

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

A-615

2-84-113

АМЕЛИН
Николай Сергеевич

ИЗУЧЕНИЕ
МЕХАНИЗМА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
АДРОН-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность: 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1984

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
профессор

В. С. БАРАШЕНКОВ

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

В. Д. ТОНЕЕВ

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Н. В. МОХОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт ядерных исследований АН СССР, Москва

Защита диссертации состоится " _____ " 1984 года
на заседании Специализированного совета К047.01.01 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан " _____ " 1984 года

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке О И Я И

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук В. И. ЛУРАВЛЕВ

Общая характеристика работы

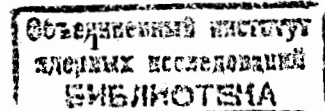
Актуальность темы: Многочисленные исследования столкновений адронов высокой энергии с атомными ядрами показали, что понимание механизма этих процессов невозможно без учета пространственно-временной картины взаимодействия элементарных частиц. Учет пространственно-временной картины в ядерных реакциях подсказывается развитием квантовой хромодинамики и позволяет анализировать динамику адронных столкновений непосредственно в области их взаимодействия. Процессы рождения частиц внутри ядра через образование промежуточных состояний различного типа оказывают существенное влияние на продукты реакций в тех кинематических областях, где ожидается проявление необычных свойств ядерной материи. Такие состояния в экспериментах по обнаружению флуктонов, короткодействующих корреляций нуклонов, мультикварковых образований и т.п., играют роль фона, который должен быть выделен из основного эффекта.

В последнее время для исследования различных проблем теоретической физики, наряду с традиционными подходами, все чаще используются различные методы математического моделирования. Среди них особое место занимает метод Монте-Карло или метод статистического моделирования. В применении к адрон-ядерным столкновениям его использование дает возможность с помощью "вычислительного эксперимента" изучать особенности механизма взаимодействий.

Цель работы состоит в изучении различных аспектов пространственно-временного развития высокоэнергетических адрон-ядерных взаимодействий методом статистического моделирования. Задача исследования включает в себя:

- разработку метода моделирования множественного рождения частиц в адрон-нуклонных взаимодействиях на основе дуальной партонной модели;
- дальнейшее развитие модели внутриядерных каскадов;
- создание пакета программ, позволяющего моделировать на ЭВМ процессы адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействий;
- проведение необходимых расчетов и сопоставление их результатов с данными опыта.

Научная новизна и практическая ценность. Разработанный в диссертации подход к эксклюзивной реконструкции адрон-нуклонных взаимодействий, основанный на дуальной партонной модели, позволяет описать и предсказать многочисленные характеристики множественного рождения. По сравнению с опубликованными в литературе инклюзивными расчетами, он открывает значительно большие возможности для детального сопоставления



с экспериментом следствий различных предположений о кварк-глюонном механизме адронных взаимодействий и может быть использован в качестве "элементарного акта" в моделях адрон-ядерных и адро-ядерных столкновений.

Для описания адрон-ядерных взаимодействий в области высоких энергий предложена новая модификация модели внутриядерных каскадов. Она позволяет единым образом подойти к расчету этих процессов в широком энергетическом интервале от десятков МэВ до сотен ГэВ.

Впервые выполнены расчеты конкретных ядерных реакций, указывающие на значительную роль перерассеяний частиц и резонансов в вылете адронов в область, запрещенную кинематикой свободного адрон-нуклонного рассеяния.

Полученные результаты могут быть использованы при создании методов расчета прохождения высокоэнергетических частиц через вещество, при планировании новых экспериментов, при оценке эффективности экспериментальных установок.

На защиту вносятся следующие основные результаты, полученные в диссертации

1. На основе представлений дуальной партонной модели предложен метод генерации с помощью ЭМ эксклюзивных конечных состояний в неупругих адрон-нуклонных столкновениях при высокой энергии.

2. Сформулирована модифицированная модель внутриядерных каскадов. В модели пространственно-временное развитие высокоэнергетических адрон-ядерных взаимодействий учитывается путем рассмотрения кварк-глюонных струн и резонансов в качестве каскадных частиц.

