

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ ВИРТУАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Е.Д. Северюхина¹, Е.А. Селихова¹, Е.С. Сухих^{1,2}, А.В. Вертинский^{1,3}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

² Научно-исследовательский институт онкологии Томского НИМЦ,
Томский национальный исследовательский медицинский центр РАН, Томск

³ Томский областной онкологический диспансер, Томск

ANALYSIS OF POTENTIAL COLLISIONS OF ELEMENTS OF THERAPEUTIC ACCELERATOR ON THE BASIS OF THE SYSTEM OF VIRTUAL VISUALIZATION OF RADIATION THERAPY

E.D. Severyukhina¹, E.A. Selikhova¹, E.S. Sukhikh^{1,2}, A.V. Vertinskiy^{1,3}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

² Tomsk Research Institute for Oncology, Tomsk National Research Medical Center, Tomsk, Russia

³ Tomsk Regional Oncology Center, Tomsk, Russia

Реферат

Цель: Анализ потенциальных столкновений с телом пациента элементов терапевтического комплекса на базе линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) с помощью системы виртуальной визуализации лучевой терапии (ВВЛТ).

Материал и методы: Исследование проводилось в системе виртуальной визуализации лучевой терапии, при котором оценивались допустимые положения элементов комплекса ЛУЭ (положение головной части ЛУЭ при определенном угле гантри и терапевтического стола) не приводящие к столкновению с пациентом. Система является программным обеспечением симуляции радиотерапевтических процедур. Для анализа было выбрано 7 моделей терапевтических ЛУЭ (производителей Varian, Elekta и Siemens) и 4 модели пациентов при различных локализациях (опухоль предстательной железы, опухоль легких, опухоль молочной железы, опухоль головы и шеи) с соответствующим набором иммобилизирующих устройств.

Результаты: Результаты представлены в виде графиков критического значения угла поворота гантри при различных поперечных и вертикальных смещениях терапевтического стола для каждой локализации. В случае рака лёгких установлено, что при поперечном смещении стола на 10 см от начального положения (положение, при котором модель пациента центрировалась относительно изоцентра ЛУЭ) разница в углах поворота гантри, при которых происходит столкновение, составляет 15°. Столкновения на ЛУЭ Elekta происходят при значениях угла гантри равным 90°, на Varian CX и iX – при 96°, на Varian TrueBeam – при 105°. При увеличении высоты стола на 10 см разница увеличивается до 20° с сохранением статистики проходимости между ускорителями. В целом, увеличение поперечного смещения или подъема стола приводит к сокращению допустимого диапазона вращения гантри до столкновения для всех моделей ускорителей.

Заключение: На основе экспериментального моделирования с помощью системы ВВЛТ получены значения критического угла поворота гантри при поперечных и вертикальных смещениях терапевтического стола. Полученные результаты могут быть использованы для разработки алгоритмов предотвращения столкновений, улучшая тем самым безопасность процедур лучевой терапии, позволяя более точно прогнозировать и избегать возможных препятствий в ходе лечения.

Ключевые слова: лучевая терапия, терапевтический линейный ускоритель электронов, виртуальная визуализация лучевой терапии, устройства иммобилизации, поворот гантри, критический угол

Abstract

Purpose: Analysis of potential collisions of elements of the therapeutic complex with the patient on the basis of linear electron accelerator (LEA) using the system of virtual visualization of radiation therapy (VVLT).

Material and methods: The research was conducted in the system of virtual visualization of radiation therapy, in which the acceptable positions of the elements of the LEA complex (position of the head part of the LEA at a certain gantry angle and of the therapy table) that do not lead to patient collision were evaluated. The system is a simulation software for radiotherapy procedures. Seven models of therapeutic LEAs (manufacturers Varian, Elekta and Siemens) and 4 patient models of different localizations (prostate tumor, lung tumor, breast tumor, head and neck tumor) with an appropriate set of immobilizing devices were selected for the analysis.

Results: The results are presented in the form of graphs of the critical value of the gantry rotation angle at different transverse and vertical displacements of the therapy table for each localization. In the case of lung cancer, it was found that a transverse displacement of the table by 10 cm from the initial position (the position at which the patient model was centered relative to the isocenter of the LEA) resulted in a 15° difference in the gantry rotation angles at which collisions occur. Collisions occur at 90° on Elekta LEA, on Varian CX and iX at 96°, and on Varian TrueBeam at 105°. When the table height is increased by 10 cm, the difference increases to 20° with the same statistics for the transversal bias between linear accelerators. In general, increasing the lateral offset or table elevation results in a reduced range of gantry rotation before collision for all LEA models.

