

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



0-927

P1 - 8199

9/xii-74

Л.С.Охрименко, Б.Словинский, З.Стругальский

4717/2-74

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДОЛЬНОГО РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫХ ЛИВНЕЙ,
ВЫЗВАННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ 30, 50, 70, 100 И 120 МЭВ
В ЖИДКОМ КСЕНОНЕ

1974

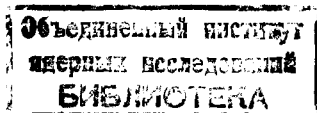
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P1 - 8199

Л.С.Охрименко, Б.Словинский, З.Стругальский

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДОЛЬНОГО РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫХ ЛИВНЕЙ,
ВЫЗВАННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ 30, 50, 70, 100 И 120 МЭВ
В ЖИДКОМ КСЕНОНЕ

Направлено в ЯФ



Охрименко Л.С., Словинский Б., Стругальский З.С. P1 - 8199

Характеристики продольного развития электронно-фотонных ливней, вызванных гамма-квантами с энергией 30, 50, 70, 100, 120 МэВ в жидком ксеноне

Приведены исследования длин развития, суммарных пробегов ливневых электронов, а также соответствующих флуктуаций в ливнях, вызванных гамма-квантами с энергией 30, 50, 70, 100, 120 МэВ в жидком ксеноне. Обнаружено свойство масштабности в интегральных каскадных кривых и изученной зависимости флуктуаций от доли суммарной длины пробега ливневых электронов.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1974

Okhrimenko L.S., Słowiński B., Strugałski Z.S. P1 - 8199

Characteristics of the Longitudinal Development of the Electron-Photon Showers Induced by the γ -Quanta of 30, 50, 70, 100 and 120 MeV in Liquid Xenon

The results are presented of investigations of the development lengths, the total ranges of shower electrons and corresponding fluctuations in the showers induced by the γ -quanta of 30, 50, 70, 100 and 120 MeV in liquid xenon. The scaling property is revealed in the integral cascade curves and in a studied dependence of fluctuations on the part of the shower electron total range.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1974

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования длин развития ливней и суммарной длины следов ливневых электронов, а также соответствующих дисперсий в ливнях, вызванных гамма-квантами с энергией 30, 50, 70, 100 и 120 МэВ в жидком ксеноне. Кроме самостоятельного значения полученные результаты нужны, с методической точки зрения, например, для определения эффективности регистрации гамма-квантов в зависимости от точности измерения их энергии ^{1/}.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В итоге просмотра около 15 000 снимков с ксеноновой пузырьковой камеры ^{2/}, облученной в пучке π^- -мезонов с импульсом 3,5 ГэВ/с, было выбрано 232 случая электронно-фотонных ливней от гамма-квантов с энергиями 30-120 МэВ. Критерии отбора те же, что и в наших прежних работах ^{4-6/}. С целью определения энергии гамма-квантов проводилась полная идентификация всех следов частиц, относящихся к ливню, вызванному этими гамма-квантами. Энергия ливня определялась по длинам электронных пробегов как сумма энергий всех принадлежащих ему электронов. Для этого использовалась зависимость между длинами пробегов электронов и их энергиями, пересчитанная для жидкого ксенона ^{3/}. Минимальная регистрируемая длина следа составляла около 1,5 мм

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

в камере, что соответствует энергии электронов около 0,5 МэВ. В табл. 1 приведены числа N_{Λ} выбранных случаев ливней, соответствующих разным значениям энергии E_{γ} инициирующих их гамма-квантов.

Таблица 1

Числа N_{Λ} выбранных случаев ливней и соответствующие им значения энергий E_{γ} гамма-квантов

E_{γ} /МэВ/	30±5	50±5	70±5	100±5	120±10
N_{Λ}	41	51	59	33	48

В каждом из этих случаев измерялись: длины пробегов отдельных ливневых электронов, соответствующие данным глубинам развития ливней t , с шагом $\Delta t = 1$ см, в плоскости проекции снимка.

