

Использование томографии в коническом пучке для верификации стереотаксического пространства при радиохирургии на аппарате Leksell Gamma Knife ICON

И. И. Банникова^{1,*}, А. В. Далечина², В. В. Костюченко²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра ускорителей и радиационной медицины
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Центр Гамма-нож при ФГАУ НМИЦ Нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко МЗ РФ
Россия, 125047, Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская д. 16, корп. 3
(Статья поступила 28.03.2019; Подписана в печать 01.04.2019)

Радиохирургия на аппарате Leksell Gamma Knife с применением жестко фиксированных стереотаксических рам является «золотым стандартом» проведения нейрорадиохирургического лечения, что обусловлено высокой точностью облучения и колоссальным мировым клиническим материалом, накопленным более чем за пятидесятилетнюю историю использования этой установки. На сегодняшний день самая современная модель гамма-ножа Leksell Gamma Knife Icon предоставляет возможность проведения стереотаксического лучевого лечения не только в раме, но и в маске. Контроль за точностью позиционирования осуществляется с помощью конусно-лучевого томографа (Cone Beam Computed Tomography, СВСТ), интегрированного с аппаратом. Также конусно-лучевая томография может быть использована для определения стереотаксического пространства вместо стереотаксической рамы. Целью данной работы является анализ литературных данных для исследования возможных причин наблюдаемых расхождений в определении пространств. Выявлено, что возникновение расхождений может быть связано с погрешностями фиксации рамы, погрешностями совмещения КТ и МРТ изображений, искажениями на МРТ, а также артефактами на СВСТ изображениях.

PACS: 87.53.Ly

УДК: 53.06

Ключевые слова: гамма - нож, радиохирургия, стереотаксическая рама, томография в коническом пучке.

ВВЕДЕНИЕ

Зарождение стереотаксической радиохирургии (СРХ) и в целом стереотаксического облучения произошло одновременно в двух дисциплинах — нейрохирургии и терапевтической радиологии — более 50 лет назад [1]. С момента появления СРХ эволюционировала от экспериментальной методики до одной из основных лечебных опций большинства первичных опухолей мозга, метастазов в головной мозг, церебральных мальформаций, тригеминальной невралгии и других функциональных патологий [2]. СРХ — метод, позволяющий деструктивно воздействовать на патологические глубоко расположенные образования с помощью однократного облучения внешне сгенерированными пучками ионизирующего излучения с высокой степенью селективности и конформности, благодаря использованию стереотаксической техники локализации очага и смежных с ним критических структур [3].

1. LEKSELL GAMMA KNIFE

Первым и важнейшим клиническим инструментом в этой области стала установка Гамма-нож Лексел-

ла (Leksell Gamma Knife), внедренный в медицинскую практику в 1967 г. [4]. На сегодняшний день в мире установлено более 330 аппаратов Leksell Gamma Knife в 54 странах мира, большинство из которых являются моделью Gamma Knife Perfexion. Схема коллимационной системы представлена на рис. 1.