3. Проведено сравнение результатов расчета высокоэнергетических адрон-ядерных взаимодействий с данными опыта. Эти расчеты позволили:

- в реакции $p d \rightarrow p p n$ при энергии $T \approx 1$ ГэВ с помощью диаграмм, учитывающих перерассеяние пионов, объяснить структуру высокоэнергетической части спектра, рассеянных "назад" протонов;

- в рамках каскадной модели с учетом $\Delta(3/2, 3/2)$ - резонансов описать инклюзивные спектры и корреляции быстрых протонов, вылетающих в заднюю полусферу при взаимодействии протонов ($T=640$ МэВ) с атомными ядрами;

- оценить вклад векторных мезонов, рождающихся внутри ядра в энергетический спектр кумулятивных пионов, в реакции $p + Td \rightarrow \pi + x$ при энергии $T=400$ ГэВ;

- методом статистического моделирования исследовать область применимости модели каскада лидирующего адрона и установить, что эта

модель не может описать среднюю множественность низкоэнергетических частиц, рожденных во взаимодействии адронов высокой энергии с тяжелыми ядрами.

4. Разработаны новые алгоритмы и создан пакет программ статистического моделирования процессов высокоэнергетических адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействий.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертации, докладывались на семинарах ЛВТА, ЛТФ, ЛВЭ ОИИИ, рабочих совещаниях в ОИИИ, сессиях ОЯФ АН СССР (1978-1982 г.г.), 2-ом Всесоюзном проблемном семинаре по взаимодействию адронов и ядер с ядрами при высоких энергиях (Ташкент, 1981 г.), Международной школе по физике высоких энергий ОИИИ-ЦЕРН (Ханко, Финляндия 1981 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано тринадцать работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав основного содержания и заключения; она содержит 129 страниц машинописного текста, 43 рисунка, 7 таблиц и библиографический список из 151 наименования.

Содержание работы

Во введении подчеркивается актуальность изучения механизма взаимодействия высокоэнергетических адронов с атомными ядрами. Дается краткое описание этапов метода статистического моделирования, применяемого для теоретического исследования сложных процессов, какими являются ядерные реакции. В качестве физической модели адрон-ядерных столкновений выбрана модель внутриядерных каскадов (МК). Рассмотрено ее место среди других теоретических моделей ядерных реакций. Определен конкретный круг явлений для исследования методом статистического моделирования. Сформулированы основные вопросы, рассмотренные в диссертации.

В первой главе диссертации рассматриваются основные положения модели внутриядерных каскадов, описывается ее программная реализация на ЭМ, с помощью разработанной версии МК проводятся тестовые расчеты и приводятся примеры расчетов, характеризующих дополнительные возможности модели и метода статистического моделирования.

В §1 излагаются основные понятия модели внутриядерных каскадов, которая рассматривает взаимодействие высокоэнергетического адрона с атомным ядром в виде последовательности двухчастичных взаимодействий, рождающихся и перерассеивающихся каскадных частиц с отдельными нуклонами ядра. Каскадные частицы считаются классическими, движущимися по определенной траектории с определенным импульсом. Ядро-мишень пред-

ставляется как ферми-газ независимых нуклонов с заданным пространственным и импульсным распределениями. Обсуждаются условия применимости модели. Выбрана версия модели внутриядерных каскадов, в которой ядерная плотность не меняется в процессе реакции и каскадные частицы не взаимодействуют между собой. Такой вариант модели допускает математическую формулировку в виде системы интегро-дифференциальных линейных стационарных уравнений. Обсуждаются преимущества использования метода Монте-Карло для решения этих уравнений.

В §2 дается описание разработанного пакета программ, реализующего модель внутриядерных каскадов на ЭВМ. Новые алгоритмы составленных программ специально приспособлены для того, чтобы вносить в них необходимые логические изменения, требующиеся при изучении адрон-ядерного взаимодействия методом статистического моделирования. В данной версии МК не требуется разбиения ядра на зоны с постоянной плотностью. Можно использовать любую требуемую плотность нуклонов. Пакет программ снабжен подробными комментариями, для наиболее сложных программ приведены их блок-схемы. Чтобы обеспечить сопряжение отдельных программ-модулей, имеется описание их входных и выходных параметров.

В §3, с целью проверки правильности функционирования пакета программ, проводятся тестовые расчеты. Результаты расчетов сравниваются с результатами расчетов по другим версиям МК. Сделан вывод о том, что разработанный пакет программ, который положен в основу моделирования на ЭВМ процесса адрон-ядерного взаимодействия, функционирует правильно.

