

У-45

2-81-845

ЧЕРБУ  
Анатолий Васильевич

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ПОДХОД  
К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССОВ КУМУЛЯТИВНОГО ТИПА

Специальность 01.04.02 - теоретическая  
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель -

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

Б.Н.КАЛИНКИН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

В.А.ЦАРЕВ,

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

В.С.СТАВИНСКИЙ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение -

Институт ядерной физики при Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова.

Защита диссертации состоится " " 1982 г. на заседании Специализированного совета КО47.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (Московская обл., г. Дубна).

Автореферат разослан " " 1982 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

В.И.ЖУРАВЛЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. За последние несколько лет оживились исследования в одной из важных областей физики высоких энергий - в релятивистской ядерной физике.

Наряду с изучением традиционных общих вопросов множественного рождения в веществе заметное место в ней заняли интересные и важные проблемы, возникающие при описании инклюзивного спектра рожденных частиц в той его части, которая запрещена законами сохранения для адрон-адронных столкновений (например, частицы с большими импульсами, вылетающие в заднюю полусферу).

Большой вклад в постановку и исследование этих проблем внесли А.М.Балдин (предсказавший эффект в целом) и группа В.С.Ставинского в ОИЯИ<sup>х/</sup>. Цикл важных экспериментов проведен также группой Г.А.Лексина в ИТЭФ<sup>xx/</sup>.

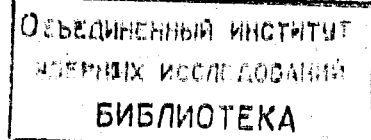
Открытие и исследование кумулятивного эффекта поставило перед теорией ряд серьезных вопросов.

Наиболее важный из них - возможны ли интерпретация эффекта с точки зрения общих представлений о сильном взаимодействии и его использование в качестве источника дополнительной информации об этом взаимодействии?

Известно, что основной результат предпринятого в последнее время интенсивного исследования адрон-ядерных столкновений заключается в установлении необходимости учета пространственно-временных факторов в процессе рождения в акте сильного взаимодействия. Результат этот носит качественный характер. Необходимым условием получения количественной информации о развитии процесса в пространстве и времени является построение возможно более полно отражающей реальную ситуацию модели, которая сводила бы всю совокупность данных по процессам кумулятивного типа к минимальному числу предположений и параметров.

<sup>х/</sup> А.М.Балдин. Heavy ion interactions at high energies.- Santa Fe Conf. on High Energy Physics and Nucl. Structure, 1975, p. 621-641.

<sup>xx/</sup> Г.А.Лексин. Ядерный скейлинг, МИФИ. Сер.: Некоторые вопросы экспериментальных исследований в области физики высоких энергий, 1975, 43 с.



Были предприняты попытки объяснить природу кумулятивных процессов на основе традиционных механизмов ферми-движения и эффектов перераспределения. Однако они не могут объяснить величину наблюдаемых сечений и характерные закономерности.

В последнее время интенсивно разрабатываются новые подходы, основанные на кварк-партоновых представлениях о структуре адронов.

Интересными вариантами этого направления являются работы, основанные на идее о реализации в холодных ядрах многокварковых конфигураций — флуктонов .

Однако такой путь не является единственным. Учитывая положительные результаты, полученные при описании процесса множественного рождения в ядерной среде в рамках пространственно-временных схем, можно надеяться построить модель, основанную на аналогичных принципах и способную описывать рождение кумулятивных частиц. В таких схемах содержатся элементы, необходимые для реализации кумулятивного механизма. Согласно этой модели рожденная в ядре адронная система, кластер, проходя через его толщу и испытывая ряд неупругих столкновений с нуклонами, конвертирует значительную часть энергии поступательного движения во внутреннюю (кумулятирует ее), которая реализуется в дальнейшем путем множественного рождения частиц. Таким образом, массивная адронная система, обеспечивающая выход рожденных частиц за кинематическую границу нуклон-нуклонных соударений, не обязательно является мишенью, приготовленной заранее. Она может возникнуть в результате ряда неупругих соударений. Предельный случай, когда первичный адрон образует с несколькими нуклонами ядра общую компаунд-систему (в данном случае — "горячую" многокварковую систему), соответствует кумулятивному процессу.