Conclusion: Based on experimental simulation using the VVLT system, the values of the critical gantry rotation angle at transverse and vertical displacements of the therapy table were obtained. The obtained results can be used to develop collision prevention algorithms, thus improving the safety of radiation therapy procedures, allowing more accurate prediction and avoidance of possible obstacles during treatment.

Key words: radiation therapy, therapeutic linear electron accelerator, virtual visualization of radiation therapy, immobilization devices, gantry rotation, critical angle

E-mail: eds9@tpu.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2024-103-3-36-45>

Введение

Современные терапевтические линейные ускорители электронов (ЛУЭ) генерирующие высокоэнергетические пучки фотонного излучения, стали незаменимым инструментом в лучевой терапии (ЛТ) при облучении опухолей различных локализаций [1]. В сочетании с ЛУЭ для повышения точности проведения сеансов ЛТ используются иммобилизующие устройства, которые обеспечивают постоянное позиционирование пациента на терапевтическом столе во время облучения, снижают риски, связанные с его движением, и облегчают внедрение передовых методов облучения, таких как стереотаксическая лучевая терапия всего тела (SBRT) и лучевая терапия с модуляцией интенсивности (IMRT) [2].

Безопасность и точность проведения ЛТ имеют первостепенное значение для обеспечения наилучших результатов лечения онкологических больных. Риск столкновения элементов ЛУЭ с терапевтическим столом, пациентом или системами фиксации пациента может поставить под угрозу точность подведения поглощенной дозы к объему опухоли, безопасность пациента и потенциально привести к неблагоприятным исходам [3]. В работе [4] были показаны результаты определения допустимых границ при взаимном перемещении гантри (головной части ЛУЭ) и терапевтического стола для ЛУЭ Varian.

Появление систем виртуальной визуализации лучевой терапии (ВВЛТ) предлагает новый подход к оценке и устранению потенциальных рисков снижения эффективности ЛТ в

контролируемой и воспроизводимой среде. Благодаря трехмерной виртуальной визуализации элементов терапевтического комплекса на базе различных моделей ЛУЭ и терапевтического стола, а также реалистичной модели пациента с соответствующим набором иммобилизирующих устройств, эти системы моделирования позволяют всесторонне оценивать возможные сценарии столкновений, предоставляя ценную информацию о взаимодействии оборудования и пациента.

В рамках данного исследования оценивались допустимые положения головной части ЛУЭ при определенном угле гантри и стола для различных терапевтических комплексов (производители Varian [5], Elekta [6] и Siemens [7]), не приводящие к столкновению при облучении опухолей различных локализаций на базе системы ВВЛТ.

Материал и методы

Исследование проводилось в системе виртуальной визуализации лучевой терапии VERT (Virtual LTD, Англия) версии 6.0, которая предоставляет пользователям реалистичную виртуальную модель процедурной комнаты с терапевтическим аппаратом. Система позволяет пользователям работать с механическими возможностями ускорителей, применять устройства для иммобилизации пациентов с различными локализациями опухолей, симулировать столкновения и ошибки, воспроизводить дозиметрические планы лучевой терапии и т.д. [8–10].

В работе рассмотрены модели пациентов системы ВВЛТ, различные по локализации проведения лучевой терапии:

- ✓ пациент № 1: взрослый мужчина, локализация – рак лёгких;
- ✓ пациент № 2: взрослая женщина, локализация – рак молочной железы;
- ✓ пациент № 3: взрослый мужчина, локализация – рак предстательной железы;
- ✓ пациент № 4: взрослая женщина, локализация – рак в области головы и шеи.

Для иммобилизации пациентов использовались такие фиксирующие устройства, как: маммоборд (для пациента № 2 рассмотрены углы наклона: 0° ; 5° ; $7,5^\circ$ и 10°), турник, подголовники, подставки под колени, термопластические маски при лечении опухолей головы-шеи, в соответствии с локализациями. Иссле-

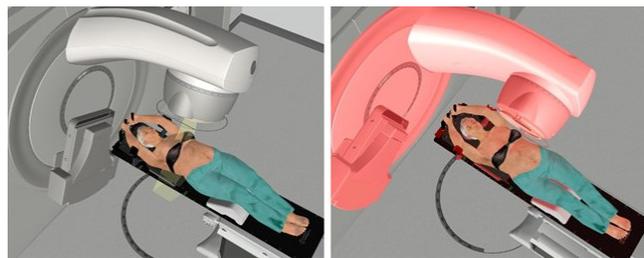


Рис. 1. Начальное положение пациента на ускорителе Elekta Synergy Platform без столкновения (слева), одно из зафиксированных столкновений при поперечном смещении (справа)

дование столкновений проводилось без привязки к стороне расположения опухоли.

