

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С КОМПЛЕКТОМ ПРИНАДЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ

И.М. Лебедеенко<sup>1,2</sup>, Ю.В. Журов<sup>1</sup>, С.В. Медведев<sup>1</sup>, Т.А. Крылова<sup>1</sup>, М.П. Шатенок<sup>1</sup>,  
В.А. Болдырева<sup>1</sup>, О.В. Зайченко<sup>1</sup>, Д.С. Романов<sup>1</sup>, С.В. Гарин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский онкологический научный центр им. Н.Н.Блохина” Минздрава России,  
Москва

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва

Проанализирован трехлетний опыт применения ускорителя электронов Clinac 600С с комплектом принадлежностей для стереотаксического облучения интракраниальных локализаций опухолей. Рассмотрены параметры стабильности механических настроек системы “пациент–рамка”. Сделано заключение о невозможности проведения стереотаксического облучения из-за нестабильности параметров системы пациент–рамка и отсутствия системы контроля положения мишени во время процедуры лечения.

Ключевые слова: *лучевая терапия, стереотаксическая радиохirurgия, система пациент–рамка, нестабильность параметров*

### Введение

Метод стереотаксической радиохirurgии (СРХ) характеризуется применением однократной высокой дозы (10–30 Гр). Во избежание переоблучения критических органов создаются дозовые распределения с высоким градиентом дозы на границе мишени. Стереотаксическая лучевая терапия (СЛТ) осуществляется при тех же требованиях с фракционированием дозы. Ограничения на использование стереотаксического облучения (СО) обусловлены гораздо большей вероятностью поражения прилегающих к опухоли здоровых тканей. Так как с ростом размера очага возрастает риск постлучевых осложнений, поперечные размеры мишени обычно составляют от нескольких миллиметров до 3,5 см. Известны типичные внутричерепные патологии, которые могут быть подвергнуты СО: одиночные первичные опухоли головного мозга, одиночные метастазы, артериовенозные мальформации и доброкаче-

ственные заболевания такие, как аденомы гипофиза и невриномы слухового нерва [1].

В 2006 г. Американское общество терапевтической радиологии и онкологии (ASCO), Американская ассоциация нейрохирургов (AANC) и Конгресс нейрохирургов согласовали определение СРХ как метод, который включает как традиционное облучение, проводимое за одну фракцию, так и фракционированное, которое проводится за 2–5 фракций [2]. В дальнейшем мы будем придерживаться этого соглашения.

Все аппараты, предназначенные для проведения СРХ, можно разделить на два класса. К первому классу относятся аппараты, специально разработанные и предназначенные для реализации процедуры СРХ (ГаммаНож, КиберНож, Novalis (BrainLab)). Ко второму классу относятся ускорители общего назначения с дополнительным оборудованием, отвечающим следующим требованиям: техническая воз-

возможность настройки более высокой изоцентрической точности ускорителя, необходимое оборудование для контроля по методике Winston-Lutz, стереотаксическая рамка с набором многослойной фиксации, специальная система планирования, система визуализации, высокоточное дозиметрическое обеспечение, высококвалифицированную команду медицинских физиков.

При осуществлении СО предъявляются повышенные требования как к самому облучателю, так и ко всем сопутствующим процедурам [3, 4]:

