modified: 05.05.2025 Approved for publication: 12.06.2025 Signed to the press: 19.06.2025

Введение. Клиническое применение лучевой терапии с модулированной интенсивностью (IMRT, Intensity-Modulated Radiation Therapy) и ротационного облучения с переменными характеристиками излучения (VMAT, Volumetric Modulated Arc Therapy) обосновано компьютерным моделированием оптимального трехмерного распределения дозы излучения. Однако процесс оптимизации трудоемкий, зависит от квалификации медицинского физика и приводит к вариативности характеристик трехмерного распределения дозы излучения, поскольку приходится идти на компромиссы между клиническими целями и сложностями при формализации этих целей для оптимизации.

Ярким примером указанных сложностей является лечение патологий грудного и поясничного отделов позвоночника методом стереотаксической лучевой терапии (СЛТ). Данный метод подразумевает использование современных технологий визуализации и пространственного моделирования распределения дозы излучения, что позволяет эффективно доставлять предписанные дозы излучения к мишени с высокой точностью. СЛТ показала свою результативность при лечении метастатических опухолей позвоночника, уменьшая болевой синдром и рост опухоли, а также при лечении радиорезистентных опухолей (почечно-клеточная карцинома и саркома [1]). Несмотря на эффективность СЛТ, анатомическое расположение новообразований по всей длине спинномозгового канала приводит к индивидуальным непредсказуемым особенностям расположения окружающих нормальных тканей и органов риска, а также конфигурации самих опухолей. Индивидуальные особенности расположения окружающих нормальных тканей и критических органов влияют на дозовые ограничения, что приводит к расхождениям в оценке параметров и характеристик моделей трехмерного распределения дозы излучения в разных отделах позвоночника.

Стереотаксическая лучевая терапия при патологиях отделов позвоночника – неотложный метод специализированной медицинской помощи при новообразованиях с компрессией спинного мозга [2]. Тем не менее компьютерное моделирование трехмерного распределения дозы излучения может занимать несколько часов или даже дней и требует множества итераций с изменением клинических и дозиметрических целей оптимизации и приоритетов для органов риска и планируемого объема облучения (PTV, Planning Target Volume). Временные затраты на создание трехмерной модели распределения дозы излучения также зависят от квалификации медицинского физика, компьютерной системы планирования облучения и параметров клинически приемлемой модели распределения дозы излучения (клинических целей) для каждого конкретного радиологического отделения [3].

Для стандартизации и оптимизации процесса моделирования авторами выбран инструмент RapidPlan – модуль на основе искусственного интеллекта (ИИ) в компьютерной системе планирования облучения Eclipse v.16.1 (Varian Medical Systems), который применяется для разработки и машинного обучения моделей распределения дозы излучения. Модуль RapidPlan использует предварительно загруженные авторами клинически приемлемые планы распределения дозы ионизирующего излучения с целью прогнозирования гистограмм доза-объем (DVH, Dose Volume Histogram) для органов риска и планируемых объемов облучения [4]. Несмотря на успешные результаты применения в Республиканском научно-практическом центре онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова (далее – Центр) модуля RapidPlan при создании многокритериальных моделей для различных новообразований, эффективность данного подхода в сложных случаях, таких как СЛТ опухолей позвоночника, требует дальнейших исследований.

Таким образом, *цель данного исследования* – повышение эффективности компьютерного моделирования трехмерного распределения дозы ионизирующего излучения для случаев СЛТ грудного и поясничного отделов позвоночника при оптимизации процесса предлучевой подготовки с помощью разработанной многокритериальной модели SRT_vertebrae (от англ. Stereotactic Radiation Therapy (SRT) – стереотаксическая радиотерапия, лат. vertebrae – позвонки).

В основе автоматизированного моделирования лежит применение искусственного интеллекта для обучения многокритериальных моделей на больших массивах данных, извлеченных из клинически приемлемых планов распределения дозы ионизирующего излучения, и дальнейшего использования этих моделей, созданных с помощью ИИ, для прогнозирования, принятия решений и автоматизации рутинных задач в процессе предлучевой подготовки [5]. Основное отличие автоматизированного моделирования от моделирования трехмерного распределения дозы ионизирующего излучения заключается в степени участия медицинского физика в процессе разработки плана распределения дозы излучения и в используемых инструментах оптимизации. Моделирование трехмерного распределения дозы ионизирующего излучения является неотъемлемой частью процесса предлучевой подготовки для каждого клинического случая.