В симуляции лечения использовались следующие встроенные в ВВЛТ модели ЛУЭ: Varian CX, Varian iX, Varian TrueBeam, Elekta Synergy, Elekta Synergy Platform, Elekta Versa HD и Siemens Artiste.

При анализе критических расстояний от элементов терапевтического ЛУЭ до пациента использовался режим активации обнаружения столкновений. Данный режим реализуется путём включения соответствующей функции в меню системы. Когда система обнаруживает пересечение каких-либо объектов (стола, фиксирующих устройств и аксессуаров, модели пациента) с подвижными элементами гантри и системой визуализации, то система выдаёт светозвуковой сигнал (рис. 1). При обнаружении столкновения все перемещения останавливаются, что полностью моделирует существующие системы безопасности реальных терапевтических ЛУЭ. В процессе исследования изучались критические значения угла поворота гантри в зависимости от комбинации положения стола в поперечном и вертикальном положениях (рис. 2 отображает траектории смещения), при которых срабатывала система обнаружения столкновения. Вращение гантри совершалось из нулевого положения. Угол поворота коллиматора составлял 0° для всех исследований. Начальное положение стола (по-



Рис. 2. Траектории смещения лечебного стола

Таблица 1

Референсные координаты терапевтического стола для каждой локализации

№ пациента, локализация	Вертикальное смещение (Couch Vrt), см	Продольное смещение (Couch Lng), см
1 (рак лёгких)	10	139,2
2 (рак молочной железы)	25	138
3 (рак предстательной железы)	10	140
4 (рак в области головы и шеи)	10	94

ложение модели пациента относительно центра ЛУЭ) – референсная точка, координаты которой представлены в табл. 1 для каждой локализации. Шаг поперечных смещений и смещений стола по высоте выбран равным 5 см.

Функция LaserGuard, которая входит в состав системы безопасности пациента современных ускорителей от производителя Varian, не реализована в системе ВВЛТ и не может быть включена в анализ столкновений.

Результаты

Исследование включало четыре модели пациентов, различных по локализации проведения лучевой терапии. Для каждого случая определены значения критического угла поворота гантри от поперечных смещений и смещений по высоте терапевтического стола на следующих ЛУЭ: Varian CX; Varian iX; Varian TrueBeam; Elekta Synergy Platform; Elekta Synergy; Elekta Versa HD; Siemens Artiste.

В качестве примера представлен подробный результат анализа модели пациента № 1 (взрослый мужчина, локализация – рак лёгких). Рис. 3 отображает графики критического значения угла поворота гантри в зависимости от высоты и поперечного смещения терапевтического стола.

При высоте стола 0 см (смещение стола вверх на 10 см относительно начального положения) для всех ЛУЭ, кроме Elekta Versa HD, не наблюдается столкновений элементов ускорителя с пациентом или столом. При поперечном смещении вправо или влево на 5 см происходит столкновение элементов ЛУЭ Elekta Versa HD с пациентом на углах поворота гантри 102° и 258°. А при поперечном смещении стола на 10 см вправо или влево столкновения с пациентом обнаружены только для двух ЛУЭ: Elekta Versa HD (при углах поворота гантри равных 91° и 269°) и Varian CX (при углах поворота гантри 105° и 255°). Ускоритель Siemens Artiste

сталкивается с пациентом только при поперечном смещении 20 см (при углах поворота гантри 69° и 291°).

При высоте стола –5 см (смещение стола вверх на 5 см относительно начального положения) для всех ЛУЭ кроме Elekta Versa HD не наблюдается столкновений элементов ускорителя с пациентом. При поперечном смещении вправо или влево на 5 см (столкновения элементов ускорителя Elekta Versa HD с пациентом происходит при углах поворота гантри 100° и 260°). А при поперечном смещении стола на 10 см вправо или влево столкновения обнаружены для трёх ЛУЭ: Elekta Versa HD (при углах поворота гантри 90° и 270°), Varian CX (при углах поворота гантри равных 101° и 259°) и Varian iX (при углах поворота гантри 105° и 255°). Ускоритель Siemens Artiste сталкивается с пациентом только при поперечном смещении 20 см (при углах поворота гантри 74°, 286°).

При высоте стола –10 см (начальное положение) зафиксировано, что при поперечном смещении на 5 см происходит столкновение элементов ЛУЭ Elekta Versa HD (при углах поворота гантри 262° и 98°), и Varian CX (при углах поворота гантри 237° и 123°) с пациентом.

