

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.12...18

М 75

9-88-265

**МОЛОКАНОВ**

**Александр Григорьевич**

**ФОРМИРОВАНИЕ**

**И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ**

**ДЛЯ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ И КЛИНИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ**

**НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ЛАБОРАТОРИИ**

**ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ОИЯИ**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1988

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук О. В. Савченко

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук Д. Н. Зайцев  
кандидат физико-математических наук К. О. Оганесян

Ведущая организация: Институт теоретической  
и экспериментальной физики,  
Москва

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1988 г. в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при Лабора-  
тории ядерных проблем Объединенного института ядерных иссле-  
дований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного  
института ядерных исследований.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1988 г.

Ученый секретарь Специализированного совета  
доктор физико-математических наук

В. А. Батузов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время пучки тяжелых заряжен-  
ных частиц находят все более широкое применение при проведении луче-  
вой терапии и диагностики. С использованием пучков тяжелых заряжен-  
ных частиц (протонов, альфа-частиц, более тяжелых ионов, отрицатель-  
ных пи-мезонов) оказывается возможным качественное улучшение простран-  
ственных дозных распределений по сравнению с пучками электронов и  
гамма-квантов.

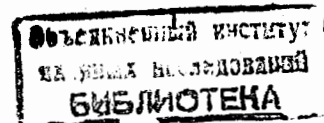
Возрастание величины линейной передачи энергии при увеличении  
глубины проникновения пучка тяжелых заряженных частиц и определенный  
пробег в веществе, величина которого определяется их энергией, при-  
водит к образованию максимума ионизации - пика Брэгга, форма которо-  
го определяется энергетическим распределением частиц в пучке и страг-  
глингом.

Если использовать пучок с такой энергией, чтобы пик Брэгга  
совпал с облучаемой мишенью, то ткани, расположенные перед ней, будут  
облучаться меньшими дозами, а ткани, расположенные за ней, практиче-  
ски не будут облучаться вообще.

При прохождении через вещество пучки тяжелых заряженных частиц  
рассеиваются значительно слабее, чем пучки электронов и фотонов. Это  
позволяет использовать узкие пучки протонов для облучения глубоко  
расположенных мишеней размером в несколько миллиметров, а также для  
диагностических целей в установках протонной компьютерной томографии.

Преимущества протонных пучков убедительно продемонстрированы  
при лечении некоторых локализаций небольшого размера, расположенных  
вблизи чувствительных к облучению органов. Применение протонных пуч-  
ков для лечения глубоко расположенных опухолей больших размеров тре-  
бует дальнейшего изучения.

Для облучения опухолей больших размеров моноэнергетические пучки  
протонов оказываются непригодными, так как размеры области пика Брэг-  
га значительно меньше размеров мишени. Для того, чтобы равномерно об-  
лучить всю мишень, такой острый пик Брэгга требуется искусственно  
расширить, модифицируя энергетический спектр пучка таким образом,  
чтобы получить глубинное дозное распределение, наиболее полно удов-  
летворяющее требованиям лучевой терапии - приблизительно однородное



распределение дозы в области максимума и крутой спад дозы за максимумом. Полученное таким образом распределение дозы по глубине называется модифицированной кривой Брэгга.

Целью настоящей работы явились разработка и исследование методов формирования дозных полей и создание на этой основе системы протонных пучков многокабинного клинико-физического комплекса, оборудования для проведения лучевой терапии и диагностики на базе реконструированного синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, исследование физико-дозиметрических характеристик пучков.

Научная новизна выполненной работы заключается в том, что для формирования глубинных дозных распределений с плоской вершиной и крутым спадом дозы за ней был разработан новый метод модификации глубинного дозного распределения немоноэнергетических протонных пучков. Этот метод основан на преобразовании широкого энергетического распределения замедленных протонов с помощью анализирующей магнитной системы и расположенного в области максимальной линейной дисперсии ступенчатого коллиматора, настраиваемого на пропускание спектра, обеспечивающего формирование заданного глубинного дозного распределения.

В результате проведения градуировки клинических дозиметров в поле гамма-излучения и сравнительной дозиметрии терапевтических протонных пучков ЛЯП ОИЯИ, ИТЭФ ГК АЭ и ЛИЯФ АН СССР повышен уровень точности измерений абсолютного значения поглощенной дозы.