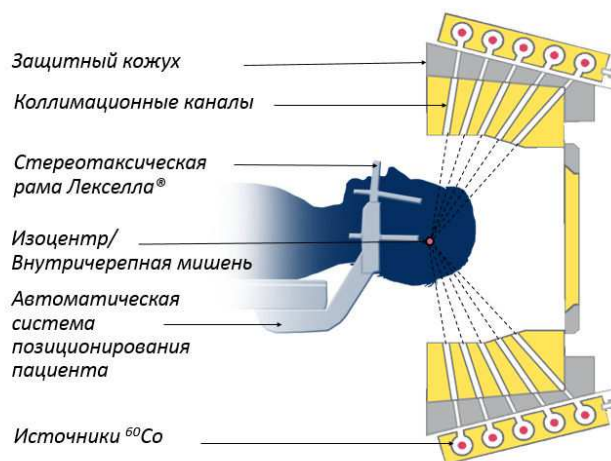
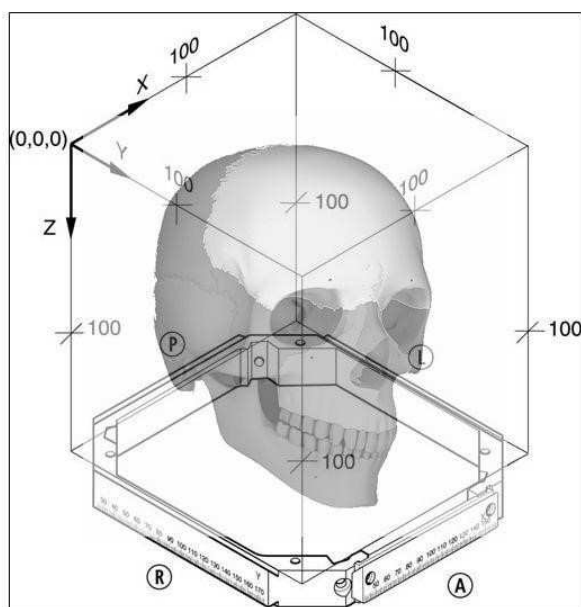


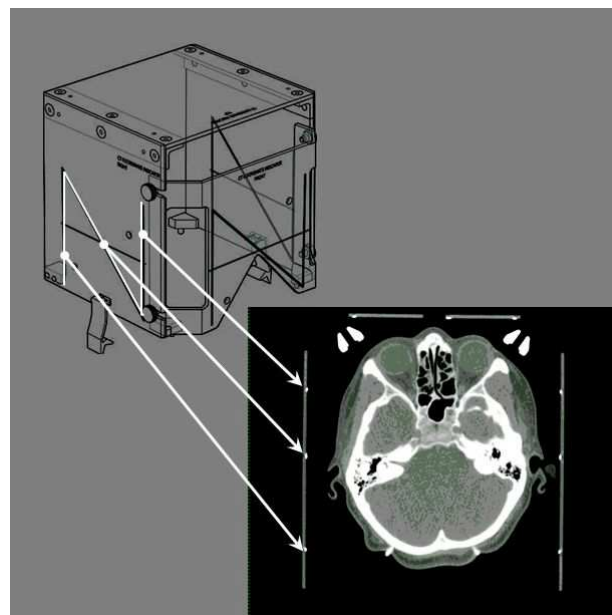
Рис. 1: Схема коллимационной системы установки Leksell Gamma Knife Perfexion

*E-mail: AAAnikova@mail.ru

В радиационном модуле этой установки размещены



а



б

Рис. 2: Стереотаксическая система координат Лекселла (а) и изображение меток локалайзера на томограмме (б)

192 источника ^{60}Co , расположенные в 8-и независимо движущихся секторах, размещенные над поверхностью неподвижного коллиматора из вольфрама, в котором находятся коллимационные отверстия различного диаметра (4, 8 и 16 мм) [5]. Пучки ионизирующего излучения из источников пересекаются в изоцентре, создавая близкое к сферическому дозовое распределение. Суммирование таких дозовых распределений при последовательном помещении в изоцентр разных точек, согласно разработанному плану лечения, позволяет получать дозовое распределение формой соответствующее, облучаемому патологическому очагу (конформное).

Для обеспечения жесткой фиксации головы пациента, исключающей малейшую возможность изменения ее положения в процессе лечения, используется стереотаксическая рама Лекселла. Рама является способом задания прямоугольной декартовой системы координат, в которой определяется положение патологического очага в пространстве.

Фиксация стереотаксической рамы к костям черепа осуществляется с помощью специальных шипов под местной анестезией перед выполнением исследований (КТ, МРТ, ангиографии). Для задания стереотаксических координат на раму устанавливается локализационная коробка с метками, которые видны на томограммах. Далее в системе планирования на основе меток локалайзера осуществляется привязка изображений к стереотаксической системе координат [6, 7]. На рис. 2. изображена стереотаксическая система координат Лекселла, метки локалайзера и их отображение на томограмме.