При высоте стола –15 см (смещение стола вниз на 5 см относительно начального положения) и поперечном смещении 5 см терапевтический стол с пациентом №2 сталкивается с элементами таких ЛУЭ как: Elekta Versa HD (98° и 262°), Varian CX (251° и 109°) и Varian iX (244° и 116°). Ускоритель Siemens Artiste сталкивается с пациентом при поперечном смещении равном 15 см (при углах поворота гантри 95°, 265°) и 20 см (при углах поворота гантри 279° и 81°).

При высоте стола –20 см (смещение стола вниз на 10 см относительно начального положения) четыре ЛУЭ сталкиваются с терапевтическим столом: Elekta Versa HD (98° и 262°), Varian CX (255° и 105°), Varian iX (252° и 108°) и Varian TrueBeam (248° и 112°).

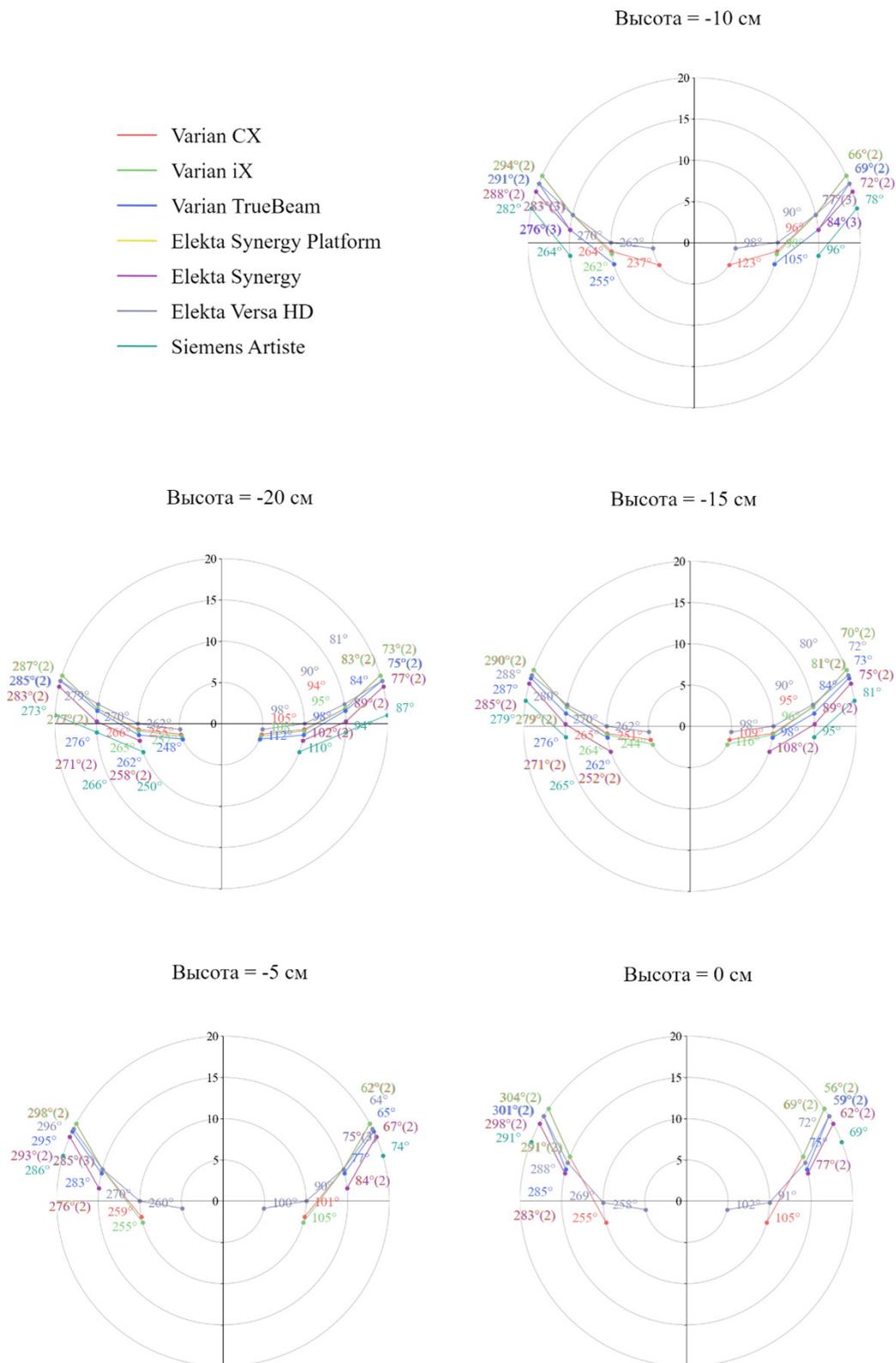


Рис. 3. Графики критического значения угла поворота гантри в зависимости от высоты и поперечного смещения лечебного стола для пациента № 1 (взрослый мужчина, локализация – рак лёгких)