Материалы и методы. Для исследования авторами сформирована библиотека планов из 50 пациентов с патологиями грудного и поясничного отделов позвоночника, которые ранее получали специализированную медицинскую помощь методом стереотаксической лучевой терапии. Выборка пациентов осуществлялась случайным образом, за исключением пациентов с патологиями поясничного отдела ниже L2-L3 позвонков по причине окончания спинного мозга в области L2. Дозиметрические и геометрические характеристики моделей трехмерного распределения дозы излучения для каждого пациента импортированы в компьютерную систему планирования облучения Eclipse v16.1 для разработки и машинного обучения многокритериальной модели SRT vertebrae.

Клинические цели представляют собой комплексные и индивидуализированные цели, направленные на максимизацию эффективности лечения и минимизацию побочных эффектов. Они требуют тщательного планирования, оптимизации и проверки, а также постоянного мониторинга и адаптации в процессе лечения. При оптимизации трехмерного распределения дозы излучения клинические цели определяют наилучшее дозовое распределение в PTV, учитывая минимальное повреждение окружающих здоровых тканей. Достижение клинических целей зачастую осложняется их многогранностью и внутренней противоречивостью, что обуславливает необходимость принятия компромиссных решений, адаптированных к индивидуальным особенностям каждого пациента. В табл. 1 представлены клинические цели оптимизации для органов риска при пятифракционной СЛТ.

Несмотря на вариативность набора структур для каждого конкретного случая, в базовый набор структур включены PTV, спинной мозг, сердце, аорта, легкие и пищевод, а также пла-

нируемый объем риска (PRV, Planning Risk Volume) для спинного мозга. Планируемый объем риска для органа – виртуальная структура, которая создается вокруг критически важного органа (OAR, organ at risk) при планировании лучевой терапии для учета неопределенностей и вариаций в процессе лечения, таких как движение пациента, неточности в позиционировании и анатомические изменения. PRV для спинного мозга определялся как виртуальное расширение спинного мозга на 1 мм. Критически важный орган (OAR) – это здоровый орган или ткани, расположенные вблизи PTV или входящие в него, которые могут быть повреждены в результате воздействия ионизирующего излучения.

Таблица 1. Дозовые нагрузки для критически важных органов при пятифракционной стереотаксической лучевой терапии позвоночника [6]

| Анатомическая структура | Объем | Целевая доза излучения, Гр Target radiation dose, Gy | | |
|--|-----------------------|---|-------------------|--|
| Anatomical structure | Volume | допустимая permissible | строгая strict | |
| PTV | 95 % | - | 30 | |
| Спинной мозг и PRV для спинного мозга Spinal cord and spinal cord PRV | 0,035 см ³ | 25,3 | 28 | |
| | 0,1 см ³ | 23 | 30 | |
| | 0,35 см ³ | - | 22 | |
| | 1 cm ³ | 14,5 | _ | |
| | 1,2 см ³ | _ | 14,5 | |
| Сердце Heart | 0,035 см ³ | _ | 38 | |
| | 0,5 см ³ | 27 | 29 | |
| | 15 см ³ | _ | 32 | |
| Аорта Aorta | 0,035 см ³ | - | 53 | |
| | 0,03 см ³ | - | 60 | |
| | 0,5 см ³ | _ | 53 | |
| | 10 см ³ | _ | 47 | |
| Легкие (правое и левое) Lungs (right and left) | 10 % | 20 | _ | |
| | 15 % | _ | 20 | |
| | 1000 см ³ | _ | 13,5 | |
| для мужчин / for men | 1500 см ³ | | 12.5 | |
| для женщин / for women | 950 см ³ | 1 — | 12,3 | |
| Пищевод | 0,035 см ³ | 35 | 38 | |
| Esophagus | 0,03 см ³ | - | 35 | |
| | 0,5 см ³ | 32 | 34 | |
| | 5 см ³ | 19,5 | 32,5 | |

Table 1. Dose constraints for organs at risk in five-fraction stereotactic radiotherapy of the spine [6]

Для компьютерного моделирования трехмерного распределения дозы излучения и оценки дозовых нагрузок на OAR и PTV в случаях наложения PTV на спинномозговой канал авторами создана структура PTV сгор путем вычитания объема спинномозгового канала из PTV.

