

## Проблемы гантри: впечатления о конференции EuCARD 2 «Сверхпроводимость и другие инновации в проектировании гантри для дистанционной (протонной и ионной) лучевой терапии»

### Аннотация

В статье приводится обзор докладов конференции о проектировании и развитии гантри для протонной и ионной терапии.

### Введение

В сентябре 2015 года в Цурхаче (Швейцария) состоялась конференция, посвященная инновациям в конструировании оборудования для протонной и ионной терапии злокачественных опухолей с акцентом на использование сверхпроводящих магнитов. Эта конференция была организована под эгидой EuCARD (European Coordination for Accelerator Research and Development) и проведена на базе одного из ведущих институтов, в течение нескольких десятилетий развивающих протонную терапию, – Института Пауля Шеррера (PSI). В конференции принимало участие около 50 специалистов из ведущих фирм, производящих и разрабатывающих оборудование для протонной и ионной терапии, и из известных медицинских центров, в которых это оборудование используется. Было сле-

дано около 20 устных докладов. Материал этой статьи основан на докладах конференции, которые доступны в Интернете [1], на обзорном докладе EuCARD, подготовленном М. Скипперсом, Х. Оуэном, Р. Эджкоком и М. Вретанаром [2], и на личных впечатлениях одного из авторов – участника конференции М.М. Каца.

Протонная (ПЛТ) и ионная (ИЛТ) терапия злокачественных и других новообразований является одним из наиболее продвинувших видов высокотехнологической медицинской помощи. Она основана на свойстве протонов и ионов (в первую очередь углерода) выделять основную энергию в конце пробега. Применяя для облучения пучки протонов и ионов, можно подвести к опухоли дозу, достаточную для ее уничтожения, пощадив окружающие ткани, что выгодно отличает ПЛТ и ИЛТ от применяемых конвенциональных методов облучения (рис. 1).

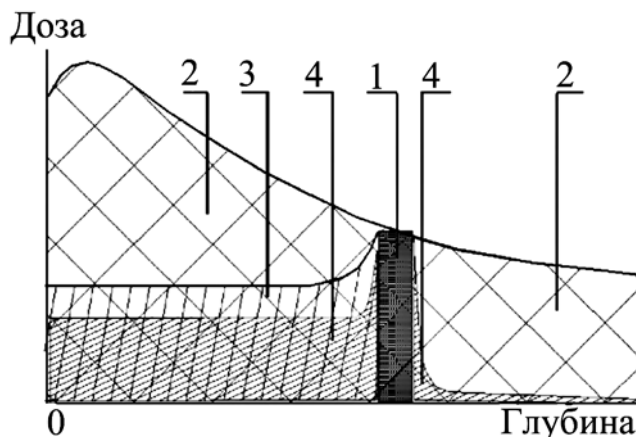


Рис. 1. Сравнение зависимости от пробега в воде поглощенной дозы различных видов излучения (гамма-излучение, протоны и ионы углерода) при облучении одинаковых опухолей с одного направления: 1 – планируемая доза в опухоли; 2 – кривая поглощения гамма-излучения; 3 – кривая поглощения протонного излучения; 4 – кривая поглощения ионного излучения

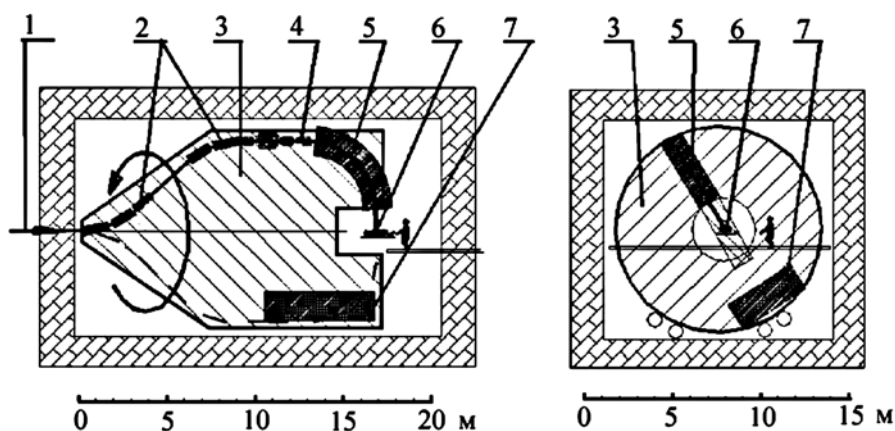


Рис. 2. Упрощенная пространственная схема гантри для пучка ионов на теплых магнитах (с максимальным полем до 1,8 Тл) с параллельным сканированием (вид сбоку и фронтальный вид): 1 – входной пучок; 2 – магнитный канал; 3 – рама; 4 – сканирующий магнит; 5 – последний поворотный магнит; 6 – больно́й; 7 – противовес