В системе планирования Leksell Gamma Plan про-

изводится поиск мишеней по МРТ снимкам, сегментация патологических и критических структур, а также непосредственно создание плана облучения [7]. Процесс планирования заключается в подборе 3D координат изоцентров и их весов (относительного времени облучения) таким образом, чтобы предписанная изодоза как можно точнее совпадала с контуром мишени. Примеры дозиметрических планов представлены на рис. 3

Система планирования позволяет создать план облучения, при котором на окружающие здоровые ткани приходится минимальная дозовая нагрузка, что крайне важно при множественных очагах. Leksell Gamma Knife Perfexion обеспечивает высокую точность облучения патологических очагов. Механическая погрешность установки изоцентра вместе с погрешностью подведения дозы составляет не более 0.5 мм [8]. Мощность дозы на момент загрузки источников составляет около 300 сГр/мин.

2. LEKSELL GAMMA KNIFE ICON

В 2014 году компанией Elekta была представлена модель Gamma Knife Icon (рис. 4). Основное отличие нового аппарата от модели Perfexion это возможность фиксации пациента, как в стереотаксической раме (для радиохирургического лечения), так и в индивидуальной термопластической маске (для фракционированного лечения).

Для обеспечения возможности проведения фракционированного облучения Leksell Gamma Knife Icon был оснащён конусно-лучевым компьютерным томографом (CBCT, англ. Cone Beam CT) и системой слежения за