При создании библиотеки планов для обучения модели распределения дозы излучения медицинский физик применял стандартные методы моделирования: техника четырех компланарных дуг с индивидуальной настройкой угла коллиматора для каждого клинического случая и критерии оценки дозовых нагрузок для критически важных органов и планируемого объема облучения (см. табл. 1). Планы распределения дозы оптимизировались в компьютерной системе планирования облучения Eclipse v16.1 с помощью алгоритма Photon Optimizer v16.1, с использованием клинических целей оптимизации, представленных в табл. 1, и дозовое распределение рассчитывалось с помощью алгоритма Acuros XB v16.1. Дозовый режим фракционирования – 6 Гр по пять фракций на PTV при ограничении дозы излучения на критические органы риска. Для всех моделей применялся автоматический контроль дозы излучения в нормальных (здоровых) тканях организма пациента (NTO, normal tissue objectives). Для повышения точности оптимизации, обусловленной наличием небольших оцениваемых структур (спинной мозг и PRV для спинного мозга), разрешение расчетной сетки установлено на 1,25 мм. После создания библиотеки планов трехмерного распределения дозы излучения, оптимизированных с применением стандартных методов моделирования, случайным образом была сформирована выборка из 40 планов распределения дозы для добавления в многокритериальную модель SRT_vertebrae. Оставшиеся 10 планов распределения дозы излучения сформировали независимую выборку для проверки многокритериальной модели SRT_vertebrae. При добавлении плана распределения дозы излучения в SRT_vertebrae извлекаются следующие данные: геометрические характеристики пучков облучения, набор структур, трехмерное дозовое распределение, гистограммы DVH и гистограммы расстояния до цели – расстояния между мишенью и точками, получающими дозу излучения (DTH, dose-to-target histogram), которые преобразуются в параметры многокритериальной модели [4].

Машинное обучение многокритериальной модели происходит после завершения процесса извлечения данных. Для этого обучения необходимо как минимум 20 планов распределения дозы излучения, также она должна присутствовать в наборе структур не менее чем в 20 планах для включения в модель конкретной структуры. При создании и машинном обучении модели модуль RapidPlan на основе извлеченных данных формирует ряд статистических графиков, параметров и журнал обучения, чтобы определить работоспособность модели. Журнал обучения включает такие статистические данные, как коэффициент детерминации и хи-квадрат (χ^2), которые показывают работоспособность первоначальной модели. Также можно оценить гистограммы DVH для каждой структуры на одном графике, что позволяет легко обнаружить выбросы, графики зависимости регрессии и графики зависимости остатков.

При обнаружении выбросов необходимо определить, является ли данный случай геометрическим или дозиметрическим выбросом [7, 8]. В зависимости от типа выявленного выброса для улучшения работы многокритериальной модели можно добавить дополнительные схожие случаи и актуализировать данный случай для достижения необходимых геометрических или дозиметрических характеристик либо удалить план распределения дозы излучения из библиотеки планов [8].

После корректировки выбросов для проверки приемлемости модели SRT_vertebrae авторами проведена верификация на независимой статистической выборке из 10 пациентов. Для каждого из контрольных случаев создан план распределения дозы излучения с помощью модели SRT_vertebrae, чтобы оценить гистограммы DVH и достижение клинических целей оптимизации. На рис. 1 отображено графическое представление распределения дозы излучения для критически важных органов: спинного мозга (кривая синего цвета) и PRV для спинного мозга (кривая зеленого цвета). Также визуализированы сгенерированные многокритериальной моделью SRT_vertebrae диапазоны гистограмм DVH (кривые, выполненные пунктирной линией), основанные на информации о предписанной дозе излучения и анатомии пациента, которые предсказывают наиболее вероятное положение кривых указанных гистограмм для OAR. Для планируемого объема облучения диапазон гистограмм DVH не генерируется.



