

СЗ41.3а
Б-245

4526/2-74



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

21/4-74

P4 - 10781

В.С.Барашенков, Ф.Г.Жереги

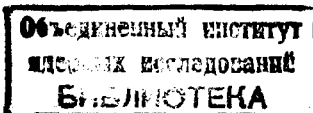
СИСТЕМАТИКА БАРЬЕРОВ ДЕЛЕНИЯ

1977

P4 - 10781

В.С.Барашенков, Ф.Г.Жереги*

СИСТЕМАТИКА БАРЬЕРОВ ДЕЛЕНИЯ



* Институт прикладной физики АН МССР, Кишинев.

Для расчета вероятностей распада тяжелых возбужденных ядер, образующихся при столкновениях ионов с ядрами и в неупругих реакциях под действием быстрых частиц, необходимо знать высоту барьеров деления V_f при различных значениях A и Z /здесь и везде ниже A - массовое число, Z - заряд ядра, $N=A-Z$ /.

Поскольку экспериментальная информация недостаточна, а теоретический расчет V_f очень сложен и не дает пока требуемой точности, в работах ^{1,2/} для описания барьеров деления было предложено полуфеноменологическое выражение

$$V_f(A,Z) = V_f^0(Z^2/A) - \Lambda(A,Z) + \delta(A,Z), \quad /1/$$

включающее массовую поправку Камерона Λ ^{3/}, поправку на нечетно-четные эффекты δ и простую аналитическую аппроксимацию гладкой части V_f^0 .

Результаты, полученные с помощью /1/, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Исключение составляет лишь область актиноидов, где имеются два набора экспериментальных значений V_f : медленно уменьшающихся с ростом Z , определенных по наблюдаемым периодам спонтанного деления /эти значения согласуются с аппроксимацией /1//, и практически постоянных / $V_f = 6,1 \pm 0,2$ МэВ ^{4/} /, полученных из измерений энергетической зависимости сечений деления. Такое различие, по-видимому, связано с тем, что в ядрах с $Z \geq 90$ барьер имеет сложную форму и описание деления очень тяжелых ядер на основе моделей с одногорбым барьером имеет характер приближенной фено-

менологической аппроксимации, параметры которой зависят от того, какие аспекты процесса рассматриваются в данном случае*.

В настоящей работе мы ставим задачу выяснить, какие значения барьеров следует использовать в расчетах деления тяжелых возбужденных ядер. Мы также рассмотрим, к каким изменениям приводит использование уточненной поправки Камерона из работы^{/6/}. Эта поправка пригодна для более широкой области массовых и зарядовых чисел, что особенно важно для расчетов внутриядерных каскадов, где остаточные ядра имеют самые различные значения A и Z .

Поправку Δ мы положим равной сумме оболочечных поправок для нейтронной и протонной компонент ядра S и парных энергий нейтронов и протонов P :

$$\Delta(A, Z) = S(N) + S(Z) + P(N) + P(Z). \quad /2/$$

Выражение для гладкой части барьера V_f^0 выберем теперь равным выражению для жидко-капельного барьера, а не просто некоторому феноменологическому выражению, как это делалось в работах^{/1,2/}. Это дает большую уверенность в расчетах, т.к. при некоторых значениях A и Z феноменологическое выражение V_f^0 может оказаться весьма неточным из-за ошибок в использованных для его определения экспериментальных значениях V_f .

$$V_f^0 = V_f^{ж.к.} = a_s A^{2/3} \begin{cases} 0.83(1-x)^3, & 2/3 < x < 1 \\ 0.38(3/4-x), & 1/3 < x < 2/3, \end{cases} \quad /3/$$

где

$$x = (Z^2/A)(a_k/2a_s) [1 - k(N-Z)^2/A^2]^{-1}$$

* Если процесс деления описывать двугорбым барьером, то набор зависящих от Z значений V_f оказывается близким к известным сейчас экспериментальным значениям внешнего, а набор постоянных значений - к экспериментальным значениям внутренних барьеров деления/см., напр., сводку значений $V_f^{внеш.}$ и $V_f^{внутр.}$ /5, с. 127//.

$a_s = 17,944 \text{ МэВ}$, $a_k = 0,7053 \text{ МэВ}$, $k = 1,7826$ ^{/7/}. Поправка на нечетно-четные эффекты спаривания:

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} 0, & N - \text{четные} \\ \delta_f, & A - \text{нечетное} \\ 2\delta_f, & N - \text{нечетное, } Z - \text{четное,} \end{cases} \quad /4/$$

где $\delta_f = 1,248 \text{ МэВ}$ ^{/25/*}.