В §4 предлагается способ использования МК для расчета полных и дифференциальных упругих сечений адрон-ядерного взаимодействия путем вычисления мнимой части фазы рассеяния. Показано, что предложенный способ более эффективен по сравнению с традиционными расчетами, основанными на оптической модели и модели Глаубера, когда не требуется высокая точность расчетов.

В §5 методом статистического моделирования исследуется область применимости модели каскада лидирующего адрона. Модель предназначена для описания адрон-ядерных неупругих взаимодействий в области высоких энергий. Она рассматривает перерассеяние внутри ядра только лидирующего адрона, а остальные частицы, образующиеся в каждом акте внутриядерного взаимодействия, далее не рассеиваются. Показано, что хотя модель дает близкие к экспериментальным характеристики ливневых частиц, она не воспроизводит экспериментального факта — практически постоянного, не зависящего от энергии первичной частицы, значения средней множественности низкоэнергетических частиц.

Во второй главе исследуется роль $\Delta(3/2, 3/2)$ — резонансов в адрон-ядерных взаимодействиях при энергии $T \leq 1$ ГэВ. Описан учет рождения, перерассеяния и распада этих резонансов в модели внутриядерных каскадов. Проводятся конкретные расчеты ядерных реакций для сравнения с МК без учета резонансов и опытом. Кратко излагаются экспериментальные данные и теоретические модели, посвященные явлению кумулятивного рождения частиц. Ставится задача об исследовании роли перерассеяния частиц и резонансов в этом явлении и проводятся исследования.

В §1 рассматривается включение в модель внутриядерных каскадов $\Delta(3/2, 3/2)$ — резонансов в качестве каскадных частиц. Считается, что каждое неупругое NN- или πN - взаимодействие идет через образование $\Delta(3/2, 3/2)$ — резонанса. Этот резонанс может образовываться в упругом πN -взаимодействии с вероятностью, пропорциональной резонансному сечению. Учитываются два вида ΔN -взаимодействий: $\Delta N_1 \rightarrow N_2 N_3$ и $\Delta_1 N_1 \rightarrow \Delta_2 N_2$. Характеристики этих процессов рассчитываются по модели однопионного обмена. Ядро оказывает влияние на движение и распад $\Delta(3/2, 3/2)$ — резонанса. В частности, принцип Паули запрещает ему распадаться в состоянии, когда кинетическая энергия нуклона-продукта ниже максимальной энергии Ферми, что приводит к существенно-му увеличению длины свободного пробега резонанса в ядре. В пакет программ, который реализует модель внутриядерных каскадов на ЭВМ, включены данные об образовании, движении внутри ядра, распаде и взаимодействии $\Delta(3/2, 3/2)$ — резонансов с внутриядерными нуклонами и созданы дополнительные программы, моделирующие эти процессы. Модель применима для расчета нуклон-ядерных и пион-ядерных взаимодействий, когда энергия налетающей частицы $T \leq 1$ ГэВ.

В §2 с помощью модели внутриядерных каскадов с включением $\Delta(3/2, 3/2)$ — резонансов рассчитываются неупругие взаимодействия протонов различных энергий с различными атомными ядрами. Результаты расчетов сопоставляются с данными эксперимента и результатами статистического моделирования, не учитывающего рождения внутри ядра резонансов. В частности, установлено, что данная версия МК хорошо описывает двойные дифференциальные сечения образования протонов и π^\pm -мезонов. Без включения резонансов такого описания получить не удастся.

В §3 рассматривается проблема рождения кумулятивных частиц в адрон-ядерных взаимодействиях. Кратко излагаются экспериментальная ситуация и теоретические модели, разработанные разными авторами для описания этого явления. Ставится задача изучения роли перерассеяния частиц и резонансов в механизме кумулятивного рождения.

В §4 исследуется механизм неупругого pd —рассеяния "назад".

