

## ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ПРОСТЫХ ВЕЩЕСТВАХ. II. ИОНЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

Д. К. Ковшов  
РФЯЦ-ВНИИЭФ

Найден нижний предел применимости формулы Бете. Исследованы положение и величина максимума потерь энергии.

### Введение

Мы продолжаем исследование тормозной способности простых веществ с помощью аппроксимирующей функции, предложенной в статье I. Рассматриваются параметры, относящиеся к промежуточной области энергий, – граница применимости формулы Бете  $E_{гр}$ , положение максимума потерь  $E_{max}$  и его величина  $S_{max}$ , – в зависимости от вещества (характеризуемого атомным номером  $Z_0$ ) и падающего иона (характеризуемого атомным номером  $Z$  и атомной массой  $M$ ). Напомним, что все энергии отнесены к 1 нуклону и измеряются в кэВ/а.е.м.

Экспериментальные данные взяты из публикаций, перечисленных в табл. 1 статьи I.

### Граница области быстрых частиц

Границей, выше которой ион может считаться «быстрым», следует считать энергию, при которой отклонения от формулы Бете сравнимы с погрешностью измерения потерь. Оценкой ее служит величина  $E_{гр}$ , входящая в аппроксимирующую функцию.

В точке  $E_{гр}$  левая и правая ветви кривой переходят друг в друга гладко, и смещение этой точки очень слабо влияет на качество аппроксимации (что говорит о размытом характере границы). Это позволяет пренебречь изотопическими эффектами в  $E_{гр}$  (возможной зависимостью от  $M$ ).

В то же время  $E_{гр}$  принципиально ограничена снизу вследствие неверного поведения функции Бете при  $E < 2,718(I_0/4m_e)$ . Кроме того, оказалось, что  $E_{гр}$  быстро возрастает с ростом  $Z$ .

Исходя из сказанного, зависимость  $E_{гр}(Z_0, Z)$  была описана формулой

$$E_{гр}(Z_0, Z) = k_{гр} I_0(Z_0)/4m_e + E_{гр0} Z^{p_{гр}}, \quad (1)$$

для параметров которой были найдены значения

$$p_{гр} \approx 4/3, \quad k_{гр} = 4,3 \pm 0,4,$$

$$E_{гр0} = 530 \pm 80 \text{ кэВ/а.е.м.} = (10, 7 \pm 1,6) v_B^2.$$

Для сравнения укажем, что граница применимости формулы Бете с поправками (Блоха, Баркаша и оболочечными) оценивается для протона в 400–700 кэВ/а.е.м. [42, 92]. В работах [21, 29, 35, 44–46, 64] величина, аналогичная  $E_{гр}$ , составляет для  $\alpha$ -частицы 150–350 кэВ/а.е.м., тогда как по формуле (1) должно быть 1400–3500 кэВ/а.е.м.; однако эти опыты проводились при энергии не выше 500 кэВ/а.е.м., так что выводы из них относительно  $E_{гр}$  недостоверны. Оценок для более тяжелых ионов найти в литературе не удалось.

### Положение максимума потерь

Положение максимума  $E_{max}$  тоже довольно слабо влияет на качество аппроксимации. Это дает возможность снова пренебречь изотопическими эффектами, а зависимость от  $Z_0$  и  $Z$  описать простым выражением

$$E_{max}(Z_0, Z) = E_{max0}(Z_0) Z^{p_{E_{max}}}. \quad (2)$$

Показатель  $p_{E_{max}} \approx 2/3$ ; для сравнения укажем, что по данным [9] он составляет 0,77. Значения  $E_{max0}$  приведены в таблице (в скобках даны значения, найденные интерполяцией).

### Положение и величина максимума потерь

Вещество	$E_{max0}$ , кэВ/а.е.м.	$S'_{max}$ , $10^{-15}$ эВ·см <sup>2</sup> /атом
H <sub>2</sub>	73±4	19±7
He	99±5	14,2±1,6
Li	(96)	21±4
Be	75±6	16,2±1,9
B	(86)	27±18
C (аморф.)	103±5	28,3±2,3
N <sub>2</sub>	92±5	42±8
O <sub>2</sub>	117±16	35±5
F <sub>2</sub>	(120)	(27,5)
Ne	121±12	24,1±2,4
Na	(121)	(25,7)
Mg	120±40	37±11
Al	123±5	37,4±2,3

