

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**
INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-166-176>
УДК 519.876.5Оригинальная статья**В. Ю. Юшкевич*, М. Н. Петкевич, И. Г. Тарутин***Государственное учреждение «Республиканский научно-практический центр онкологии
и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова»,
аг. Лесной, 223040, Минский район, Минская область, Республика Беларусь***ИТЕРАТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ПРИ ПАТОЛОГИЯХ ГРУДНОГО
И ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛОВ ПОЗВОНОЧНИКА**

Аннотация. Представлены результаты применения итеративного подхода к оптимизации многокритериальных моделей распределения дозы ионизирующего излучения для стереотаксической лучевой терапии позвоночника. В исследовании использовались две модели: базовая многокритериальная модель (SRT_Vert_BM, от англ. *Baseline Multicriteria Model*) и усовершенствованная многокритериальная модель (SRT_Vert_IM, от англ. *Iterative Multicriteria Model*). Первая построена на основе клинической выборки дозиметрических планов, вторая создана итеративным методом, при котором обучающая выборка формировалась из планов, сгенерированных исходной моделью. Валидация показала, что SRT_Vert_IM обеспечивает статистически значимое улучшение прогностических характеристик (повышение коэффициента детерминации R^2 , снижение среднеквадратичной ошибки MSE) и дозиметрических параметров для билатеральных паренхиматозных органов риска ($p < 0,05$) при сохранении клинически приемлемого покрытия целевого объема облучения. Итеративное обучение позволило повысить воспроизводимость и достоверность качества дозиметрических планов, что подтверждает перспективность данного подхода для совершенствования процесса планирования стереотаксической лучевой терапии.

Ключевые слова: итеративный метод обучения, многокритериальная модель, моделирование трехмерного распределения дозы, 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: Юшкевич Виктория Юрьевна – медицинский физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова», e-mail: yushkevich.ur@gmail.com; Петкевич Максим Николаевич – кандидат технических наук, начальник отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова», <https://orcid.org/0000-0002-5137-3064>, e-mail: maxpetkevichn@gmail.com; Тарутин Игорь Германович – доктор технических наук, профессор, медицинский физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова», e-mail: itarutin1940@mail.ru

Вклад авторов: авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Для цитирования: Юшкевич, В. Ю. Итеративное обучение модели дозиметрического планирования стереотаксической лучевой терапии при патологиях грудного и поясничного отделов позвоночника / В. Ю. Юшкевич, М. Н. Петкевич, И. Г. Тарутин // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 166–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-166-176>

Поступила в редакцию: 05.12.2025

Доработанный вариант: 18.04.2026

Утверждена к публикации 04.06.2026

Подписана в печать 15.06.2026

© Юшкевич В. Ю., Петкевич М. Н., Тарутин И. Г., 2026

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Viktoryia Yu. Yushkevich*, Maksim N. Pietkevich, Igar G. Tarutin

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

**ITERATIVE TRAINING OF AN AUTOMATED DOSIMETRIC PLANNING MODEL
FOR STEREOTACTIC RADIOTHERAPY IN THORACIC AND LUMBAR SPINE PATHOLOGIES**

Abstract. The study presents the results of applying an iterative approach to optimizing automated multi-criteria ionizing radiation dose distribution models for stereotactic spine radiotherapy. Two models were used: SRT_Vert_BM (Baseline Multicriteria Model) and SRT_Vert_IM (Iterative Multicriteria Model). The former was built on a clinical dataset of dosimetric plans, while the latter was created using an iterative method where the training dataset was formed from plans generated by the baseline model. Validation demonstrated that SRT_Vert_IM provides statistically significant improvements in predictive performance (increased coefficient of determination R^2 , reduced mean squared error MSE) and dosimetric parameters for bilateral parenchymal organs at risk ($p < 0.05$) while maintaining clinically acceptable target volume coverage. Iterative training enhanced the reproducibility and reliability of dosimetric plan quality, confirming the potential of this approach for advancing automated treatment planning.

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

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

Information about the authors: *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; *Maksim N. Pietkevich* – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department for Engineering Support of Radiation Therapy at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-5137-3064>, e-mail: maxpetkevichn@gmail.com; *Ihar G. Tarutin* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Medical Physicist of the Medical Physicist and Engineering Department at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, e-mail: itarutin1940@mail.ru

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

For citation: Yushkevich V. Yu., Pietkevich M. N., Tarutin I. G. Iterative training of an automated dosimetric planning model for stereotactic radiotherapy in thoracic and lumbar spine pathologies. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 166–176 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-166-176>

Received: 05.12.2025

Modified: 18.04.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Стереотаксическая лучевая терапия (СЛТ) позвоночника применяется при лечении метастатических и радиорезистентных новообразований, обеспечивая локальный контроль опухоли и снижение болевого синдрома. Особенностью данной методики является необходимость достижения высокой конформности и субмиллиметровой точности распределения дозы при минимизации нагрузки на критические структуры, прежде всего на спинной мозг. Топографо-анатомические особенности позвоночного столба обуславливают сложность планирования: целевые объемы часто граничат с органами риска, что требует многокритериальной оптимизации распределения дозы ионизирующего излучения [1].

