

## ЛЕКЦІЇ

УДК 615.849:351.77(477.65)

ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ МЕЧЕВ<sup>1</sup>, НИКОЛАЙ ВИЛЛЕНОВИЧ КРАСНОСЕЛЬСКИЙ<sup>2</sup>,  
МИЯ ГРИГОРЬЕВНА СИХАРУЛИДЗЕ<sup>3</sup>, НАТАЛЬЯ МИХАЙЛОВНА СЕРЕГИНА<sup>3</sup>,  
ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА ГУМЕНЮК<sup>3</sup>, НИКОЛАЙ БОГДАНОВИЧ ГУМЕНЮК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Национальная медицинская академия последипломного образования им. П. Л. Шупика, Киев*

<sup>2</sup> *ГУ «Институт медицинской радиологии им. С. П. Григорьева НАМН Украины», Харьков*

<sup>3</sup> *Украинский центр томотерапии, Кировоград*

### ТОМОТЕРАПИЯ — ПЕРЕДОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

**Резюме.** Представлена информация об открытии первого в Украине Центра томотерапии в г. Кировограде. Описана структура центра, суть и принципы томотерапии, основные показания, особенности и преимущества метода стереотаксического лучевого лечения. Проанализированы первые клинические наблюдения при использовании системы томотерапии у онкологических больных. Данное направление предполагает самую высокую степень эффективной конформной стереотаксической лучевой терапии всего тела — SBRT при ограничении облучения окружающих опухоль здоровых органов и тканей. Сочетание в одном устройстве трехмерной КТ-визуализации с новым спиральным методом подведения облучения значительно повышает эффективность лечения.

Особое внимание уделено системе гарантии качества лучевого лечения при томотерапии.

**Ключевые слова:** конформная стереотаксическая томотерапия, оборудование, показания, преимущества, структура Центра томотерапии, SBRT.

17 июня 2015 г. в Кировограде состоялось значительное для Украины событие — торжественная церемония открытия первого в стране Украинского центра томотерапии (УЦТ). При этом также впервые в Украине реализована модель приватно-государственного партнерства в области онкологии. Такая модель предлагается в качестве пилотной для развития украинской онкологии в целом и радиоонкологии в частности. Благодаря преимуществам такого партнерства большая часть денег была инвестирована в современное оборудование и существенное повышение квалификации персонала.

#### Ключевые показатели проекта:

- проект был реализован менее чем за 12 месяцев;
- в процессе создания УЦТ принимали участие около 100 специалистов из 10 стран мира;
- пропускная способность центра — более 2 тыс. пациентов в год;

© Д. С. Мечев, Н. В. Красносельский, М. Г. Сихарулидзе,  
Н. М. Серегина, Е. В. Гуменюк, Н. Б. Гуменюк, 2015



- этот диагностико-лечебный комплекс, позволяющий проводить 3D-планирование курсов лучевой терапии, является уникальным для Украины;

- в УЦТ вошли в строй два новейших лечебных комплекса (линейные ускорители для дистанционной лучевой терапии) — «TomoTherapy HD» и «Elekta Synergy»;

- диагностический комплекс Toshiba Medical Systems: KT Aquilion LB, MPT Vantage Titan 1,5 T и УЗ-аппарат экспертного класса Aplio 500 Platinum;

- планируется открытие Центра повышения квалификации врачей — лучевых терапевтов, рентгенологов и медицинских физиков.

В этих показателях проекта удивляет разумный симбиоз трех ведущих медицинских компаний мира: Accuray (томотерапия), Elekta (линейные ускорители), Toshiba (диагностическое оборудование).

Изюминкой центра, безусловно, является система TomoTherapy HD, которая предлагает высококонформный (со всеми необходимыми для этого аксессуарами) путь развития стереотаксической лучевой терапии всего тела (SBRT — stereotactic body radiation therapy).

Центр начал работу в апреле 2015 года. Результаты лечения первых 14 пациентов были продемонстрированы во время официального открытия 17 июня. На открытии было зарегистрировано более 150 гостей — специалистов-радиологов, онкологов, лучевых терапевтов, главных врачей онкодиспансеров из разных областей Украины. Мероприятие почтили своим участием министр здравоохранения Украины А. Квиташвили, главный радиолог МЗ Украины проф. О. Солодянникова, директор Национального института рака д.м.н. Е. Колесник, директор Харьковского института радиологии им. С. П. Григорьева проф. Н. Красносельский, президент Украинского общества радиационных онкологов проф. В. Иванкова, зав. кафедрой радиологии НМАПО им. П. Л. Шупика (единственная в Украине академия, которая готовит лучевых терапевтов) проф. Д. Мечев, зав. кафедрой онкологии ЗМАПО проф. А. Ковалев, известный в Европе медицинский физик Карлос Сандин (Британия), гости из Грузии и Белоруссии, глава Кировоградской ОГА С. Кузьменко, глава Кировоградского областного совета О. Черноиваненко и др. [5].

Во время открытия УЦТ был подписан договор «О приватно-государственном партнерстве» между Кировоградской ОГА и Украинским центром томотерапии.

Для представителей СМИ (более 30 человек) был проведен круглый стол «Европейская модель развития медицины в Украине». Модераторами круглого стола выступили: А. Квиташвили — министр здравоохранения Украины; К. Яринич — депутат ВСУ, член Комитета по вопросам охраны здоровья; А. Павленко — первый заместитель министра здравоохранения Украины; К. Гаевский — инициатор проекта УЦТ; Е. Колесник — директор Национального института рака; М. Сихарулидзе — главный врач, директор УЦТ.