В табл. 1 собраны известные в настоящее время барьеры деления $V_f^{\text{эксп.}}$, полученные из анализа различных экспериментальных данных, и соответствующие значения $V_f^{\text{теор.}}$, вычисленные по формулам /1/-/4/.

Заметные различия $\approx 20\%$ между расчетными и экспериментальными данными имеют место для двух самых легких ядер, Eu и Ho , однако барьеры $V_f^{\text{эксп.}}$ в этой области определяются весьма неточно. Менее понятным является превышение теоретических значений барьеров над экспериментальными для части изотопов Ra , Th и Pa .

Расчетные значения V_f демонстрируют очень слабую зависимость от A и Z при переходе к ядрам с большим числом нейтронов и медленное уменьшение барьера с ростом Z /см. рис. 1,2/.

Эти выводы не зависят от того, какая из двух возможных аппроксимаций используется для $\Delta(A, Z)$ **.

* Результаты расчетов изменяются не сильно, если в соответствии с работой^{/9/} положить $\delta_f = 11/\sqrt{A}$. Однако построенная $\delta_f = 1,248 \text{ МэВ}$ дает несколько лучшее согласие с экспериментальными значениями V_f /при этом лучше получается наблюдаемое в опыте различие V_f для ядер с четными и нечетными массовыми числами/.

** В работах^{/1,2/} получено значительно лучшее согласие с $V_f^{\text{эксп.}}$ для ядер Eu и Ho . Это обусловлено тем, что выражение для гладкой части $V^0(A, Z)$ нормировалось на эти точки. Однако в самих значениях $V_f^{\text{эксп.}}$ могут быть значительные погрешности. Барьеры V_f для Eu и Ho , полученные в работе^{/30/} из сопоставления экспериментальных и некоторых модельных данных, также несколько превышают $V_f^{\text{эксп.}}$.

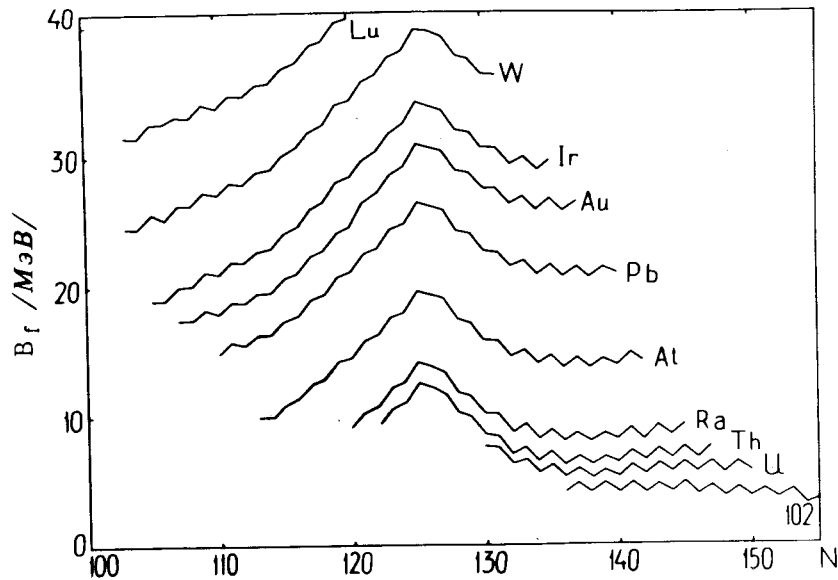
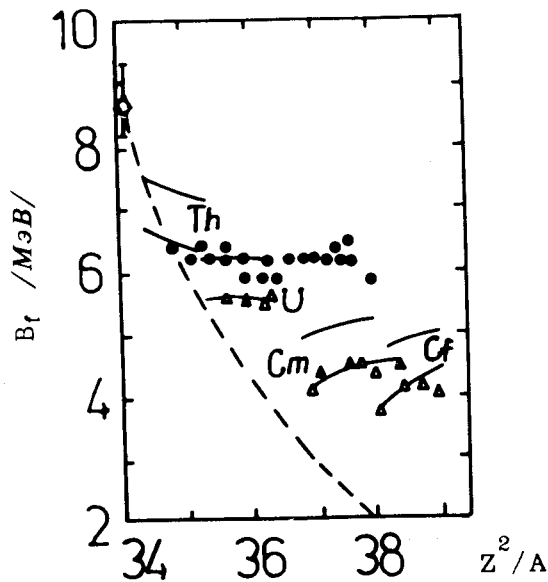


Рис. 1. Зависимость расчетных значений барьеров деления от числа протонов и нейтронов в ядре.