Дейтрон – самое простое ядро с хорошо известной волновой функцией, что дает возможность при анализе реакции использовать диаграммную технику. Энергетический спектр быстрых протонов, вылетающих назад в реакции $pd \rightarrow ppp$ при начальном импульсе 1,66 ГэВ/с, удалось описать "треугольной" диаграммой с однопионным обменом (см. рис. 1). Инвариантный вид соответствующего дифференциального сечения в зависимости от переменной $\chi = T/T_{\text{макс}}$ для двух интервалов по $\cos \theta$ показан на рис. 1. Здесь T – кинетическая энергия регистрируемых протонов в реакции, а $T_{\text{макс}}$ – кинетическая энергия рассеянных под тем же углом протонов в угловом pd -рассеянии. Сплошные линии – результаты расчетов с учетом треугольной диаграммы. Пунктирные – вклад однократно-го pn взаимодействия.

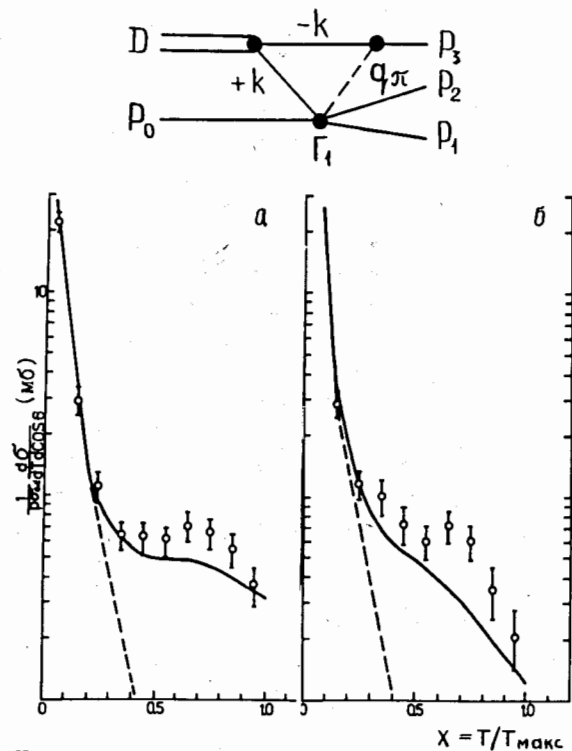


Рис. 1. Инвариантное дифференциальное сечение реакции с выходом протонов в заднюю полусферу, проинтегрированное по $\cos \theta$ в интервале $(-1, -0.67)$ -а и в интервале $(-0.67, -0.33)$ -б. Экспериментальные данные взяты из работы Аладашвили Б.С. и др. ЯФ, 1978, т. 27, с.708

Видно вполне удовлетворительное согласие расчетной кривой с экспериментальными данными, особенно в области больших углов. При этом спектр протонов, вылетающих в заднюю полусферу при $\chi \geq 0.2$, подобен энергетическому спектру пионов в реакции $pd \rightarrow ppp$, который при данном начальном импульсе имеет резонансный характер в области энергий пионов, соответствующей максимуму кривой на рис. 1а, т.е.

$$\frac{1}{p b_{\text{tot}}^{\text{pn}}} \frac{d\sigma}{dT_p} \approx A |F_\pi|^2 \frac{d\sigma}{dT_\pi}$$

Здесь $\frac{d\sigma}{dT_\pi}$ – энергетический спектр π -мезонов, F_π – фактор пиона, учитывающий сход с массовой поверхностью, A – слабо меняющаяся с импульсом рассеянного протона функция.

В §5 модель внутриядерных каскадов с включением $\Delta(3/2, 3/2)$ -резонансов используется для расчета инклюзивных энергетических спектров и корреляций быстрых протонов, вылетающих в заднюю полусферу в протон-ядерных взаимодействиях при начальной энергии $T=640$ МэВ.

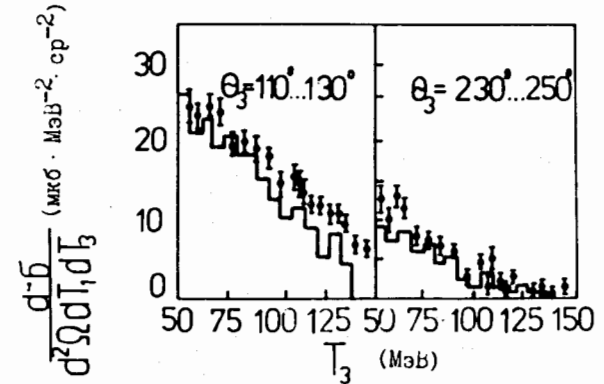


Рис. 2. Дифференциальные сечения вылета протонов в столкновениях протонов с энергией 640 МэВ с ядрами углерода под углами $\theta_1 = -12^\circ$, $110^\circ \leq \theta_3 \leq 130^\circ$ и $\theta_1 = -12^\circ$, $230^\circ \leq \theta_3 \leq 250^\circ$. Кинетическая энергия протонов, вылетающих "вперед", заключена в интервале $255 \text{ МэВ} \leq T_1 \leq 330 \text{ МэВ}$. Гистограммы – результат статистического моделирования. Точки $\bar{\sigma}$ – данные работы Комаров В.И. et al. Phys. Lett., 1979, v. B20, No 1,2, p.30.