Результаты анализа модели пациента № 2 (взрослая женщина, локализация – рак молочной железы) представлены на рис. 4 и отображают графики критического значения угла поворота гантри в зависимости от высоты и поперечного смещения терапевтического стола. Очевидно, что в случае данной локализации допускается контралатеральное смещение стола на значительные величины. При этом следует учитывать диапазон вращения гантри в противоположном направлении от места расположения опухоли. Например, при левостороннем расположении опухоли стоит руководствоваться пределами вращения гантри против часовой стрелки от вертикального положения.

Результаты анализа модели пациента № 3 (взрослый мужчина, локализация – опухоль предстательной железы) представлены на рис. 5.

Результаты анализа модели пациента № 4 (взрослая женщина, локализация – опухоль в области головы и шеи) представлены на рис. 6.

Для всех рассмотренных локализаций характерен тренд на сокращение допустимого угла поворота гантри при изменении поперечного смещения и на увеличение при снижении высоты терапевтического стола относительно начального положения.

Следует отметить, что ЛУЭ Siemens Artiste отличается наибольшим углом поворота до столкновения (значения лежат в диапазоне от 69° до 87° в крайних положениях терапевтического стола). Как следствие, данный ЛУЭ может совершать полный оборот вокруг пациента без соударения с терапевтическим столом. Elekta Synergy и Elekta Synergy Platform, в свою очередь, имеют абсолютно идентичные данные углов отклонения и обладают довольно широким диапазоном относительно иных ЛУЭ. Данную особенность можно объяснить конструкционным сходством МЛК (в обеих версиях установлен Agility МЛК). ЛУЭ линейки Varian обладают сравнительно меньшими диапазонами углов поворота гантри до столкновения с терапевтическим столом по отношению к вышеупомянутым ЛУЭ.

Важным фактором является положение пациента на терапевтическом столе, которое влияет на допустимый угол поворота гантри. В зависимости от конкретной локализации и положения стола, разница в угле может достигать до 5° .

Заключение

В данной работе выполнен анализ потенциальных столкновений элементов терапевтических ЛУЭ с пациентами. Использование системы ВВЛТ позволило воссоздать условия лучевой терапии и изучить зависимость критического значения угла поворота гантри от высоты и поперечного смещения терапевтического стола с пациентом (использовались фиксирующие устройства, соответствующие локализации облучения) без угрозы для реальных пациентов и техники.

Результаты исследования показали, что в зависимости от модели ЛУЭ при одинаковых локализациях, критические значения угла поворота гантри неодинаковы, в особенности при облучении опухолей торакоабдоминальной отдела. Это следует учитывать при выборе определенной модели ЛУЭ для создания дозиметрического плана лечения соответствующей локализации.

Допускается, что антропометрические параметры пациентов также могут вносить некоторые отклонения от полученных в исследовании данных.

Полученные значения критических углов поворота гантри в зависимости от высоты и поперечного смещения терапевтического стола относительно изоцентра (нулевого положения) могут быть использованы для разработки алгоритмов предотвращения столкновений, улучшая тем самым безопасность процедур лучевой терапии. Эти результаты могут внести вклад в область радиационной безопасности и обеспечения качества лечения онкологических заболеваний, позволяя более точно прогнозировать и избегать возможных препятствий в ходе облучения.

Также важно отметить, что современные ускорители производителя Varian, оснащены системой безопасности LaserGuard, которая обнаруживает объекты в области контроля данной оптической системы и предотвращает столкновения коллиматора с ними. Расстояние, на котором срабатывает система LaserGuard, составляет около 9 см от коллиматора, что уменьшает область безопасного перемещения гантри/коллиматора и терапевтического стола. Однако данная функция не реализована в системе ВВЛТ и, следовательно, не может быть включена в анализ потенциальных столкновений.