## СТРУКТУРА УЦТ

### Диагностическое отделение

#### *Компьютерный томограф Toshiba Aquilion LB*

- Апертура гентри 90 см
- Поле обзора 85 см
- Тонкие срезы 0,5 мм

#### *Магнитно-резонансный томограф Vantage TITAN 1,5T*

- Технология Speeder TM
- Технология Atlas TM
- Диапазон сканирования — 205 см

#### *УЗ-аппарат экспертного класса Aplio 500*

- Высокая разрешающая способность
- Программа Precision Imaging
- Эластография

### Лечебное отделение

#### *Радиотерапевтическая система Elekta Synergy*

- Рабочий диапазон энергии: 6 MV
- Интегрированный многолепестковый коллиматор MLCi2
- XVI — Система рентгеновской 2D/3D-визуализации
- Система портальной визуализации: iViewGT
- Информационно-административная система

### MOSAIQ

#### *Радиотерапевтическая система TomoTherapy TomoHD*

- 2 рабочие энергии
  - 6 MV терапевтическая
  - 3,5 MV для MVCT
- Узкий пучок 1, 2,5 и 5,0 см
- Спиральное/статическое посрезовое облучение
- 85 см SAD
- Легко реализуется IGRT (xenon ion chamber) и IMRT
- FFF 850 cGy/min в макс.
- Терапевтическое поле
  - Возможность лечения объемов размером до 40 см в диаметре и до 135 см по длине. Отсутствует опасность столкновения стола с гентри
- Характеристики гентри
  - Ширина апертуры — 850 мм (радиус 425 мм)
  - Время оборота:
    - 360° за 60 с (min); 360° за 10 с (max).

## СУТЬ И ПРИНЦИПЫ ТОМОТЕРАПИИ

Томотерапия — новый метод дистанционной лучевой терапии, заключающийся в облучении мишени частями и напоминает собой, с точки зрения технической реализации, спиральную компьютерную рентгеновскую томографию (рис. 1).

Метод разрабатывался с 70-х годов XX века в Японии и США, однако реализация терапевтических аппаратов стала технически возможной только в XXI веке. В 2003 г. появились первые центры в Европе, а в 2005–2006 гг. — первые публикации [1–4] по SBRT.

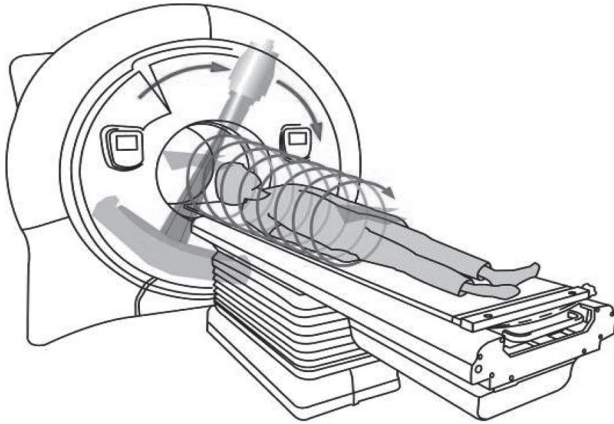


Рис. 1.

Модель TomoTherapy TomoHD (рис. 1) представляет собой гибридный современный высокотехнологичный линейный ускоритель и компьютерный томограф. Данное оборудование дает возможность осуществлять облучения «мишеней» (очагов и метастазов различных локализаций) пучками высокоэнергетического излучения с высокой точностью благодаря использованию MVCT (мегавольтной томографии патологического очага перед началом каждой процедуры — IGRT).

#### **Показания к проведению томотерапии**

- Опухоли больших размеров
- Опухоли сложной конфигурации
- Необходимость облучения сразу нескольких мишеней
- Большие по протяженности опухоли
- Случаи, когда необходимо проводить повторное облучение.

#### **Томотерапия открывает новые возможности при лечении:**

- Мезотелиомы плевры
- Распространенных лимфом кожи
- Тотального облучения костного мозга (перед пересадкой костного мозга)

#### **а также используется для:**

- Облучения единственной почки
- Тотального облучения лимфатических узлов
- Краниоспинального облучения (при медуллобластомах, эпендимоммах, герминогенных опухолях, лимфомах с поражением ЦНС, нейробластомах, пинеобластомах).

#### **Особенности TomoTherapy:**

- Спиральная доставка дозы (51 проекция за оборот)
- Разделение пучка на бимлеты (64 бимлета с проекции)
- Легкость реализации планов IMRT
- Возможность замены стола КТ на стол Tomo
- 1 изоцентр
- Наличие подвижных лазеров для позиционирования
- Легкость реализации IGRT с помощью CTTrue Imaging
- Новый метод доставки облучения для SRS и SBRT

- Равномерное облучение опухоли независимо от ее размеров без участков наложения полей и «холодных» зон
- Снижение токсичности лучевой терапии
- Возможность реализации адаптивного планирования
- Пневматическое MLC
- Программа TomoTherapy Quality Assurance (TQA) для дополнительного контроля качества системы
- Отсутствует опасность столкновения стола с гентри.

#### **Снижение токсичности при томотерапии**

- Снижается степень проявления местных и общих лучевых реакций
- Снижается частота прерывания курсов лучевой терапии
- Улучшаются косметические результаты лечения

#### **Преимущества томотерапии в клинической практике**

- Высокая конформность дозы за счет спиральной доставки облучения
- Высокая однородность дозового распределения
- Высокий градиент дозы между планируемым объемом облучения и органами риска
- Возможность реконструкции фактической дозы, что является необходимым условием при адаптивной радиотерапии
- Низкая токсичность лечения
- Может использоваться для реализации планов лечения, которые соответствуют дозиметрическим и клиническим требованиям к стереотаксической радиохирургии.

Особенности аппарата и доставка дозы представлены на рисунках 2, 3, VI цв. вкл. [1].