Вещество	$E_{\max 0}$ , кэВ/а.е.м.	$S'_{\max}$ , $10^{-15}$ эВ·см <sup>2</sup> /атом
Si	87±6	45±4
P	(84)	(54,1)
S	(73)	(61,3)
Cl <sub>2</sub>	87±11	70±14
Ar	64±3	77±17
K	(65)	(71,2)
Ca	(71)	(70,7)
Sc	(80)	(68,3)
Ti	94±6	67±14
V	109±13	56±8
Cr	138±27	48±5
Mn	160±40	42±5
Fe	149±14	43±4
Co	158±15	38,2±2,9
Ni	160±7	35,5±1,6
Cu	157±7	32,3±1,3
Zn	138±17	36,8±2,6
Ga	(144)	(36,5)
Ge	168±24	47±5
As	(113)	(43,5)
Se	85±23	41±6
Br <sub>2</sub> (газ)	88±10	62±7
Kr	85±5	63±7
Rb	(84)	(73,5)
Sr	(85)	(78,2)
Y	104±23	72±22
Zr	103±13	81±29
Nb	109±9	80±30
Mo	112±14	69±17
Tc	(124)	(59,4)
Ru	(129)	(55,0)
Rh	(133)	(52,1)
Pd	(135)	49±7
Ag	131±4	50,3±2,0
Cd	(134)	(51,6)
In	(131)	54±8
Sn	105±25	65±8
Sb	160±30	60±9
Te	110±30	67±14
I <sub>2</sub>	(94)	(82,2)
Xe	90±8	91±12
Cs	(93)	(88,1)
Ba	(104)	(88,2)
La	120±19	97±13
Ce	(127)	70±40
Pr	(133)	64±18
Nd	154±28	64±7
Pm	(144)	(69,3)
Sm	(149)	(65,3)
Eu	(154)	(61,6)
Gd	168±14	56±8
Tb	130±40	65±7
Dy	143±21	55±4
Ho	160±90	46±8
Er	132±25	53±8
Tm	(174)	(46,4)
Yb	(176)	46±8
Lu	(178)	60±5

Hf	190±24	47±11
Ta	190±14	41,4±2,2
W	183±20	47±5
Re	180±20	41±3
Os	(181)	(43,4)
Ir	180±40	44±3
Pt	203±24	40,2±2,9
Au	178±6	46,6±1,1
Hg	(178)	(48,7)
Tl	(176)	(50,8)
Pb	170±30	59±6
Bi	150±30	71±7
U	130±100	—

Величина  $E_{\max 0}$  зависит от  $Z_0$  немонотонно (рис. 1). Она максимальна при  $Z_0 \approx 2; 8 \div 12; 25 \div 29; 46 \div 49$  и минимальна при  $Z_0 \approx 3 \div 4; 18; 34 \div 40; 54$ , в полном согласии с результатами [59, 61, 62, 69, 75]. При  $Z_0 > 60$  погрешности  $E_{\max 0}$  возрастают и определить положение экстремумов не удастся.

Осцилляции происходят на фоне общего роста  $E_{\max 0}$ , который грубо может быть описан формулой

$$E_{\max 0} \approx (80 + Z_0) \text{ кэВ/а.е.м.} \quad (3)$$

(показан на рис. 1 пунктиром).

Для лития аппроксимация дала явно заниженное значение  $E_{\max 0}$ : сказалось влияние данных [88], у которых максимум сильно смещен влево по сравнению с [1, 5, 7]. Для Pd, In и Lu, напротив,  $E_{\max 0}$  завышены, скорее всего из-за систематической ошибки в данных [91]. Для всех четырех элементов в таблице приведены интерполированные значения.

Проверить наши результаты можно путем сравнения с данными тех работ, в которых исследуемый энергетический диапазон покрывает точку максимума, а для протона и  $\alpha$ -частицы, кроме того, – с таблицами Андерсена и Циглера [42, 43]. Это сделано на рис. 2. В разных работах положение максимума различается весьма значительно: среднеквадратический разброс составляет 32 %. Значения, полученные по формуле (2), не выходят за рамки этого разброса; превышение экспериментальных  $E_{\max}$  над расчетными, наблюдаемое на графике для  $Z_0 = 29$ , не является статистически значимым. Значение  $E_{\max}$  для  $^{127}\text{I}$  в золоте, приведенное в [18], находится в вопиющем противоречии не только с расчетным значением, но и с экспериментальными значениями для других ионов и, видимо, должно быть забраковано как грубая ошибка.