Как было показано^{/4÷6/}, при изучении электронно-фотонных ливней удобно пользоваться параметром A , представляющим собой долю суммарного пробега электронов ливня, наблюдаемую на длине d_A его развития, отсчитываемой от точки конверсии инициирующего лавину гамма-кванта. Целесообразно также ввести так называемую среднюю длину $\langle d \rangle$ развития ливня, определяемую следующим образом:

$$\langle d \rangle = \frac{1}{n \cdot N_{\Lambda}} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{N_{\Lambda}} d_{A_j}^{(i)}, \quad /1/$$

где $d_{A_j}^{(i)}$ - длина развития i -того ливня, соответствующая

доле A_j суммарного пробега электронов лавины, n - число делений Δt случаев ливней, зарегистрированных на снимке камеры, при которых изучались величины $d_{A_j}^{(i)}$ и A_j .

Ниже приведены результаты измерений, касающиеся длин развития ливней, суммарной и частичных длин пробегов ливневых электронов, флуктуаций суммарного пробега ливневых электронов и флуктуаций длин развития ливней.

А. Длина развития ливня

В табл. 2 приведены значения средних длин $\langle d \rangle$ развития ливней, вызванных гамма-квантами с энергией 30, 50, 70, 100 и 120 МэВ в жидком ксеноне. Даны также соответствующие значения дисперсии $\sigma_{\langle d \rangle}$ и отношений $\sigma_{\langle d \rangle} / \langle d \rangle$.

Для наглядности зависимость средней длины $\langle d \rangle$ развития ливней от энергии E_{γ} создающих их гамма-квантов представлена также на рис. 1.

Б. Суммарная длина пробегов ливневых электронов

В табл. 3 даны средние значения $\bar{d}_A / \langle d \rangle$ частичных длин развития, деленных на среднее значение длины развития $\langle d \rangle$ при разных значениях параметра A , для всех значений энергий изучаемых ливней. Графически эта зависимость представлена на рис. 2.

В. Флуктуация суммарного пробега ливневых электронов

На рис. 3 представлена зависимость относительных дисперсий σ_A / \bar{A} суммарного пробега ливневых электронов, соответствующего длине частичного развития ливней, на которой наблюдается в среднем доля \bar{A} полного пробега электронов. Приведенные данные относятся к пяти значениям энергии E_{γ} гамма-квантов, вызывающих ливни в жидком ксеноне: 30, 50, 70, 100 и 120 МэВ.

Таблица 2
Значения средних длин $\langle d \rangle$ развития ливней, соответствующих им дисперсий $\sigma_{\langle d \rangle}$ и отношений $\sigma_{\langle d \rangle} / \langle d \rangle$ при разных энергиях E_γ гамма-квантов

E_γ (МэВ)	30 ± 5	50 ± 5	70 ± 5	100 ± 5	120 ± 10
$\langle d \rangle$ (см)	$1,50 \pm 0,05$	$2,06 \pm 0,08$	$2,76 \pm 0,11$	$3,47 \pm 0,16$	$3,69 \pm 0,14$
$\sigma_{\langle d \rangle}$ (см)	1,09	1,71	2,73	2,99	2,98
$\sigma_{\langle d \rangle} / \langle d \rangle$	$0,73 \pm 0,03$	$0,83 \pm 0,04$	$0,99 \pm 0,04$	$0,86 \pm 0,05$	$0,81 \pm 0,04$

Таблица 3.

Средние значения $\bar{d}_\lambda / \langle d \rangle$ частичных длин \bar{d}_λ развития ливней, отнесенных к соответствующим средним длинам $\langle d \rangle$ ливней, при разных значениях доли A суммарного пробега ливневых электронов в ливнях, вызванных гамма-квантами с энергией E_γ .