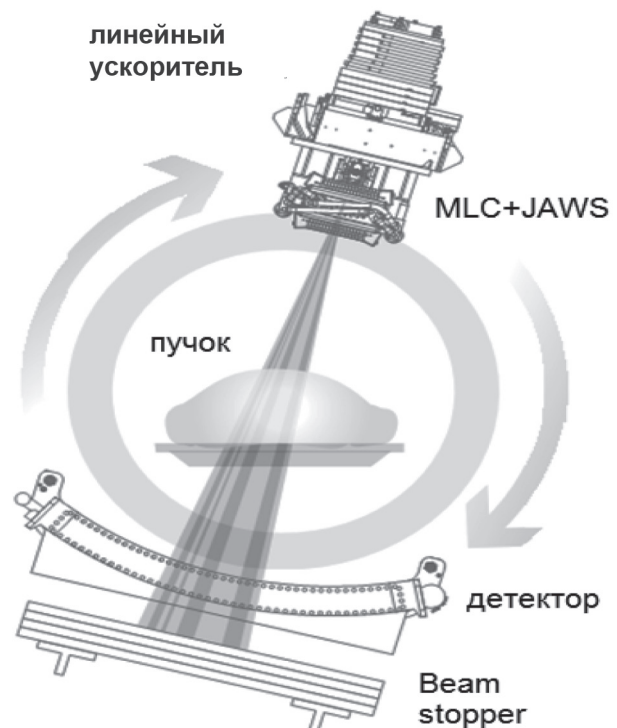


Рис. 2



Рис. 3.

Режимы облучения представлены на рис. 4.



Рис. 4.

### TomoHelical™

Режим облучения TomoHelical позволяет реализовать IMRT и 3D CRT.

Во время облучения линейный ускоритель осуществляет множественные обороты на 360° вокруг пациента, стол при этом движется сквозь апертуру гентри (рис. 5).

### TomoDirect™

Режим облучения TomoDirect — это режим, при котором облучение проводится с дискретных направлений (от 2 до 12 углов), то есть статическими пучками, которые в каждой мишени подводятся последовательно. При каждом угле поворота гентри стол движется сквозь его апертуру с соответствующей скоростью (рис. 6).

Важнейшую роль, как и при работе всех линейных ускорителей, играют коллиматоры (рис. 7).

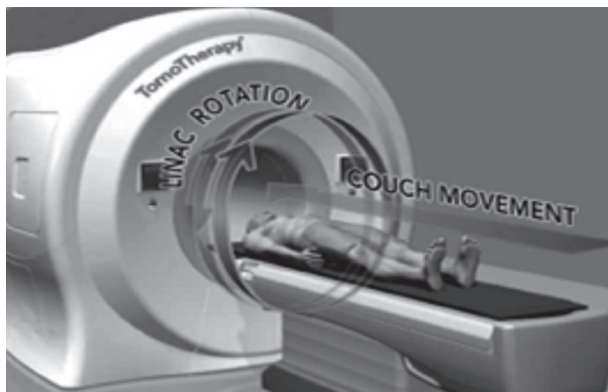


Рис. 5.

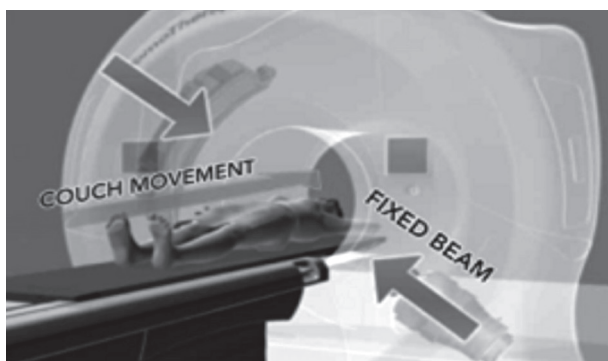
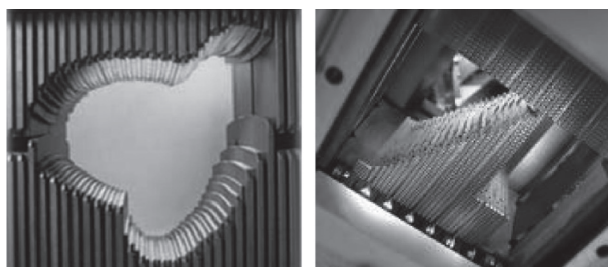


Рис. 6.



а



б

Рис. 7. Многолепестковый коллиматор (модулятор МЛК): а) бинарный МЛК; б) обычный МЛК

### Бинарный МЛК

- Лепестки либо закрыты, либо открыты
- Двигаются пневматически
- Созданы для модуляции пучка (IMRT)
- Время откр./закр. лепестка ± 20 ms
- 64 × 6,25 mm лепестка
- Каждый открытый лепесток пропускает определенную запланированную дозу.

### Обычный МЛК

- Лепестки движутся к запланированной позиции
- Двигаются моторчиками
- Созданы для формирования пучка.

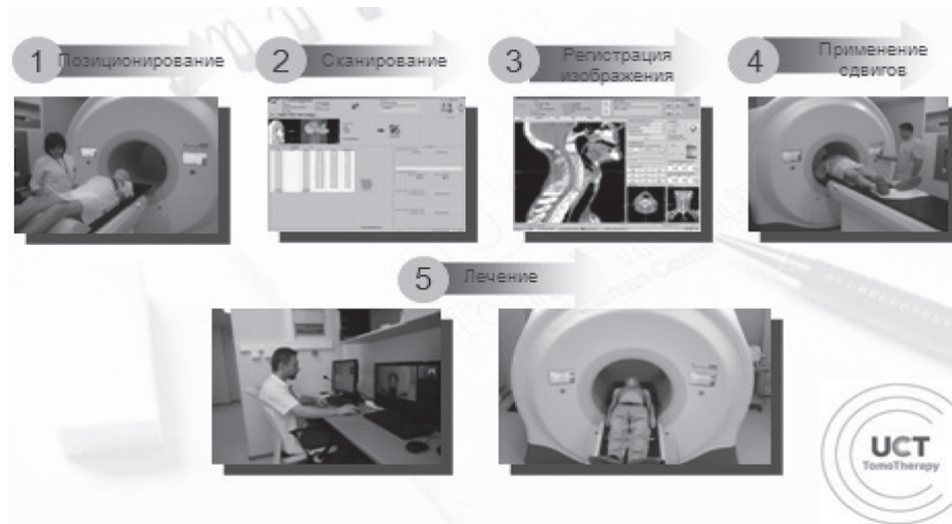


Рис. 8. Tomotherapy® Treatment System — процесс доставки дозы

На рис. 8, VII цв. вкл., 9, VIII цв. вкл. представлены иллюстрации по процессу доставки дозы, позиционированию и регистрации изображений.