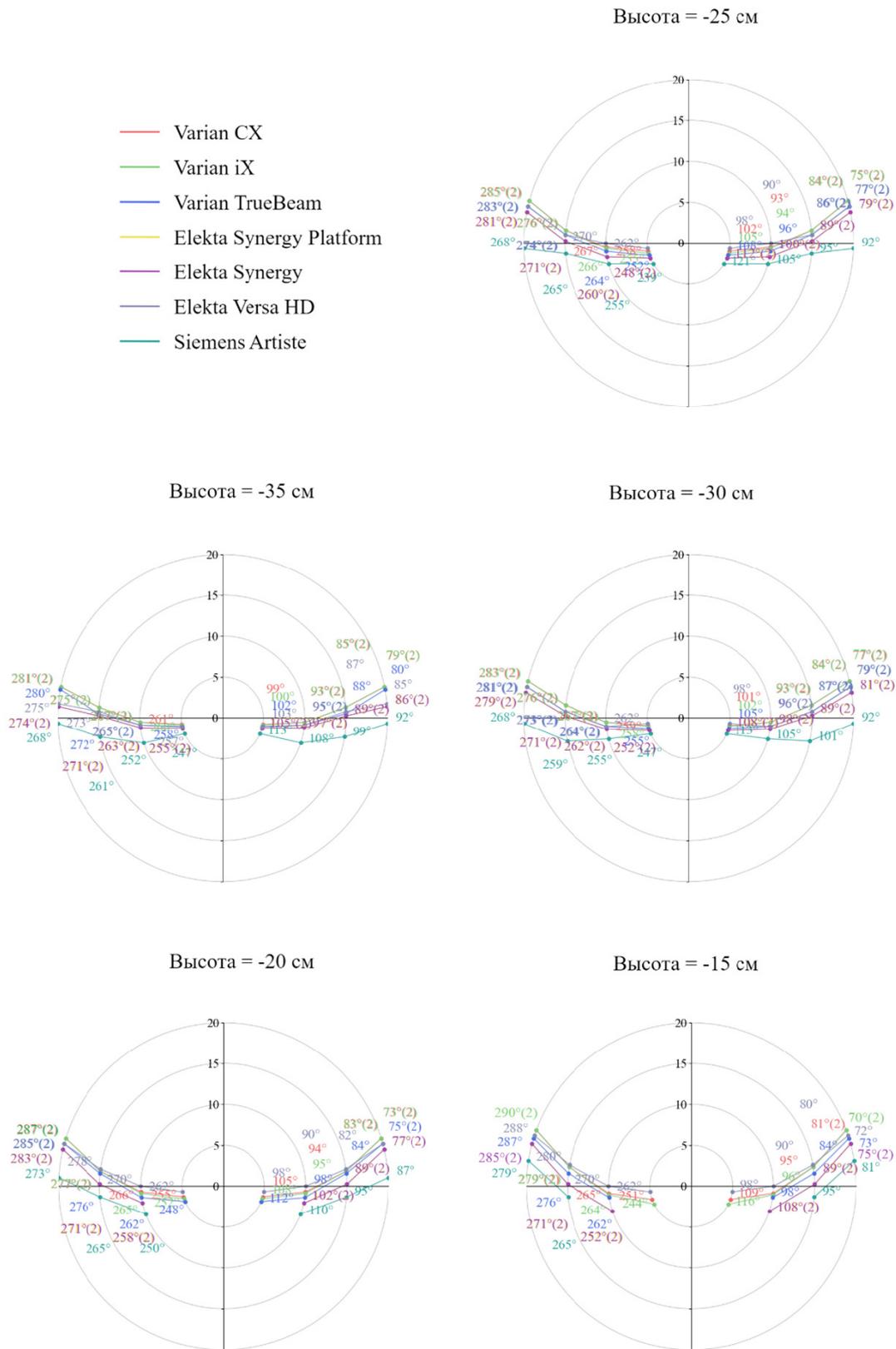


Рис. 4. Графики критического значения угла поворота гантри в зависимости от высоты и боковых смещений лечебного стола для пациента № 2 (взрослая женщина, локализация – рак молочной железы)