#### Практическая значимость работы

1. Создано физико-техническое оборудование для формирования протонных пучков в процедурных кабинетах клинико-физического комплекса на реконструированном фазотроне ЛЯП ОИЯИ.

2. В трех процедурных кабинетах клинико-физического комплекса сформированы протонные пучки, предназначенные для лучевой терапии и диагностики.

3. На сформированных протонных пучках начато проведение радиобиологических и клинических исследований.

4. Высокое энергетическое разрешение, которое может быть получено в результате магнитного анализа замедленного протонного пучка ( $\Delta p/p = 0,5\%$ ) и возможность в широких пределах варьировать энергию протонов (от 50 МэВ до 660 МэВ) позволяют использовать этот канал для проведения исследований протон-протонных и протон-ядерных взаимодействий.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на научно-методических семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, на Первом международном семинаре по использованию протонных пучков в луче-

вой терапии (Москва, 1977 год), на Рабочем совещании по вопросам протонной терапии (Ленинград, 1986 год) /17/.

По результатам диссертации опубликовано 15 работ /1-4, 6, 8-17/ и получено два авторских свидетельства на изобретения /5, 7/.

Структура диссертации и ее объем. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация содержит 116 страниц машинописного текста, в том числе 41 рисунок и 9 таблиц. Список цитируемой литературы включает 61 наименование.

#### Результаты, представленные к защите

1. Метод модификации глубинного дозного распределения немоноэнергетических протонных пучков, основанный на преобразовании широкого энергетического распределения замедленных протонов.

2. Численный метод расчета кривой Брэгга для немоноэнергетических протонных пучков.

3. Результаты формирования и исследования физико-дозиметрических характеристик протонных пучков клинико-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ.

4. Результаты проведения сравнительной дозиметрии медицинских протонных пучков ЛЯП ОИЯИ, ИТЭФ ГК АЭ и ЛИЯФ АН СССР.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматриваются особенности применения тяжелых заряженных частиц в лучевой терапии с точки зрения процессов их взаимодействия с веществом, делается вывод о том, что применение пучков тяжелых заряженных частиц, в частности протонов, позволяет существенно улучшить дозные поля по сравнению с наиболее широко применяемыми в лучевой терапии пучками электронов и гамма-излучением.

Более слабое рассеяние пучков тяжелых заряженных частиц в ткани и наличие максимума ионизации — пика Брэгга позволяют формировать дозные поля с высокими краевыми градиентами, в результате чего уменьшается доза облучения окружающих опухоль здоровых тканей.

Для того, чтобы в полной мере использовать отмеченные преимущества тяжелых заряженных частиц в широкой клинической практике, необходимо разработать гибкие методы формирования дозных полей в соответствии с клиническими требованиями, а также методы точного определения положения опухоли внутри тела пациента.



Использование дозных полей с большими градиентами в лучевой терапии требует повышения точности определения положения опухоли внутри тела пациента и специального юстировочного и дозиметрического оборудования для контроля за совмещением дозного максимума с облучаемой мишенью. Такой высокий уровень точности может быть обеспечен на основе применения рентгеновских и протонных компьютерных томографов.

Во второй главе описывается численный метод расчета кривой Брэгга для моноэнергетических протонных пучков. Метод позволяет рассчитать форму глубинного дозного распределения для произвольного распределения пробегов протонов по толщине замедляющего вещества с учетом ядерных взаимодействий и многократного кулоновского рассеяния.

Суммарная ионизация  $I$ , производимая пучком протонов на глубине  $t$  вещества, может быть описана формулой:

$$I(t) = \int_0^{R_{\max}} f(R)G(R-t)i(R-t)dR, \quad \text{где}$$

- $f(R)$  - распределение пробегов протонов по толщине  $R$  вещества;
- $i(R-t)$  - линейные потери энергии на глубине  $t$  одного протона, останавливающегося на глубине  $R$ ;
- $G(R-t)$  - уменьшение количества протонов в пучке при прохождении толщины вещества  $(R-t)$ ;
- $R_{\max}$  - максимальный пробег протонов.