Получено хорошее согласие экспериментально измеренных и рассчитанных инклюзивных спектров под разными углами и для разных ядер-мишеней. С целью дальнейшей дискриминации механизма вылета протонов в область, запрещенную кинематикой свободного протон-нуклонного рассеяния, были проведены расчеты корреляций этих протонов с энергичными протонами,

вылетающими в переднюю полушфферу. В настоящее время нет теории, которая объясняла бы эффекты корреляций, в то же время учет $\Delta(3/2, 3/2)$ -резонансов приводит к неплохому согласию результатов расчета с данными опыта. Это видно из рис. 2, где приведено сравнение измеренных и рассчитанных корреляций. На рис. 2 величины T_1 , T_3 и θ_1, θ_3 обозначают кинетические энергии и углы вылетающих в результате ядерной реакции протонов соответственно в направлении "вперед" и "назад". Эксперимент поставлен в "компланарной геометрии".

В третьей главе исследуются механизмы адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействий, при энергиях, когда происходит множественное рождение частиц. Дается краткое описание дуальной партонной модели, которая положена в основу разработанного метода моделирования на ЭВМ процесса множественного рождения в адронных соударениях. Проводится расчет многочисленных характеристик этого процесса и сопоставление их с характеристиками, извлеченными из эксперимента. Предлагается модификация модели внутриядерных каскадов. С помощью модифицированной МВК получено неплохое описание ряда экспериментальных данных по выходу ливневых частиц. Исследуется роль векторных мезонов в механизме кумулятивного рождения пионов.

В §1 кратко излагаются основные положения дуальной партонной модели, предназначенной для описания взаимодействия адронов на больших расстояниях. Модель основана на топологическом разложении амплитуды бинарных процессов в квантовой хромодинамике и феноменологических подходах к описанию перехода кварков в адроны. Если ограничить рассмотрение NN или πN неупругими недифракционными взаимодействиями, то в модели процессы рождения происходят следующим образом: в результате столкновения адронов путем аннигиляции медленных валентных кварков или цветовой перезарядки образуется одна или несколько кварк-глюонных струн. Далее струны разрываются вакуумными кварк-антикварковыми парами, давая ливни конечных адронов. Партонная интерпретация множественного рождения дает возможность методом Монте-Карло с помощью ЭВМ моделировать процесс.

В §2 описана предлагаемая процедура моделирования неупругих адрон-нуклонных взаимодействий. Первый шаг моделирования состоит в выборе диаграммы соответствующей топологии. Затем определяются ароматы и, по заданным импульсным распределениям, импульсы взаимодействующих кварков, антикварков или дикварков, которые будут на концах бесцветных кварк-глюонных струн. Последний шаг составляет моделирование процесса разрыва струн. В данном случае разрыв струн моделируется путем независимой фрагментации концов струны в ее системе центра масс. Учитывается структура дикварков. Конечные продукты моделирова-

ния - адроны, которые входят в состав барионного 56-плета и мезонного 35-плета группы $SU(6)$. Процедура моделирования обеспечивает выполнение законов сохранения энергии-импульса и квантовых чисел. В случае необходимости моделируется распад мезонных и барионных резонансов.

В §3 приводится сравнение результатов моделирования высокоэнергетических пион-нуклонных и нуклон-нуклонных соударений с экспериментальными данными. Показано, что в широком энергетическом интервале хорошо описываются экспериментальные средние множественности заряженных частиц, отдельные компоненты средних множественностей, включающие мезонные и барионные резонансы, странные частицы. Получено неплохое описание быстротных распределений, распределений по продольному и поперечному импульсу частиц и резонансов. Согласие расчетных и экспериментальных данных иллюстрируется на рис. 3 и 4.