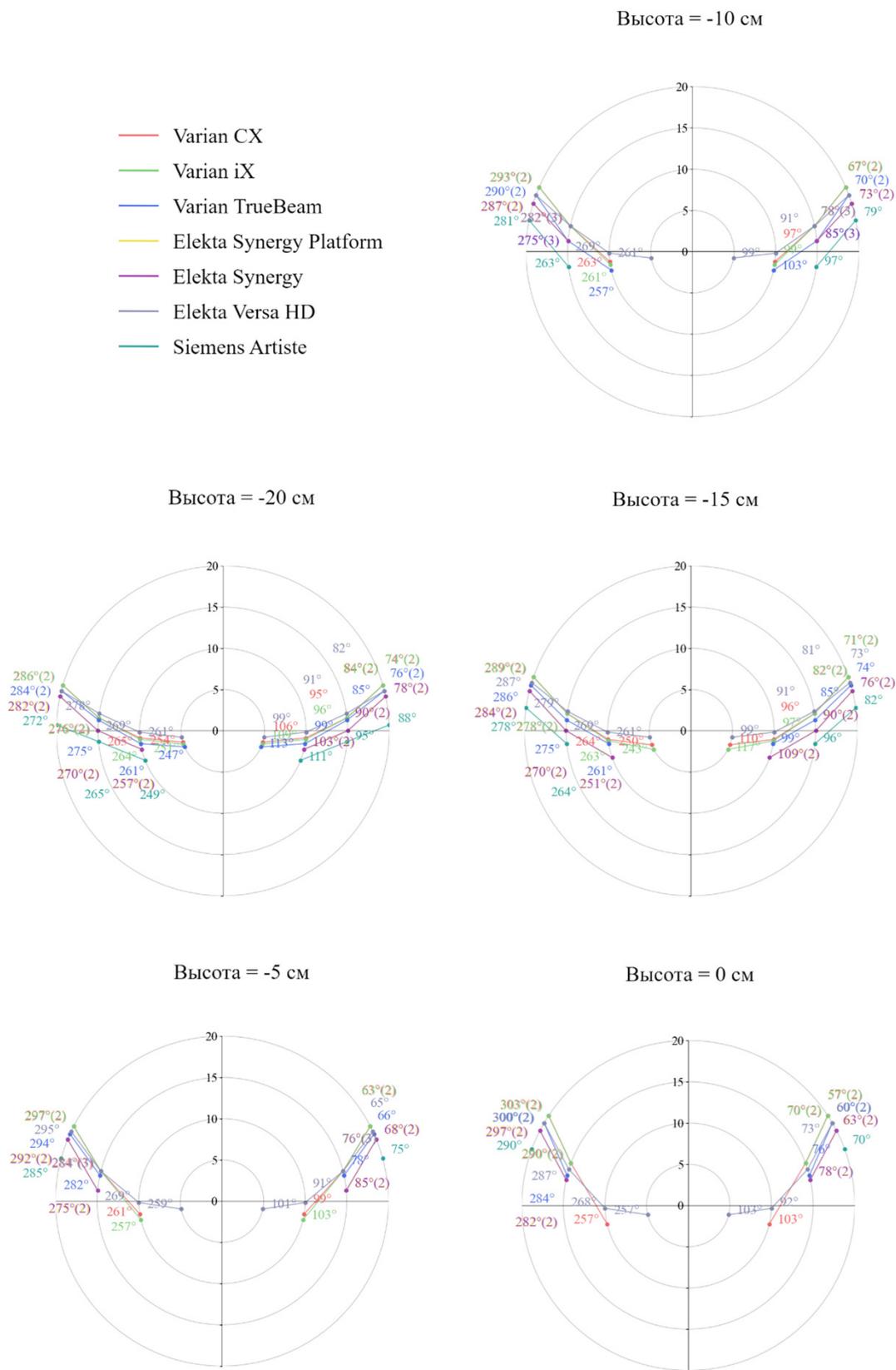


Рис. 5. Графики критического значения угла поворота гантри в зависимости от высоты и боковых смещений лечебного стола для пациента № 3 (взрослый мужчина, локализация – опухоль предстательной железы)