Зависимость линейных потерь энергии протонов с энергией ниже 300 МэВ от пробега  $R$  в мягкой ткани может быть аппроксимирована степенной зависимостью  $i(R) \sim R^{-n}$ . Зависимость  $G(R-t)$  для данного вещества и определенных геометрических условий может быть определена на основе измерений в таких же условиях кривой Брэгга пучка с узким энергетическим распределением.

Форма кривой Брэгга для произвольного распределения плотности остановок протонов в пучке  $f(R)$  может быть определена в результате численных расчетов на ЭВМ. При замедлении пучка протонов с энергией 660 МэВ область остановок протонов составляет несколько г/см<sup>2</sup>. Глубинное дозное распределение такого пучка - широкий пологий пик Брэгга с медленным спадом дозы за ним. (Рис. I, а). Пунктирными линиями изображены распределения пробегов протонов, определяемые энергетическим распределением протонов в пучке. Если из имеющегося широкого энергетического распределения выделить протоны, находящиеся в узком интервале энергии, образуется дозное распределение, изображенное на рис. I, б. Если же сформировать пучок с энергетическим распределением, характеризующимся распределением пробегов, изображенным на рис. I, в, можно получить глубинное дозное распределение с модифицированной фор-

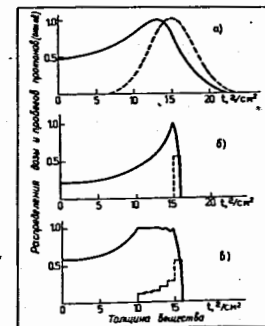


Рис. I. Распределение пробегов протонов (пунктирные линии) и соответствующие им глубинные дозные распределения (сплошные линии).

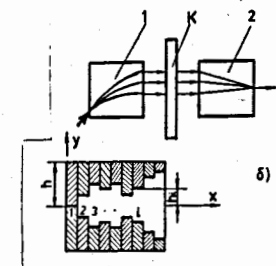


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для преобразования широкого энергетического распределения протонного пучка (а) и коллиматорной системы (б).

мой кривой Брэгга – однородное распределение дозы в максимуме и крутой спад дозы за ним.

Для получения модифицированного дозного распределения из немонэнергетического протонного пучка был предложен новый метод модификации имеющегося широкого энергетического распределения частиц в пучке <sup>15/</sup>.

Устройство для формирования дозного распределения тяжелых заряженных частиц в веществе, основанное на данном методе, и схематически изображенное на рис. 2, а можно условно разделить на три части.

1. Поворотный магнит или система магнитов, анализирующая частицы в пучке по величине импульса.
2. Коллиматорная система, преобразующая энергетический спектр частиц в пучке.
3. Система элементов магнитной оптики (поворотные магниты и квадрупольные линзы), компенсирующая линейную дисперсию, возникающую при магнитном анализе пучка.

Устройство действует следующим образом. Если в анализирующую магнитную систему входит узкий пучок частиц с широким энергетическим распределением, то после ее прохождения пучок приобретает линейную дисперсию, т.е. траектории частиц с различными импульсами пространственно разделяются. Затем с помощью коллиматорной системы К могут быть частично или полностью перекрыты апертуры отдельных участков, через которые проходят протоны с различной величиной импульса. После этого с помощью магнитооптической системы 2 происходит компенсация линейной дисперсии и в результате смешивания образуется пучок с преобразованным энергетическим спектром и, соответственно, преобразованным глубинным дозным распределением.

На протонном пучке синхротрона до его остановки на реконструкцию была проведена экспериментальная проверка данного метода <sup>13/</sup>, разработана схема каналов для формирования и транспортировки протонных пучков в процедурные кабины клинично-физического комплекса на реконструированном ускорителе <sup>19/</sup>.

В третьей главе описываются разработка и создание каналов протонных пучков в процедурных кабинах клинично-физического комплекса на реконструированном фазотроне ЛЯП ОИЯИ и исследование их физико-дозиметрических характеристик.

Для решения вопросов оптимизации режимов работы каналов формирования и транспортировки протонных пучков в процедурные помещения были проведены измерения энергетических параметров выведенного из фазотрона пучка – величин средней энергии и дисперсии энергетического распределения протонов в пучке. Эти величины могут быть определены из анализа формы кривой Брэгга.