E_γ / МэВ	A	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
30	0,16±0,02	0,35±0,03	0,52±0,04	0,68±0,05	0,82±0,06	1,00±0,07	1,20±0,09	1,43±0,10	1,69±0,11	2,12±0,14	
50	0,16±0,01	0,31±0,02	0,47±0,03	0,68±0,05	0,84±0,08	1,01±0,08	1,23±0,09	1,42±0,10	1,73±0,14	2,15±0,15	
70	0,15±0,01	0,30±0,02	0,45±0,03	0,61±0,04	0,70±0,07	1,03±0,10	1,27±0,13	1,51±0,15	1,76±0,17	2,22±0,19	
100	0,17±0,01	0,32±0,03	0,46±0,04	0,62±0,05	0,78±0,07	0,96±0,09	1,17±0,10	1,46±0,13	1,89±0,21	2,17±0,22	
120	0,18±0,01	0,34±0,02	0,53±0,05	0,70±0,07	0,83±0,08	1,02±0,09	1,19±0,09	1,43±0,11	1,70±0,14	2,09±0,15	

Таблица 2
Значения средних длин $\langle d \rangle$ развития ливней, соответствующих им дисперсий $\sigma_{\langle d \rangle}$ и отношений $\sigma_{\langle d \rangle} / \langle d \rangle$ при разных энергиях E_γ гамма-квантов

E_γ (МэВ)	30 \pm 5	50 \pm 5	70 \pm 5	100 \pm 5	120 \pm 10
$\langle d \rangle$ (см)	1,50 \pm 0,05	2,06 \pm 0,08	2,76 \pm 0,11	3,47 \pm 0,16	3,69 \pm 0,14
$\sigma_{\langle d \rangle}$ (см)	1,09	1,71	2,73	2,99	2,98
$\sigma_{\langle d \rangle} / \langle d \rangle$	0,73 \pm 0,03	0,83 \pm 0,04	0,99 \pm 0,04	0,86 \pm 0,05	0,81 \pm 0,04

Таблица 3.

Средние значения $d_n / \langle d \rangle$, частных длин d_n развития ливней, отнесенных к соответствующим средним длинам $\langle d \rangle$ ливней, при разных значениях доли A суммарного пробега ливневых электронов в ливнях, выделенных гамма-квантами с энергией E_γ .

E_γ / A МэВ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
30	0,18 \pm 0,02	0,35 \pm 0,03	0,52 \pm 0,04	0,68 \pm 0,05	0,82 \pm 0,06	1,00 \pm 0,07	1,20 \pm 0,09	1,43 \pm 0,10	1,69 \pm 0,11	2,12 \pm 0,14
50	0,16 \pm 0,01	0,31 \pm 0,02	0,47 \pm 0,03	0,66 \pm 0,05	0,84 \pm 0,08	1,01 \pm 0,08	1,23 \pm 0,09	1,42 \pm 0,10	1,73 \pm 0,14	2,15 \pm 0,15
70	0,15 \pm 0,01	0,30 \pm 0,02	0,45 \pm 0,03	0,61 \pm 0,04	0,70 \pm 0,07	1,03 \pm 0,10	1,27 \pm 0,13	1,51 \pm 0,15	1,78 \pm 0,17	2,22 \pm 0,19
100	0,17 \pm 0,01	0,32 \pm 0,03	0,46 \pm 0,04	0,62 \pm 0,05	0,78 \pm 0,07	0,96 \pm 0,09	1,17 \pm 0,10	1,46 \pm 0,13	1,89 \pm 0,21	2,17 \pm 0,22
120	0,18 \pm 0,01	0,34 \pm 0,02	0,53 \pm 0,05	0,70 \pm 0,07	0,88 \pm 0,08	1,02 \pm 0,09	1,19 \pm 0,09	1,43 \pm 0,11	1,70 \pm 0,14	2,09 \pm 0,15

Можно заметить, что при всех значениях E_γ зависимость σ_A / \bar{A} от A одна и та же, в пределах достигнутой точности эксперимента. Характер этой зависимости аналогичен, как и при более высоких энергиях гамма-квантов, образующих ливни в жидком ксеноне^[3,4], однако значения σ_A / \bar{A} , относящиеся к изучаемому диапазону энергий 30 ÷ 120 МэВ, заметно выше.