- ✓ точному позиционированию пациента;
- ✓ механической точности и воспроизводимости параметров ускорителя;
- ✓ оптимальному распределению дозы;
- ✓ общей и радиационной безопасности пациента;
- ✓ погрешность подведенной к мишени дозы должна укладываться в 5 % в соответствии с требованиями международного стандарта [5];
- ✓ доза к мишени должна подводиться с геометрической погрешностью до 1,0 мм для всех углов поворота гантри, коллиматора и стола;
- ✓ третичный коллиматор должен формировать пучок с допустимой погрешностью не более 2,0 мм по ширине на полувысоте;
- ✓ градиент дозы в области полутени должен быть больше или равен 60 %/3 мм;
- ✓ следует ввести ограничение поворота штатива в зависимости от положения стола для предотвращения нанесения увечий пациенту (как программным контролем, так и аппаратными средствами);
- ✓ обеспечить установление шторок вторичного коллиматора в положение, оптимальное для облучения, при котором формируемое прямоугольное поле должно максимально приближаться к границам требуемого фигурного поля. Действительно, если СРХ будет проведена со шторками вторичного коллиматора, открытыми за третичным коллиматором, нормальная ткань мозга получит неприемлемо высокую дозу;
- ✓ обеспечение обесточивания и обездвиживания стола в случае аварийной ситуации в ходе выполнения СРХ.

## Материал и методы

Аппарат Clinac 600C с номинальной энергией фотонов 6 МВ располагает системой портальной визуализации, интегрированным МЛК 120 (размер тени пластины на уровне изоцентра – 5 мм) предназначенным, в том числе, для проведения СРХ, а также набором конических коллиматоров диаметром от 4 до 30 мм и стереотаксической рамкой компании BrainLab. Максимальный размер поля облучения 40×40 см. Измерения изоцентрической точности показали, что отклонение изоцентра при вращении гантри, коллиматора и стола укладываются в сферу радиусом не более 0,75 мм, что лучше заявленных паспортных данных (радиус 1 мм) и удовлетворяет требованию по точности для проведения СО.

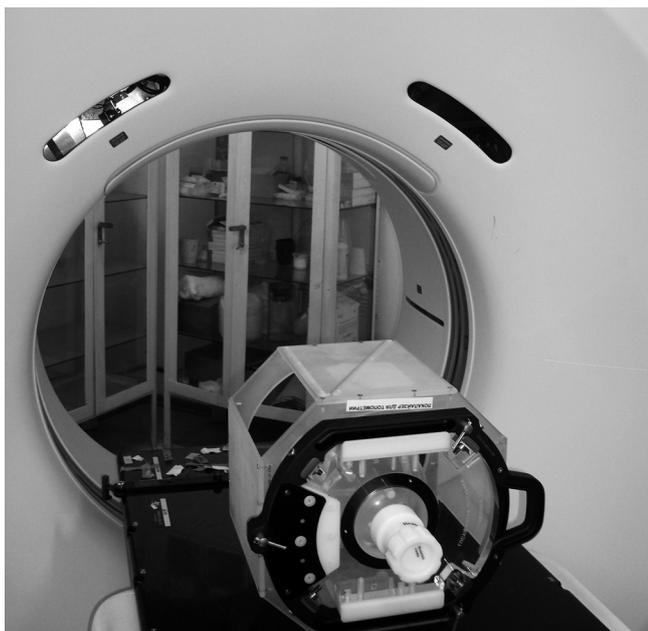
Период освоения методики СО условно можно разделить на несколько этапов.

Первый этап – получение исходной дозиметрической информации. По правилам международного стандарта в 2009–2010 гг. были проведены приемо-сдаточные испытания ускорителя. Реализованы процедуры съемки дозиметрической информации, согласования с международной базой данных, заведения и многоступенчатого тестирования систем планирования Eclipse и iPlan, сопоставления рассчитанных и измеренных данных как в точке, так и с помощью матрицы детекторов 2D Array (PTW) (процедура “commissioning”).

Второй этап – выбор инструментария для верификационных процедур. Проведен комплекс работ, который позволил физикам определиться в выборе метода и оборудования для предтерапевтических проверок СО.

Третий этап – лечение больных, накопление опыта.