### Величина максимума потерь

Величина максимума определяется гораздо точнее, чем его положение; поэтому, чтобы удовлетворительно описать ее зависимость от  $Z$ , пришлось построить более сложное выражение

$$\frac{1}{S_{\max}(Z_0, Z)} = \frac{1}{S'_{\max}(Z_0) Z^{p'_S \max}} + \frac{1}{S''_{\max}(Z_0) Z^{p''_S \max}} \quad (4)$$

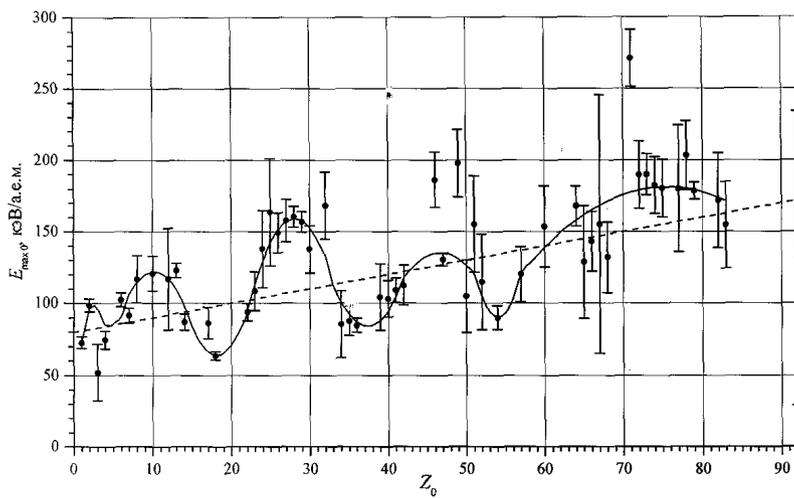


Рис. 1. Положение максимума потерь: — — осцилляции (сглаженная кривая);  
 - - - - монотонная часть зависимости

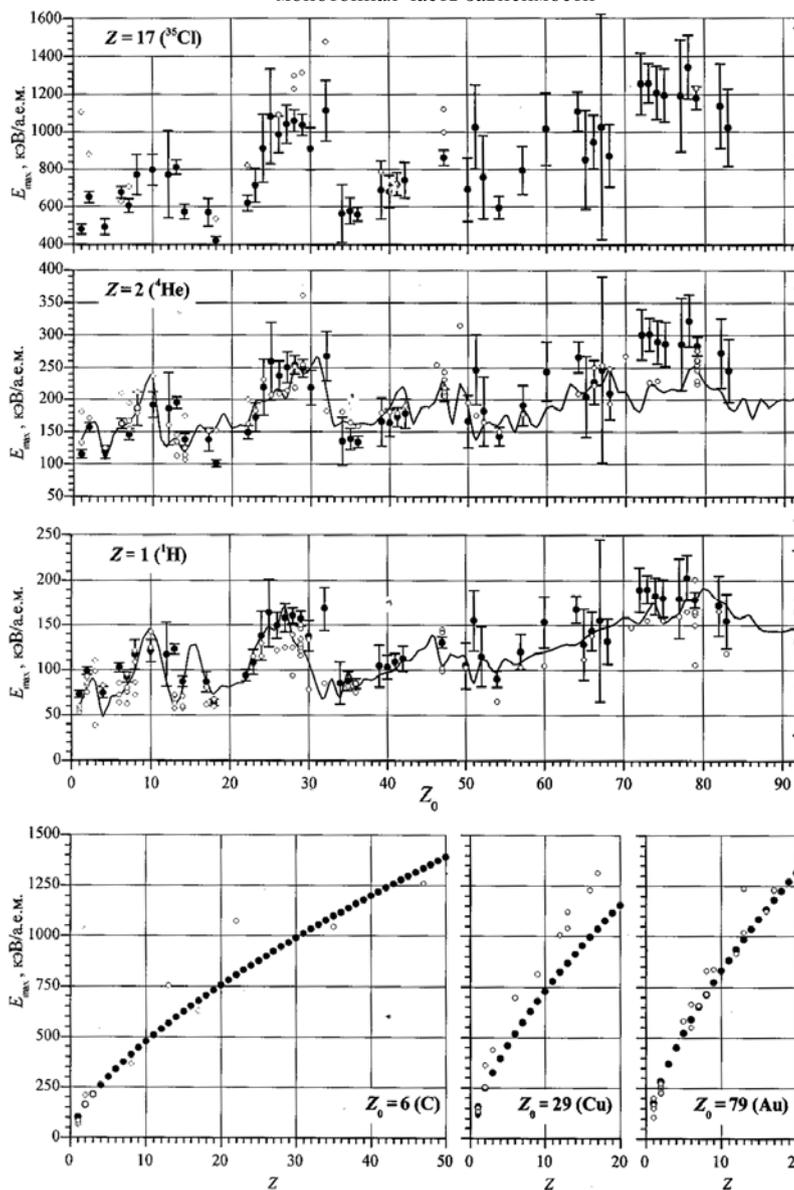


Рис. 2. Положение максимума потерь. Сравнение с результатами других авторов: ● — данная работа;  
 — — Андерсен и Циглер [42, 43]; ○ — экспериментальные данные [1–8, 10–23, 25–27, 30, 32, 33, 36,  
 38–41, 48–53, 55, 56, 59–61, 65–68, 70, 73, 74, 76–81, 84, 85, 87–90]