Рис. 1. Гистограммы доза-объем для планов распределения дозы излучения с помощью автоматизированного моделирования для опухоли грудного отдела позвоночника (*a*) и доза-объем для планов распределения дозы излучения с помощью автоматизированного моделирования для опухоли поясничного отдела позвоночника (*b*)
Fig. 1. Dose-volume histograms for radiation dose distribution plans using automated modeling for a thoracic spine tumor (*a*) and for radiation dose distribution plans using automated modeling for a lumbar spine tumor (*b*)

При оптимизации трехмерного распределения дозы излучения модуль RapidPlan выделяет приоритет целевой структуре, что создает определенные сложности при наложении органа риска на PTV. Чтобы избежать переобучения многокритериальной модели, использовалась структура PTV_crop. Модель SRT_vertebrae запоминает не только общие закономерности в данных, но и случайные колебания и специфические особенности обучающего набора. В результате SRT_vertebrae идеально работает на обучающих данных, однако показывает плохие результаты на новых данных, так как она запомнила детали, которые не являются репрезентативными для генеральной совокупности [9, 10].

Результаты и их обсуждение. Являющиеся независимой статистической выборкой все 10 планов трехмерного распределения дозы излучения (см. рис. 2, 3), оптимизированные с применением стандартных методов моделирования и с помощью многокритериальной модели SRT_vertebrae, соответствуют приоритетным дозовым ограничениям, указанным в табл. 1. Планы распределения дозы излучения не нормализованы, чтобы не ухудшить результат оптимизации. Нормализация плана – это процесс масштабирования дозового распределения, гарантирующий обеспечение требуемых условий облучения по отношению к PTV, например, 95 % целевого объема получает предписанную дозу.

Визуальное сравнение результатов моделирования, сгенерированных моделью SRT_vertebrae и оптимизированных медицинским физиком с помощью стандартных методов моделирования, представлено на рис. 2, 3. На рис. 4, 5 показано сравнение результатов моделирования планов распределения дозы излучения с помощью гистограмм DVH.







Рис. 3. План распределения дозы излучения для опухоли поясничного отдела позвоночника, оптимизированный с использованием стандартных методов моделирования (слева) и с помощью автоматизированного моделирования (справа) Fig. 3. Radiation dose distribution model for a lumbar spine tumor, optimized using standard modeling techniques (left) and automated modeling (right)



Рис. 4. Сравнение результатов моделирования планов распределения дозы излучения с помощью гистограмм доза-объем для опухоли грудного отдела позвоночника:
 1 – использование стандартных методов моделирования, 2 – использование автоматизированного моделирования Fig. 4. Comparison of radiation dose distribution plan modeling results using dose-volume histograms for a thoracic spine tumor: 1 – using standard modeling techniques, 2 – using automated modeling



Fig. 5. Comparison of radiation dose distribution plan modeling results using dose-volume histograms for a lumbar spine tumor; a – optimized with automated modeling, b – optimized with standard modeling techniques

Результаты оценки для спинного мозга и PRV для спинного мозга путем количественного сравнения параметров D0.035см³, D0.1см³, D0.35см³, D1см³, D1.2см³, а также для планируемого объема облучения для планов распределения дозы излучения, оптимизированных с использованием стандартных методов моделирования и сгенерированных с помощью модели SRT vertebrae [6], представлены в табл. 2.

Применение модели SRT_vertebrae привело к улучшению результата при выгораживании OAR по сравнению с моделями распределения дозы излучения, оптимизированными стандартными методами моделирования, без существенных изменений в покрытии PTV D95%. Клинические цели для оптимальной модели распределения дозы излучения включают дозу в 95 % (D95%) объема PTV_crop, получающего предписанную дозу (30 Гр) или больше (D95% – D100%), а максимальная доза излучения в 1 % (D1%) объема PTV сгор должна соответствовать ≤ 160 %

от предписанной дозы излучения (D1% – D160%). Все планы распределения дозы излучения, сгенерированные многокритериальной моделью SRT_vertebrae, соответствуют клинической цели D95% – D100%. При этом только 8 из 10 планов, оптимизированных медицинским физиком с помощью стандартных методов моделирования, соответствовали клинической цели D95% – D100% предписанной дозы излучения. Все планы распределения дозы излучения, оптимизированные медицинским физиком с помощью стандартных методов моделирования дозы излучения. Все планы распределения дозы излучения, оптимизированные медицинским физиком с помощью стандартных методов моделирования, соответствовали клинической цели D1% – D160%.