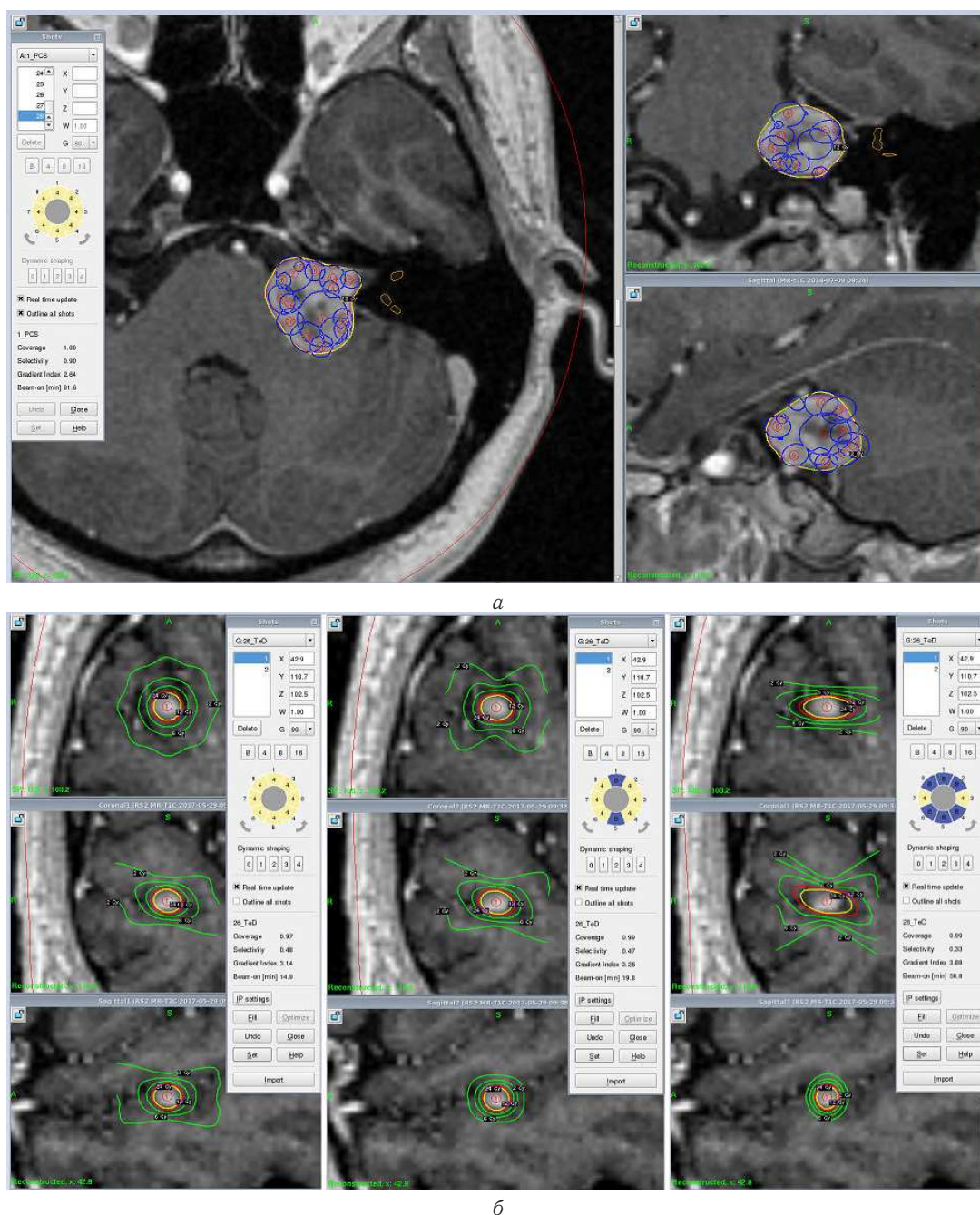


Рис. 3: Расположение изоцентров (шотов) при планировании радиохирургии вестибулярной шванномы (а), различные варианты плана облучения метастатического очага при блокировании секторов (б) (Планы из системы LGP Центра «Гамма-нож»)

положением пациента в процессе лечения (HDMM, англ. high definition motion management) [9], [10].

Система HDMM способна контролировать смещения положения пациента во время лечения в 0,1 мм. HDMM состоит из инфракрасной стереоскопической камеры, непрерывно отслеживающей позиции четырех маркеров, расположенных на адаптере, и пятого маркера, прикрепленного к кончику носа пациента. Как только камера фиксирует смещение пятого маркера, превышающее заданный порог (по умолчанию 1,5 мм),

система прекращает лечение (рис. 5) [9].

СВСТ — система рентгеновской компьютерной томографии, где рентгеновские лучи расходятся, образуя конус. Подвижный элемент СВСТ представляет собой С-дугу (C-arm), на которой расположены рентгеновская трубка и плоскостной детектор излучения. В процессе сканирования угол поворота С-дуги вокруг головы пациента составляет 210° (рис. 6).

Данная система может быть использована для определения стереотаксического пространства вместо сте-

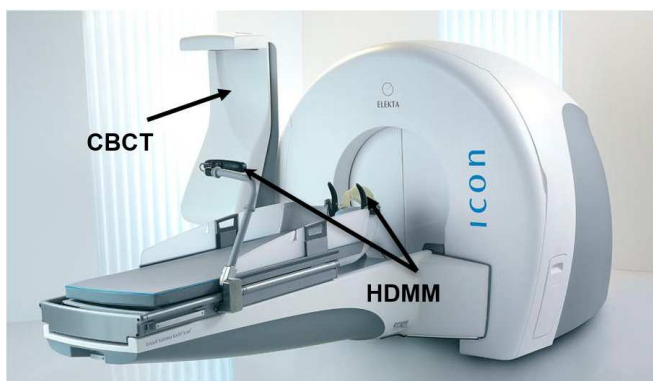


Рис. 4: Схема коллимаційної системи установки Leksell Gamma Knife Perfexion (фото Elekta AB)

реотаксическої рами (в цьому випадку СВСТ вважаються референсними), а також для верифікації положення голови пацієнта і виявлення поступальних і вращательних зсувів відносно референсних знімків СВСТ [11]. Процес совмещения МРТ зображення з референсними КТ зображенням представлено на рис. 7.