Средняя энергия определяется по величине среднего пробега протонов, а величина дисперсии энергетического распределения – по крутизне спада дозы за пиком Брэгга. В результате проведенных измерений <sup>13/</sup> получены следующие значения:

$$E = (659 \pm 6) \text{ МэВ} \quad \sigma_E = (3,1 \pm 0,8) \text{ МэВ}.$$

Канал для формирования протонного пучка с модифицированной формой кривой Брэгга должен обеспечить:

- а) магнитный анализ и получение необходимой линейной дисперсии заторможенного протонного пучка в месте расположения коллиматорной системы, трансформирующей энергетическое распределение протонов в пучке,
- б) компенсацию линейной дисперсии и получение оптимальных размеров пучка в процедурных кабинах в месте расположения облучаемых объектов,
- в) транспортировку в процедурные помещения протонных пучков с достаточно широким импульсным распределением ( $\Delta p/p = 6-7\%$ ),
- г) минимальные потери пучка при транспортировке.

На основе этих требований был разработан и создан канал с соответствующим физико-техническим оборудованием для транспортировки и формирования таких пучков на реконструированном синхротроне ЛЯП ОИЯИ, схема которого приводится на рис. 3.

Выведенный из камеры синхротрона протонный пучок с помощью магнитов СП-35 и ОМ-1 и двух дублетов квадрупольных линз  $D_1$  и  $D_2$  фокусируется на вход углеродного замедлителя. Углеродный замедлитель состоит из трех независимо вращающихся барабанов. Два первых барабана служат для установки на пути пучка блоков углерода различной толщины, комбинация их толщин позволяет устанавливать суммарную толщину замедлителя от 0 до 132 см с шагом 1,2 см, в результате чего энергия протонного пучка может быть уменьшена до необходимой средней энергии. Третий барабан позволяет устанавливать на ось пучка один из 11 сменных коллиматоров.

При формировании замедленных протонных пучков в процедурных кабинах № 1 и 2 три магнита – СП-37, СП-10 и СП-57 отклоняют пучок на углы  $32^\circ$ ,  $9,5^\circ$  и  $14,5^\circ$ , соответственно. При этом осуществляется магнитный анализ замедленного пучка, в результате чего протоны различных энергий пространственно разделяются, а их энергетическое распределение может быть преобразовано с помощью коллиматорной системы.

Дистанционно управляемая коллиматорная система представляет собой набор из 12 пар подвижных пластин шириной по 1,5 см. Перемещением этих пластин в вертикальном направлении симметрично относительно



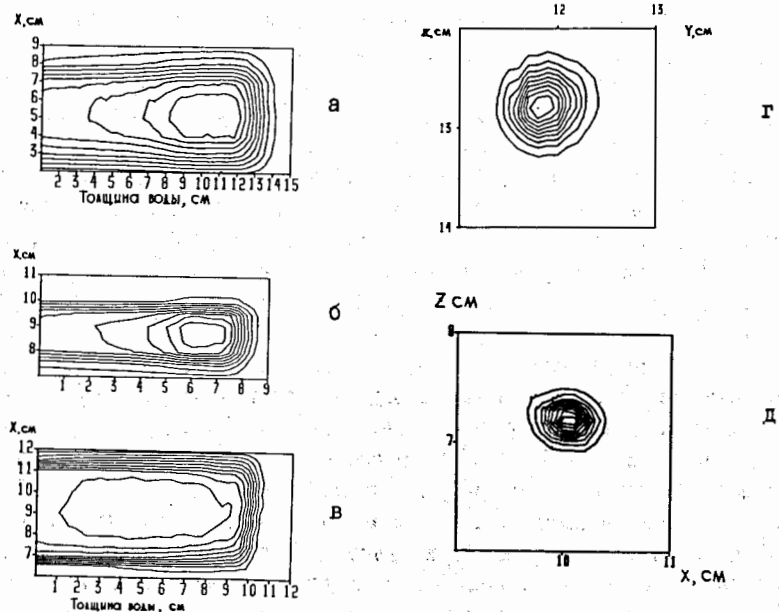


Рис.5. Изодозные распределения протонных пучков.