В составе системы TomoHD есть стационарные лазеры зеленого цвета — для идентификации положения виртуального изоцентра.

Подвижные лазеры красного цвета — для позиционирования пациента по меткам (их положение определяется физиком при создании терапевтического планирования + 18 см от зеленых).

**TOMOTHERAPY® TREATMENT SYSTEM IGRT:3D MVCT Imaging CTrue™** (рис. 9)

- Качественное изображение (отсутствие артефактов).
- Низкая поглощенная доза (1–3 сGy), которая позволяет проводить IGRT перед каждой процедурой.

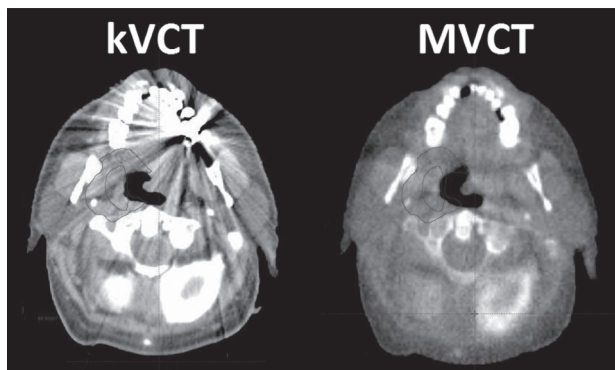


Рис. 9.

**Регистрация изображения** (рис. VIII цв. вкл.)

- Ручной и автоматический методы сопоставления kVCT и MVCT
- Возможность изменения стартового положения стола и угла гентри
- Сопоставление распределения дозы с реальным положением органов.

Рассматривая возможности томотерапии в лечебном плане, следует отдельно остановиться на краниоспинальном облучении (рис. VIV цв. вкл.) и адаптивной радиотерапии [2, 3].

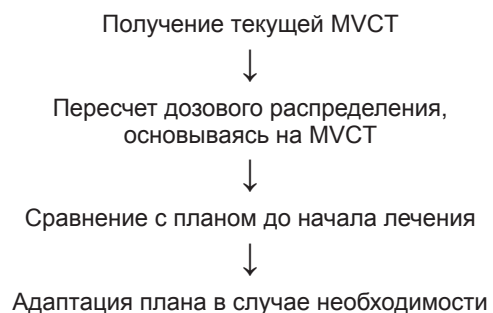
**Томотерапия — метод выбора при краниоспинальном облучении**

- Проведение сеанса лучевой терапии с одним изоцентром
- Однородность дозы облучения (нет «холодных», «горячих» точек в местах стыковок полей, как при лечении на обычном линейном ускорителе)
- Высокий градиент дозы между планируемым объемом облучения и органами риска
- Ежедневный визуальный контроль

**Адаптивная радиотерапия**

Адаптивная радиотерапия — это современная технология лучевой терапии, подразумевающая коррекцию плана облучения на протяжении курса лечения в связи с изменениями анатомии опухоли и здоровых органов и тканей.

**Основные этапы адаптивной радиотерапии**



Первые в Украине собственные (4 наблюдения УЦТ) клинические наблюдения

**Рак гортаноглотки**

(рис. BV–BIX цв. вкл.)

**Опухоль головного мозга**

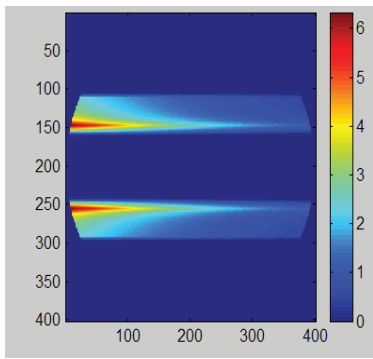
(рис. BX–BXI цв. вкл.)

**Краниоспинальное облучение**

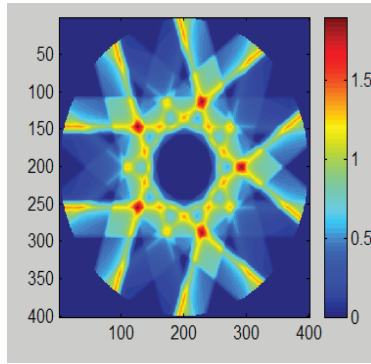
(рис. BXII–BXIII цв. вкл.)

**Облучение рака предстательной железы**

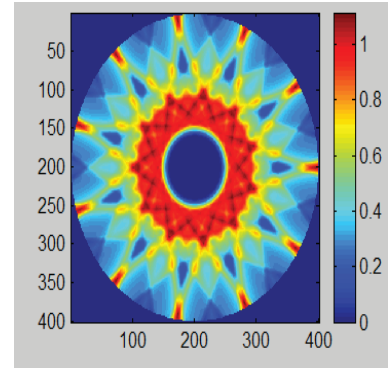
(рис. BXIV цв. вкл.)