Лікування пацієнта в масці допускає можливі зміни в положенні пацієнта від фракції до фракції, тому після совмещения СВСТ зображень, виконаних при кожній укладці, з референсним СВСТ, система автоматично коректує розходження в дозових розподілах, спостережувані за рахунок погрешностей укладки [10]. На рис. 8 представлено приклад автоматичної корекції дозових розподілів після совмещения зображень і порівняння гістограм «доза-об'єм».

3. ВЕРИФІКАЦІЯ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА С ПОМОЩЬЮ ТОМОГРАФИИ В КОНИЧЕСКОМ ПУЧКЕ?

При використанні Leksell Gamma Knife Icon виникає можливість задання стереотаксическої системи координат за допомогою рами і за допомогою СВСТ [12]. Отримані при цьому системи координат не повністю ідентичні одна одній. Дослідження розбіжностей в визначенні стереотаксических просторів є дуже актуальною задачею, так як виявлені закономірності дозволять оцінити неопределенності, пов'язані зі стереотаксическою рамою, в проведенні радіохірургічного лікування. Метою даного огляду є аналіз літературних даних для виявлення можливих причин спостережуваних розходжень.

В роботі [13] 150 пацієнтам була проведена радіохірургія в рамі, при цьому кожному пацієнту перед процедурою було зроблено СВСТ. В день лікування після фіксації рами було виконано «класическе» стереотаксическе КТ в локалізаційному боксі, кото-

рое затем совмещалось с СВСТ зображеннями. Автори [13] відзначають, що в більшості випадків різниця в стереотаксических координатах була менше 1 мм/1°. Однак в декількох випадках спостерігалися великі розходження. Проведений аналіз показав, що це могло бути пов'язано з низьким функціональним статусом пацієнта. Гіпотетично такі пацієнти, можливо, нестрого слідували інструкціям медичного персоналу, уникали прийому седативних препаратів при відчутті дискомфорту від рами, тому могли застосовувати силу для самостійного зняття рами, що могло привести до жорсткої фіксації рами до голови. Також однією з причин ротаційних зсувів згідно з роботою [13] може бути вибір більш довгих шпиль при фіксації рами. Крім цього автори відзначають як одну з причин — розташування шпилей не перпендикулярно до поверхні черепа або на рухомих кісткових лопатках у пацієнтів з передшлющими краніотоміями. Іншими теоретичними причинами виникнення розходжень можуть бути погрешності при фіксації рами, а саме механічне вигинання рами і шпилей, проскальзування шпилей з встановлених положень. В роботі [14] автори також провели верифікацію з використанням СВСТ для 20 пацієнтів в рамі, однак не відзначили зміщення більше 1 мм. Крім цього були досліджені зміщення в процесі проведення радіохірургії. Для цього СВСТ було виконано перед лікуванням і після лікування. Були виявлені незначительні розходження не більше ніж на 0.05 мм і 0.05°.

Однією з потенційних причин можливих погрешностей при верифікації стереотаксического простору з допомогою СВСТ може бути неякісне совмещение МРТ і СВСТ. За даними компанії Elekta погрешність совмещения СВСТ зображень з МРТ зображеннями не перевищує 0.3 мм. В роботі [15] автори також оцінили погрешність совмещения цих досліджень і продемонстрували розбіжності в 0.2 мм. Однак було відзначено, що погрешність збільшується до 0.8 при включенні в область корекції нижньої щелеп.

Також на точність совмещения зображень можуть впливати такі погіршуючі ефекти як розсіяння і шум в зображеннях СВСТ. Крім цього можливо існує вплив деяких параметрів алгоритму реконструкції 3D СВСТ зображень, що призводить до появи артефактів на зображеннях. В публікації [10] повідомляється про виникненні артефактів в верхній частині голови, пов'язаних з алгоритмом реконструкції СВСТ. Також можливо зменшення точності реконструкції на краях сканованого об'єкта через наявність розсіяння. Розповсюдженим методом зменшення розсіяння випромінювання є переміщення детектора далі від об'єкта. Але в зв'язі з конструкційними особливостями Leksell Gamma Knife це неможливо зробити.