Для изотопов, указанных в табл. 1, различие барьеров $B_f^{\text{теор}}$ для поправок Δ из работ ^{3,6} невелико. Различия становятся более заметными для обедненных или сильно перегруженных нейтронами изотопов. В этих случаях использование данных работы ⁶ является, по-видимому, более предпочтительным.

На рис. 3 приведены отношения испарительной и делительной ширины Γ_n/Γ_f , вычисленные при двух различных предположениях о зависимости барьеров деления от Z : для барьеров, рассчитанных по формулам /1/-/4/, и постоянных барьеров $B_f = 6,2 \text{ МэВ}$, полученных в работе ⁴. Как видно, в случае тяжелых трансурановых ядер предположение о независимом от A и Z барьере деления приводит к резкому и увеличивающемуся с ростом Z расхождению с экспериментом, в то время как выражение /1/ дает значения Γ_n/Γ_f , близкие к экспериментальным.

Это подтверждает вывод работ ^{1,2} о том, что аппроксимация /1/ может использоваться для расчета распадов возбужденных ядер при самых различных значениях Z , вплоть до тяжелых трансурановых ядер.

Рис. 2. Зависимость барьеров деления тяжелых ядер от Z^2/A . • - экспериментальные данные из работы ¹⁴; Δ - барьеры деления, определенные по экспериментальным значениям $t_{1/2}$; \diamond - экспериментальное значение B_f для Ra. Пунктир - жидко-капельная зависимость $B_f^{\text{ж.к.}}$ (Z^2/A), сплошные кривые - расчетные значения $B_f^{\text{теор}}$ для Th, U, Cm и Cf. В каждой паре верхняя кривая относится к изотопам с нечетным A , нижняя кривая - к изотопам с четным A .

Таблица 1

Барьеры деления B_f / МэВ/

Ядро	B_f теор	B_f эксп	Ядро	B_f теор	B_f эксп
$^{149}\text{Eu}_{63}$	39,4	32,5 [8]	$^{188}\text{Os}_{76}$	23,8	23,9 [9] 23,7 [10] 24,2±0,5 [II]
$^{157}\text{Ho}_{67}$	31,6	26,5 [8]	$^{190}\text{Os}_{76}$	24,8	25,1 [9]
$^{173}\text{Lu}_{71}$	30,4	28,0 [9] 27,3 [10] 28,7±3 [II]	$^{185}\text{Ir}_{77}$	20,2	20,4 [8]
$^{175}\text{Ta}_{73}$	25,9	25,1 [9]	$^{187}\text{Ir}_{77}$	21,0	21,6 [12] 21,8±3,5 [II]
$^{179}\text{Ta}_{73}$	27,7	26,3 [9] 26,2 [10] 27±3 [II]	$^{189}\text{Ir}_{77}$	21,9	20,6 [9] 21,7 [10] 22±3 [II]
$^{178}\text{W}_{74}$	24,6	23,0±3,5 [II] 21,5 [12]	$^{191}\text{Ir}_{77}$	23,0	21,5 [9] 22,8 [10] 23±3 [II]
$^{179}\text{W}_{74}$	25,7	25,0±3,5 [II] 23,2 [12]	$^{190}\text{Pt}_{78}$	19,1	19,8 [8]
$^{180}\text{W}_{74}$	25,3	25,7 [9] 28,7±3,5 [II] 25,0 [12]	$^{192}\text{Pt}_{78}$	20,7	21,0 [9]
$^{181}\text{W}_{74}$	26,3	24,6 [9]	$^{193}\text{Pt}_{78}$	21,9	20,9 [9]
$^{182}\text{W}_{74}$	26,4	26,0 [9]	$^{194}\text{Pt}_{78}$	22,5	21,9 [9]
$^{184}\text{W}_{74}$	27,1	26,7 [9]	$^{196}\text{Pt}_{78}$	24,3	24,3 [9]
$^{181}\text{Re}_{75}$	23,6	24,0 [12] 25,0±3,5 [II]	$^{191}\text{Pt}_{79}$	18,7	18,4 [8]
$^{185}\text{Re}_{75}$	25,5	24,9 [9]	$^{195}\text{Pt}_{79}$	21,2	19,5 [9]
$^{186}\text{Os}_{76}$	22,8	23,9 [9] 22,5 [10] 23,4±0,5 [II]	$^{197}\text{Pt}_{79}$	22,8	21,8 [9]
$^{187}\text{Os}_{76}$	23,8	23,1 [9] 22,5 [10] 22,7±0,5 [II]	$^{194}\text{Hg}_{80}$	18,3	19,4±3,5 [II]
			$^{196}\text{Hg}_{80}$	19,8	19,5 [9]
			$^{198}\text{Hg}_{80}$	21,4	21,3 [9] 21,8±1,5 [II]