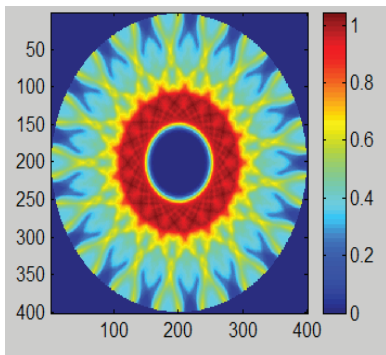
1 пучок



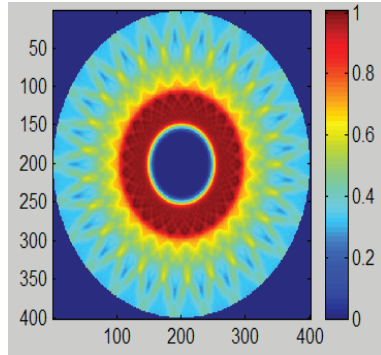
5 пучков



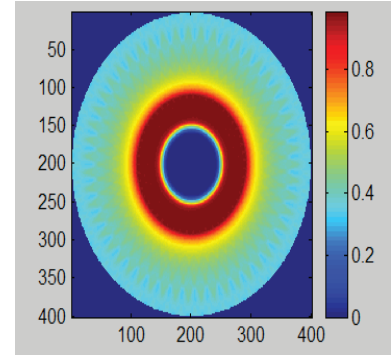
11 пучков



17 пучков

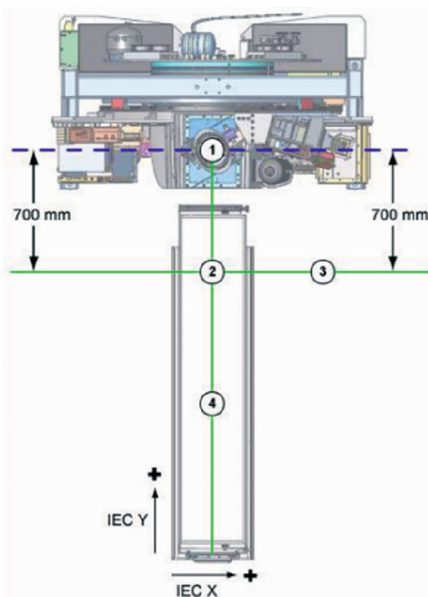


25 пучков

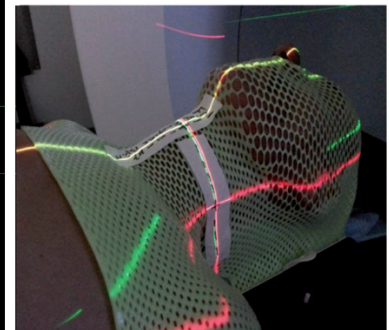
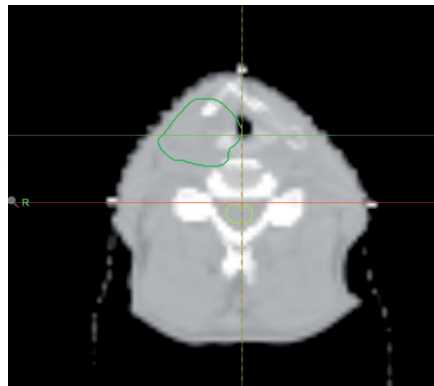


51 пучок

Рис. VI



*a*



*б*

Рис. VII. Позиционирование

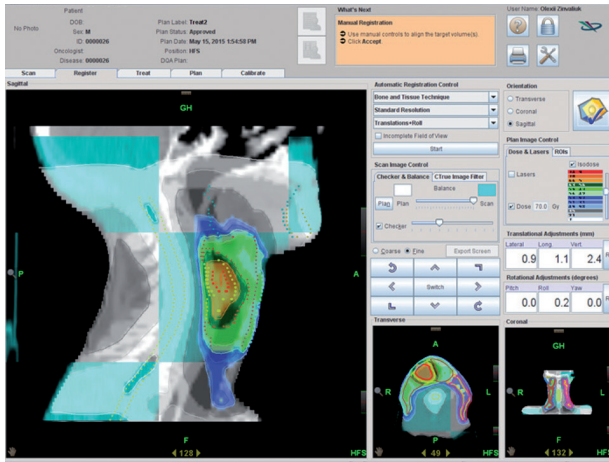


Рис. VIII. Регистрация изображения

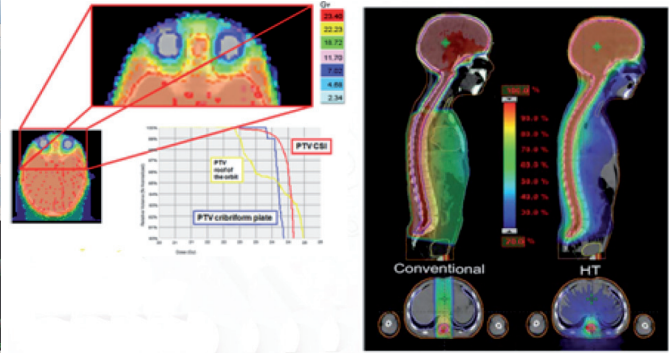


Рис. ВIV. Краниоспинальное облучение

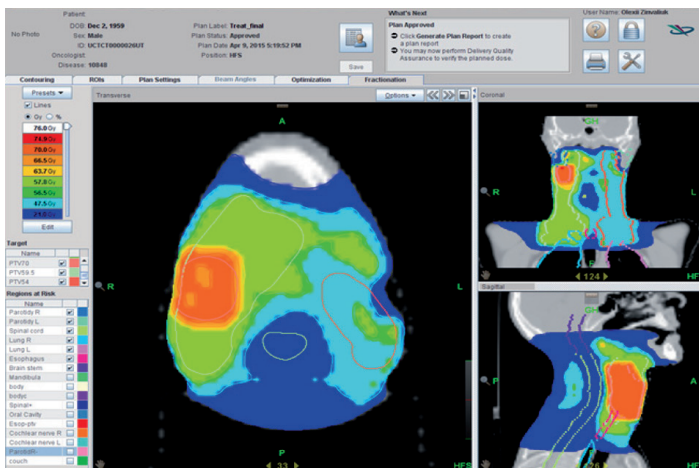


Рис. BV. T4aN1M0 IVa стадия, mts в лимфоузлы шеи справа. Пациент С. 55 лет. ПГЗ — плоскоклеточный ороговевающий рак. Опухоль гортаноглотки и поражения л/у РД 2,0 Гр, СОД 70 Гр. Лимфоузлы шеи справа РД 1,8 Гр, СОД 59,5 Гр, слева РД 1,54 Гр, СОД 54 Гр