При конвенциональном облучении для уменьшения доз в здоровых тканях всегда используют облучение со многих направлений. Аналогично при облучении пучками протонов и ионов желательнее использовать несколько направлений. Оборудование для изменения направления пучка по отношению к лежащему неподвижно пациенту называется гантри (*рис. 2*, приведена схема, реализованная в Гейдельберге). Для максимальной производительности и минимальной стоимости лечения при одном ускорителе полезно иметь 2...4 процедурные комнаты с гантри и одну комнату с горизонтальным пучком.

Для оптимального распределения дозы по объему опухоли желательнее применять последовательное облучение элементов ее объема хорошо сфокусированными пучками с нужными энергиями и интенсивностями. Такой процесс называется сканированием.

Гантри состоит из магнитного канала транспортировки пучка, который содержит поворотные и сканирующие магниты, фокусирующие пучок линзы. Все элементы магнитного канала и его противовес закреплены на объемной раме, поворачиваемой вокруг лежащего пациента.

Пациент укладывается так, чтобы через центр опухоли проходила ось пучка. Позиционирование пациента на пучке занимает в 5 раз больше времени, чем облучение.

При поворотах рамы вокруг горизонтальной оси, совпадающей с направлением входящего в процедурную комнату пучка и проходящей через точку внутри опухоли в соответствии с планом облучения, меняется направление облучения. Направления облучения выбираются так, чтобы минимально повредить здоровые ткани организма и полностью облучить опухоль вместе с объемом возможного распространения раковых клеток. Гантри стало важнейшим инструментом протонной и ионной терапии злокачественных и ряда доброкачественных новообразований. С введением гантри в медицинскую практику (с 1990 года PSI) компетенция ПЛТ резко выросла.

Классическое гантри имеет следующие характеристики:

- объем защищенного помещения для протонов – около  $10 \text{ м}^3$  (как трехэтажный дом), а для ионов –  $14 \times 14 \times 18 \text{ м}$  (как пятиэтажный дом);
- масса вращаемой прецизионно рамы с магнитным каналом и противовесом – около 100 т для пучка протонов и около 660 т для пучка ионов;
- энергопотребление ~ от 0,2 МВт (для протонов) до 0,8 МВт (для ионов);
- цена гантри – от примерно 5 млн. дол. для пучка протонов до 100 млн. дол. для пучка ионов.

Характеристики гантри зависят от возможностей обычных теплых, т. е. работающих при комнатной температуре, магнитов поворачивать пучки частиц. Обычные теплые магниты с максимальным полем до 1,8 Тл поворачивают пучки протонов с радиусом 1,5 м, а ионов – 4 м. Расчетный относительный допуск на магнитное поле  $dB/B \leq \pm 10^{-4}$  влияет на ширину зазора последнего магнита. При расположении сканирующих магнитов перед этим магнитом и при угле поворота пучка в данном магните  $90^\circ$  именно последний магнит определяет массу, энергопотребление и стоимость гантри, так как рабочий зазор последнего магнита для параллельного сканирования равен максимальным размерам опухоли (20 x 20 см).

У любого гантри сложная магнитная фокусировка пучка. Терапевтический пучок должен транспортироваться без потерь и фокусироваться на заданную область опухоли как пятно с диаметром около 1 см. Пучок должен попадать в запланированные точки с точностью  $\pm 0,5 \text{ мм}$  после поворота на  $90^\circ$  при расстоянии ~ 5 м от центра поворота в последнем магните до опухоли при любой ориентации рамы. Это требование определяет жесткие допуски и на механику поворота рамы, и на магнитные поля всех элементов канала.

Габариты, сложность, энергопотребление, стоимость современных гантри – основное препятствие для массового внедрения протонной и ионной терапии.

Применение сверхпроводящих магнитов может теоретически существенно уменьшить габариты и электропотребление гантри.

Цель проведенной в Цурцах конференции – поиск оптимальных вариантов гантри за счет применения сверхпроводящих магнитов. Гантри должно позволять облучать опухоли любой локализации сканирующим пучком с учетом изменений в геометрии тела и опухоли во время облучения. Гантри должно быть как можно менее громоздким, как можно более точным, с возможно более коротким временем облучения, возможно меньшим электропотреблением, с максимальной надежностью, минимальной стоимостью в изготовлении и эксплуатации.

Нельзя не отметить, что стремление создать идеальную установку противоречит разработке максимально компактных и недорогих систем облучения, в которых приемлемая цена будет сочетаться с высоким качеством облучения для большинства пациентов.