В этом направлении и проводились исследования, результаты которых изложены в диссертации.

Цель работы — построение феноменологической модели процесса кумуляции, описывающей его пространственно-временное развитие; установление на этой основе связи кумулятивных процессов с общими аспектами множественного рождения частиц в плотной ядерной среде.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации сформулирована модель, представляющая самостоятельное направление исследований кумулятивных процессов.

Она успешно интерпретирует экспериментальные данные в широком интервале энергий:  $2 \text{ ГэВ} \leq E_p \leq 400 \text{ ГэВ}$ . Ее математический аппарат позволяет получать абсолютные выходы кумулятивных частиц. Модель основана на высказанных ранее предположениях:

— о реализации приближенной масштабной инвариантности инклюзивного спектра частиц, рожденных в коллективном взаимодействии адронов, и

— о необходимости явного учета пространственно-временных факторов в процессе рождения частиц в плотной ядерной среде.

В диссертации впервые исследованы зависимость от начальной энергии основных характеристик, определяющих ход развития процесса, а также возможное влияние ядерной среды на выход рожденных кумулятивных частиц.

На основе этих исследований впервые получена информация о том, что канал реакции в столкновении адронов, идущий через образование единой компаунд-системы, не "вымирает" с ростом энергии. Его сечение  $\sigma_c$  при  $E_p \geq 6 \text{ ГэВ}$  приблизительно постоянно и находится на уровне  $0,25 \sigma_{pp}^{in}$ .

Изучено поведение и другого важного параметра  $\bar{\tau}_0$ , связанного со временем жизни компаунд-системы по отношению к испусканию энергичных кумулятивных частиц.

В диссертации использована также гипотеза об идентичности инклюзивных спектров в адронных столкновениях и коллективном взаимодействии адронов при одинаковой массе промежуточной системы. Она позволяет распространить исследование коллективного взаимодействия адронов на случай малых энергий, когда масштабная инвариантность уже не имеет места.

Сформулированная модель позволяет получить практически значимые результаты. Она позволяет провести расчеты — предсказания для кумулятивных процессов, еще не изученных экспериментально.

#### Следующие результаты выдвигаются для защиты

1. Построена феноменологическая модель явления кумуляции, основанная на идеях, использованных ранее для пространственно-временного описания множественного рождения адронов в плотной ядерной среде и на гипотезе о масштабно-инвариантных свойствах инклюзивного спектра частиц, рожденных в коллективном взаимодействии адронов.

2. На основе этой модели проведен анализ имеющегося экспериментального материала по кумулятивным процессам, позволяющий утверждать, что эксперимент не противоречит гипотезе о масштабно-инвариантных свойствах инклюзивного спектра в коллективных взаимодействиях адронов.

3. Показано, что обсуждаемая модель не требует наличия в ядре готового объекта с удвоенной, утроенной и т.д. нуклонной массой, т.е. не требует дополнительных предположений о структуре ядра. Она исходит из неизбежности возникновения такого объекта в процессе неупругого взаимодействия с нуклонами ядра первичного адрона, масса которого

намного превышает максимально возможную массу в  $NN$ -взаимодействии при той же начальной энергии.

Поскольку этот механизм не только объясняет основные закономерности, но и правильно воспроизводит величину выхода кумулятивных частиц, он может претендовать на роль доминирующего.

4. Получена оценка времени формирования кумулятивных частиц в компаунд-системе.

5. В широком интервале начальных энергий  $2 \text{ ГэВ} \leq E_p^{in} \leq 400 \text{ ГэВ}$  определено сечение образования компаунд-систем, способных сконцентрировать значительную долю энергии на излучении одной частицы. Канал реакции в столкновении адронов, идущей через образование единой компаунд-системы, не "вымирает" с ростом энергии. Его сечение при  $E_p^{in} > 6 \text{ ГэВ}$  приблизительно постоянно и находится на уровне  $0,25 \sigma_{pp}^{in}$ .