бинного дозного распределения до  $8 \text{ г/см}^2$  дополнительно применен гребенчатый фильтр. Расчеты конфигурации гребенчатого фильтра проводились с учетом многократного кулоновского рассеяния в веществе гребенчатого фильтра. Изодозное распределение полученного таким образом пучка приводится на рис. 5, в.

Имеющийся канал может обеспечить разрешение по импульсу  $\Delta p/p = 0,5\%$  в широком диапазоне энергий, что позволяет использовать этот канал для проведения экспериментов по изучению протон-протонных и протон-ядерных взаимодействий.

В процедурной кабине № 3 сформированы узкие пучки протонов диаметром 5–10 мм с энергией 660 МэВ для лучевой терапии малых внутричерепных мишеней методом напролет. Низкий фон вторичных частиц вне области пучка обеспечивается тем, что коллимирование пучка осуществляется на большом расстоянии от облучаемой мишени.

Формирование начальной части канала осуществляется теми же элементами, что и для получения замедленных протонных пучков. Далее магнит СП-57 отклоняет пучок на коллиматор  $K_2$ , размеры которого определяют размеры поперечного сечения пучка на мишени. Коллиматор  $K_3$  задает угловую апертуру пучка и обеспечивает защиту от фона вторичных частиц, образовавшихся в помещении лаб. № 4 фазотрона. Коллиматор  $K_4$  служит для обрезания оресла пучка. Для очистки пучка от фона вторичных частиц предусмотрен поворот пучка в кабину № 3 на угол  $7^\circ$  магнитом СП-10-2. Два квадрупольных триплета  $T_6$  и  $T_7$  фокусируют пучок на центр стэнда для подвижного облучения мишеней в процедурной кабине № 3. Изоурвни плотности потока протонов в поперечном сечении пучка представлены на рис. 5, г.

Кроме терапевтических пучков в процедурной кабине № I сформирован узкий пучок протонов с энергией 660 МэВ для исследований по протонной реконструктивной томографии. Размеры пучка по изоурвню 50% составляют 3,8 мм по горизонтали и 2,8 мм по вертикали (рис. 5, д).

Формирование и транспортировка пучков осуществляется в вакууме, так как многократное рассеяние в воздухе увеличивает фазовый объем пучков, что делает невозможным получение узких пучков, а также ухудшает энергетическое разрешение анализирующей магнитной системы при формировании замедленных протонных пучков с модифицированной формой кривой Брегга.

В четвертой главе описываются измерения дозиметрических параметров медицинских протонных пучков. Для измерения полного потока протонов через поперечное сечение канала применяются плоскопараллельные воздушные ионизационные камеры. Измерения пространственных дозных распределений проводятся миниатюрными кремниевыми детекторами с помощью устройств, работающих на связи с ЗЕМ <sup>14</sup> и термоллюминесцентными дозиметрами.

Абсолютные дозиметрические измерения проводятся дозиметрами типа VA-J-18 и КД-27012, детекторами в которых являются воздушные ионизационные камеры.

С целью повышения точности абсолютных измерений поглощенной дозы была проведена градуировка клинических дозиметров в поле гамма-излучения на установке РОКУС-М /16/. Градуировка осуществлялась путем сравнения величин экспозиционной дозы, измеренных калибруемыми дозиметрами и ионизационной камерой, предварительно откалиброванной на первичном эталоне в ЧССР. Градуировка проведена совместно с сотрудниками Института радиационной дозиметрии ЧСАН в Праге.

Медицинские протонные пучки, работающие на разных ускорителях, существенно отличаются друг от друга энергией, пространственными и временными характеристиками и, соответственно, методами дозиметрии. Различия в используемых режимах облучения и размер дозных полей затрудняют сопоставление клинических результатов, возникает необходимость убедиться в совпадении абсолютных калибровок.

Для этого были проведены циклы сравнительных дозиметрических измерений между тремя медицинскими протонными пучками - Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, Института теоретической и экспериментальной физики в Москве и Ленинградского института ядерной физики. Измерения поглощенной дозы на медицинских протонных пучках ИТЭФ и ЛИЯФ проводились с помощью термолуминесцентных дозиметров LiF и CaF<sub>2</sub>, предварительно откалиброванных на медицинском протонном пучке ЛЯП ОИЯИ. Точность сравнительной дозиметрии в каждом сеансе измерений составляла 10-12% (среднеквадратичное отклонение). Было получено совпадение абсолютных значений доз в пределах погрешностей измерений на всех трех пучках, несмотря на существенные различия энергетических и временных характеристик этих пучков /8/.

