

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

K-19

P1-88-30

Т. Канарек, Е. Н. Кладницкая, Г. П. Тонеева\*,  
Р. Тогоо

СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ И  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ  
В СС-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
ПРИ ИМПУЛЬСЕ 4,2 ГэВ/с на нуклон

Направлено в журнал "Ядерная физика"

---

\* Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена анализу спектров протонов и  $\pi^-$ -мезонов в лабораторной системе в угловом интервале от 0 до  $180^\circ$  во взаимодействиях ядер углерода с импульсом 4,2 ГэВ/с на нуклон с углеродной мишенью. Представленные спектры охватывают практически полный интервал импульсов протонов и отрицательных пионов, кинематически доступный для исследуемых СС-взаимодействий.

В экспериментах по изучению ядро-ядерных соударений, проводившихся на дубненском синхрофазотроне, анализировались распределения протонов и  $\pi^-$ -мезонов из области фрагментации либо ядрамишени<sup>/1-4/</sup>, либо ядра-снаряда<sup>/5-7/</sup>. Спектры протонов в широком интервале импульсов и углов получены во взаимодействиях ядер меньших энергий (до 2,1 ГэВ) на ускорителе Бэвалак (см., например, <sup>/8/</sup>).

Исследованию спектров протонов в интервале до 1 ГэВ/с в адрон-ядерных взаимодействиях посвящены эксперименты, выполненные в ИТЭФ (см., например, работу<sup>/9/</sup> и ссылки в ней).

Новые результаты измерения инвариантных сечений реакций  $pA \rightarrow pX$  и  $pA \rightarrow \pi^+X$  для импульсов вторичных протонов и  $\pi^-$ -мезонов в интервалах  $0,6 \div 1,83$  ГэВ/с и  $0,6 \div 1,62$  ГэВ/с соответственно под углом  $119^\circ$  при энергии первичных протонов 10 ГэВ приведены в работах<sup>/10/</sup>.

Инклюзивные распределения протонов и  $\pi^-$ -мезонов по кинематическим переменным в СС-взаимодействиях при 4,2 ГэВ/с на нуклон опубликованы в<sup>/11, 12/</sup>.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Использованы стереофотографии, полученные при облучении двухметровой пропановой лузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ ядрами углерода с импульсом 4,2 ГэВ/с на нуклон.

Взаимодействия на ядре углерода отбирались из всех событий в пропане согласно описанной ранее методике<sup>/11/</sup>. Всего было отобрано 3342 события.

На снимках с пропановой камеры эффективность идентификации протонов близка к 100% лишь для интервала импульсов  $0,15 \div 0,5$  ГэВ/с. Протоны с импульсом  $P_{\text{lab}} < 0,15$  ГэВ/с в камере не видны из-за малого пробега ( $< 2$  мм). Для получения спектра протонов в интервале импульсов выше 0,5 ГэВ/с использовалась следующая процедура:

из распределений однозарядных положительных частиц, куда входят протоны (с примесью дейтронов и ядер трития) и  $\pi^+$ -мезоны с  $P_{\text{лаб}} > 0,5$  ГэВ/с, вычитались распределения  $\pi^-$ -мезонов с  $P_{\text{лаб}} > 0,5$  ГэВ/с. Для СС-взаимодействий такой подход вполне правомерен, поскольку спектры  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов должны совпадать. Примесь дейтронов и ядер трития среди однозарядных фрагментов составляет не более  $10 \div 15\%$  <sup>8,13</sup>. Из спектров были исключены стриппинговые фрагменты ядра-снаряда ( $P_{\text{лаб}} > 3$  ГэВ/с и  $\theta_{\text{лаб}} < 4^\circ$ ) и ядра-мишени ( $P_{\text{лаб}} < 0,3$  ГэВ/с) <sup>11</sup>. Все отрицательные частицы в отобранных СС-взаимодействиях считались  $\pi^-$ -мезонами. В пропановой камере  $\pi^-$ -мезоны надежно идентифицируются с импульсом  $P_{\text{лаб}} > 0,07$  ГэВ/с. В дальнейшем анализе использовано  $\sim 15000$  протонов и  $\sim 6000$   $\pi^-$ -мезонов\*.

### ИМПУЛЬСНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТОНОВ

Зависимости инвариантных сечений выхода протонов  $\sigma_{\text{ИНВ}} = E/P^2 d^2\sigma/dp d\Omega$  от их импульса в лабораторной системе для фиксированных угловых интервалов показаны на рис.1-3. Видно, что форма спектров существенно зависит от угла вылета протонов. При малых углах ( $5 \div 10^\circ$ ) инвариантное сечение протонов слабо меняется вплоть до 4 ГэВ/с, т.е. до величины, соответствующей импульсу на нуклон ядра-снаряда. Выше 4 ГэВ/с спектр экспоненциально убывает. Появление в СС-взаимодействиях протонов с импульсами, превышающими импульс нуклона в налетающем ядре (в нашем случае доля таких протонов составляет  $(10 \pm 1)\%$ ), обсуждалось в работе <sup>11</sup>.

Для  $\theta_{\text{лаб}}$  выше  $10^\circ$  спектры принимают спадающий вид и могут быть аппроксимированы экспонен-

циальной функцией.

Рис.1. Инвариантные сечения выхода протонов в интервалах углов  $5^\circ \div 10^\circ$  (O),  $10^\circ \div 20^\circ$  (●) и  $20^\circ \div 30^\circ$  (x) в зависимости от импульса протонов.

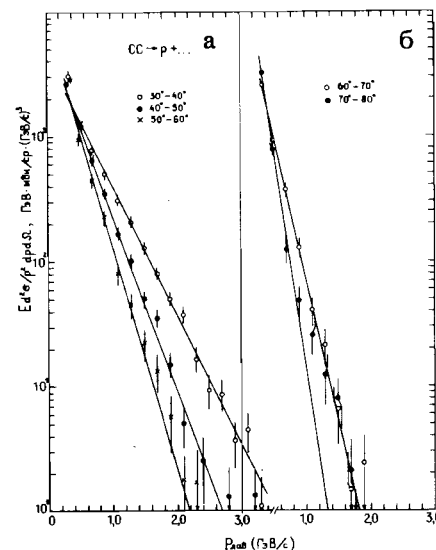
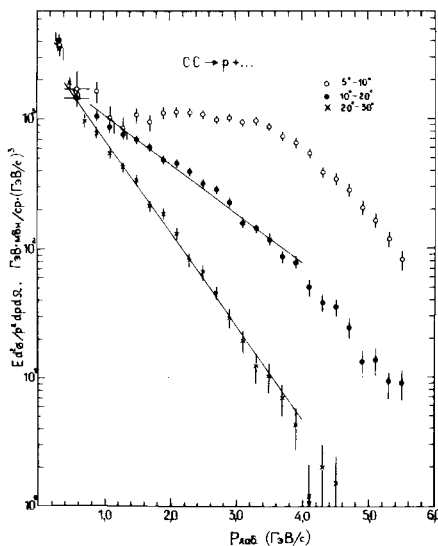


Рис.2. Инвариантные сечения выхода протонов в интервалах углов  $30^\circ \div 40^\circ$  (O),  $40^\circ \div 50^\circ$  (●),  $50^\circ \div 60^\circ$  (x) (a);  $60^\circ \div 70^\circ$  (O),  $70^\circ \div 80^\circ$  (●) (б) в зависимости от импульса протонов.

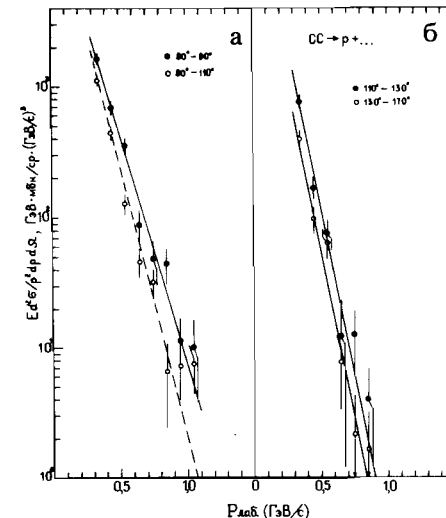


Рис.3. Инвариантные сечения выхода протонов в интервалах  $80^\circ - 90^\circ$  (●),  $90^\circ \div 110^\circ$  (O) (a);  $110^\circ \div 130^\circ$  (●),  $130^\circ \div 180^\circ$  (O) (б) в зависимости от импульса протонов.