Таблица 2. Сравнение дозовых нагрузок на OAR и PTV в планах распределения дозы излучения, рассчитанных с использованием стандартных методов моделирования и планах распределения дозы излучения, оптимизированных моделью SRT_vertebrae (значения – среднее ± стандартное отклонение) Table 2. Comparison of dose exposure to OARs and PTV in radiation dose distribution models: standard planning and automated planning (mean ± standard deviation)

| Спинной мозг и PRV для спинного мозга Spinal cord and spinal cord PRV | | | | | | | | | |
|--|---------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--|--|--|
| Объем критического органа, см 3 Volume of the organ at risk, cm 3 | 0,035 | 0,1 | 0,35 | | 1,0 | 1,2 | | | |
| Доза излучения, Гр Radiation dose, Gy | 28,0 | 30,0 | 22,0 | | 14,5 | 14,5 | | | |
| Доза излучения для планов, рассчитанных с использованием стандартных методов моделирования, Гр Radiation dose for plans calculated using standard modeling methods, Gy | 27,55 ± 1,22 | 29,79 ± 1,01 | 21,46 ± 1,69 | | 15,81 ± 2,41 | 17,96 ± 3,12 | | | |
| Доза излучения для планов, рассчитанных с использованием автоматизированного моделирования, Гр Radiation dose for plans calculated using automated modeling, Gy | 24,78 ± 0,95 | 21,03 ± 0,89 | 17,32 ± 0,45 | | 10,46 ± 0,43 | 12,37 ± 0,67 | | | |
| Планируемый объем облучения Planned Target Volume (PTV) | | | | | | | | | |
| PTV, % | 95–100 | | | 1–160 | | | | | |
| Доза излучения для планов, рассчитанных с использованием стандартных методов моделирования, % Radiation dose for plans calculated using standard modeling methods, % | 95 ± 1,85 | | | 140 ± 5,22 | | | | | |
| Доза излучения для планов, рассчитанных с использованием автоматизированного моделирования, % Radiation dose for plans calculated using automated modeling, % | 98 ± 0.78 | | | 135 ± 4,45 | | | | | |

При оптимизации планов трехмерного распределения дозы излучения стандартными методами моделирования медицинскому физику требовалось от 5 до 8 итераций для создания клинически приемлемой модели. Временные затраты на компьютерное моделирование составили от 6 до 18 ч. В то время как генерация плана распределения дозы излучения многокритериальной моделью SRT vertebrae без вмешательства медицинского физика продолжалась 40–60 мин.

После завершения процесса машинного обучения многокритериальной модели SRT_vertebrae модуль Model Configuration [4], входящий в состав компьютерной системы планирования облучения Eclipse v.16.1, позволяет анализировать работоспособность созданной модели: этап оценки рассматривается как часть процесса конфигурации, где выявляются и обрабатываются возможные выбросы. Высокое значение коэффициента детерминации (\mathbb{R}^2) не гарантирует получение эффективной многокритериальной модели, поэтому следует учитывать значение данного параметра, чтобы избежать переобучения модели. Согласно [4, 10] оптимальное значение коэффициента детерминации яногокритериальной модели SRT_vertebrae трехмерного распределения дозы излучения численное значение \mathbb{R}^2 равно 0,65, то есть 65 % изменчивости зависимой переменной объясняется независимыми переменными

в модели. Это позволяет ей адаптироваться к различным анатомическим особенностям пациентов. Оптимальное значение χ^2 лежит в пределах 1,1–1,2 [4, 10]. Для созданной модели SRT_vertebrae численное значение данного критерия равно 1,14.

Модуль Model Configuration также позволяет визуально оценить графики зависимости регрессии и зависимости выбросов (рис. 6, 7) на основе идентифицированных критических органов (спинной мозг и PRV для спинного мозга).

На рис. 6 визуализирован доверительный интервал, показывающий диапазон значений, в котором, вероятно, находится истинное значение зависимой переменной для заданного значения независимой переменной. На графике зависимости регрессии можно визуализировать выбросы, то есть точки данных, которые значительно отклоняются от линии регрессии, оказывающие влияние на регрессионную модель. Чем меньше разброс данных вокруг линии регрессии, тем лучше модель соответствует данным [11].