Основные результаты диссертации могут быть сформулированы следующим образом:

1. Предложен и разработан новый метод формирования модифицированной кривой Брэгга для немонотонных энергетических протонных пучков, основанный на магнитном анализе пучка и преобразовании имеющегося широкого энергетического распределения коллиматорной системой, расположенной в области максимальной линейной дисперсии. На пучке синхротрона ЛЯП ОИЯИ проведена экспериментальная проверка данного метода.

2. На основе предложенного метода разработаны каналы для формирования и транспортировки протонных пучков в процедурные кабины клинико-физического комплекса на реконструированном фазотроне, разработано и введено в эксплуатацию физико-техническое оборудование каналов, в том числе дистанционно-управляемый углеродный замедлитель, автоматизированная коллиматорная система для преобразования энергетического распределения протонов в пучке.

3. Разработан численный метод расчета глубинных дозных распределений для пучков с произвольной плотностью остановок протонов по толщине вещества с учетом ослабления пучка в результате ядерных взаимодействий и многократного кулоновского рассеяния, с помощью которого проведено моделирование на ЭЕМ транспортировки по каналу протонных пучков с модифицированной формой кривой Брэгга.

4. В трех процедурных кабинах клинико-физического комплекса реконструированного фазотрона сформирован набор протонных пучков для лучевой терапии локализаций различных размеров, как поверхностных, так и расположенных на большой глубине. Исследованы характеристики анализирующей магнитной системы.

5. Для сравнения результатов лучевой терапии на протонных пучках Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, Института теоретической и экспериментальной физики ГК АЭ в Москве и Ленинградского института ядерной физики АН СССР впервые проведена их сравнительная дозиметрия. В результате получено совпадение в пределах погрешностей измерений абсолютных калибровок всех трех пучков.

6. Для повышения точности абсолютных измерений поглощенной дозы на базе гамма-облучателя РОКУС-М был оборудован стенд для градуировки клинических дозиметров в поле гамма-излучения.

7. Сформированы и исследованы дозные поля, необходимые для проведения клинического облучения и биологических экспериментов. Проведен первый этап радиобиологических экспериментов по измерению ОБЭ протонных пучков, совместно с сотрудниками ВОНЦ АМН СССР начаты сеансы лучевой терапии на протонном пучке реконструированного фазотрона.

8. Сформирован протонный пучок для проведения экспериментов по исследованию протон-протонных и протон-ядерных взаимодействий.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. И.И.Аниканов, Е.С.Кузьмин, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко, В.П.Стекольников, Б.В.Астрахан, С.А.Бальтер, М.Ш.Вайнберг, И.Г.Жаков, А.И.Рудерман. Медицинский протонный пучок Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Вып. 2. Под редакцией В.П.Джелепова и А.И.Рудермана. ОИЯИ, 7287, Дубна, 1973.
2. В.М.Абазов, В.П.Джелепов, Е.С.Кузьмин, А.Г.Молоканов, Г.П.Решетников, О.В.Савченко, В.А.Трофимов, Е.П.Череватенко, Б.В.Астрахан, А.А.Вайнсон, М.Ш.Вайнберг, Г.В.Макарова, А.И.Рудерман, Н.Л.Шмакова, С.П.Ярмоненко. Получение и использование медицинских протонного и пи-мезонного пучков в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и перспективы дальнейших работ. ОИЯИ, Д-8883, Дубна, 1975.