Несмотря на развитие технологий, процесс дозиметрического планирования остается трудоемким и подверженным субъективным факторам, связанным с опытом медицинского физика и неоднозначностью клинических сценариев. Системы планирования лучевой терапии, основанные на анализе баз данных оптимальных планов, позволяют стандартизировать процесс и повысить воспроизводимость качества. Одним из наиболее распространенных решений является использование предиктивных многокритериальных моделей, формируемых в модуле RapidPlan системы Eclipse (Varian Medical Systems). Однако точность прогноза таких моделей зависит от качества обучающей выборки, что ограничивает их эффективность в клинической практике [2; 3].

В данной работе предложен подход итеративного обучения, при котором новая модель формируется на основе планов, сгенерированных исходной моделью. Такой метод позволяет устранить артефакты и скорректировать неточности, связанные с ограниченностью исходной библиотеки дозиметрических планов. Для исследования разработаны и проанализированы две многокритериальные модели: SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM.

Цель работы – сравнительная оценка их прогностической способности и клинической применимости в задачах дозиметрического планирования СЛТ позвоночника.

Материалы и методы. Для исследования сформирована выборка из 52 пациентов с метастатическими или радиорезистентными новообразованиями грудного (29) и поясничного (23) отделов позвоночника, получавших лечение методом СЛТ в ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова» в 2020–2025 гг. Исключены случаи локализаций ниже уровня L2–L3, что обусловлено анатомическим окончанием спинного мозга и необходимостью стандартизации объемов для построения моделей.

Анатомические характеристики пациентов и целевые объемы облучения представлены в табл. 1 в виде среднего значения, стандартного отклонения и диапазона. В набор включены целевые объемы облучения GTV (от англ. *Gross Tumor Volume*), CTV (от англ. *Clinical Target Volume*), PTV (от англ. *Planning Target Volume*) и критические органы риска (аорта, пищевод, сердце, легкие, почки, спинной мозг, спинномозговой канал). Такая форма представления обеспечивает репрезентативность выборки для построения математических зависимостей между геометрическими параметрами и дозиметрическими характеристиками [4].

Т а б л и ц а 1. Анатомические характеристики пациентов и целевые объемы облучения
Table 1. Anatomical patient characteristics and target volumes

Структура Structure	Среднее значение ± стандартное отклонение [диапазон значений], см ³ Mean ± standard deviation [range of values], cm ³
GTV	2,8 ± 1,4 [0,4; 5,2]
CTV	35,6 ± 11,7 [15,3; 55,8]
PTV	74,2 ± 10,4 [56,2; 92,1]
Аорта Aorta	109,8 ± 11,5 [89,9; 129,7]
Легкое левое Left lung	2309,6 ± 167,9 [2018,8; 2600,4]
Легкое правое Right lung	2754,2 ± 146,1 [2501,2; 3007,3]
Легкие (левое и правое) Lungs (left and right)	5063,8 ± 313,9 [4520,0; 5607,7]
Пищевод Esophagus	21,1 ± 2,0 [17,6; 24,6]
Почка левая Left kidney	120,9 ± 9,6 [104,3; 137,6]
Почка правая Right kidney	123,9 ± 8,4 [109,3; 138,4]
Почки (левая и правая) Kidneys (left and right)	244,8 ± 18,01 [213,6; 276,0]
Сердце Heart	276,2 ± 16,5 [247,6; 304,8]
Спинномозговой канал Spinal canal	51,9 ± 2,5 [47,5; 56,3]
Спинной мозг Spinal cord	29,1 ± 0,1 [27,4; 30,8]

Протокол визуализации и предлучевой подготовки. КТ-симуляция выполнена с шагом 1 мм и расширенной зоной визуализации не менее 15 см за пределами планируемого поля, включая позвонки от C1 до S1. Такое решение обеспечило возможность точной идентификации анатомических структур вдоль всего позвоночного столба. Для верхнегрудного отдела применена укладка пациента с поднятыми руками, что позволяло использовать некомпланарные дуги при построении дозиметрического плана. Для поясничного отдела руки фиксировались вдоль тела.

Совмещение КТ- и МРТ-изображений выполнено с точностью 1 мм, что исключало артефакты от костных структур и обеспечивало корректное определение анатомических границ спинного

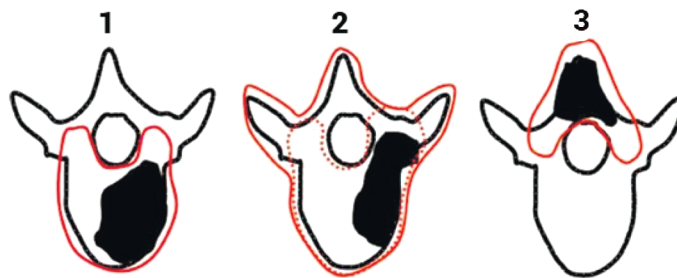


Рис. 1. Схематическое представление целевых объемов, где: 1 – пример контурирования для патологий грудного отдела позвоночника, 2 – пример контурирования для патологий поясничного отдела позвоночника, 3 – пример контурирования для патологий шейного отдела позвоночника [5]

Fig. 1. Schematic representation of target volumes, where: 1 – example of contouring for thoracic spine pathologies, 2 – example of contouring for lumbar spine pathologies, 3 – example of contouring for cervical spine pathologies [5]

мозга. Имобилизация выполнена с применением термопластических масок или вакуумных матрасов; подколенный клин и абдоминальная компрессия использованы для снижения дыхательных артефактов. В ряде случаев применена респираторная синхронизация (RPM-система), которая позволила уменьшить амплитуду дыхательных смещений на 30–40 % и обеспечить точность позиционирования в пределах ± 2 –3 мм.