График зависимости остатков – это инструмент для диагностики регрессионных моделей, помогающий выявить проблемы, такие как нелинейность, гетероскедастичность, выбросы и зависимость остатков, что позволяет улучшить многокритериальную модель и получить более надежные результаты. На рис. 7 остатки распределены случайным образом, что указывает на отсутствие систематической ошибки в данных.

Таким образом, результаты верификации показывают адекватность созданной модели SRT_ vertebrae и подтверждают ее пригодность для клинического применения в радиологических отделениях учреждений здравоохранения онкологического профиля.

В исследовании продемонстрирована эффективность автоматизированного моделирования на примере многокритериальной модели SRT_vertebrae, созданной с помощью модуля RapidPlan на основе ИИ, для автоматизации процесса предлучевой подготовки для опухолей грудного и поясничного отделов позвоночника в отделениях Центра. Многокритериальная модель SRT_vertebrae оптимизирует планы распределения дозы излучения, эквивалентные или улучшенные по срав-

Рис. 6. График зависимости регрессии, где по оси X – независимая переменная: общий объем облучения критической структуры, по оси Y – зависимая переменная: наиболее вероятная гистограмма доза-объем для критической структуры, прогнозируемая моделью SRT_vertebrae на основе геометрии критической структуры

Fig. 6. Regression plot: X-axis – total irradiated volume (critical structure), Y-axis – model-predicted DVH (critical structure geometry)

Рис. 7. График зависимости остатков, где по оси X – независимая переменная: предсказанные значения компонент гистограммы доза-объем для критической структуры, по оси Y – зависимая переменная: гистограммы доза-объем, сформированные основываясь на предсказанных значениях

Fig. 7. Residual plot: X-axis - predicted DVH components (critical structure), Y-axis - DVHs formed from predictions

нению с планами, созданными медицинским физиком стандартными методами моделирования, существенно сокращая временные затраты на создание плана распределения дозы излучения.

Преимуществами многокритериальной модели SRT_vertebrae являются прежде всего оптимизация и автоматизация процесса моделирования, что приводит к сокращению временных затрат на создание клинически приемлемого плана распределения дозы, а также потенциальное улучшение характеристик планов распределения дозы излучения и возможность стандартизировать качество и клинические цели оптимизации. Успешное внедрение в клиническую практику SRT_vertebrae привело к повышению эффективности и улучшению параметров компьютерного моделирования трехмерного распределения дозы излучения методом СЛТ для грудного и поясничного отделов позвоночника. Несмотря на временные затраты, необходимые для разработки, машинного обучения и валидации многокритериальной модели SRT_vertebrae, ее использование позволяет перераспределить временные затраты и сосредоточиться на выполнении приоритетных рабочих задач.

Для создания клинически приемлемого плана распределения дозы излучения с минимальным участием или без участия медицинского физика существуют альтернативные методы оптимизации: автоматизированная, приоритетная и многокритериальная оптимизация. Однако уникальным преимуществом рассматриваемой модели является возможность воспроизвести качество планов распределения дозы излучения, достигнутое ранее.

Модель SRT_vertebrae продемонстрировала соответствие клиническим протоколам и стандартам, принятым в Центре. Она не содержит идентифицирующей информации о пациентах, что позволяет внедрить ее в клиническую практику других медицинских учреждений при условии проведения тщательной валидации и адаптации, обеспечивающей соответствие клинической картине медицинского учреждения. На процесс внедрения многокритериальной модели влияют следующие факторы: сопоставимость протоколов лечения, наличие необходимого оборудования, квалификация сотрудников, использующих принципы и методы визуализации целевых объемов и критических органов, а также методы моделирования трехмерного распределения дозы излучения.

Заключение. Настоящее исследование показало эффективность применения созданной многокритериальной модели SRT_vertebrae на основе модуля RapidPlan для усовершенствования процесса оптимизации предлучевой подготовки в радиологических отделениях Центра. В частности, созданная модель SRT_vertebrae на основе ИИ позволила значительно сократить временные затраты на моделирование трехмерного распределения дозы излучения для СЛТ грудного и поясничного отделов позвоночника (от 6–18 ч до 40–60 мин). Это привело к существенному повышению эффективности работы и высвобождению ресурсов для решения других задач.