При дослідженні залежності області совмещения на точність, в «медіальній» частині голови очі-

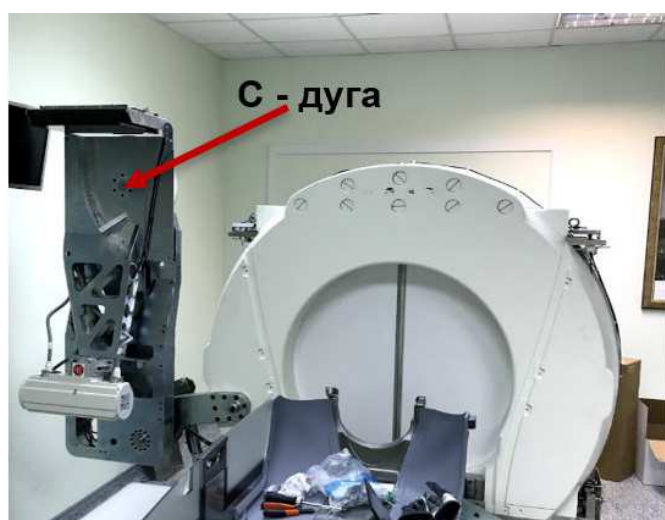


а

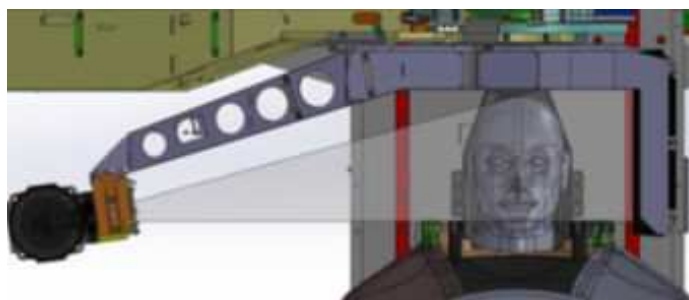


б

Рис. 5: Пациент в термопластической маске (а), слежение за референсными маркерами и маркером пациента с помощью инфракрасной камеры (б) (фото Elekta AB)



а



б

Рис. 6: Фото во время инсталляции установки Leksell Gamma Knife Icon в ФГАУ НМИЦ им. акад. Н. Н. Бурденко (а), схема получения томографического изображения в коническом пучке (Elekta AB) (б)

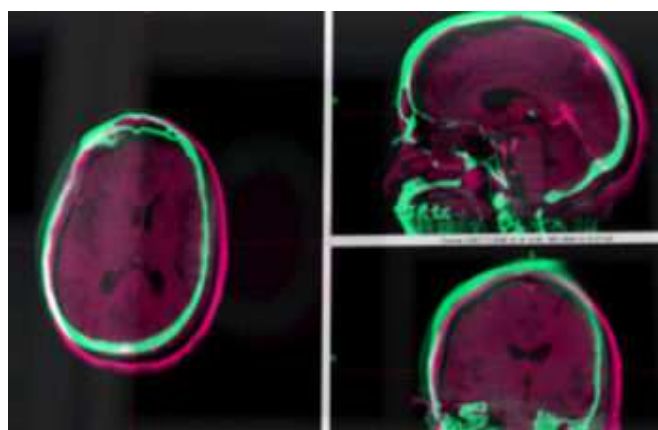


Рис. 7: Корегистрация (совмещение) изображений (Elekta AB)