Определение целевых объемов и критических структур. Контурирование целевых объемов выполнено в соответствии с рекомендациями протоколов RTOG и схематично представлено на рис. 1. Определены три ключевых объема:

GTV – макроскопически видимый опухолевый очаг по данным МРТ с контрастированием;

CTV – клинический объем, включающий пораженный позвонок без спинного мозга;

TV – планируемый объем, сформированный с учетом погрешности иммобилизации (1–2 мм).

Критические структуры включали аорту, сердце, пищевод, легкие, почки, спинной мозг и спинномозговой канал. Для каждой из структур задавались строгие дозовые ограничения согласно международным протоколам¹.

Методика планирования стереотаксической лучевой терапии. Планы облучения построены методом ротационного облучения с переменными характеристиками излучения (VMAT, от англ. *Volumetric Modulated Arc Therapy*) с использованием 2–4 компланарных и некомпланарных дуг. Применен линейный ускоритель TrueBeam (Varian Medical Systems) с энергией фотонов 6 МэВ в режиме без выравнивающего фильтра (FFF, от англ. *Flattening Filter Free*) при мощности дозы до 2400 МЕ/мин. Оптимизация выполнена алгоритмом Photon Optimizer v16.1; финальное распределение дозы рассчитано с помощью алгоритма Acuros XB v16.1 [5].

Использован гипофракционированный режим: 6 Гр $\times$ 5 фракций. Для точного моделирования дозиметрического распределения применена расчетная сетка 1,25 мм, что особенно важно для мелких структур, таких как спинной мозг и спинномозговой канал.

Формирование многокритериальных моделей дозиметрического планирования. В рамках исследования разработаны две модели:

SRT_Vert_BM – базовая многокритериальная модель, обученная на клинической выборке оптимальных планов СЛТ позвоночника [6];

SRT_Vert_IM – усовершенствованная модель, обученная итеративным методом на планах, сгенерированных SRT_Vert_BM.

Модель SRT_Vert_BM формировалась в модуле RapidPlan путем анализа 52 дозиметрических планов, соответствующих строгим критериям клинического качества. На основе геометрических характеристик целевых объемов и органов риска формировались зависимости, связывающие анатомические параметры с дозиметрическими характеристиками (DVH, от англ. *Dose-Volume Histogram*) [7].

¹ Radiation Therapy Oncology Group (RTOG). RTOG 0631 Spine: A Phase II/III Study of Image-Guided Radiosurgery. SBRT for Localized Spine Metastasis. 2013. URL: <https://www.rtog.org/ClinicalTrials/ProtocolTable/StudyDetails.aspx?study=0631> (date of access: 01.02.2025); IBA Dosimetry. Normal tissue constraints for SRS/SBRT. Louvain-la-Neuve, Belgium: IBA Dosimetry, 2022. URL: https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/products/02_radiation_therapy/myqa_srs/iba_dose_constraints_poster_rev2_0522.pdf (date of access: 10.10.2024).

Модель SRT_Vert_IM создана методом повторного обучения: в качестве обучающей базы использованы планы, сгенерированные SRT_Vert_BM. Такой подход обеспечил последовательное уточнение прогностических зависимостей, позволил устранить артефакты, связанные с ограниченностью исходной базы, и повысил точность прогнозирования дозиметрических параметров. Итеративный метод обеспечил структурную избыточность данных, что позволило уменьшить риск переобучения и повысить устойчивость модели при применении к новым клиническим случаям.

Параметры оптимизации. Ограничения для целевых объемов и органов риска включали верхние (Upper, от англ. *Upper Constraint*) и нижние (Lower, от англ. *Lower Constraint*) ограничения дозы, допустимые объемные доли, ограничение на среднюю дозу (Mean, от англ. *Mean Dose Constraint*), линейное ограничение (Line, от англ. *Line Constraint*) и ограничение на обобщенную эквивалентную равномерную дозу (gEUD, от англ. *generalized Equivalent Uniform Dose*) [8; 9].

Приоритеты задавались с учетом клинической значимости структур: максимально допустимая доза для объема спинного мозга и спинномозгового канала, аорты, легких, пищевода и PTV – Upper. Минимальная доза, которую должны получить GTV и CTV, – Lower. Контроль средней дозы по всему объему левой и правой почек – Mean. Ограничение, заданное вдоль кривой DVH, для аорты, легких, пищевода, сердца и почек – Line. Преобразование неоднородного распределения дозы в эквивалентную равномерную дозу, учитывая радиобиологические параметры, для спинного мозга и спинномозгового канала – gEUD. Также использовались автоматически созданные параметры оптимизации, которые система генерирует на основе предсказанных DVH для всех органов риска, – Generated (от англ. *Generate*) [10].