При подготовке к планированию облучения осуществлялась идентификация объема мишени в локализационной коробке, которая изображена на фотографии с фантомом внутри вместо головы пациента (рис. 1). Это было необходимо для установления соответствия стереотаксической и диагностической систем координат. Локализационная коробка представляет собой раму со стенками с нанесенными на них перекрестиями для точной центрации больного на столе КТ. Методы визуализации (КТ, МРТ, и/или ангиография), позволяют определить облучаемый объем в пределах стереотаксической рамки, затем осуществляется слияние изображений. Далее КТ-снимки в циф-



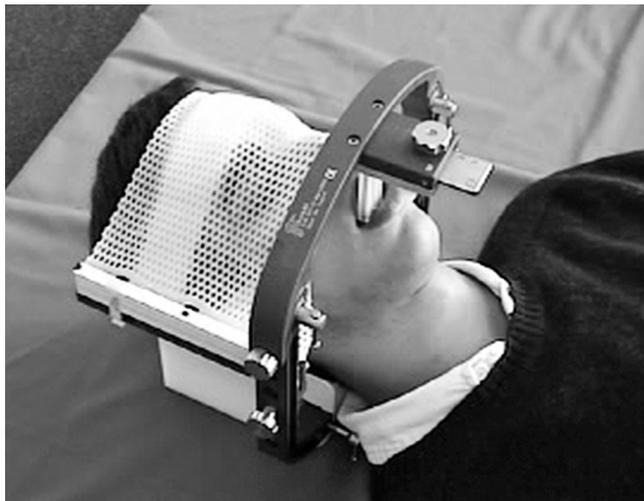
**Рис. 1.** Фантом Лису на столе КТ в стереотаксической рамке и локализационной коробке



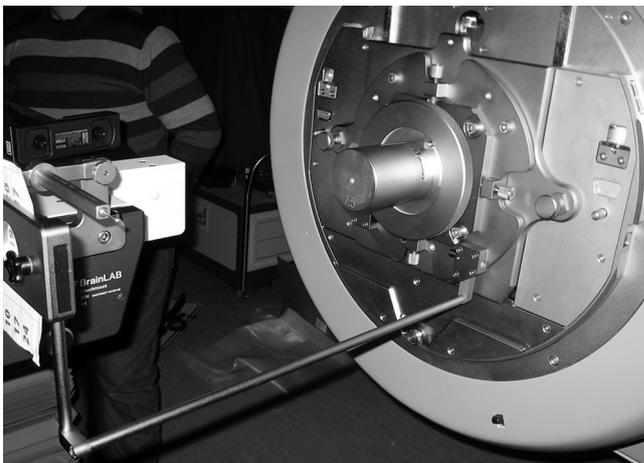
**Рис. 2.** Положение больного на терапевтическом столе перед процедурой СРХ

ровом виде поступают на рабочую станцию, где врач-радиолог оконтуривает мишень и критические структуры. Оконтуренные изображения поступают в систему планирования iPlan, где медицинский физик составляет план СО.

При процедуре СРХ, проводимой за один сеанс, рамка четырьмя винтами прикрепляется к костям черепа пациента. Два винта крепятся к лобной части, два – к затылочной. Процедура проводится нейрохирургами под



**Рис. 3.** Многослойная фиксация черепа пациента при фракционированном облучении



**Рис. 4.** Тест-объект для изоцентрической настройки ускорителя по методике Winston-Lutz, закрепленный на краю терапевтического стола

местной анестезией (рис. 2). При лечении, проводимом за 2–5 сеансов, фиксация пациента осуществляется при помощи многослойной термопластической маски (рис. 3).

Перед СО проводится внеочередная калибровка ускорителя и проверка по методике Winston-Lutz (рис. 4) для проверки соответствия изоцентрических настроек ускорителя (центра совпадения осей штатива, диафрагмы, стола) параметрам радиационного поля. Результат такой проверки сводится к получению совпадения в определенных допусках центра перекрытия радиационного поля и тени центра шарика тест-объекта, отражающего изоцент-

Таблица 1

**Результаты проверки механической стабильности ускорителя электронов  
Clinac 600С (отклонение точки изоцентра от исходного положения, мм)**