Таблица

Интервал $\theta_{\text{лаб}}$ , град	Интервал $P_{\text{лаб}}$ , ГэВ/с	$P_0^p$ , ГэВ/с	$\chi^2/\text{ст.св.}$	Интервал $P_{\text{лаб}}$ , ГэВ/с	$P_0^{\pi^-}$ , ГэВ/с	$\chi^2/\text{ст.св.}$
10-20	0,8-4,0	$1,14 \pm 0,03$	1,4	0,5-2,6	$0,36 \pm 0,01$	1,2
20-30	0,4-4,0	$0,60 \pm 0,01$	0,9	0,1-2,3	$0,31 \pm 0,01$	1,8
30-40	0,3-3,4	$0,42 \pm 0,01$	1,0	0,1-1,8	$0,26 \pm 0,01$	1,1
40-50	0,3-2,8	$0,31 \pm 0,01$	1,2	0,1-1,5	$0,21 \pm 0,01$	0,6
50-60	0,3-2,4	$0,24 \pm 0,01$	1,8	0,1-1,3	$0,156 \pm 0,005$	2,6
60-70	0,3-2,0	$0,19 \pm 0,01$	0,7	0,1-1,1	$0,138 \pm 0,006$	0,6
70-80	0,3-1,6	$0,12 \pm 0,01$	3,9	0,1-1,1	$0,121 \pm 0,007$	1,0
80-90	0,3-1,1	$0,12 \pm 0,01$	1,2	0,1-0,9	$0,104 \pm 0,007$	1,3
90-110	0,3-1,1	$0,101 \pm 0,005$	1,7	0,1-0,7	$0,085 \pm 0,005$	0,9
110-130	0,3-0,9	$0,081 \pm 0,007$	1,3	0,1-0,6	$0,074 \pm 0,005$	1,4
130-180	0,3-0,9	$0,082 \pm 0,007$	1,2	0,1-0,5	$0,056 \pm 0,004$	1,1

\*  $\pi^-$ -мезоны взяты из несколько большей статистики СС-событий, чем протоны.

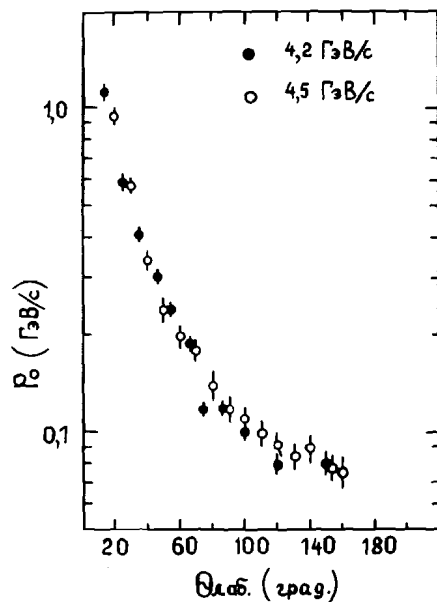
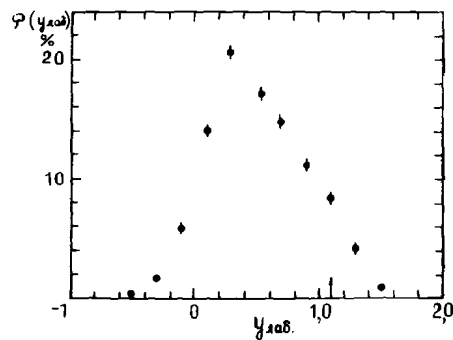


Рис.4. Зависимость параметра  $P_0^P$  (см. текст) от угла вылета протонов. ● — данные настоящей работы, ○ — результаты работы<sup>3/</sup>.

Рис.5. Распределение по продольной быстрой скорости протонов, вылетающих под углами  $\theta_{\text{лаб}} > 20^\circ$ . Стрелкой показано значение  $u_{\text{лаб}}$  для системы центра масс нуклон — нуклон.