Г. Флуктуации длины развития ливней

На рис. 4 дано распределение по параметру A относительных дисперсий σ_d / \bar{d}_A длин частичного развития ливней, на которых в среднем выделяется доля \bar{A} сум-

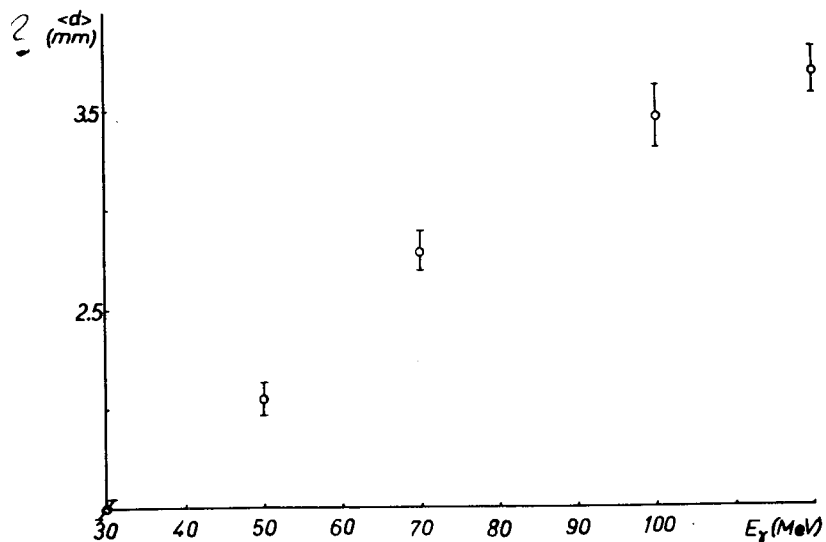


Рис. 1. Зависимость средней длины $\langle d \rangle$ развития ливней от энергии E_γ гамма-квантов, образующих ливни в жидком ксеноне.

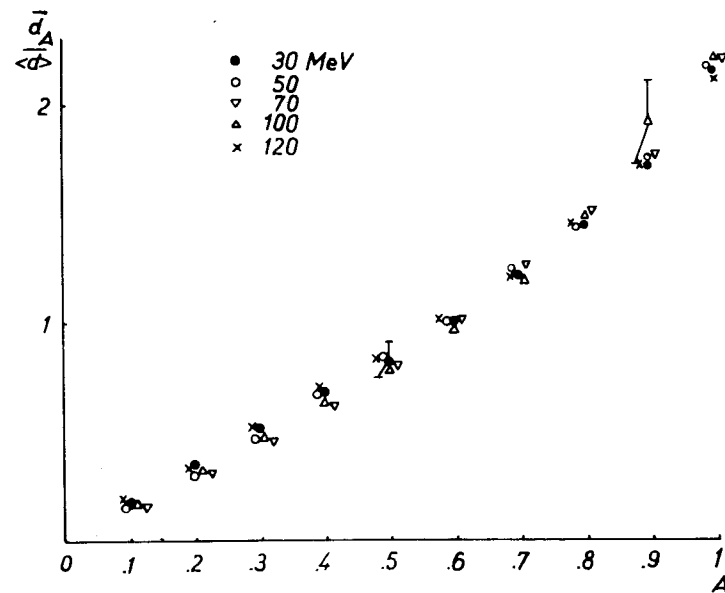


Рис. 2. Зависимость длины $\bar{d}_A / \langle d \rangle$ развития ливней, на которой выделяется в среднем доля A суммарного пробега ливневых электронов, от параметра A , для ливней, инициируемых в жидком ксеноне гамма-квантами с энергией E_γ : \bullet - 30 МэВ, \circ - 50 МэВ, ∇ - 70 МэВ, Δ - 100 МэВ и \times - 120 МэВ.