№ испытания	Г-0°	Г-90°	Г-270°	Г-180°
Исходно, С-0°, К-0°	0	0	0	–
1, С-0°, К-0°	1	<1	0	–
2, С-0°, К-0°	1	<1	0	–
№ испытания	С-0°	С-90°, Г-90°	С-270°, Г-0°	С-0°, Г-0°
Исходно, К-0°	0	0	–	–
1, К-0°	1	0	–	–
2, К-0°	1	0	–	–
№ испытания	К-0°	К-90°	К-180°	К-270°
Исходно, С-90°, Г-0°	0	0	–	–
1, С-90°, Г-0°	0	<1	–	–
2, С-90°, Г-0°	<1	0	–	–
№ испытания	К-0°	К-90°	К-180°	К-270°
Исходно, С-90°, Г-0°	0	0	–	–
1, С-90°, Г-0°	0	<1	–	–
2, С-90°, Г-0°	<1	0	–	–
№ испытания	К-0°	К-90°	К-180°	К-270°
Исходно, С-270°, Г-0°	0	0	–	0
1, С-270°, Г-0°	<1	<1	–	0
2, С-270°, Г-0°	<1	<1	–	0
№ испытания	К-0°	К-90°	К-180°	К-270°
Исходно, С-270°, Г-90°	0	0	–	0
1, С-270°, Г-90°	1	1	–	1
2, С-270°, Г-90°	1	1	–	1
№ испытания	К-0°	К-90°	К-180°	К-270°
Исходно, С-0°, Г-0°	0	<1	–	1
1, С-0°, Г-0°	0	<1	–	1
2, С-0°, Г-0°	<1	<1	–	1

Сокращения: Г – гантри, С – стол, К – коллиматор

рические настройки, в пределах 1,0 мм. получают около 10 таких изображений для различных углов поворота гентри и стола, Результаты Winston-Lutz теста для ускорителя Clinac 600С находятся в допустимых пределах.

Четвертый этап – осмысление накопленного опыта. До конца 2014 г. проведено СО интракраниальных образований у 21 пациента. По истечении шести месяцев эксплуатации ускорителя Clinac 600С в режиме СО в специальном эксперименте в присутствии врачей, медицинских физиков и инженеров по обслуживанию ЛУЭ, была зафиксирована нестабильность настроек системы координат “пациент-рамка”. При этом стереотаксическая рамка была зафиксирована на краю стола с грузом, эквивалентным массе тела человека. Процедура проверки системы “пациент-рамка” предшествовала независимая проверка механической

стабильности настроек ускорителя, которые не выходили за пределы допусков для всех положений стола, гентри и диафрагмы (табл. 1) и процедура независимой оценки изоцентрической стабильности системы лазеров, которая также оказалась в пределах допуска (1 мм).

Нестабильность настроек системы координат пациент-рамка выражалась в “сползании” настроек совпадения осей светового поля, оси диафрагмы, оси ротации и лазера, проекции которых отражались на стенках стереотаксической рамки. По предварительным предположениям “сползание” настроек было обусловлено ослаблением зажимов и фланцев рамки со временем (до 30 мин). Эти отклонения были зафиксированы и составляли от  $\pm 0,5$  до  $\pm 1,0$  мм для разных положений стола, штатива и диафрагмы. Это означало, что через некоторое время после фиксации головы больного и

ухода персонала из каньона, все настройки, которые в конечном итоге позволяли визуализировать точку с максимальным значением дозы в опухоли, уже не соответствовали исходным. В результате наблюдений нестабильности системы “пациент–рамка” и при отсутствии системы контроля за положением опухоли в режиме on-line и возможности корректировки этого положения с помощью стола мы отказались от СО больных на ускорителе Clinac 600C в такой конфигурации.