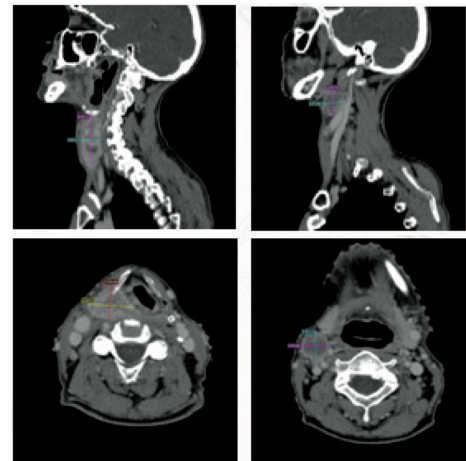


Рис. BVII. Компьютерная томография до начала лечения. Опухоль гортаноглотки инфильтрирует правую половину щитовидного хряща, частично разрушает правый край перстневидного хряща, инфильтрирует ложную и истинную голосовые складки и превертбральное пространство размером  $32 \times 37 \times 60$  мм. Определяется группа увеличенных л/у справа (уровень 2) размером  $30 \times 28 \times 25$  мм

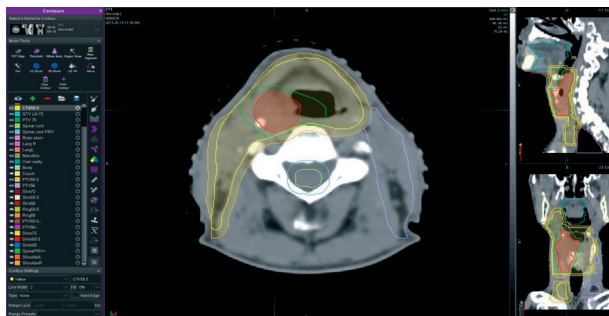
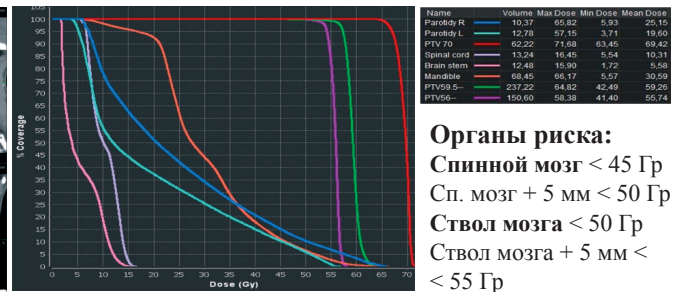


Рис. BVII. Оконтуривание мишени и органов риска на станции MIM



Слюнная железа пр. D mean 25,15 Гр  
Слюнная железа лев. D mean 19,60 Гр

**Органы риска:**  
**Спинальный мозг** < 45 Гр  
 Сп. мозг + 5 мм < 50 Гр  
**Ствол мозга** < 50 Гр  
 Ствол мозга + 5 мм < 55 Гр  
**Нижняя челюсть**  
 dmax 70 Гр  
 Не больше 5% > 70 Гр  
**Слюнные железы**  
**Левая сл. железа**  
 mean < 26 Гр  
**Правая сл. железа**  
 mean < 22 Гр

Рис. BVIII. Гистограмма доза-объем (DVH)

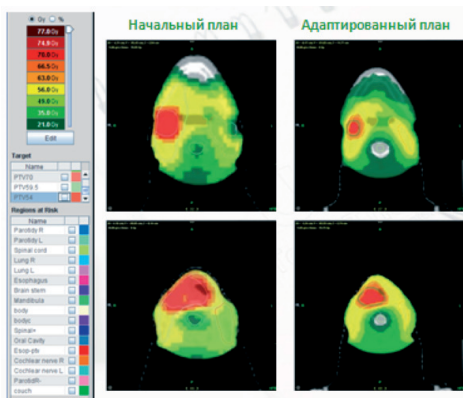


Рис. XIX. Адаптация плана

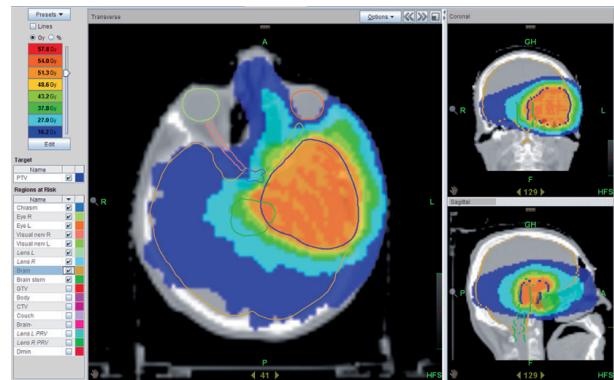
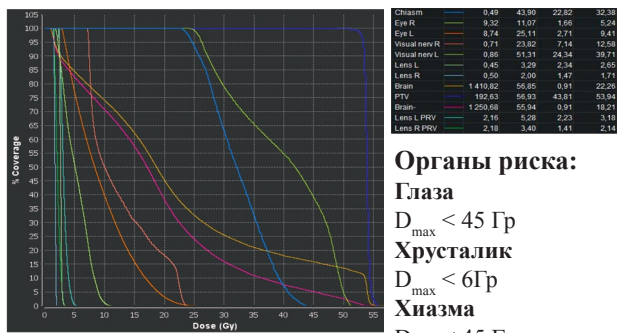


Рис. XX. Внутримозговая опухоль левой височно-лобно-медианной локализации. ПГЗ — протоплазматическая астроцитома G2. Послеоперационный курс ЛТ РД 2 Гр, СОД 54 Гр