6. На основе информации о поведении параметров модели, полученной из анализа данных о рождении кумулятивных мезонов и гиперонов, а также образования частиц с большими поперечными импульсами на ядрах описаны кумулятивные эффекты в процессах с участием дейтрона и подпороговое рождение антипротонов на ядрах. Сделаны расчеты-предсказания для инвариантных инклюзивных сечений кумулятивных мезонов и антипротонов при  $E_p^{in} = 400 \text{ ГэВ}$ . Предсказания находятся в согласии с результатами недавних экспериментов.

Рассматриваются также и другие процессы кумулятивного типа, где может проявляться предложенный механизм кумуляции. К таким процессам относятся: образование "звезд" с большим числом рожденных частиц - "сверхзвезд" в коллективном взаимодействии адронов и корреляция кумулятивных пионов с явлением "полного развала" ядра-мишени.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на семинарах ЛТФ, ЛВЭ ОИЯИ и ИФВЭ АН Каз ССР, на сессиях ОЯФ АН СССР 1978г, 1981г., на Международной школе по ядерной физике (Г. Бизенталь, ГДР, 1981г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 8 статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав основного содержания, заключения, содержит 119 страниц машинописного текста, 36 рисунков, 2 таблицы и библиографический список литературы из 85 названий.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий обзор существующих моделей кумулятивных процессов. Кратко охарактеризованы трудности, с которыми встречаются эти модели. Прослеживается связь между кумулятивными

процессами и пространственно-временными аспектами процесса множественного рождения частиц в плотной ядерной среде.

Ставится задача описания кумулятивных процессов с точки зрения общих представлений о сильном взаимодействии и использования таких процессов в качестве дополнительного источника информации об этом взаимодействии. Перечислены проблемы, исследуемые в диссертации.

В первой главе диссертации дана формулировка пространственно-временной картины процессов кумулятивного типа. В ее основу положена схема, которую можно эффективно описать механизмом "собирания" в ядре  $N$  нуклонов налетающим адроном в последовательных актах столкновения с коэффициентом неупругости  $K \approx 1$  и сечением  $\sigma \ll \sigma_{pp}^{in}$ . При этом учитывается возможность распада промежуточной системы, т.е. выхода ее из кумулятивного "собирательного" канала на каждом этапе процесса. Таким образом, согласно модели процесс развивается в пределах определенного пространственно-временного интервала.

Для описания инклюзивного спектра распадающейся системы, как правило, используется принцип масштабной инвариантности.

Обсуждается также гипотеза, значительно расширяющая возможности модели. Согласно этой гипотезе инвариантные инклюзивные сечения образования частиц в коллективных взаимодействиях приблизительно идентичны тем же сечениям в элементарном акте при той же самой массе промежуточной системы. Такая формулировка модели позволяет перейти к энэлизу кумулятивных процессов и при совсем небольших энергиях, когда принцип масштабной инвариантности заведомо нарушен.

В первом параграфе даны основные соотношения, описывающие процесс в рамках сформулированной картины. Инвариантное сечение рождения частицы сорта  $i$  определяется выражением

$$R_A^{(i)}(S, X, P_\perp) = \sum_{n=\min} W_A^{(n)} \cdot \frac{1}{\sigma_{NN}^{in}} F_i^{(o)}(S_n, X_n, P_\perp), \quad (1)$$

где  $F_i^{(o)}(S_n, X_n, P_\perp)$  - инвариантное сечение рождения частицы сорта  $i$  в  $NN$ -столкновении;  $X_n = P_n / P_{n(i)}^{max}$  и  $P_{n(i)}^{max}(n)$  - максимальное значение продольного импульса частицы  $i$  при заданном значении ее поперечного импульса  $P_\perp$ .

Далее:

$$S_n = 2n m E_p^{in} + (n^2 + 1) m^2, \quad (2)$$

$n$  - число "собранных" нуклонов ядра.

Таким образом, если первичная энергия равна  $E_p^{in}$ , то в кумулятивном процессе  $n$ -го порядка используется функция, измеренная в  $pp$ -столкновении при энергии



$$E_{pp} = \frac{1}{2m} [(n^2+1)m^2 + 2nmE_{pp}^{in}] - m. \quad (3)$$

Если зависимость  $F$  от  $S$  отсутствует:  $F(S, X) = F(X)$ , получаем масштабную инвариантность.