Продолжение таблицы 1

Ядро	B_f теор	B_f эксп	Ядро	B_f теор	B_f эксп
$^{199}\text{Hg}_{80}$	22,8	21,1 [9]	$^{232}\text{Th}_{90}$	6,5	6,0 [II] 5,40±0,22 [IB]
$^{200}\text{Hg}_{80}$	23,1	23,0 [9]			6,3*
$^{201}\text{Tl}_{81}$	22,6	20,4 [9] 22,3±0,5 [II] 22,5±1,5 [13]	$^{233}\text{Th}_{90}$	7,3	6,4 [II, 4] 6,0±0,2 [IB]
$^{198}\text{Pb}_{82}$	17,9	17,0 [8]	$^{234}\text{Th}_{90}$	6,6	6,1 [II]
$^{207}\text{Bi}_{83}$	22,8	20,8 [9] 21,2±0,5 [II]	$^{231}\text{Pa}_{91}$	6,1	7,5,6*
$^{209}\text{Bi}_{83}$	24,1	22,6±0,5 [II] 22,0 [9]	$^{232}\text{Pa}_{91}$	7,0	5,4±0,5 [IB] 6,25±0,11 [19]
$^{208}\text{Po}_{84}$	19,9	18,7 [9]	$^{232}\text{U}_{92}$	5,3	5,4*
$^{210}\text{Po}_{84}$	21,2	19,2±0,8 [14] 20,0 [9] 20,4±0,5 [II]	$^{233}\text{U}_{92}$	6,1	5,8* 5,7±0,3 [II] 5,5 [20] 5,8±0,1 [21] 5,18±0,27 [18]
$^{211}\text{Po}_{84}$	20,8	18,1 [9] 21,5 [10] 19,7±0,5 [II]	$^{234}\text{U}_{92}$	5,4	5,7* 6,0 [II] 5,2 [22] 5,3 [23] 5,31±0,27 [18]
$^{212}\text{Po}_{84}$	19,2	18,1 [9] 18,6±0,5 [II]	$^{235}\text{U}_{92}$	6,2	7,5,8* 5,75 [20] 6,2 [4] 5,31±0,27 [18]
$^{213}\text{At}_{85}$	17,4	15,2 [9] 16,8±0,5 [II]	$^{236}\text{U}_{92}$	5,6	5,7* 5,9 [II] 5,44 [23] 5,8 [22]
$^{225}\text{Ra}_{88}$	8,5	6,5±0,5 [15]	$^{237}\text{U}_{92}$	6,3	6,1 [II] 6,4 [20,4]
$^{226}\text{Ra}_{88}$	7,9	8,5±0,5 [16]			
$^{227}\text{Ra}_{88}$	8,5	8,5±0,5 [15]			
$^{229}\text{Th}_{90}$	6,7	6,4 [4]			
$^{230}\text{Th}_{90}$	6,3	5,8*			
$^{231}\text{Th}_{90}$	7,2	6,2 [II, 4]			