### Заключение и выводы

Совершенно очевидно, что стереотаксическое облучение интракраниальных образований должно проводиться исключительно на аппаратах, удовлетворяющих требованиям, главными из которых являются: наличие МЛК и/или конических коллиматоров; наличие устройств визуализации и контроля за положением опухоли в режиме on-line (ExacTrac) с возможностью корректировки положения пациента с учетом зарегистрированных сдвигов; наличие режима облучения с высокой мощностью дозы. Использование ЛУЭ с оборудованием для СО без устройств контроля и коррекции в режиме on-line может явиться причиной неудачи лечения. В такой комплектации приобретать и использовать ускоритель категорически не рекомендуется. Отсюда следуют выводы:

1. Наличие в комплекте ускорителя только стереотаксической рамки не решает задачи высокоточного подведения дозы. Механические настройки системы “пациент–рамка” могут выйти за пределы допустимых погрешностей из-за крупного шага системы “винт-гайка” (позиционирование рамки по

изоцентру) и стать главной причиной ошибки при подведении дозы.

2. Это может быть связано либо с нестабильностью крепежей и фланцев стереотаксической рамки, либо с возникшей кривизной деки терапевтического стола, на котором крепится рамка, в результате его ежедневной эксплуатации.
3. Лечение опухолей головного мозга с помощью рамки BrainLab возможно только при контроле за опухолью в режиме on-line.
4. Наличие “старения” системы “пациент–рамка” оговаривается компаниями-производителями в руководствах по эксплуатации. Оно происходит также и из-за неаккуратного обращения с рамкой (случайные падения, применение силы).
5. Компании-производители рекомендуют проводить аудит системы “пациент–рамка” для контроля точности системы и, при необходимости ее коррекции, проводить замену или ремонт.

### Список литературы

1. Костюченко В.В. История развития стереотаксического облучения // Мед. физика. 2015. № 2. С. 52–65. № 3. С. 74–88.
2. AANS/CNS. Statement on Coding and Reimbursement for Stereotactic Radiosurgery. 2008.
3. AAPM Report № 54 // Stereotactic Radiosurgery. 1995.
4. Podgorsak E.B. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students – IAEA. 2005.
5. МКРЕ 50/62. Назначение, протоколирование и отчетность по фотонной терапии // Мед. физика. 1998. № 5. С. 28–32.

### APPLICATION OF CLINAC 600C ACCELERATOR WITH EQUIPMENT FOR STEREOTACTIC RADIOSURGERY

I. Lebedenko<sup>1,2</sup>, Y. Jourov<sup>1</sup>, S. Medvedev<sup>1</sup>, T. Krylova<sup>1</sup>, M. Shatenok<sup>1</sup>, V. Boldyreva<sup>1</sup>,  
O. Zaichenko<sup>1</sup>, D. Romanov<sup>1</sup>, S. Garin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> N.N. Blokhin Russian Cancer Research Center, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Applicability of linac Clinac 600 C/D for intracranial stereotactic treatment using immobilization tools was studied. The stability analysis for basic mechanical parameters of the machine and patient–frame system was done. It was concluded that stereotactic treatment cannot be used by the reason of bad reproducibility of patient–frame system parameters after 3 exploration years. It is important also to note that linac should be equipped with imaging system to control target position.

Key words: radiation therapy, stereotactic radiosurgery, patient–frame system, instability parameters

E-mail: [imlebedenko@mail.ru](mailto:imlebedenko@mail.ru)

## Комментарии

Приведённые в статье И.М. Лебеденко и соавт. данные по проблеме проведения стереотаксического облучения (СО) на неспециализированных установках представляет определённый практический интерес. Мы, однако, не можем согласиться с третьим выводом авторов о невозможности проведения СО в раме без использования радиотерапевтических систем наведения по изображениям (IGRT), к которым относится система EhasTrac. Очевидным примером существования такой возможности является установка Гамма-нож, на которой с 1974 г. проводится радиохирургия без наведения по изображениям. За это время в мире было пролечено более 1 млн. пациентов. Гамма-нож часто упоминается в литературе как “золотой стандарт” радиохирургического оборудования, и новые установки сопоставляются с ним по точности.