**Органы риска:**

**Глаза**

$D_{max} < 45$  Гр

**Хрусталик**

$D_{max} < 6$  Гр

**Хиазма**

$D_{max} < 45$  Гр

**Зрительные нервы**

$D_{max} < 55$  Гр

**Средние дозы на критические органы:**

Глаз пр. 5,24 Гр

Глаз лев. 9,41 Гр

Хиазма 32,38 Гр

Зрит. нерв. Пр. 12,58 Гр

Зрит. нерв. Лев. 39,71 Гр

Рис. XXI. Гистограмма доза–объем (DVH)

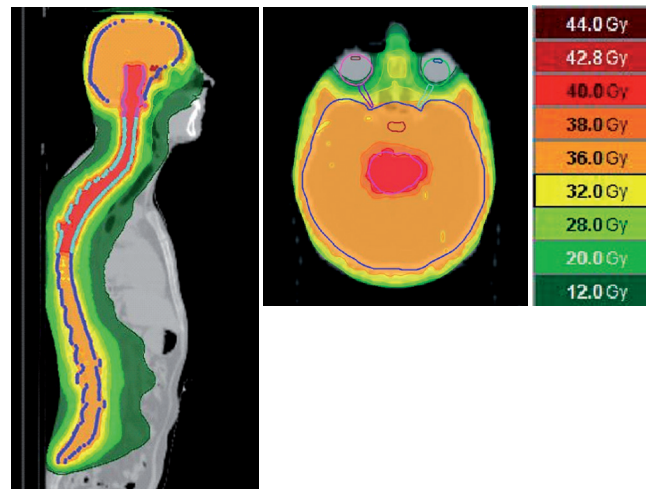
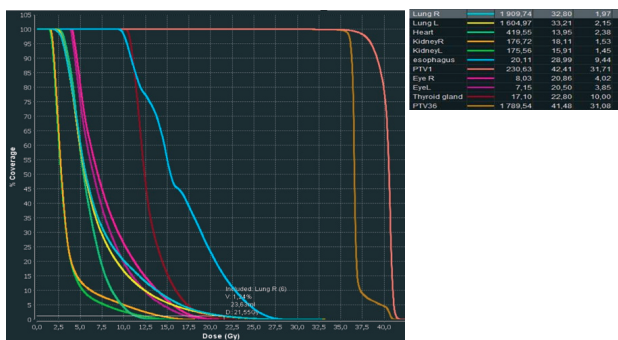


Рис. XXII. Пациент В., 30 лет. ПГЗ — анапластическая эпендимома РД 1,8 Гр на головной и спинной мозг, СОД 36 Гр. Интегрированный буст РД 2 Гр, СОД 50 Гр



**Средние дозы на критические органы:**

Глаз лев. — 7,52 Гр

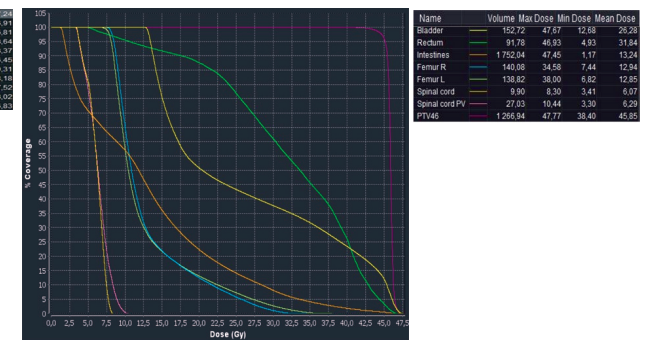
Глаз пр. — 8,18 Гр

Пищевод — 16,45 Гр

Почка лев. — 3,37 Гр

Почка пр. — 7,24 Гр

Рис. XXIII. Гистограмма доза–объем (DVH)



**Органы риска**

– **толерантные дозы:**

Прямая кишка V50 < 50 %;

Мочевой пузырь V80 < 15 %, V65 < 50 %;

– **полученные дозы:**

Прямая кишка 50 % — 33,75 Гр

Мочевой пузырь 15 % — 44,5 Гр, 50 % — 20 Гр.

Рис. XXIV. Гистограмма доза–объем (DVH) при облучении рака предстательной железы



В заключение следует подробнее остановиться на программе TQA (гарантии качества лучевой терапии).

**Гарантия качества лучевой терапии (ГКЛТ)** представляет собой систему мероприятий, направленных на соблюдение качества технологического процесса ЛТ на всех этапах.

В условиях применения ГКЛТ важным становится **контроль качества (КК)** применяемого оборудования.

**Контроль качества** оборудования является ключевым элементом оптимизации радиационной защиты пациентов (рис. 10–12).

**TomoTherapy Quality Assurance (TQA)**

Программа TQA предназначена для мониторинга изменений параметров функционирования системы, который позволяет заранее выявить признаки того, что система нуждается в техническом обслуживании или дозиметрической проверке. Кроме того, приложение TQA может использоваться в обычных обязательных процедурах контроля качества, необходимых для подтверждения правильности дозиметрических параметров при выполнении лечебных процедур на системе лучевой терапии TomoTherapy [4].