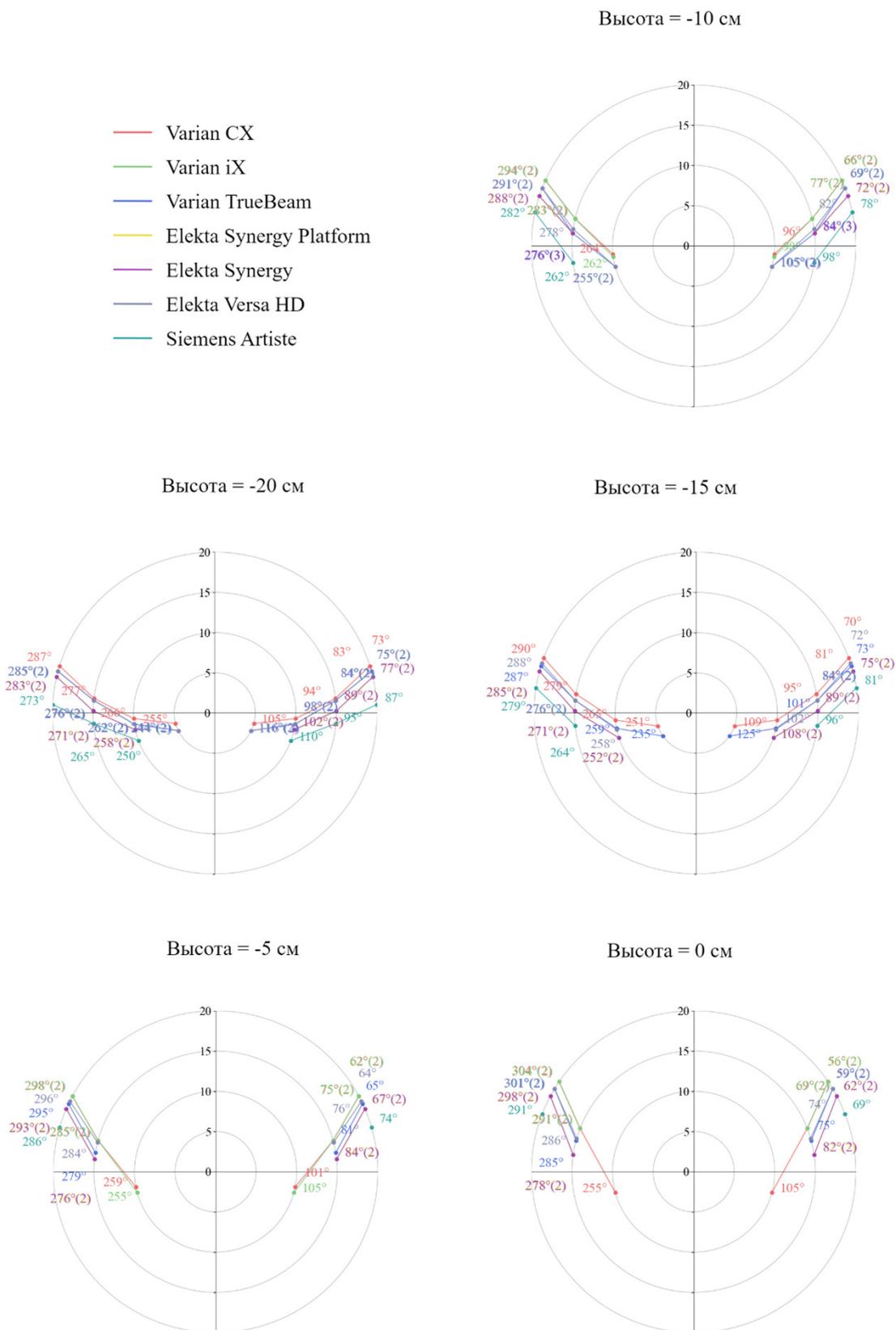


Рис. 6. Графики критического значения угла поворота гантри в зависимости от высоты и боковых смещений лечебного стола для пациента № 4 (взрослая женщина, локализация – рак в области головы и шеи)

Список литературы

1. Stockham A, Balagamwala EH, Singh AD, Macklis R. Teletherapy: advanced techniques. *Ophthalmic Radiation Therapy*. 2013 Aug; 52: 15-28. DOI: 10.1159/000351050.
2. Verhey LJ. Immobilizing and positioning patients for radiotherapy. *Seminars in Radiation oncology*. 1995 Apr; 5 (2): 100-14. DOI: 10.1054/SRA000500100.
3. Nioutsikou E, Bedford JL, Webb S. Patient-specific planning for prevention of mechanical collisions during radiotherapy. *Phys Med Biol*. 2003 Nov 21; 48 (22): N313-21. DOI: 10.1088/0031-9155/48/22/n02.
4. Becker JS. Collision indicator charts for gantry-couch position combinations for Varian linacs. *J Appl Clin Med Phys*. 2011 Mar 2; 12 (3): 3405. DOI: 10.1120/jacmp.v12i3.3405.
5. © Varian Medical Systems, Inc. 1999-2024. <https://www.varian.com/>.
6. © 2024 Elekta. <https://www.elekta.com/>.
7. © Siemens. 1996-2024. <https://www.siemens.com/global/en.html>.
8. Kane JP. The impact of the VERT virtual reality system on teaching and learning associated with radiation therapy planning skills in the second year of the Bachelor of Radiation Therapy. 2014 Apr 1. DOI: 10.13140/RG.2.2.28783.23201.
9. Kane JP. Simulation based education: A narrative review of the use of VERT in radiation therapy education. *J Med Radiat Sci*. 2018 Jun; 65 (2): 131-6. DOI: 10.1002/jmrs.276.
10. Leong A, Herst P, Kane P. VERT, a virtual clinical environment, enhances understanding of radiation therapy planning concepts. *J Med Radiat Sci*. 2018 Jun; 65 (2): 97-105. DOI: 10.1002/jmrs.272.