марного пробега ливневых электронов. Данные относятся к пяти изученным значениям энергии E_γ : 30, 50, 70, 100 и 120 МэВ гамма-квантов, инициирующих ливни в жидком ксеноне.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из полученных экспериментальных данных /табл. 2/ следует, что средняя длина развития ливня $\langle d \rangle$ увеличивается с ростом энергии E_γ гамма-квантов, причем это увеличение заметно замедляется в области больших значений E_γ . Также растет с увеличением энергии

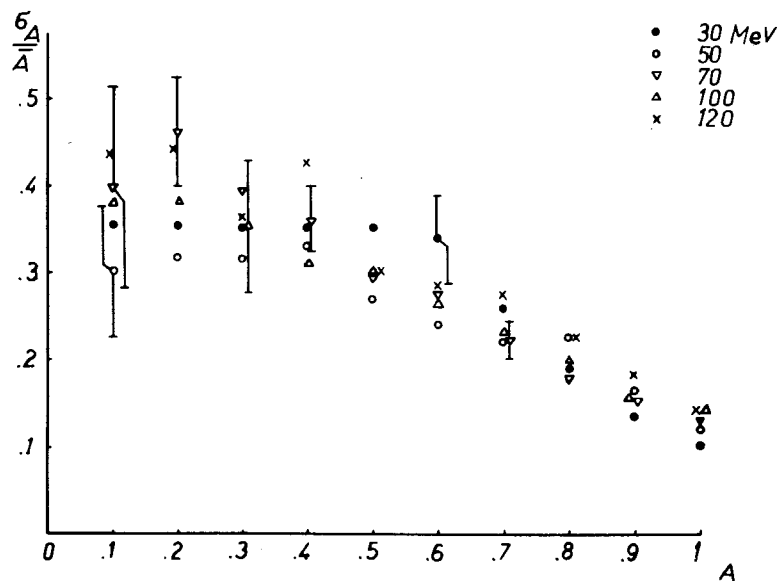


Рис. 3. Относительные дисперсии σ_d / \bar{A} доли суммарного пробега ливневых электронов, соответствующей длине развития ливня, на которой в среднем выделяется доля \bar{A} суммарного пробега ливневых электронов. Обозначения как на рис. 2.

E_γ дисперсия $\sigma_{\langle d \rangle}$ средней длины развития ливня, достигая насыщения уже в районе E_γ 70–100 МэВ. Относительная дисперсия $\sigma_d / \langle d \rangle$ первоначально растет с возрастанием энергии E_γ гамма-квантов, что следует отнести в счет увеличения роли тормозного излучения в процессе развития ливня. Затем, достигнув максимума в районе ≈ 70 МэВ, уменьшается, так как в ливне участвует все больше электронов, и относительные флуктуации становятся все меньше.

Зависимость отношения $d_A / \langle d \rangle$ от параметра A /рис. 2/ одна и та же в пределах точности эксперимента, при всех изученных значениях энергии E_γ гамма-квантов, образовавших ливни. Интересно подчеркнуть, что приведенная зависимость является аналогом интеграль-

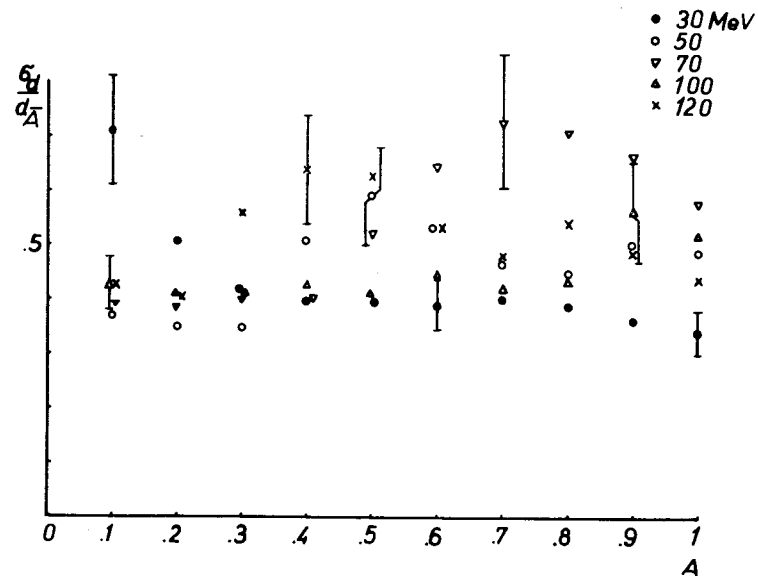


Рис. 4. Относительные дисперсии $\sigma_d / d_{\bar{A}}$ доли суммарного пробега ливневых электронов, на которой выделяется в среднем доля \bar{A} суммарного пробега ливневых электронов. Обозначения как на рис. 2.