дается минимальная ошибка, так как погрешность МРТ в центральной области меньше. В исследовании [15] средние ошибки МРТ составляли 0.6 ± 0.2 мм, 0.4 ± 0.2 мм и 0.6 ± 0.2 мм в областях «Нижняя», «Медиальная» и «Верхняя» соответственно. Также средняя ошибка на МРТ-изображениях составляла 0.95 мм, но уменьшалась до 0.60 мм, когда рассматривались только точки в пределах 7 см от центра координат и до 0.47 мм при уменьшении расстояния до 5 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных показывает, что СВСТ обеспечивает субмиллиметровую точность при определении стереотаксического пространства, однако отмечены факторы, влияющие на разницу между стереотаксическим пространством в раме и стереотаксическими координатами, определенными по СВСТ. Появление

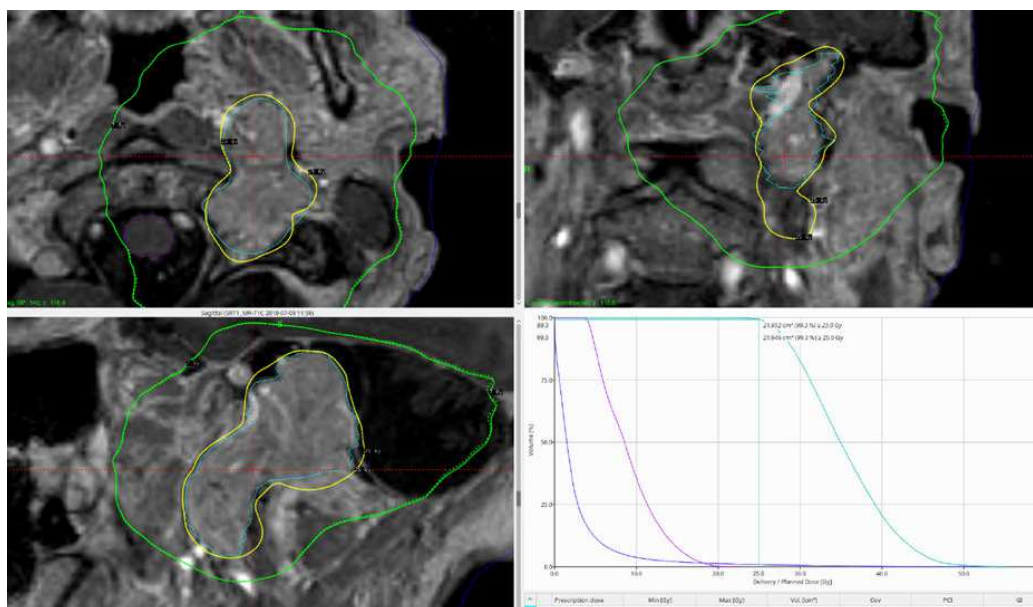


Рис. 8: Автоматическая коррекция дозовых распределений после совмещения МРТ изображения с референсным КТ, полученным при выполнении томографии в коническом пучке, при лечении пациента в режиме гипофракционирования. Гистограмма «доза–объем» показывает, что покрытие мишени предписанной дозой не изменилось. Сплошная линия — скорректированный план, учитывающий смещение, возникшее при повторной укладке, пунктир — планирование по референсному КТ (План из системы LGP Центра «Гамма-нож»)

ние возможности верификации радиохирургии в раме с помощью СВСТ позволит выявить скрытые неопределенности при использовании рамы в качестве фиксирующего устройства.

По результатам проведенного анализа литературных данных планируется провести собственное исследование различий в определении стереотаксических пространств, оценивая такие факторы, как установка стереотаксической рамы, положение шипов, локализация мишени, качество совмещения изображений, неопределенности, связанные с МРТ изображениями.

Gamma Knife Icon может изменить привычную парадигму радиохирургического лечения, однако требуется детальное исследование выявленных неопределенностей. Дальнейший этап работы заключается в более подробном анализе параметров, которые могут быть причинами наблюдаемых расхождений в дозовых распределениях при разных способах определения стереотаксических координат.