Анализ параметров полученных планов распределения дозы излучения показал, что планы распределения дозы излучения, сгенерированные многокритериальной моделью SRT_vertebrae, не уступают по своим дозиметрическим характеристикам планам распределения дозы излучения, разработанным с помощью стандартных методов моделирования (техника четырех компланарных дуг с индивидуальной настройкой угла коллиматора для каждого клинического случая и критерии оценки дозовых нагрузок для критически важных органов и планируемого объема облучения (см. табл. 1)). Применение модуля RapidPlan позволило оптимизировать планы распределения дозы излучения, улучшенные по сравнению с планами, созданными медицинским физиком стандартными методами моделирования. Более того, по мере накопления опыта использования модуля RapidPlan и дальнейшего совершенствования предиктивных моделей можно ожидать дальнейшего повышения параметров моделирования трехмерного распределения дозы излучения. Результаты верификации созданной модели SRT_vertebrae доказывают ее адекватность и пригодность для клинического применения в учреждениях здравоохранения онкологического прифила ($\mathbb{R}^2 = 0,65, \chi^2 = 1,14$).

В перспективе усовершенствованные многокритериальные модели могут быть использованы для создания индивидуализированных моделей распределения дозы излучения, адаптированных к уникальным анатомическим особенностям каждого пациента, что позволит минимизировать риск побочных эффектов, связанных с недостаточным облучением целевого объема и превышением допустимых дозовых ограничений для органов риска.

Список использованных источников

1. The efficacy of external beam radiotherapy and stereotactic body radiotherapy for painful spinal metastases from renal cell carcinoma / G. K. Hunter, E. H. Balagamwala, S. A. Koyfman [et al.] // Practical Radiation Oncology. – 2012. – Vol. 2, № 4. – P. 95–100. https://doi.org/10.1016/j.prro.2012.01.005

2. Stereotactic body radiotherapy for metastatic spinal sarcoma: a detailed patterns-of-failure study / J. E. Leeman, M. Bilsky, I. Laufer [et al.] // Journal of Neurosurgery. – 2016. – Vol. 25, № 1. – P. 52–58. https://doi.org/10.3171/2015.11.SPINE151059

3. Reducing inter- and intra-planner variability in radiotherapy plan output with a commercial knowledge-based planning solution / A. Scaggion, M. Fusella, A. Roggio [et al.] // European Journal of Medical Physics. – 2018. – Vol. 53. – P. 86–93. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.08.016

4. Eclipse Photon and Electron Algorithms Reference Guide. – Varian Medical Systems, Inc., 2014. – Ch. 10: DVH Estimation Algorithm for RapidPlan. – P. 219–229. – URL: https://jpneylon.github.io/ABR/PDFs/Add_052418/ EclipseAlgorithms13.6 RefGuide.pdf (date of access: 01.02.2025).

5. Искусственный интеллект в медицинской физике: функции, обязанности, образование и подготовка медицинских физиков клинической квалификации / IAEA (Междунар. агентство по атом. энергии). – Вена, 2025. – 43 с. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-83_R_web.pdf (дата обращения: 01.02.2025).

6. Normal tissue constraints for SRS/SBRT. – URL: https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/products/02_radiation therapy/myqa srs/iba dose contraints poster rev2 0522.pdf (date of access: 01.02.2025).

7. Machine learning and modeling: data, validation, communication challenges / I. El Naqa, D. Ruan, G. Valdes [et al.] // Medical Physics. – 2018. – Vol. 45, Iss. 10. – P. 834–840. https://doi.org/10.1002/mp.12811

8. Effect of Dosimetric Outliers on the Performance of a Commercial Knowledge-Based Planning Solution / A. R. Delaney, J. P. Tol, M. Dahele [et al.] // International Journal of Radiation Oncology Biology Physics. – 2016. – Vol. 94, Iss. 3. – P. 469–477. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2015.11.011

9. Development and evaluation of a clinical model for lung cancer patients using stereotactic body radiotherapy (SBRT) within a knowledge-based algorithm for treatment planning / K. C. Snyder, J. Kim, A. Reding [et al.] // Journal of Applied Clinical Medical Physics. – 2016. – Vol. 17, Iss. 6. – P. 263–275. https://doi.org/10.1120/jacmp.v17i6.6429