ных каскадных кривых, так как в случае, когда многократное рассеяние ливневых электронов не очень велико, наблюдается прямая пропорциональность между инте-

гральной каскадной кривой $\sum \frac{\Delta \bar{N}}{\Delta t} \Delta t$ и распределением

суммарных пробегов $\Sigma r(t)$ ливневых электронов. Для жидкого ксенона и ливней, вызванных гамма-квантами с энергией 1600 МэВ, коэффициент пропорциональности

$$K = k \cdot \Sigma r(t) / \sum \frac{\Delta \bar{N}}{\Delta t} \Delta t \quad /2/$$

равен $K = 10,71 \pm 0,32 \text{ МэВ}^{-1}$ при энергии обрезания ливневых электронов 3 МэВ^{5/3}. Здесь t - длина развития ливня, отсчитываемая от точки конверсии гамма-кванта,

$k=0,6 \text{ МэВ/мм}^{1/2}$. Так как параметр A равен по определению $A = \Sigma r(t) / \Sigma r(t \rightarrow \infty)$, то из рис. 2 можно сделать вывод о том, что каскадные кривые ливней, вызванных гамма-квантами с энергией 30, 50, 70, 100 и 120 МэВ в жидком ксеноне, выраженные через долю d_A суммарного пробега ливневых электронов на длине частичного развития d_A , деленную на среднюю длину развития ливня $\langle d \rangle$, не зависят от энергии E_γ гамма-квантов, вызывающих ливни в изученном диапазоне энергий E_γ . Поскольку параметры A и $\bar{d} / \langle d \rangle$ не зависят от свойства вещества, то полученный вывод справедлив также для других однородных сред.

Можно также заключить, что в пределах экспериментальных ошибок не наблюдается зависимости σ_d / d_A от параметра A при всех исследованных значениях энергий гамма-квантов /рис. 4/. Аналогичная картина наблюдалась нами раньше при изучении лавин, вызываемых гамма-квантами с энергией 200, 500 и 1600 МэВ^{4,5}, однако относительные флуктуации σ_d / d_A в диапазоне энергий 30 - 120 МэВ заметно выше.

В заключение следует подчеркнуть, что выбранные параметры, характеризующие продольное развитие ливней: средняя длина развития ливня $\langle d \rangle$, длина d_A частичного развития, доля суммарного пробега ливневых электронов A , а также относительные дисперсии доли суммарного пробега σ_A / \bar{A} и длины частичного развития ливня σ_d / d_A весьма удобны при изучении характеристик продольного развития электронно-фотонных лавин, вызываемых гамма-квантами в однородных средах. Каскадные характеристики и флуктуации, выраженные через эти параметры, проявляют полезные и интересные масштабные свойства.

Литература

1. И.А.Ивановская, Т.Канарек, Л.С.Охрименко, Б.Словинский, З.С.Стругальский, И.В.Чувило, З.Яблонский. ПТЭ, 2, 39 /1968/.

2. Е.В.Кузнецов, А.Н.Розанов, Ю.В.Бардюков, И.Н.Виноградов, В.В.Бармин, В.М.Голубчиков, А.Г.Долголенко, И.С.Коноплев, А.Г.Мешковский, В.А.Шебанов. ПТЭ, 2, 56 /1870/.
3. L.Pages, E.Bartel, H.Joffre, L.Sklvenitis. Rapport CEA-R-3942, 1970.
4. Б.Словинский, З.Стругальский, Б.Яновская. ЯФ, 9, 39 /1969/.
5. Б.Словинский, З.Стругальский, В.Хуберт. ЯФ, 12, 734 /1972/.
6. Л.С.Охрименко, Б.Словинский, З.Стругальский. Препринт ОИЯИ, Р1-7500, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 августа 1974 года.