Продолжение таблицы 1

Ядро	β_f теор	β_f эксп	Ядро	β_f теор	β_f эксп
238 U_{92}	5,5	5,6* 5,8 [20] 5,6 [24,25] 5,08±0,15 [18]	243 Pu_{94}	5,4	5,8 [II,4]
239 U_{92}	6,2	6,15 [20] 6,3 [4,24,25]	244 Pu_{94}	4,8	5,0* 5,4±0,3 [II]
240 U_{92}	5,5	5,7 [II]	245 Pu_{94}	5,4	5,8 [4] 5,4 [II]
236 Np_{93}	6,4	6,2 [26]	241 Am_{95}	5,2	5,4* 6,0 [24,25] 5,9±0,3 [II]
237 Np_{93}	5,8	≥ 5,9* 5,6±0,3 [II] 5,5 [26]	242 Am_{95}	5,9	5,4* 6,35±0,12 [I9] 6,4 [II,24,25]
238 Np_{93}	6,5	5,3±0,4 [18] 5,98±0,12 [19] 6,0 [26]	243 Am_{95}	5,1	5,4* 6,2 [4,24,25] 6,3 [II]
239 Np_{93}	5,7	> 5,2* 5,6 [26]	240 Cm_{96}	4,6	4,4*
236 Pu_{94}	4,7	4,8*	242 Cm_{96}	4,5	4,5*
238 Pu_{94}	4,8	5,0*	244 Cm_{96}	4,4	4,5*
239 Pu_{94}	5,5	5,6* 6,1 [4] 5,8 [II] 5,31±0,25 [18]	245 Cm_{96}	5,1	6,4 [4] 6,2 [II]
240 Pu_{94}	4,7	4,9* 5,9 [II] 4,8 [23]	246 Cm_{96}	4,4	4,5*
241 Pu_{94}	5,5	6,1 [4] 6,2 [22] 5,9 [II]	247 Cm_{96}	5,1	6,2 [4] 5,9 [II]
242 Pu_{94}	4,7	5,0* 5,8±0,3 [II]	248 Cm_{96}	4,4	4,5*
			249 Cm_{96}	5,0	6,2 [4] 5,5 [II]
			250 Cm_{96}	4,0	4,1*
			249 Bk_{97}	4,9	4,8* 5,9 [II]

Продолжение таблицы 1

Ядро	β_f теор	β_f эксп	Ядро	β_f теор	β_f эксп
250 Bk_{97}	5,4	5,8 [I7]	255 Md_{101}	4,6	> 3,4*
246 Cf_{98}	4,2	4,0*	256 Md_{101}	4,9	> 3,3*
248 Cf_{98}	4,3	4,2*	257 Md_{101}	-	> 3,4*
249 Cf_{98}	4,9	5,0*	252 Io_{102}	3,6	≥ 2,8*
250 Cf_{98}	4,2	4,2*	254 Io_{102}	3,5	≥ 3,3*
252 Cf_{98}	3,8	3,9*	256 Io_{102}	3,0	≥ 3,1*
253 Cf_{98}	4,1	5,3 ± 0,3 [II] 5,8 [4]			
254 Cf_{98}	-	3,5*			
256 Cf_{98}	-	< 3,2*			
253 Es_{99}	4,3	4,4*			
254 Es_{99}	4,6	≥ 4,6*			
255 Es_{99}	-	4,1*			
244 Fm_{100}	4,4	2,4*			
246 Fm_{100}	4,3	2,8*			
248 Fm_{100}	4,1	3,3*			
250 Fm_{100}	4,1	3,7*			
252 Fm_{100}	4,1	3,9*			
254 Fm_{100}	3,7	3,6*			
255 Fm_{100}	3,9	4,1*			
256 Fm_{100}	-	3,2*			
257 Fm_{100}	-	3,9*			
258 Fm_{100}	-	2,3*			

* Вычислено по формуле $\beta_f = 0,125(2I,5 + \lg t_{1/2} [\text{сек}])$. Периоды полураспада (спонтанное деление) $t_{1/2}$ взяты из обзора [5].