той вида  $\sigma_{\text{инв}} = A \exp(-P/P_0^P(\theta))$ . Значения параметра  $P_0^P(\theta)$ , интервалы  $P_{\text{лаб}}$ , по которым проводилась аппроксимация, и значения  $\chi^2$  на степень свободы для фиксированных угловых интервалов приведены в таблице. На рис.1-3 результаты фита показаны прямыми линиями. Значения  $P_0^P(\theta)$  уменьшаются с увеличением угла испускания протонов примерно до  $110^\circ$ , а далее, в пределах ошибок, остаются постоянными. Полученная в нашем эксперименте зависимость  $P_0^P$  от  $\theta_{\text{лаб}}$  ( $\theta_{\text{лаб}} > 20^\circ$ ) для спектров протонов совпадает с зависимостью  $P_0^P$  от угла вылета протонов, полученной в работе<sup>3/</sup> при описании спектров протонов в интервале  $350 \div 900$  МэВ/с для СС-взаимодействий при 4,5 ГэВ/с на нуклон (рис.4).

Распределение протонов, вылетающих под углами  $\theta_{\text{лаб}} > 20^\circ$  по продольной быстрой скорости (рис.5), показывает, что анализируемые нами спектры в указанном угловом интервале содержат протоны не только из области фрагментации ядра-мишени, но частично и из центральной области, куда входят протоны из обоих сталкивающихся ядер.

### ИМПУЛЬСНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ $\pi^-$ -МЕЗОНОВ

Инвариантные сечения выхода  $\pi^-$ -мезонов в СС-соударениях в зависимости от импульса в лабораторной системе показаны на рис.6-8. При малых углах вылета  $\pi^-$ -мезонов сечения мало меняются для  $P_{\text{лаб}}$  до 1 ГэВ/с, а потом быстро убывают.

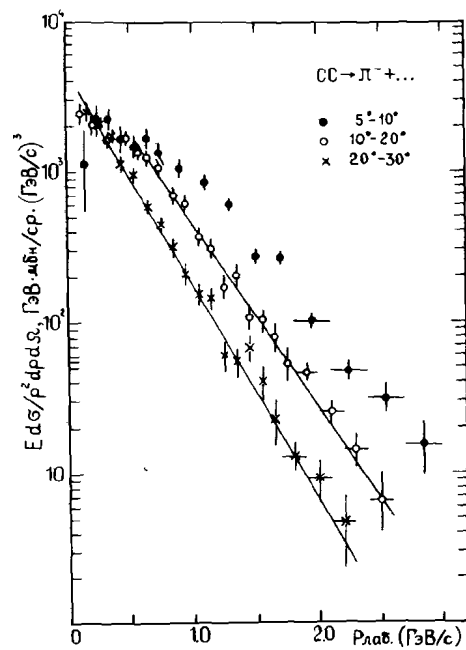


Рис.7. То же, что на рис.6, для угловых интервалов  $30^\circ \div 40^\circ$  (●),  $40^\circ \div 50^\circ$  (○),  $50^\circ \div 60^\circ$  (×).

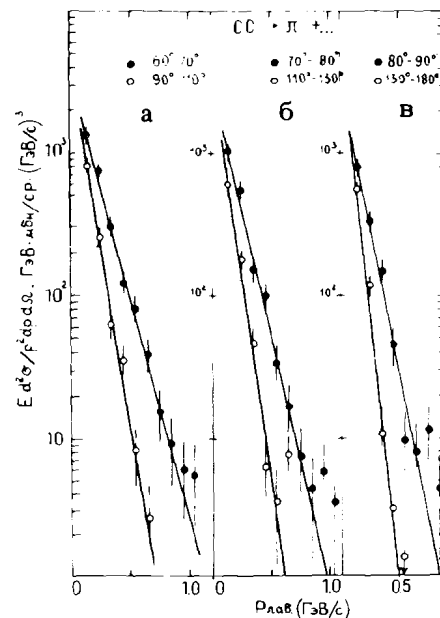


Рис.6. Инвариантные сечения выхода  $\pi^-$ -мезонов в интервалах углов  $5^\circ \div 10^\circ$  (●),  $10^\circ \div 20^\circ$  (○),  $20^\circ \div 30^\circ$  (×), в зависимости от импульса  $\pi^-$ -мезонов.