### Краткое содержание основных докладов

Т. Lomax (PSI) [1] доказывал на примерах планов облучения из практики лечения в PSI необходимость применения гантри, ибо оно позволяет облучать любые опухоли с любых направлений и максимально удобно для пациентов и врачей. Однако, по нашему мнению, из этих примеров было видно, что для тех же локализаций опухоли оборудование с диапазоном возможных направлений облучения в пределах от  $-45$  до  $45^\circ$  может успешно заменять гантри.

J. Flanz из Massachusetts General Hospital (MGH, США) [1] поставил вопрос: нужны ли гантри в принципе и возможно ли их заменить на установки со сканирующим пучком с фиксированными направлениями. По его мнению, основанному на опыте лечения 4300 пациентов в MGH, при использовании оборудования с ограниченным диапазоном направлений, например, с углом поворота направления пучка от  $-20$  до  $20^\circ$ , но с возможностью сканировать опухоль тонким пучком, т. е. без гантри, можно лечить подавляющее большинство пациентов с разными локализациями опухоли. Однако, по нашему мнению, чем больше диапазон направлений, доступных для лечения, тем лучше. Для некоторых локализаций применение гантри со сканированием имеет явные преимущества.

Согласно докладу G. de Rijk (CERN, Швейцария) [1], новые материалы Nb<sub>3</sub>Sn и высокотемпературные сверхпроводники позволят в будущем использовать магниты с полями до 20 Тл и уменьшить радиус поворота пучков протонов и ионов в 10 раз по сравнению с современными теплыми магнитами.

В нескольких докладах было предложено использовать новые конструкции сверхпроводящих магнитов и технологии их изготовления с применением композитных сверхпроводящих кабелей, которые не требуют охлаждения жидким гелием. Их можно будет использовать для создания специфических элементов электромагнитной оптики, способных одновременно поворачивать и фокусировать пучки. Для того чтобы было технологически удобно совмещать повороты и фокусировку пучка, было предложено наматывать кабели по пазам в подставках, имеющих форму цилиндра или тора.

Однако было отмечено, что на пути внедрения сверхпроводящих магнитов в гантри есть ряд трудностей, связанных с технологией изготовления и эксплуатации магнитов.

Чем быстрее происходит облучение опухоли сканирующим пучком, тем быстрее надо изменять величины магнитных полей всех элементов канала, тем больше тепловые потери, тем больше риск потери сверхпроводимости. На ввод сверхпроводящего магнита из теплого состояния в рабочий режим и на восстановление рабочего режима после нежелательного местного выделения энергии (квенч) требуется несколько дней. Охлаждение магнита жидким гелием на поворотной раме является заметной технической трудностью. Сверхпроводящие магниты без железного ярма позволяют изменять магнитное поле

быстро, но они рассеянными полями могут портить качество фокусировки пучка, влиять на приборы и, возможно, на пациента. На сегодня максимальные магнитные поля в магнитах гантри приходится ограничивать величинами около 2,5 Тл. Поэтому по сравнению с гантри на теплых магнитах габариты реализованных и предложенных гантри на сверхпроводящих магнитах уменьшились не сильно.

Несколько докладов было посвящено выбору положения сканирующих магнитов (рис. 2). Если они расположены до последнего поворота пучка, то диаметр вращаемого тяжелого оборудования получается минимальным, качество облучения – оптимальным, но последний магнит будет очень тяжелым, громоздким и дорогим. Если радиус поворота пучка в этом магните равен (или превосходит) 1,5 м, как в теплом магните для протонов или ионов, то оптимальные условия для сканирования достигаются за счет фокусирующего действия этого магнита. Но для протонного гантри увеличение магнитного поля последнего поворотного магнита в 3 раза приводит не только к полезному уменьшению радиуса поворота пучка до 0,5 м (и соответственно гантри), но и к существенным трудностям в магнитной оптике сканирования. В конечном счете, к сожалению, при конструировании гантри с использованием сверхпроводящих магнитов вследствие возникновения сопутствующих их использованию технических трудностей диаметр гантри остается большим даже для протонов (5...8 м).

Последний вывод был подтвержден в докладе F. Ebskamp о гантри разработки фирмы «Danfysik» (Дания) [1] для пучка ионов на теплых магнитах с оптимальным расположением сканирующих магнитов между частями последнего поворотного магнита. Показано, что габариты гантри «Heavy Ion Medical Accelerator» («НИМАС», Япония) со сверхпроводящими магнитами не меньше, чем габариты гантри с теплыми магнитами «Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum» («НИТ», ФРГ) или гантри в проекте «Danfysik».