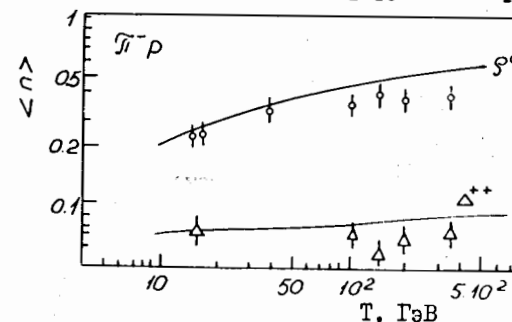


Рис. 3. Средние множественности q^0 и Δ^{++} резонансов, рождающихся в неупругих πp -столкновениях. Кривые - результат расчета. Точки \odot и \triangle - экспериментальные данные, взятые соответственно из работ Higgins P.D. et al. Phys. Rev., 1979, v.D19, p.65; Higgins P.D. et al. Phys. Rev., 1979, v.D19, p.731.

В §4 предлагается модификация модели внутриядерных каскадов, в которой неупругие внутриядерные взаимодействия в соответствии с дуальной партонной моделью происходят через образование кварк-глюонных струн. Делается предположение о мгновенном образовании струн. Предполагается, что струна подобна резонансу, т.е. имеет определенную массу, ширину и различные моды распада. Кварк-глюонная струна с определенными кварком и дикварком (антикварком) на концах с нуклоном ядра взаимодействует таким же образом, как и адрон с данным кварковым составом. Кроме струн в развитии внутриядерного каскада участвуют пионы, нуклоны, странные частицы, мезонные и барионные резонансы, возникающие от их распада. Проведено сравнение результатов расчета

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Амелин Н.С., Лыкасов Г.И. О механизме неупругого $p d$ -рассеяния назад. ЯФ, 1978, т. 28, вып. 5 (II), с. 1258-1265.
2. Амелин Н.С., Барашенков В.С. Модель внутриядерных каскадов для области энергий, меньших нескольких ГэВ. ОИЯИ, P2-12616, Дубна, 1979, 8с.
3. Амелин Н.С., Барашенков В.С. Программа INSS -78. Расчет внутриядерных каскадов при энергиях, меньших нескольких ГэВ, ОИЯИ, Б1-2-12985, Дубна, 1979, 104л.
4. Амелин Н.С. Модель внутриядерных каскадов с учетом резонансов. ОИЯИ, P2-80-661, Дубна, 1980, 12с.
5. Амелин Н.С. Программа INSSD . Расчет внутриядерных каскадов с учетом Δ -изобар. ОИЯИ, Б1-2-80-667, Дубна. 1980, 122л.
6. Амелин Н.С., Барашенков В.С. Дифракционное рассеяние в модели внутриядерных каскадов. ОИЯИ, P2-12927, Дубна, 1979, 7с.
7. Амелин Н.С., Лыкасов Г.И. Роль резонансов в образовании кумулятивных π -мезонов. ЯФ, 1981, т. 33, вып. I, с. 194-207.
8. Амелин Н.С., Барашенков В.С., Бордиян Л.В., Мусульманбеков Ж.Ж. Упругое рассеяние в модели внутриядерных каскадов. ОИЯИ, P2-81-366, Дубна, 1981, 6с.
9. Амелин Н.С., Глаголев В.В., Лыкасов Г.И. Характерные особенности взаимодействий адронов с легкими ядрами при средних энергиях. ЭЧАЯ, т. 13, вып. I, с. 130-163.
10. Амелин Н.С., Барашенков В.С., Славин Н.В. Роль фибролов в механизме внутриядерных каскадов. ОИЯИ, P2-82-500, Дубна, 1982, 7с.
11. Амелин Н.С., Барашенков В.С., Славин Н.В. Моделирование методом Монте-Карло множественного рождения частиц при высокоэнергетических соударениях адронов. ОИЯИ, P2-83-769, Дубна, 1983, 14с.
12. Амелин Н.С., Барашенков В.С., Лыкасов Г.И. Роль Δ -резонансов во внутриядерных каскадах. ОИЯИ, P2-83-768, Дубна, 1983, 12 с.
13. Амелин Н.С., Барашенков В.С. Внутриядерный каскад с кварк-глюонными струнами. ОИЯИ, P2-83-770, Дубна, 1983, 6с.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 февраля 1984 года.