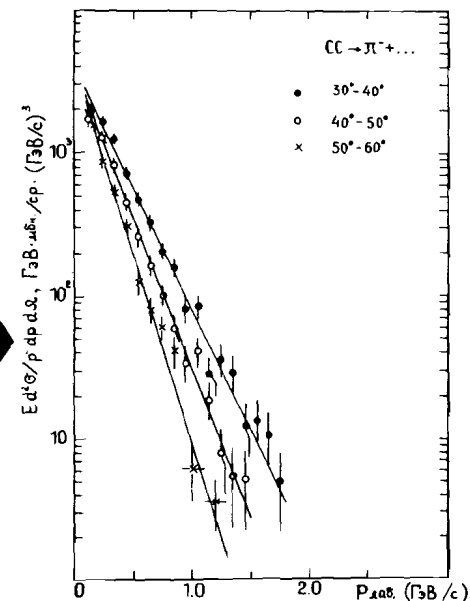


Рис.8. То же, что на рис.6, для угловых интервалов  $60^\circ \div 70^\circ$  (●),  $90^\circ \div 110^\circ$  (○) а);  $70^\circ \div 80^\circ$  (●),  $110^\circ \div 130^\circ$  (○) (б);  $80^\circ \div 90^\circ$  (●),  $130^\circ \div 180^\circ$  (○) (в).

Выше  $20^\circ$  спектры  $\pi^-$ -мезонов экспоненциально спадают с увеличением  $R_{\text{лаб}}$ . Так же, как и для протонов, спадание усиливается по мере возрастания  $\theta_{\text{лаб}}$ . Аппроксимация инвариантных сечений функций  $\sigma_{\text{инв}} = a \exp(-R/R_0^{\pi^-}(\theta))$  дала значения  $R_0^{\pi^-}$ , представленные в таблице. Параметры  $R_0^{\pi^-}$  убывают вплоть до самых больших углов, однако убывание идет медленнее, чем у параметра  $R_0^p$ . Значения  $R_0^{\pi^-}$  меньше величины  $R_0^p$  для небольших углов, по мере увеличения  $\theta_{\text{лаб}}$  эти параметры сближаются и в угловом диапазоне  $70 \div 80^\circ$  совпадают. Для углов выше  $80^\circ$   $R_0^p$  и  $R_0^{\pi^-}$  близки между собой, хотя  $R_0^{\pi^-}$  систематически меньше  $R_0^p$  (см. таблицу).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во взаимодействиях ядер углерода с углеродной мишенью при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон спектры всех протонов с  $R_{\text{лаб}} > 0,3$  ГэВ/с, испускаемых под углами  $\theta_{\text{лаб}} > 20^\circ$  (это 45% протонов), могут быть описаны экспонентой вида  $\sigma_{\text{инв}} = A \exp(-R/R_0^p(\theta))$ . Значения параметров  $R_0^p(\theta)$  убывают с увеличением угла вылета протонов от  $20^\circ$  до  $110^\circ$ , а в интервале  $110^\circ \div 180^\circ$  остаются постоянными.

Значения параметров  $R_0^p(\theta)$  при соответствующих углах совпадают с величинами  $R_0^p(\theta)$ , полученными в работе<sup>/3/</sup> при описании спектров протонов в ограниченном интервале импульсов ( $350 \div 900$  МэВ/с) в СС-взаимодействиях при импульсе 4,5 ГэВ/с на нуклон.

При фиксированном угле вылета ( $\theta_{\text{лаб}} > 20^\circ$ ) одной экспонентой описывается импульсный спектр, включающий протоны не только от фрагментации ядра-мишени, но и частично из центральной области по продольной быстрой, куда попадают протоны от фрагментации обоих сталкивающихся ядер.