Кроме того, использование одновременно рамы для фиксации пациента и системы EhasTrac для его позиционирования технически невозможно (в соответствии с рекомендациями производителя). IGRT появилось, как средство, необходимое именно в тех случаях, когда нельзя использовать раму: при гипофракционировании, когда необходима повторная фиксация, или при лечении экстракраниальных заболеваний, где жёсткая фиксация невозможна.

В статье указано, что в 2009–2010 гг. были проведены приемо-сдаточные испытания системы, что также включает приемо-сдаточные испытания комплекта оборудования для СО. Это означает, что на момент начала клинического использования система обеспечивала необходимую точность проведения СО. Авторы подробно перечислили “повышенные требования как к самому облучателю, так и ко всем сопутствующим процедурам”, а также отметили, что “компания-производитель рекомендуют проводить аудит системы ... и, при необходимости, проводить замену или ремонт”. В данной ситуации аудит квалифицированными инженерами компании-производителя, возможно, помог бы установить источник возникающих неточностей и устранить его. Эксплуатация системы в течение длительного времени без должного обслуживания не является поводом для настоятельной рекомендации другим пользователям отказаться от проведения радиохирургии в раме.

В статье приведена фотография фантома Лусу, который предназначен для контроля качества СО и проведения так называемого end-to-end теста – проверки всей последовательности терапевтических мероприятий (сканирования в компьютерном томографе, планирования, укладки и облучения). Результаты тестирования авторами не приводятся, что являлось бы явным ответом на вопрос, обеспечивает ли данная система фиксации и позиционирования стереотакси-

ческую точность. При обнаружении ненадлежащей точности абсолютной дозы и распределения на пленке, в ходе дальнейшего анализа ситуации можно было сделать вывод, связана ли плохая фиксация пациента со старением системы, неаккуратным обращением или с “нестабильностью крепежей и фланцев стереотаксической рамки, либо с возникшей кривизной деки терапевтического стола”. Описание проведенного эксперимента, к сожалению, не позволяет детально понять его суть и прокомментировать причины возникающих погрешностей.

В статье не содержится ссылок на статьи в международных журналах других пользователей данной системы и на руководство компании BrainLab. Однако в руководстве пользователя рекомендуется перепроверять положение лечебного изоцентра перед каждым следующим полем, что позволяет скомпенсировать провисание деки стола и ослабление крепежей, если таковые действительно имеют место.

В отделении радиологии и радиохирургии НИИ НХ им. Н.Н. Бурденко стереотаксическая рама производства BrainLab используется свыше 10 лет. За это время около 880 пациентов были пролечены в режиме радиохирургии. Проводимые с определенной периодичностью Winston-Lutz тест и контроль стабильности положения пациента во время сеанса облучения (по лазерам) имеют удовлетворительные результаты (отклонение положения изоцентра  $\leq 0,5$  мм). По нашему мнению, конструкция рамы и креплений обладает необходимой жесткостью и надежностью и может обеспечить неподвижность пациента относительно деки стола на время облучения ( $\approx 20$  мин). Однако, фиксация рамы к голове пациента должно выполняться нейрохирургом, имеющим опыт работы таким оборудованием. Система EhasTrac используется в отделении только при фракционированном лечении пациента в маске.

Данная статья полезна для читателей, т.к. обращает внимание на серьезную проблему обеспечения точности СО. Подведение пациенту высоких разовых доз выдвигает дополнительные требования к состоянию оборудования, дозиметрии, процедурам подготовки и проведения облучения. Но основной вывод такой работы, по нашему мнению, должен заключаться не в необходимости отказа от радиохирургии в раме без IGRT, а в настоятельной рекомендации другим пользователям обеспечивать своевременное и квалифицированное проведение всех необходимых процедур гарантии качества и сервисного обслуживания оборудования для СО.

Н.А. Антипина  
НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко,  
В.В. Костюченко  
Центр Гамма-нож, Москва