Для PTV критерием нормализации являлась средняя доза. Подробные параметры оптимизации представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Критерии оптимизации

Table 2. Optimization objectives

Структура Structure	Параметр Parameter	Объем, % Volume, %	Характеристика распределения дозы Dose distribution characteristics	gEUD
GTV	Lower	100	105 %	
CTV	Lower	100	100 %	
PTV	Upper	0	110 %	
	Lower	100	95 %	
Аорта Aorta	Upper	Generated	50 %	
	Upper	Generated	70 %	
	Upper	Generated	30 %	
	Line	Generated	Generated	
Легкое левое Left lung	Upper	Generated	20 Гр / 20 Gy	
	Line	Generated	Generated	
Легкое правое Right lung	Upper	Generated	20 Гр / 20 Gy	
	Line	Generated	Generated	
Легкие (левое и правое) Lungs (left and right)	Line	Generated	Generated	
Пищевод Esophagus	Upper	0	Generated	
	Upper	5	Generated	
	Upper	15	Generated	
	Upper	50	Generated	
	Line	Generated	Generated	
Почка левая Left kidney	Mean	–	Generated	
	Line	Generated	Generated	
Почка правая Right kidney	Mean	–	Generated	
	Line	Generated	Generated	

Окончание табл. 2

Структура Structure	Параметр Parameter	Объем, % Volume, %	Характеристика распределения дозы Dose distribution characteristics	gEUD
Почки (левая и правая) Kidneys (left and right)	Mean	—	10 Гр / 10 Gy	
	Line	Generated	Generated	
Сердце Heart	Line	Generated	Generated	
Спинальный мозг и спинномозговой канал Spinal cord and spinal canal	Upper	Generated	5 %	
	Upper	Generated	15 %	
	Upper	Generated	30 %	
	Upper	Generated	45 %	
	Upper	Generated	60 %	
	Upper	Generated	75 %	
	Upper gEUD		Generated	40
	Upper gEUD		Generated	25

Методы валидации и статистический анализ. Валидация эффективности моделей выполнена на независимой выборке из 20 пациентов. Для каждого случая сформированы планы с использованием моделей SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM [11]. Сравнительный анализ проведен по следующим критериям:

- покрытие PTV ($V_{100} \% \geq 95 \%$, $D_{99} \% \geq 99 \%$),
- покрытие CTV и GTV ($V_{100} \% \geq 100 \%$, $D_{99} \% \geq 99 \%$),
- дозовая нагрузка на органы риска ($D_{\max}$, D_{mean}),
- коэффициент детерминации (R^2),
- среднеквадратичная ошибка (MSE, от англ. *Mean Squared Error*),
- χ^2 -метрика.

Для снижения риска переобучения применена десятикратная кросс-валидация (10-fold cross-validation). Дополнительно использованы методы многомерного анализа: метод главных компонент (PCA, от англ. *Principal Component Analysis*) для сокращения размерности и регрессионный анализ с целью выявления ключевых факторов, влияющих на распределение дозы. Такой подход обеспечил комплексную оценку математической адекватности и клинической применимости моделей [12].

Результаты и их обсуждение. Математическая оценка эффективности моделей SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM выполнена на основе статистических показателей, формируемых в модуле *Model Configuration* по завершении машинного обучения. В табл. 3 представлены коэффициенты детерминации (R^2), MSE и χ^2 -метрики для основных органов риска.

Таблица 3. Статистические показатели качества моделей SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM

Table 3. Statistical parameters of SRT_Vert_BM and SRT_Vert_IM models

Структура Structure	R^2 (BM)	R^2 (IM)	χ^2 (BM)	χ^2 (IM)	MSE (BM)	MSE (IM)
Аорта Aorta	0,724	0,845	1,008	1,025	0,026	0,007
Легкое левое Left lung	0,720	0,901	1,254	1,182	0,015	0,002
Легкое правое Right lung	0,512	0,833	1,007	1,130	0,033	0,008
Легкие (левое и правое) Lungs (left and right)	0,563	0,915	1,351	1,183	0,014	0,009
Пищевод Esophagus	0,824	0,917	1,099	1,248	0,005	0,001

Окончание табл. 3

Структура Structure	R ² (BM)	R ² (IM)	χ^2 (BM)	χ^2 (IM)	MSE (BM)	MSE (IM)
Почка левая Left kidney	0,503	0,785	1,014	1,135	0,093	0,009
Почка правая Right kidney	0,571	0,701	1,013	1,121	0,028	0,008
Почки (левая и правая) Kidneys (left and right)	0,612	0,894	1,454	1,157	0,013	0,009
Сердце Heart	0,745	0,856	1,065	1,149	0,029	0,005
Спинномозговой канал Spinal canal	0,816	0,845	1,047	1,102	0,029	0,009
Спинной мозг Spinal cord	0,834	0,871	1,083	1,174	0,013	0,005

Анализ показал, что коэффициент детерминации (R^2), отражающий долю объясняемой дисперсии, увеличен практически для всех органов риска, особенно для билатеральных паренхиматозных (парных) структур, таких как легкие и почки. Так, для легких (левое и правое) R^2 возрос от 0,563 до 0,915, для почек (левой и правой) – от 0,612 до 0,894, что свидетельствует о повышении прогностической способности модели SRT_Vert_IM [12].

Оптимальные значения χ^2 -метрики лежат в пределах 1,1–1,2, что соответствует приемлемому согласованию наблюдаемых и предсказанных данных. Полученные результаты подтверждают улучшение качества регрессионных зависимостей при переходе от базовой модели к усовершенствованной [12; 13].

Дополнительно рассчитана MSE, характеризующая отклонение прогнозируемых DVH от реальных данных. Для спинного мозга MSE снижена с 0,0126 до 0,0051, что соответствует уменьшению погрешности на 40 %. Для аорты, пищевода и сердца уменьшение MSE составило 30, 16 и 27 % соответственно, что эквивалентно снижению неопределенности дозиметрического распределения на 0,5–1,5 Гр в клинических планах. Для парных органов (легкие и почки) уменьшение MSE составило 66–68 %, что эквивалентно – 2,5–3,0 Гр.