Величины  $W_A^{(n)}$  - сечения собирания системы, включающей  $n$  нуклонов ядра-мишени с массовым числом  $A$ , равны:

$$W_A^{(n)} = \frac{\pi}{2} \frac{(\sigma_c \rho)^n}{\prod_{\lambda=1, \dots, n} (\sigma_c \rho + a_\lambda)} \left\{ 2R^2 \sum_{k=1}^n C_k^{(n)} \frac{\delta[2; 2(\sigma_c \rho + a_k)R]}{(\sigma_c \rho + a_k)^2} \right\}, \quad (4)$$

где

$$a_1 = 0, \\ C_{k+1}^{(n)} = \prod_{\lambda=1, \dots, n} (\sigma_c \rho + a_\lambda) \left[ \prod_{\substack{\xi=1, \dots, n \\ \xi \neq k}} (a_k - a_\xi) \right], \\ C_{k=1}^{(n)} = - \left[ 1 + (-1)^n \sum_{k=2}^n C_k^{(n)} \right].$$

В (4)  $\sigma_c$  - сечение захвата нуклона в компаунд-систему,  $\rho$  - ядерная плотность,  $R = r_0 A^{1/3}$  - радиус ядра,  $r_0 = 1,2$  фм,  $a$  - определяется кинематикой процесса и  $\bar{\tau}_0$  - временем жизни компаунд-систем, способных излучать кумулятивные частицы.

Далее,  $\bar{\tau}_0 = \tau_0 (S_{n-1})^{-1/2} / C$  - связь, подсказанная соотношением неопределенностей и наблюдаемой общей тенденцией изменения времени жизни резонансов с ростом их массы.

Во втором параграфе обсуждается  $A$  - зависимость инвариантного сечения. Для исследования зависимости инвариантного сечения от массового числа ядра-мишени рассматривается поведение функций  $W_A^{(n)}$  в (4) в двух предельных случаях: малого и большого времени, т.е.

$a_n > 1$  и  $a_n < 1$  ( $\sigma_c$  - считается малым). Поскольку  $\sigma_c \ll \sigma_{NN}^{in}$ , то для легких и средних ядер:  $\omega = 2\sigma_c \rho R < 1$ .

Тогда в случае малого времени  $a_n > 1$  из (4) следует:

$$W_A^{(n)} \approx \frac{\pi}{2} \frac{(\sigma_c \rho)^{n+1}}{\prod_{\lambda=1, \dots, n} (\sigma_c \rho + a_\lambda)} \left\{ 2R^2 \frac{\delta[2; 2\sigma_c \rho R]}{(\sigma_c \rho)^2} \right\} \approx \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{(\sigma_c \rho)^{n+1}}{\prod_{\lambda=1, \dots, n} (\sigma_c \rho + a_\lambda)} \sim A. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что в любом порядке  $n$  кумуляции зависимость инвариантного сечения является "объемной". В терминах широко распространенной аппроксимации  $A$  - зависимости функцией виде  $R \sim A^N$  это означает, что показатель  $N$  равен 1. В случае больших времен  $a_n < 1$  и

$$W_A^{(n)} \sim (\sigma_c \rho)^n R^{2+n} \sim A^{2/3+n/3}, \quad (6)$$

в показатель  $N$  равен  $N = (2+n)/3$ . "Объемная" зависимость (5) объясняется тем, что при малых временах процесс "собирания" происходит в относительно малой области ядра, причем по порядку величины

$$\Delta Z \approx \frac{1}{a_2} \approx \text{const}(R).$$

Процесс в этом случае "локален". При больших временах  $W_A^{(n)} \sim A$ , так как  $\sigma_c$  - мало. Дальнейшее увеличение  $N$  с ростом  $n$  на  $1/3$  обусловлено тем, что вклад каждого порядка кумуляции пропорционален эффективному пробегу в ядре  $R \sim A^{1/3}$ .