10. An analysis of knowledge-based planning for stereotactic body radiation therapy of the spine / J. J. Foy, R. Marsh, R. K. Ten Haken [et al.] // Practical Radiation Oncology. – 2017. – Vol. 7, Iss. 5. – P. E355–E360. https://doi.org/10.1016/j.prro.2017.02.007

11. Can knowledgebased DVH predictions be used for automated, individualized quality assurance of radiotherapy treatment plans? / J. P. Tol, M. Dahele, A. R. Delaney [et al.] // Radiation Oncology. – 2015. – Vol. 10, № 1. – Art. ID 234. https://doi.org/10.1186/s13014-015-0542-1

References

1. Hunter G. K., Balagamwala E. H., Koyfman S. A., Bledsoe T., Sheplan L. J., Reddy C. A., S. T. Chao [et al.]. The efficacy of external beam radiotherapy and stereotactic body radiotherapy for painful spinal metastases from renal cell carcinoma. *Practical Radiation Oncology*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 95–100. https://doi.org/10.1016/j.prro.2012.01.005

2. Leeman J. E., Bilsky M., Laufer I., Folkert M. R., Taunk N. K., Osborne J. R., Arevalo-Perez J. [et al.]. Stereotactic body radiotherapy for metastatic spinal sarcoma: a detailed patterns-of-failure study. *Journal of Neurosurgery*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 52–58. https://doi.org/10.3171/2015.11.SPINE151059

3. Scaggion A., Fusella M., Roggio A., Bacco S., Pivato N., Rossato M. A., Peña L. M. A. [et al.]. Reducing interand intra-planner variability in radiotherapy plan output with a commercial knowledge-based planning solution. *European Journal of Medical Physics*, 2018, vol. 53, pp. 86–93. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.08.016

4. Chapter 10. DVH Estimation Algorithm for RapidPlan. *Eclipse Photon and Electron Algorithms Reference Guide*. Varian Medical Systems, Inc., 2014, pp. 219–229. Available at: https://jpneylon.github.io/ABR/PDFs/Add_052418/ EclipseAlgorithms13.6_RefGuide.pdf (accessed 1 February 2025).

5. IAEA. Artificial Intelligence in Medical Physics. Roles, Responsibilities, Education and Training of Clinically Qualified Medical Physicists. Vienna, 2023. 46 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-83 R web.pdf (accessed 1 February 2025).

6. Normal tissue constraints for SRS/SBRT. Available at: https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/ products/02_radiation_therapy/myqa_srs/iba_dose_contraints_poster_rev2_0522.pdf (accessed 1 February 2025).

7. El Naqa I., Ruan D., Valdes G., Dekker A., McNutt T., Ge Y., Wu J. Q. [et al.]. Machine learning and modeling: data, validation, communication challenges. *Medical Physics*, 2018, vol. 45, iss. 10, pp. 834–840. https://doi.org/10.1002/mp.12811

8. Delaney A. R., Tol J. P., Dahele M., Cuijpers J., Slotman B. J., Verbakel W. F.A.R. Effect of Dosimetric Outliers on the Performance of a Commercial Knowledge-Based Planning Solution. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2016, vol. 94, iss. 3, pp. 469–477. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2015.11.011

9. Snyder K. C., Kim J., Reding A., Fraser C., Gordon J., Ajlouni M., Movsas B. [et al.]. Development and evaluation of a clinical model for lung cancer patients using stereotactic body radiotherapy (SBRT) within a knowledge-based algorithm for treatment planning. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2016, vol. 17, iss. 6, pp. 263–275. https://doi.org/10.1120/jacmp.v17i6.6429

10. Foy J. J., Marsh R., Ten Haken R. K., Kelly C. Younge, Schipper M., Sun Yi., Owen D. [et al.]. An analysis of knowledgebased planning for stereotactic body radiation therapy of the spine. *Practical Radiation Oncology*, 2017, vol. 7, iss. 5, pp. E355–E360. https://doi.org/10.1016/j.prro.2017.02.007

11. Tol J. P., Dahele M., Delaney A. R., Slotman B. J., Verbakel W. F. A. R. Can knowledgebased DVH predictions be used for automated, individualized quality assurance of radiotherapy treatment plans? *Radiation Oncology*, 2015, vol. 10, no. 1, art. ID 234. https://doi.org/10.1186/s13014-015-0542-1