Регрессионные зависимости между геометрическими и дозиметрическими параметрами продемонстрировали различия в характере признаков (рис. 2). Для базовой модели SRT_Vert_BM прогноз строился с использованием комбинации геометрических факторов (объем мишени, зона перекрытия с органом риска), что приводило к неустойчивости результатов и кластеризации данных. В усовершенствованной модели SRT_Vert_IM в качестве ключевого признака использована первая главная компонента (PCS-1, от англ. *Principal Component Score*), что позволило устранить эффект кластеризации и обеспечить более точное соответствие прогнозируемых и реальных DVH [14; 15].

Особое значение имеет корректировка признаков для спинного мозга, пищевода, сердца и аорты. В SRT_Vert_BM объем спинного мозга использовался как прогностический фактор, что методологически некорректно, поскольку клинически значимым параметром является $D_{\max}$. В SRT_Vert_IM этот признак исключен, что улучшило интерпретацию регрессионных зависимостей, повысило коэффициент детерминации R^2 (от 0,675 до 0,842) и снизило MSE. Таким образом, усовершенствованная модель продемонстрировала более высокую клиническую релевантность.

Дозиметрическая оценка выполнена на валидационной выборке из 20 пациентов. Для парных органов риска установлено статистически значимое снижение средней дозы. Так, для почек D_{mean} уменьшилась на 5 % ($p < 0,05$). Для легких снижение составило в среднем 1 %. Для спинного мозга и спинномозгового канала существенного улучшения качества не выявлено: $D1$ % увеличилась на 3–4 %, однако различия статистически незначимы. Это объясняется применением жестких верхних ограничений с высоким приоритетом, которые ограничивают потенциал модели по оптимизации DVH.

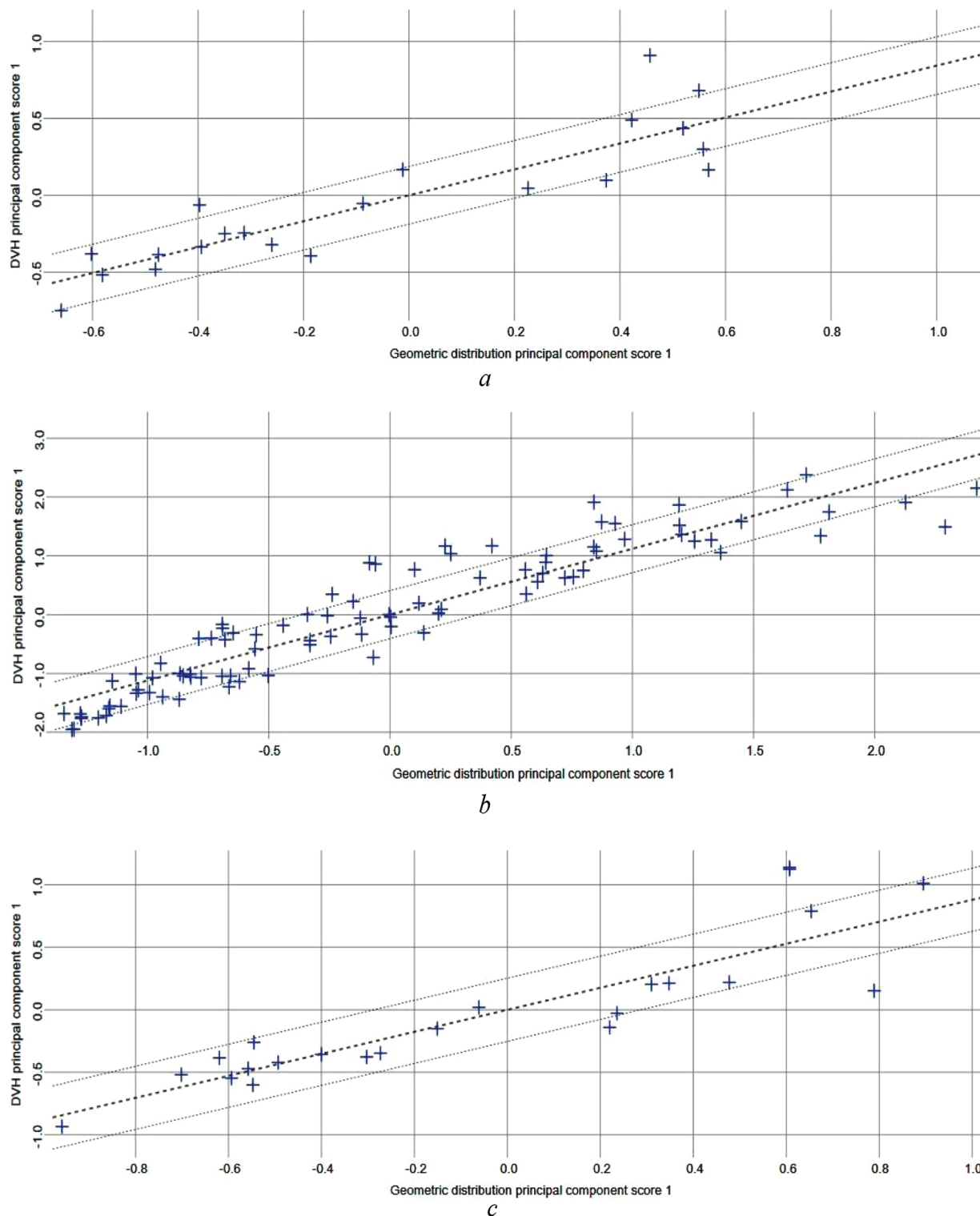


Рис. 2. Графики регрессии, где: *a*, *b* – регрессионные зависимости для легких, полученные с помощью SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM соответственно; *c*, *d* – регрессионные зависимости для почек, полученные с помощью SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM соответственно; *e*, *f* – регрессионные зависимости для спинного мозга, полученные с помощью SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM соответственно (начало рисунка; окончание см. на с. 174)