Таким образом, при фиксированном значении  $E^{in}$  увеличение времени  $\bar{\tau}_0$  (т.е. увеличение допустимой степени диссипации энергии в компаунд-системе) для одного кумулятивного процесса по отношению к другому должно приводить к усилению  $A$  - зависимости инвариантного сечения, т.е. к росту  $N$ :

$$N = f(\bar{\tau}_0) \quad - \text{растущая функция.}$$

Реальная  $A$  - зависимость определяется значениями параметров модели  $\sigma_c$  и  $\bar{\tau}_0$ , установленными путем сравнения с данными по спектрам кумулятивных частиц.

В третьем параграфе исследуются угловые распределения кумулятивных частиц. Установлено, что эффектами поглощения кумулятивных частиц, рожденных в ядре, в процессе их прохождения через его толщю можно пренебречь в низших порядках кумуляции, поскольку в процессе "собирания" образуется канал с резко пониженной плотностью нуклонов. Показано также, что прохождение  $\pi$  - мезонов в канале, окруженном плотной поглощающей средой, может повлиять на их угловое распределение в результате проявления дифракционных эффектов.

В четвертом параграфе обсуждается качественное сравнение модели с некоторыми экспериментальными тенденциями. В частности, показано, что усиление выхода кумулятивных частиц с ростом  $A$  происходит интенсивнее для тех из них, которые вылетают с большими значениями  $T_\pi$  (так как для них  $r$  - больше).

В терминах аппроксимации  $R_A(T_\pi) \sim \exp(T_\pi/\tau_0)$ , которая часто используется для эмпирического описания спектра кумулятивных  $\pi$  - мезонов под углом  $180^\circ$ , это означает, что при фиксированной энергии  $E^{in}$  параметр  $\tau_0$ , вообще говоря, является растущей (по-видимому, слабо растущей) функцией от  $A$ .

Во второй главе диссертации сформулированная модель кумуляции сопоставляется с экспериментом и изучается поведение ее основных характеристик.

В первом параграфе модель "собрания" сопоставляется с экспериментальными данными. Уточнение параметров  $\sigma_c$  и  $\bar{\tau}_0$  проведено по данным, полученным в каком-либо частном случае процесса кумуляции. Затем их значения считаются известными и фиксированными. Наилучшее согласие с экспериментом достигается, если  $\sigma_c = 0,25 \sigma_{pp}^{in}$ ,  $\bar{\tau}_0 = 4 \cdot 10^{-24}$  с.

Во втором параграфе проведен анализ зависимости параметров модели от начальной энергии. Для этой цели использованы экспериментальные данные о

- а) кумулятивных  $\pi$ -мезонах в  $P+A \rightarrow \pi+X$  процессе,
- б) кумулятивных  $K^0$  и  $\Lambda^0$  - частицах,
- в) рождении частиц с большими  $P$  на ядрах при высоких энергиях.

Проведенный анализ позволил получить информацию о том, что в реакции столкновения адронов канал, идущий через образование единой компаунд-системы, не "вымирает" с ростом энергии. Его сечение при  $E_p^{in} > 6$  ГэВ приблизительно постоянно и находится на уровне  $0,25 \sigma_{pp}^{in}$ . Анализ также не противоречит положению о постоянстве параметра  $\bar{\tau}_0$ , связанного с временем жизни компаунд-системы, и отсутствии его зависимости от энергии столкновения при достаточно высоких энергиях. Это приводит к постоянству длины взаимодействия адронов в системе центра масс для процессов кумулятивного типа.

В третьем параграфе на основе полученной информации о поведении параметров модели для выяснения степени общности (в рамках принятых приближений) области применимости и для возможных уточнений изложенной картины кумулятивных процессов проведены расчеты - предсказания для инвариантных сечений рождения в процессах, еще не изученных экспериментально. Обсуждается рождение кумулятивных  $K^\pm$ -мезонов и антипротонов в процессе  $P+A \rightarrow (\tilde{P}, K^\pm) + X$  при  $P_p^{in} = 8,6$  ГэВ/с.

Сделаны предсказания для рождения кумулятивных векторных мезонов и гиперонов, а также для процесса  $P+A \rightarrow (\pi, K, \tilde{P}) + X$  при  $P_p^{in} = 400$  ГэВ/с. Недавние эксперименты по рождению кумулятивных  $\pi^-$ -мезонов при батавских энергиях подтверждают сделанные предсказания.