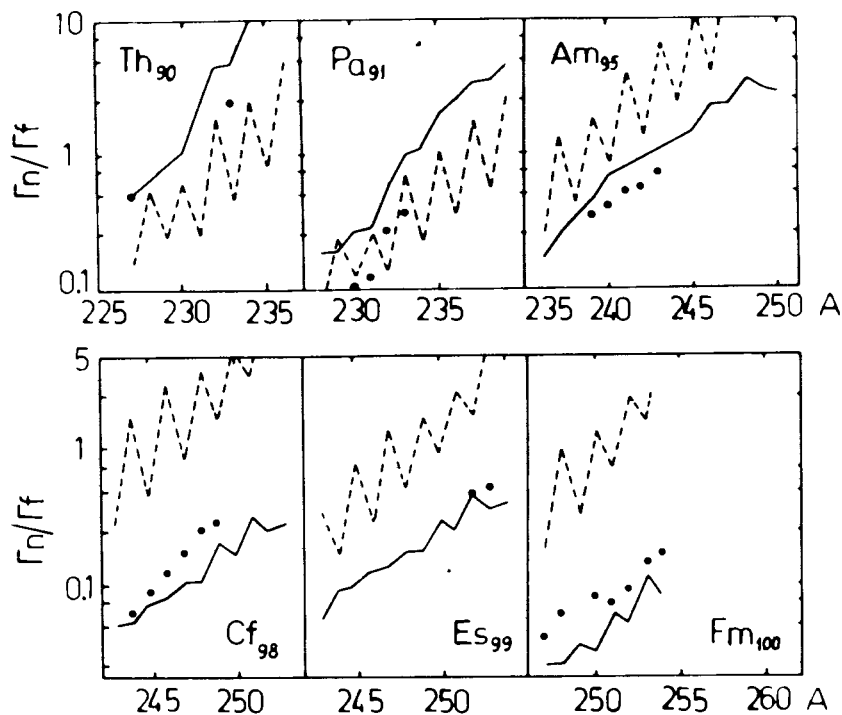


Рис. 3. Отношение испарительной и делительной ширины для ядер с $Z \geq 90$. Сплошные кривые - расчет с использованием барьеров деления 11 МэВ; энергия возбуждения ядер $E^* = 11$ МэВ. Пунктир - соответствующий расчет с постоянным, не зависящим от A и Z барьером деления. Точками нанесены усредненные экспериментальные данные из работ ²⁷⁻²⁹.

Литература

1. Barashenkov V.S. e.a. *Nucl. Phys.*, 1973, A206, p.131.
2. Барашенков В.С. и др. ЭЧАЯ, 1974, 5, с.479.
3. Cameron A.G.W. *Canad. J. Phys.*, 1957, 35, p. 1021.
4. Воротников В.Е. АЭ, 1972, 33, с.995.
5. Горбачев В.М., Замятин Ю.С., Лбов А.А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деления ядер. Атомиздат, М., 1976.

6. Tzuran J.W., Cameron A.G.W. In: *Proc. of the Cutern Conf. on the Properties of Nuclei Far from the Region of Beta/Stability*. Leysin, 1970, v.1, p.275.
7. Myers W.D., Swiatecki W.J. *Ark.Fyz.*, 1967, 36, p.593.
8. Sikkeland T.S. *Phys.Rev.*, 1964, 135B, p.669.
9. Измятук А.В. и др. ЯФ, 1975, 21, с.1185.
10. Thompson S.G. Цитируется по работе Hasse B.W. *Ann.Phys.*, 1971, 68, p.377.
11. Vandenbosch R., Huizenga J.R. *Nuclear Fission*. Acad.Pres., N.Y., 1973.
12. Sikkeland T.S. e.a. *Phys. Rev.*, 1971, 3C, p.329.
13. Burnett D.C. e.a. *Phys.Rev.*, 1964, 134B, p.952.
14. Иткус М.Г. и др. ЯФ, 1972, 16, с.258.
15. Бабенко Ю.А. и др. ЯФ, 1968, 7, с.269.
16. Жагров Е.А., Немилев Ю.А., Илицкий Ю.А. ЯФ, 1968, 7, с.264.
17. Воротников П.Е. и др. ЯФ, 1969, 10, с.726.
18. Hill D.L., Wheeler J.A. *Phys.Rev.*, 1953, 89, p.1102.
19. Воротников П.Е. ЯФ, 1969, 9, с.538.
20. Хайд Э., Перлман И., Сиборг Г. Деление ядер. Атомиздат, М., 1969.
21. Воротников П.Е. и др. ЯФ, 1970, 12, с.474.
22. Halpern I. *Ann.Rev.Nucl.Sci.*, 1959, 9, p.245.
23. Northrop J.A., Stones R.H., Boyer K. *Phys.Rev.*, 1959, 115, p.1277.
24. Wilkins B.D., Unik J.P., Huizenga J.R. *Phys.Lett.*, 1964, 12, p.243.
25. Viola V.E., Wilkins B.D. *Nucl.Phys.*, 1966, 82, p.65.
26. Bishop C.J. e.a. *Nucl.Phys.*, 1972, 198A, p.161.
27. Sikkeland T., Ghiorso A., Nurmi M.J. *Phys.Rev.*, 1968, 172, p.1232.
28. Ванденбош Р., Хейзенга Дж. В кн.: Труды второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии, т.2. Атомиздат, М., 1959, с.366.
29. Gavron A. e.a. *Phys.Rev.*, 1976, 13C, p.2374.
30. Каманин В.В., Карамян С.А. ОИЯИ, P7-10061, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 июня 1977 года.