Спектры  $\pi^-$ -мезонов ( $R_{\text{лаб}} > 0,1$  ГэВ/с) из тех же СС-соударений при углах  $\theta_{\text{лаб}} > 20^\circ$  (это 68% всех  $\pi^-$ -мезонов) также описываются экспонентой с параметрами  $R_0^{\pi^-}(\theta)$ , убывающими с увеличением  $\theta_{\text{лаб}}$  от  $20^\circ$  до  $180^\circ$ . Значения параметров  $R_0^{\pi^-}$  меньше величин  $R_0^p$  в соответствующих угловых интервалах до  $\theta_{\text{лаб}} = 70^\circ$ . Для углов выше  $70^\circ$  значения  $R_0^p$  и  $R_0^{\pi^-}$  близки между собой.

Подобное соотношение параметров  $R_0^p$  и  $R_0^{\pi^-}$  для углов больше  $90^\circ$  наблюдалось в протон-ядерных взаимодействиях, например в  $pA$  -соударениях при 8,9 ГэВ/с<sup>/2/</sup> и 10 ГэВ<sup>/10/</sup>. При этом сами параметры  $R_0^p$  и  $R_0^{\pi^-}$ , определенные нами, в пределах  $\sim 10\%$  погрешностей совпадают с соответствующими параметрами из работ<sup>/2,10/</sup>.

Авторы работы<sup>/3/</sup> уже отмечали, что имеет место подобие формы спектров протонов в области углов  $\theta_{\text{лаб}} > 90^\circ$  как для протон-ядерных (4 ГэВ/с<sup>/14/</sup> и 7,5 ГэВ/с<sup>/15/</sup>), так и для ядро-ядерных взаимодействий при 4,5 ГэВ/с на нуклон.

Из сравнения наших результатов с данными работ<sup>/2/</sup> и <sup>/10/</sup> аналогичное заключение можно сделать относительно спектров  $\pi^-$ -мезонов, испускаемых под углами  $\theta_{\text{лаб}} > 90^\circ$ .

Авторы выражают благодарность Е.Бартке за полезные обсуждения, участникам сотрудничества по исследованию на двухметровой пропановой камере за получение экспериментального материала, лаборантам за просмотр пленок и измерение событий, И.И.Зайцевой, Э.В.Сафроновой за помощь в оформлении рукописи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ставинский В.С. – ЭЧАЯ, 1979, т.10, вып.3, с.949.
2. Baldin A.M. et al. JINR, E1-82-472, Dubna, 1982;  
Балдин А.М. и др. ОИЯИ, P1-83-432, Дубна, 1983.
3. Адыяевич Б.П. и др. – ЯФ, 1984, т.40, в.2(8), с.495.
4. Аникина М.Х. – ЯФ, 1984, т.40, с.489.
5. Abdurakhimov A.U. JINR, E1-12730, Dubna, 1979; Nucl.Phys.A, 1981, v.362, p.376.
6. Глаголев В.В. и др. ОИЯИ, 1-80-244, Дубна, 1980; ОИЯИ, P1-85-149, Дубна, 1985.
7. Ableev V.G. et al. – Nucl.Phys.A, 1983, v.393, p.491.
8. Nagamija S. et al. – Phys.Rev.C, 1981, v.24, p.971.
9. Бургов Н.А. и др. – ЯФ, 1976, т.24, вып.6, с.1183.
10. Бояринов С.В. и др. – ИТЭФ, 86-130, М.: ЦНИИАтоминформ, 1986;  
ИТЭФ, 87-5, М.: ЦНИИАтоминформ, 1987.
11. Армутлийски Д. и др. ОИЯИ, P1-86-263, Дубна, 1986;  
ЯФ, 1987, т.45, вып.4, с.1047.
12. Агакишиев Г.Н. и др. ОИЯИ, P1-84-35, Дубна, 1984;  
ЯФ, 1984, т.40, с.1209.
13. Adjasevich B.P. et al. IAE-4148/2, Moscow, 1985.
14. Nakai K. et al. – Phys.Lett., 1983, v.121B, N6, p.373.
15. Баюков Ю.Д. и др. – ЯФ, 1985, т.42, вып.1(7), с.185;  
ЯФ, 1985, т.42, вып.2(8), с.377.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 января 1988 года.