Дополнительно в этом докладе было показано, что оптимальное расположение сканирующих магнитов позволяет вдвое уменьшить вращаемую массу при сохранении качества облучения. Стоимость гантри «Danfysik» (из трех рассмотренных вариантов) минимальна.

В нескольких докладах были рассмотрены вопросы оптимизации равномерности и точности распределения дозы по объему опухоли при сканировании.

Несколько докладов были посвящены новым вариантам гантри.

Гантри SC360 фирмы «ProNova» (США) [1] основано на применении сверхпроводящих магнитов для двух ахроматичных (для частиц разной энергии) поворотов пучка в системах магнит-триплет-магнит с углами поворота 45 и 135° при малой апертуре вакуумной камеры и при расположении сканирующих магнитов после последнего поворотного магнита. Хотя это гантри занимает небольшой объем, его трудно назвать компактным, так как его диаметр более 8 м.

В докладе Y. Iwata из National Institute of Radiological Science (NIRS, Япония) [1] было описано ионное гантри на базе 10 подобных сверхпроводящих поворачивающих и фокусирующих магнитов, которое будет запущено в 2016 году. Его диаметр – 11 м, длина – 13 м, вращаемая масса – около 300 т.

A. Koschik (PSI) [1] рассказал об «идеальном» гантри PSI-3 для транспортировки протонов с максимальной энергией 350 МэВ. На этой установке доступны любые направления облучения, опухоль с поперечными размерами до 30 x 40 см облучается быстро и точно, пациент позиционируется на пучке при помощи томографа, установленного во вспомогательном помещении. Затем стол с пациентом перевозится в процедурную комнату и устанавливается в рабочее положение. Однако, учитывая стоимость установки 20 млн. швейц. франков (19,6 млн. дол.), увеличенные габариты и вращаемую массу 270 т (вместо 100 т в стандартном гантри фирмы «Ion Beam Application», IBA), трудно предположить, что эта установка будет массово тиражирована.

В нескольких докладах было упомянуто гантри FFAG (Fixed Field Alternative Gradient) на постоянных магнитах. Оно будет способно пропускать пучок с большим разбросом по энергиям, обеспечивая тем самым сканирование опухоли в глубину без перестройки магнитного канала. Однако гантри FFAG имеет большой диаметр, его магниты могут стареть от облучения, и такое гантри пока не было реализовано.

Был представлен перспективный проект создания протонного гантри PSI совместно с LBNL (Lawrence Berkely National Laboratory) на сверхпроводящих магнитах. Эта установка будет иметь малый диаметр (5 м), длину около 9 м и сканирование при помощи быстрого изменения толщины тонкого гребенчатого фильтра и не такого быстрого изменения величин магнитных полей.

Был сделан доклад об оптимизации работы компактного и недорогого комплекса с одной процедурной комнатой «ProteusOne» (IBA), который основан на применении сверхпроводящего циклотрона и специфического гантри на теплых магнитах. В этом гантри происходит выделение терапевтического пучка из пучка, прошедшего через тормозящий фильтр, транспортировка полезного пучка со сканированием и изменение направлений пучка в пределах от –100 до 100°. Сканирующие магниты расположены оптимально, поэтому габариты и вращаемая масса минимальны. Этот комплекс так же, как комплекс фирмы «Mevion» (США), уже внедряется.

В нескольких докладах было обосновано применение КТ в смежном с процедурной комнатой помещении (для предварительного позиционирования пациента) и непосредственно в процедурной комнате для уточнения плана облучения при изменении контуров опухоли между фракциями облучения и при поворотах процедурного стола вокруг горизонтальной оси.

М.М. Кац [1] представил схему компактной и недорогой плоской системы для транспортировки пучков протонов и ионов при выбранном компромиссно ограниченном диапазоне направлений облучения. В ней исходный горизонтальный пучок после квадрупольных линз и сканирующих магнитов поворачивается в вертикальной плоскости неподвижным магнитом, а горизонтальный процедурный стол с лежащим на нем пациентом смещается по вертикали так, чтобы пучок попадал в центр мишени. Для пучка протонов при направлениях облучения в пределах от –45 до 45° теплый магнит имеет зазор диаметром около 1,2 м при его высоте 13 см, а процедурный стол с пациентом, приборы и пол в процедурной комнате смещаются вертикально в пределах от –1,2 до 1,2 м. Размеры процедурной комнаты для такой системы – около 7 x 7 x 5 м.