Fig. 2. Regression plots where: *a*, *b* – show regression dependencies for the lungs obtained using SRT_Vert_BM and SRT_Vert_IM, respectively; *c*, *d* – show regression dependencies for the kidneys obtained using SRT_Vert_BM and SRT_Vert_IM, respectively; *e*, *f* – show regression dependencies for the spinal cord obtained using SRT_Vert_BM and SRT_Vert_IM, respectively (beginning of the Figure; ending see on p. 174)

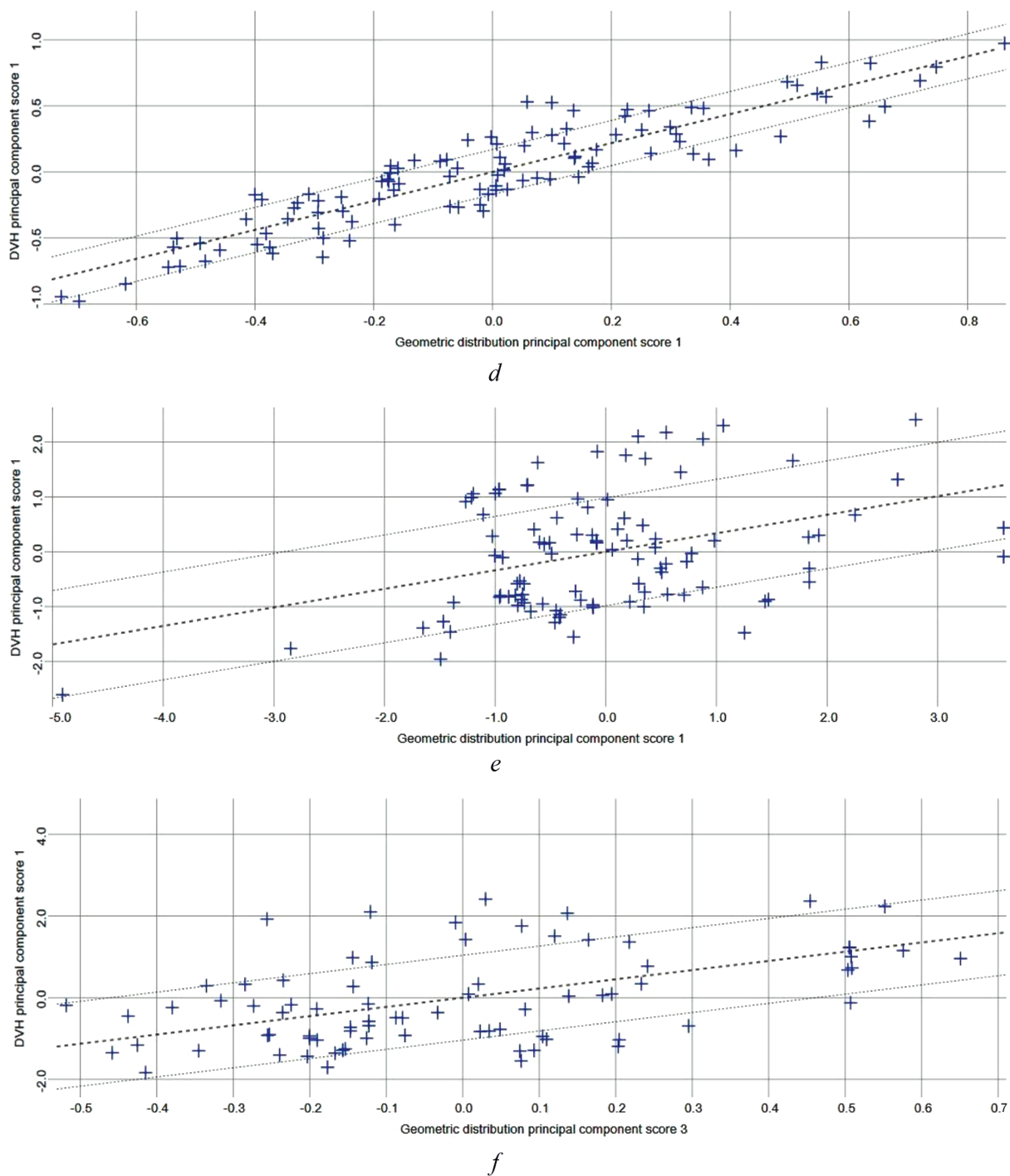


Рис. 2. Окончание (начало см. на с. 173)

Fig. 2. Ending (see the beginning on p. 173)

Таким образом, результаты подтверждают, что усовершенствованная модель SRT_Vert_IM обеспечивает:

- повышение статистических показателей качества ($R^2 \uparrow$ на 0,10–0,15, $MSE \downarrow$ на 30–40 %);
- улучшение прогноза для парных органов риска с клинически значимым снижением дозовых нагрузок;
- сохранение адекватного покрытия целевого объема облучения ($V95\% \text{ PTV} \geq 98\%$);
- устранение методологических артефактов, связанных с некорректным выбором прогностических признаков, в базовой модели.