В четвертом параграфе исследовано влияние ядерной среды на выход кумулятивных частиц при больших порядках кумуляции  $n$ . Показано, что в величину инвариантного сечения рожденных частиц могут давать вклады дополнительные эффекты (взаимное отталкивание нуклонов на малых расстояниях и эффект "поглощения").

В пятом параграфе исследован вопрос о степени коллективизации взаимодействия релятивистских адронов с ядрами. На основе анализа данных по кумулятивному мезонообразованию и образованию частиц с большими поперечными импульсами на ядрах показано, что используемый в некоторых работах упрощенный механизм когерентного взаимодействия адрона с нуклонами трубки в рассматриваемой области энергий не реализуется.

В третьей главе показано, что пространственно-временная формулировка феноменологической модели кумулятивных процессов, основанной на схеме "собрания" адронов в единую компаунд-систему, может быть с успехом использована для интерпретации других процессов кумулятивного типа.

В первом параграфе рассмотрены процессы с участием дейтрона, в которых также проявляются эффекты кумуляции. Это процессы типа

$$(P, d) \rightarrow \pi^-(\theta = 180^\circ) + X$$

и

$$(d, A) \rightarrow \pi(\theta = 0^\circ) + X.$$

Во втором параграфе изложенный в диссертации механизм кумуляции применяется для интерпретации упругого  $(P, d)$ -рассеяния назад. В этом случае рассматривается распад "собранный" компаунд-системы в начальный канал.

В третьем параграфе изучается эффект подпорогового рождения антипротонов на ядрах. Представленные результаты получены при значениях параметров, которые позволяют описать и кумулятивное мезонообразование, т.е. проявляется родство обоих процессов, как процессов, протекающих вблизи предельных значений кинематических переменных.

В четвертом параграфе исследованы другие возможные проявления кумулятивного эффекта в таких процессах, какими являются образование "сверхзвезд", корреляция кумулятивных  $\pi$ -мезонов с явлением "полного развала" ядра-мишени. Результаты этого параграфа носят в основном качественный, предсказательный характер.

В заклучении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Б.Н.Калинкин, А.В.Чербу, В.Л.Шмонин. О механизме кумулятивных процессов. - Препринт ОИЯИ, P2-10783, 16 с., Дубна, 1977, Acta Phys. Pol., B9, No 5, p. 375-383, 1978.

Б.Н.Калинкин, А.В.Чербу, В.Л.Шмонин. Кумулятивные эффекты в процессах с участием дейтрона. - Препринт ОИЯИ, P2-10785, 16 с., Дубна, 1977, Acta Phys. Pol. B9, No 5, p. 385-392, 1978.

- Б.Н.Калинкин, А.В.Чербу, В.Л.Шмонин. Подпороговое рождение антипротонов на ядрах. - Препринт ОИЯИ, P2-10784, 15 с. Дубна, 1977.  
Acta Phys. Pol. B9, No 5, p. 393-400, 1978.
- Б.Н.Калинкин, А.В.Чербу, В.Л.Шмонин. К изучению общих свойств инклюзивного спектра частиц в коллективном взаимодействии адронов. - Препринт ОИЯИ, P2-11621, 15 с., Дубна, 1978,  
Acta Phys. Pol. B10, No 3, p. 255-261, 1979.
- Б.Н.Калинкин, А.В.Чербу, В.Л.Шмонин. К вопросу о степени коллективизации взаимодействия релятивистских адронов с ядрами. - Препринт ОИЯИ, P2-11622, Дубна, 1978, 14 с.,  
Acta Phys. Pol., B10, No 3, p. 247-253, 1979.
- Б.Н.Калинкин, А.В.Чербу, В.Л.Шмонин. О пространственно-временных характеристиках кумулятивных процессов. - Препринт ОИЯИ P2-11802, 18 с., Дубна, 1978.
- B.N.Kalinkin, A.V.Chербу, V.L.Shmonin. On the range of applicability of space-time "gathering" mechanism of cumulative processes.- JINR, E2-12209, Dubna, 1979.
- B.N.Kalinkin, A.V.Chербу, V.L.Shmonin. Space-time approach to the description of cumulative-type processes.- Fortschritte der Physik, 28, p. 35-65, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 декабря 1981 года