На круглом столе в конце конференции дополнительно обсуждались следующие вопросы:

- можно ли сократить расстояние источник – поверхность тела до 1...2 м? Да, это возможно для неглубоких мишеней. Если мишень глубокая, то при этом увеличиваются дозы в тканях вблизи поверхности тела;
- является ли гантри с углами поворотов в пределах  $\pm 100^\circ$  и последующим поворотом процедурного стола с иммобилизованным пациентом вокруг вертикальной оси стола на  $180^\circ$  эквивалентом гантри с углами поворотов в пределах  $\pm 180^\circ$ ? Любые повороты гантри удобнее, но гантри будет дороже;
- какова роль современных систем позиционирования (с использованием КТ, МРТ, ПЭТ) в качестве части гантри? Их оперативное применение очень полезно, но требует дополнительных средств.

## Заключение

Габариты, сложность, энергопотребление, стоимость современных гантри – тормоз для массового внедрения протонной и ионной терапии. Поэтому внедрение ПЛТ и ИЛТ идет, но не так быстро, как необходимо для оказания качественной массовой помощи больным. Работы по развитию техники гантри проводятся активно во многих направлениях и во многих стра-

нах. Применение сверхпроводимости является одним из важных направлений таких исследований. Однако, несмотря на значительный прогресс в технологии сверхпроводящих магнитов, пока их применение в системах транспортировки пучков для медицины не привело к кардинальному уменьшению габаритов и стоимости этих систем. Единого оптимального решения (особенно для транспортировки пучка ионов) в настоящее время нет. Поэтому, наряду с поисками оптимальных гантри-систем, полезно исследовать другие возможности и пытаться внедрять компактные и относительно недорогие компромиссные решения (например, однокабинные комплексы фирм «IBA», «Mevion» и так называемые плоские системы).

*Авторы благодарны Jay Flanz (MGH) и Alexander Gerbershagen (PSI) за полезные обсуждения.*

#### *Список литературы:*

1. <https://indico.psi.ch/contributionListDisplay.py?confId=3575>.
2. Schippers M., Owen H., Edgecock R., Vretenar M. Report on workshop: Superconductivity and other new developments in gantry design for particle therapy / EuCARD, Nov. 9, 2015, WP4.3, Paul Scherrer Institute (PSI).

*Марк Моисеевич Кац,  
канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник,  
ускорительный центр,  
Ирина Николаевна Канчели,  
ведущий инженер-физик,  
отдел медицинской физики,  
центр протонной лучевой терапии,  
ФГБУ «ГНЦ РФ – ИТЭФ»,  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
г. Москва,  
e-mail: markmkats@gmail.com*

### **Международное научно-техническое общество приборостроителей и метрологов (МНТО ПМ) – издатель журнала «ПРИБОРЫ»**

Международное научно-техническое общество приборостроителей и метрологов издает отраслевой научно-технический и производственный журнал «ПРИБОРЫ», отражающий состояние современного российского рынка приборостроительной продукции, интересы предприятий и потребителей, результаты деятельности разработчиков новых изделий и систем автоматизации, аналитические обзоры состояния этой сферы науки, техники и производства. Журнал ориентирован на широкий круг специалистов промышленности, предпринимателей, работников фирм и вузов, заинтересованных в систематическом получении актуальной и достоверной информации о выпускаемых в России и странах СНГ приборах и средствах автоматизации, о новых изделиях, предлагаемых потребителям, а также о действующих нормативных документах и рекомендациях. Журнал публикует материалы о новых методах измерений, сбора и представления измерительной и контрольной информации, новых конструктивных и технологических решениях, новых технологиях и материалах, составляющих основу создания новой конкурентоспособной продукции, осуществляет систематические публикации материалов по созданию и эксплуатации систем автоматизации различного назначения для отраслей промышленности, науки, по информационным технологиям, программно-техническим комплексам. Публикуется информация о профиле и продукции отдельных приборостроительных предприятий, их новых разработках, производственных и технологических возможностях и интересах. Тесные связи нашего Общества и редакции с Международной конфедерацией по измерениям (ИМЕКО) позволяют постоянно знакомить наших читателей с материалами этой весьма авторитетной международной профессиональной организации.

**Журнал зарегистрирован в ВАК РФ как научное издание.**

Журнал выходит 12 раз в год и распространяется по подписке.  
Индекс журнала в каталоге Агентства «Роспечать» – 79727.

В редакции можно оформить льготную подписку на 2017 год.  
Стоимость годовой подписки (12 экз.) – 12000 руб.

Заявки принимаются по тел./факсу: (495) 695-10-71  
или по e-mail: kavalero@mail.ru.

Более подробная информация о журнале «Приборы» – на сайте: [www.pribory-smi.ru](http://www.pribory-smi.ru).