Заклучение. В результате исследования разработана и апробирована усовершенствованная многокритериальная модель дозиметрического планирования методом СЛТ (SRT_Vert_IM), сформированная на основе планов, сгенерированных базовой моделью (SRT_Vert_BM).

Получены статистически подтвержденные улучшения прогностических характеристик разработанной модели по сравнению с базовой: коэффициент детерминации R^2 увеличен на 0,10–0,15, MSE снижена на 30–40 %, устранены признаки кластеризации и некорректные регрессионные зависимости.

Клинический анализ показал уменьшение дозовой нагрузки на парные органы риска: средняя доза на почки снижена на 5 % ($p < 0,05$), на легкие – на 1 %, при сохранении нормируемого покрытия целевого объема облучения ($V95 \% \geq 98 \%$). Для аорты, сердца, пищевода и спинного мозга существенных различий между моделями не выявлено, что обусловлено применением жестких ограничений с высоким приоритетом.

Экспериментальные данные подтверждают эффективность итеративного обучения как метода совершенствования систем многокритериального дозиметрического планирования. Использование модели SRT_Vert_IM позволяет повысить точность прогнозирования дозо-объемных характеристик, воспроизводимость качества планов и достоверность оценки дозовой нагрузки на органы риска, что имеет прикладное значение для развития систем верификации и оптимизации динамической лучевой терапии.

Модель SRT_VERT_IM не содержит идентифицирующей информации о пациентах, что дает возможность внедрения ее в клиническую практику других медицинских учреждений при условии проведения тщательной валидации и адаптации, обеспечивающей соответствие клинической картине медицинского учреждения.

Список использованных источников

1. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice / M. Teoh, C. H. Clark, K. Wood [et al.] // *The British Journal of Radiology*. – 2011. – Vol. 84, № 1007. – P. 967–996. <https://doi.org/10.1259/bjr/22373346>
2. Intercenter validation of a knowledge based model for automated planning of volumetric modulated arc therapy for prostate cancer. The experience of the German RapidPlan Consortium / C. Schubert, O. Waletzko, C. Weiss [et al.] // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 12, № 5. – Art. ID e0178034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178034>
3. Is it possible for knowledge-based planning to improve intensity modulated radiation therapy plan quality for planners with different planning experiences in left-sided breast cancer patients? / J. Wang, W. Hu, Z. Yang [et al.] // *Radiation Oncology*. – 2017. – Vol. 12, № 1. – Art. ID 85. <https://doi.org/10.1186/s13014-017-0822-z>
4. 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.] // *Physica Medica*. – 2018. – Vol. 53. – P. 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.cjmp.2018.08.011>
5. Lahanas, M. Multiobjective inverse planning for intensity modulated radiotherapy with constraint-free gradient-based optimization algorithms / M. Lahanas, E. Schreibmann, D. Baltas // *Physics in Medicine and Biology*. – 2003. – Vol. 48, № 17. – P. 2843–2871. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/17/307>
6. Петкевич, М. Н. Разработка и машинное обучение многокритериальной модели распределения дозы ионизирующего излучения в системе планирования лечения Eclipse / М. Н. Петкевич, В. Ю. Юшкевич // Весті 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>
7. Shiraishi, S. Knowledge-based prediction of three-dimensional dose distributions for external beam radiotherapy / S. Shiraishi, K. L. Moore // *Medical Physics*. – 2016. – Vol. 43, № 1. – Art. ID 378. <https://doi.org/10.1118/1.4938583>
8. Pareto navigation – algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning / M. Monz, K. H. Küfer, T. R. Bortfeld, C. Thieke // *Physics in Medicine and Biology*. – 2008. – Vol. 53, № 4. – P. 985–998. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/4/011>
9. Assessment of a model based optimization engine for volumetric modulated arc therapy for patients with advanced hepatocellular cancer / A. Fogliata, P. M. Wang, F. Belosi [et al.] // *Radiation Oncology*. – 2014. – Vol. 9. – Art. ID 236. <https://doi.org/10.1186/s13014-014-0236-0>
10. RapidPlan head and neck model: the objectives and possible clinical benefit / A. Fogliata, G. Reggiori, A. Stravato [et al.] // *Radiation Oncology*. – 2017. – Vol. 12, № 1. – Art. ID 73. <https://doi.org/10.1186/s13014-017-0805-0>
11. A broad scope knowledge based model for optimization of VMAT in esophageal cancer: validation and assessment of plan quality among different treatment centers / A. Fogliata, G. Nicolini, A. Clivio [et al.] // *Radiation Oncology*. – 2015. – Vol. 10. – Art. ID 234. <https://doi.org/10.1186/s13014-015-0545-y>