- [1] Костюченко В.В. Медицинская физика 2015. **2(66)**. Р. 52.
- [2] Голанов А.В., Костюченко В.В. Нейрохирургия на Гамма-ноже. М. 2018.
- [3] Torrens M., Chung H.-T. et al. Journal of Neurosurgery. 2014.**121**. Р. 2.
- [4] Backlund E.-O. Progress in Neurological Surgery. 2007.**20**.
- [5] Костюченко В.В. Медицинская физика. 2015. **4(68)**. Р. 85.
- [6] Elekta MR Indicator: Instructions for Use. [Doc. Art. No 003606 Rev. 02 (2004.04)]. Stockholm, Sweden. 2004
- [7] Fanqing Guo Medical Dosimetry. 2018. **43**. Р. 177.
- [8] Smith P., Young A., Rockhill K. Clinical Positioning Accuracy for Multisession Stereotactic Radiotherapy With the Gamma Knife Perfexion. 2017. **16(6)**. Р. 893.
- [9] Elekta High Definition Motion Management—enabling stereotactic Gamma Knife® radiosurgery with non-rigid patient fixations. Stockholm. Sweden. 2014
- [10] Elekta Design and performance characteristics of a Cone Beam CT system for Leksell Gamma Knife® Icon™. Stockholm. Sweden. 2014
- [11] Fukuda A. J Appl Clin Med Phys. 2010. **11**. Р. 3162.
- [12] Dorenlot A. Elekta Launch symposium. 2015.
- [13] Sunil W. Dutta, Roman O. Kowalchuk, Daniel M. Trifiletti, M. Sean Peach, Jason P. Sheehan, James M. Larner, David Schlesinger Int J Radiat Oncol Biol Phys 2018. Р. 1.
- [14] Li W., Cho Y.B., Ansell S. et al. Int J Radiat Oncol Biol Phys 2016. **96**. Р. 214.
- [15] Chung H.-T., Kim J.H., Kim J.W., Paek S.H., Kim D.G., Chun K.J. et al. PLoS ONE 2018. **13(3)**. e0193809.

Using Cone Beam Computer Tomography for stereotactic space verification during frame-based Leksell Gamma Knife ICON radiosurgery

I. I. Bannikova^{1,a}, A. V. Dalechina², V. V. Kostjuchenko²

¹*Department of accelerators and radiation medicine, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Moscow Gamma Knife Center at Burdenko Neurosurgical Institute
Moscow, 125047, Russia*

E-mail: ^aAAAnikova@mail.ru.ru

Leksell Gamma Knife frame-based radiosurgery is considered the «gold standard» of neuro radiosurgery. This is due to both the high precision of the radiation treatment and the large amount of the global clinical data gathered over 50 years of using this radiosurgery system. To date, Leksell Gamma Knife Icon is the most modern model of Gamma Knife and provides the ability to conduct a frame-based stereotactic radiation treatment as well as both mask-fixated frameless hypofractionation and radiosurgery. The integrated Cone Beam CT is used for the positional delivery accuracy. Also the CBCT can be used for defining Leksell stereotactic space instead of the traditional stereotactic frame. The purpose of this work is to analyze different studies to investigate the reasons of the observed deviations in the definition of the stereotactic spaces. It was found that the occurrence of the deviations could be associated with the frame placements uncertainties, MR/CT co-registration errors, MRI distortions and the CBCT artifacts.

PACS: 87.53.Ly.

Keywords: Gamma Knife, radiosurgery, stereotactic frame, cone beam computed tomography.

Received 28 March 2019.

Сведения об авторах

1. Банникова Ирина Игоревна — студентка четвертого курса; e-mail: AAAnikova@mail.ru.
2. Далечина Александра Владимировна — канд. физ.-мат. наук; e-mail: adalechina@nsi.ru.
3. Костюченко Валерий Валерьевич — физик; e-mail: vkostjuchenko@nsi.ru.