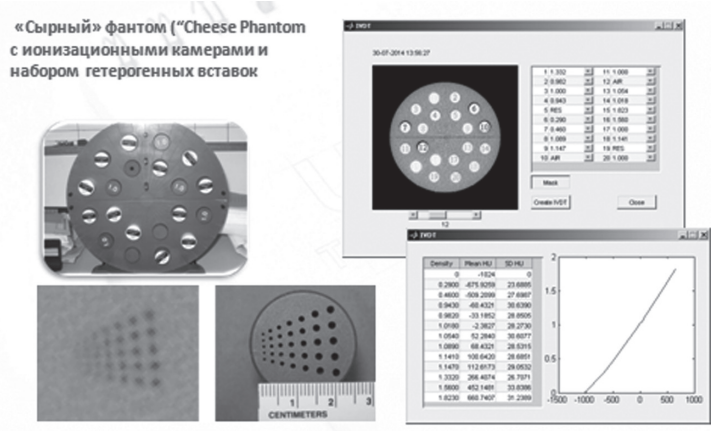


Рис. 10. Контроль качества характеристик аппарата

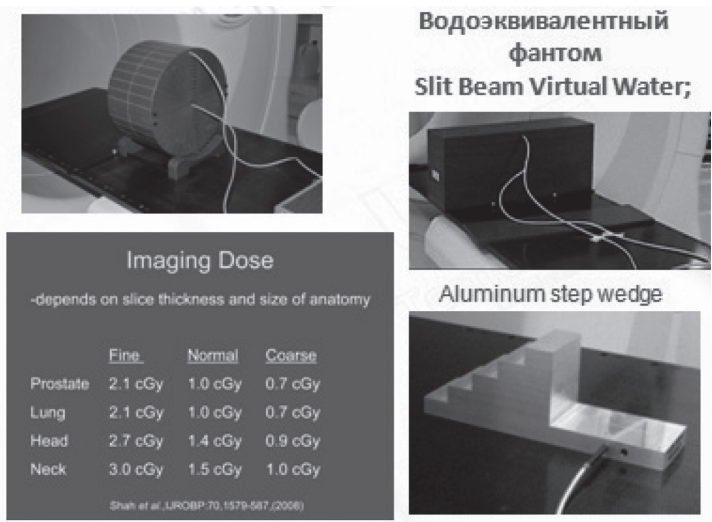


Рис. 11. Контроль качества характеристик аппарата



Рис. 12. Водный фантом с контроллером, электрометром и программным обеспечением

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Lane R. Rosen Establishing an SBRT Program in a clinical oncology practice / R. Lane // *Acta Oncology*, 2006. — Vol. 44, N 6. — P. 890–896.
2. Stereotactic radiosurgery for spinal metastases: case report and review of treatment options / S. Chawla, R. Abu-Aita, A. Philip et al. — *Bone*, 2009, Oct. — Vol. 45, N 4. — P. 817–823.
3. Stereotactic body radiation therapy for inoperable early stage lung cancer / R. Timmerman, R. Paulus, J. Qalvin et al. // *J.A.M.A.*, 2010. — Vol. 303, N 11. — P. 1070–1076.
4. SBRT: dosimetric and radiobiological considerations / H. Dela Fuente, M. Vlachaki, T. Herman et al. // *J. Appl Clin Med Phys*, 2010. — Vol. 11, N 1. — P. 31–38.
5. Інформаційна брошура до Урочистого відкриття УЦТ. — Кіровоград, 2015. — 12 с. (укр., англ. мова).

Статья поступила в редакцию 28.09.2015.

Д. С. МЕЧЕВ<sup>1</sup>, М. В. КРАСНОСЕЛЬСЬКИЙ<sup>2</sup>, М. Г. СИХАРУЛІДЗЕ<sup>3</sup>, Н. М. СЕРЬОГІНА<sup>3</sup>,  
К. В. ГУМЕНЮК<sup>3</sup>, М. Б. ГУМЕНЮК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національна медична академія післядипломної освіти ім. П. Л. Шупика, Київ

<sup>2</sup> ДУ «Інститут медичної радіології ім. С. П. Григор'єва НАМН України», Харків

<sup>3</sup> Український центр томотерапії, Кіровоград

**ТОМОТЕРАПІЯ — ПЕРЕДОВА ТЕХНОЛОГІЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ ПРОМЕНЕВОЇ ТЕРАПІЇ**

**Резюме.** Представлено інформацію про відкриття першого в Україні Центру томотерапії в м. Кіровограді. Описано структуру центру, суть і принципи томотерапії, основні показання, особливості та переваги методу стереотаксичного променевого лікування. Проаналізовано перші клінічні спостереження при використанні системи томотерапії в онкологічних хворих. Даний напрямок передбачає найвищий ступінь ефективної конформної стереотаксичної променевої терапії усього тіла — SBRT, обмежуючи опромінювання оточуючих пухлину здорових органів і тканин. Поєднання в одному пристрої тривимірної КТ-візуалізації з новим спіральним методом підведення опромінення значно підвищує ефективність лікування.

Особливу увагу приділено системі гарантії якості променевого лікування при томотерапії.

**Ключові слова:** конформна стереотаксична томотерапія, прилади, показання, переваги, структура Українського центру томотерапії, SBRT.

D. S. MECHEV<sup>1</sup>, M. V. KRASNOLESKY<sup>2</sup>, N. M. SEREGINA<sup>3</sup>, K. V. GUMENYUK<sup>3</sup>, M. B. GUMENYUK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> P. L. Shupyk National Medical Academy of Postgraduate Education, Kiev

<sup>2</sup> SI «Grigoriev Institute for Medical Radiology of National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kharkiv

<sup>3</sup> Ukrainian Center of Tomotherapy, Kirovohrad

**TOMOTHERAPY AS AN ADVANCED TECHNOLOGY OF EXTERNAL-BEAM RADIOTHERAPY**

**Summary.** The aim of the paper was to describe the first Ukrainian Center of TomoTherapy in Kirovograd: Key parameters, structure, equipment for diagnostic (CT, MRI, ultrasound) and radiotherapy (linear accelerator Elekta Synergy and TomoTherapy system) purposes.

The TomoTherapy platform provides a highly conformal way of delivering stereotactic body radiation therapy (SBRT) to all tumors with limited exposure to the surrounding organs.

SBRT personnel, clinical parameters, treatment planning, Quality Assurance, first results and daily treatment, follow up of patients are described in this first for Ukraine publication.

**Keywords:** conformal stereotactic tomotherapy, SBRT, clinical parameters, QA, first clinical results.

**Контактная информация:**

Мечев Дмитрий Сергеевич

заслуженный деятель науки и техники Украины, д. мед. н., профессор, заведующий кафедры радиологии

НМАПО им. П. Л. Шупика

ул. Дорогожицкая, 9, г. Киев, 04112, Украина

e-mail: mechevds@ukr.net