12. 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, № 5. – P. 355–360. <https://doi.org/10.1016/j.prro.2017.02.007>
13. Highly efficient training, refinement, and validation of a knowledge-based planning quality-control system for radiation therapy clinical trials / N. Li, R. Carmona, I. Sirak [et al.] // *International Journal of Radiation Oncology – Biology – Physics*. – 2017. – Vol. 97, № 1. – P. 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.09.022>
14. DVH Estimation Algorithm for RapidPlan // *Eclipse Photon and Electron Algorithms Reference Guide*. – Palo Alto, CA: Varian Medical Systems, 2014. – P. 219–229. URL: https://www.varian.com/sites/default/files/resource_attachments/EclipsePhotonElectronAlgorithmsRef_0.pdf (date of access: 01.02.2025).
15. Machine learning and modeling: Data, validation, communication challenges / I. El Naqa, D. Ruan, G. Valdes [et al.] // *Medical Physics*. – 2018. – Vol. 45, № 10. – P. 834–840. <https://doi.org/10.1002/mp.12811>

References

1. Teoh M., Clark C.H., Wood K., Whitaker S., Nisbet A. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice. *The British Journal of Radiology*, 2011, vol. 84, no. 1007, pp. 967–996. <https://doi.org/10.1259/bjr/22373346>
2. Schubert C., Waletzko O., Weiss C., Voelzke D., Toperim S., Roeser A., Puccini S. [et al.]. Intercenter validation of a knowledge based model for automated planning of volumetric modulated arc therapy for prostate cancer. The experience of the German RapidPlan Consortium. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 5, art. ID e0178034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178034>
3. Wang J., Hu W., Yang Z., Chen X., Wu Z., Yu X., Guo X. [et al.]. Is it possible for knowledge-based planning to improve intensity modulated radiation therapy plan quality for planners with different planning experiences in left-sided breast cancer patients? *Radiation Oncology*, 2017, vol. 12, no. 1, art. ID 85. <https://doi.org/10.1186/s13014-017-0822-z>
4. Scaggion A., Fusella M., Roggio A., Bacco S., Pivato N., Rossato M. A., Peña L. M. A., Paiusco M. Reducing inter- and intra-planner variability in radiotherapy plan output with a commercial knowledge-based planning solution. *Physica Medica*, 2018, vol. 53, pp. 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.08.011>
5. Lahanas M., Schreibmann E., Baltas D. Multiobjective inverse planning for intensity modulated radiotherapy with constraint-free gradient-based optimization algorithms. *Physics in Medicine and Biology*, 2003, vol. 48, no. 17, pp. 2843–2871. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/17/307>
6. 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'nei 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>
7. Shiraishi S., Moore K.L. Knowledge-based prediction of three-dimensional dose distributions for external beam radiotherapy. *Medical Physics*, 2016, vol. 43, no. 1, art. ID 378. <https://doi.org/10.1118/1.4938583>
8. Monz M., Küfer K. H., Bortfeld T. R., Thieke C. Pareto navigation – algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning. *Physics in Medicine and Biology*, 2008, vol. 53, no. 4, pp. 985–998. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/4/011>
9. Fogliata A., Wang P. M., Belosi F., Clivio A., Nicolini G., Vanetti E., Cozzi L. Assessment of a model based optimization engine for volumetric modulated arc therapy for patients with advanced hepatocellular cancer. *Radiation Oncology*, 2014, vol. 9, art. ID 236. <https://doi.org/10.1186/s13014-014-0236-0>
10. Fogliata A., Reggiori G., Stravato A., Lobefalo F., Franzese C., Franceschini D., Tomatis S. [et al.]. RapidPlan head and neck model: the objectives and possible clinical benefit. *Radiation Oncology*, 2017, vol. 12, no. 1, art. ID 73. <https://doi.org/10.1186/s13014-017-0805-0>
11. Fogliata A., Nicolini G., Clivio A., Vanetti E., Laksar S., Tozzi A., Scorsetti A. C., Cozzi L. A broad scope knowledge based model for optimization of VMAT in esophageal cancer: validation and assessment of plan quality among different treatment centers. *Radiation Oncology*, 2015, vol. 10, art. ID 234. <https://doi.org/10.1186/s13014-015-0545-y>
12. Foy J. J., Marsh R., Ten Haken R. K., Younge K. C., Schipper M., Sun Y., Owen D., Matuszak M. M. An analysis of knowledge-based planning for stereotactic body radiation therapy of the spine. *Practical Radiation Oncology*, 2017, vol. 7, no. 5, pp. 355–360. <https://doi.org/10.1016/j.prro.2017.02.007>
13. Li N., Carmona R., Sirak I., Kasaova L., Followill D., Michalski J., Bosch W. R. [et al.]. Highly efficient training, refinement, and validation of a knowledge-based planning quality-control system for radiation therapy clinical trials. *International Journal of Radiation Oncology – Biology – Physics*, 2017, vol. 97, no 1, pp. 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.09.022>
14. DVH Estimation Algorithm for RapidPlan. *Eclipse Photon and Electron Algorithms Reference Guide*. Palo Alto, CA, Varian Medical Systems, 2014, pp. 219–229. Available from: https://www.varian.com/sites/default/files/resource_attachments/EclipsePhotonElectronAlgorithmsRef_0.pdf (accessed: 1 February 2025).
15. El Naqa I., Ruan D., Valdes G., Dekker A., McNutt T., Ge Ya., Wu Q. J. [et al.]. Machine learning and modeling: Data, validation, communication challenges. *Medical Physics*, 2018, vol. 45, no. 10, pp. 834–840. <https://doi.org/10.1002/mp.12811>