3. В.П.Зорин, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко. Метод модификации пика Брэгга для моноэнергетических протонных пучков. ОИЯИ, Р16-11080, Дубна, 1977.
4. В.П.Зорин, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко. Метод модификации пика Брэгга для моноэнергетических протонных пучков. В кн. Использование протонных пучков в лучевой терапии. Труды Первого международного семинара. Т.1, стр. 137, М., Атомиздат, 1979.
5. А.Г.Молоканов, О.В.Савченко. Устройство для формирования дозных распределений тяжелых заряженных частиц в веществе. ОИПОТЗ № 15, стр. 174, 1979. Авторское свидетельство № 658517.
6. В.М.Абазов, Г.А.Андреев, Б.В.Астрахан, Т.С.Гаврилова, В.П.Зорин, И.И.Ключков, Е.С.Кузьмин, С.А.Кутузов, А.Г.Молоканов, В.И.Пахомов, Г.П.Решетников, О.В.Савченко, Л.М.Сороко, В.Г.Сухов. Эксперименты по реконструктивной томографии на медицинском протонном пучке синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. ОИЯИ, 18-80-746, Дубна, 1980.
7. В.М.Абазов, Б.В.Астрахан, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко. Устройство для цифровой томографии на пучках тяжелых заряженных частиц. ОИПОТЗ, 1982, № 14, стр. 324. Авторское свидетельство № 867162.
8. Д.Л.Карлин, Б.А.Коннов, В.И.Коотиченко, М.Ф.Ламанов, А.Г.Молоканов, В.Б.Низковалос, О.В.Савченко, В.С.Хорошков. Сравнительная дозиметрия медицинских протонных пучков ЛЯП ОИЯИ, ИТЭФ ИКАЭ и ЛИЯФ АН СССР. ОИЯИ, 16-82-876, Дубна, 1982.
9. Е.С.Кузьмин, И.В.Мирохин, А.Г.Молоканов, Ю.Л.Обухов, О.В.Савченко. Расчет каналов для формирования и транспортировки протонных пучков медицинского назначения на фазотроне ОИЯИ. ОИЯИ, Р9-84-445, Дубна, 1984.
10. В.М.Абазов, С.А.Густов, В.П.Зорин, С.А.Кутузов, И.В.Мирохин, Г.В.Мишн, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко, А.В.Филимонов. Получение и исследование терапевтических протонных пучков на реконструированном фазотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. ОИЯИ, Р9-86-648, Дубна, 1986.
11. В.М.Абазов, С.А.Густов, В.П.Зорин, С.А.Кутузов, И.В.Мирохин, Г.В.Мишн, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко. Получение и исследование физико-дозиметрических характеристик медицинского протонного пучка со средней энергией 130 МэВ. ОИЯИ, 9-87-280, Дубна, 1987.
12. В.М.Абазов, С.А.Густов, В.П.Зорин, С.А.Кутузов, И.В.Мирохин, Г.В.Мишн, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко. Получение и исследование физико-дозиметрических характеристик медицинского протонного пучка со средней энергией 100 МэВ с модифицированной формой кривой Брэгга. ОИЯИ, 9-87-281, Дубна, 1987.

13. В.М.Абазов, С.А.Густов, В.П.Зорин, О.Л.Климов, С.А.Кутузов, И.В.Мирохин, Г.В.Мишн, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко, Е.П.Череватенко. Измерение параметров выведенного протонного пучка реконструированного фазотрона ОИЯИ. ОИЯИ, 9-87-322, Дубна, 1987.
14. В.М.Абазов, С.А.Густов, В.П.Зорин, С.А.Кутузов, И.В.Мирохин, Г.В.Мишн, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко, А.В.Филимонов. Измерительная аппаратура на связи с ЭММ. Медицинская радиология, 1987, № 10, стр. 72.
15. В.П.Зорин, С.А.Кутузов, И.В.Мирохин, Г.В.Мишн, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко. Получение и исследование узких пучков протонов с энергией 660 МэВ для лучевой терапии. ОИЯИ, 9-87-840, Дубна, 1987.
16. Р.Вагнер, В.П.Зорин, П.Йироушек, О.Л.Климов, И.Коварж, А.Г.Молоканов, Г.В.Мишн, Й.Новотны. Физико-дозиметрические измерения на гамма-аппарате РОКУС-М. ОИЯИ, 16-87-935, Дубна, 1987.
17. В.М.Абазов, С.А.Густов, В.П.Зорин, С.А.Кутузов, И.В.Мирохин, Г.В.Мишн, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко, А.В.Филимонов. Получение и исследование терапевтических протонных пучков на реконструированном фазотроне. Медицинская радиология, 1988, № 1, стр. 67.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 апреля 1988 года.