Масса иона в формулу не входит, потому что результаты аппроксимации свидетельствуют об одинаковой (в пределах погрешности) величине максимума потерь у изотопов одного элемента.

Договоримся, что  $p'S'_{\max} > p''S'_{\max}$ ; тогда для легких ионов (в пределе  $Z \rightarrow 0$ ) максимальные потери энергии определяются первым слагаемым, для тяжелых – вторым. У тяжелых ионов, как оказалось, максимальные потери зависят от  $Z_0$  монотонно и могут быть аппроксимированы степенной функцией

$$S''_{\max}(Z_0) = \Sigma_{\max 0} Z_0^{p'S'_{\max} 0}. \quad (5)$$

Параметры формул (4), (5) принимают значения

$$\begin{aligned} p'S'_{\max} &\approx 2; & p''S'_{\max} &\approx 1; & pS'_{\max} &\approx 2/3; \\ \Sigma_{\max 0} &= (9,00 \pm 0,13) \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{см}^2/\text{атом} = \\ &= (0,940 \pm 0,013) \Sigma_E. \end{aligned}$$

Таким образом, у легких ионов зависимость  $S_{\max}(Z)$  близка к квадратичной; с ростом атомного номера иона зависимость слабеет и у тяжелых ионов переходит в линейную. Это совпадает с результатами экспериментов [9] и расчетов [86].

Значения параметра  $S'_{\max}$  даны в таблице. Он испытывает периодичность по  $Z_0$  (рис. 3); максимумы соответствуют  $Z_0 \approx 7 \div 8; 17 \div 22; 39 \div 41; 54 \div 57$ , минимумы –  $Z_0 \approx 2 \div 4; 10; 29; 46 \div 47; 73 \div 78$ . Это согласуется с результатами работ [59, 61, 69, 75], а также с картиной периодичности  $S(Z_0 | E = \text{const})$  в области  $E/Z^{2/3} = 50 \div$

$\div 500$  кэВ/а.е.м., полученной экспериментально [7, 21, 30, 31, 41, 54, 58, 63, 78], путем компиляции экспериментальных данных [33, 34, 42, 43] и расчетным путем [24, 28, 34, 37, 47, 57, 71, 72, 82, 83]. (Надо, однако, заметить, что результаты разных работ плохо согласуются между собой: положение экстремумов имеет разброс 3–5 единиц  $Z_0$ , а двух последних – до 15 единиц.)

В большинстве расчетных работ и в некоторых экспериментах наблюдается «тонкая структура» периодичности: минимум при  $Z_0 \approx 24 \div 25$  и максимум при  $Z_0 \approx 25 \div 26$  [21, 24, 28, 33, 34, 72, 83]; максимум при  $Z_0 \approx 34 \div 35$  и минимум при  $Z_0 \approx 35 \div 36$  [24, 28, 34, 57, 82, 83]; минимум при  $Z_0 \approx 41 \div 42$  и максимум при  $Z_0 \approx 43$  [24, 28, 34, 47]. Ее признаки имеются и на рис. 3, но они не выходят за пределы погрешностей.

Осцилляции  $S'_{\max}$  также сопровождаются общим ростом:

$$S'_{\max} \approx 15 \cdot 10^{-15} Z_0^{1/3} \text{ эВ} \cdot \text{см}^2/\text{атом}. \quad (6)$$

Для Ca и Rh параметр  $S'_{\max}$  имеет очень большую погрешность (превышающую величину самого параметра), так как имеющиеся данные лежат слишком далеко от максимума. Для этих элементов в таблице приведены интерполированные значения  $S'_{\max}$ .

Сравнение с экспериментальными данными было выполнено так же, как для  $E_{\max}$ . Среднеквадратический разброс экспериментальных значений  $S_{\max}$  составляет 12%; значения, рассчитанные по формулам (4), (5), не выходят за пределы этого разброса (рис. 4).

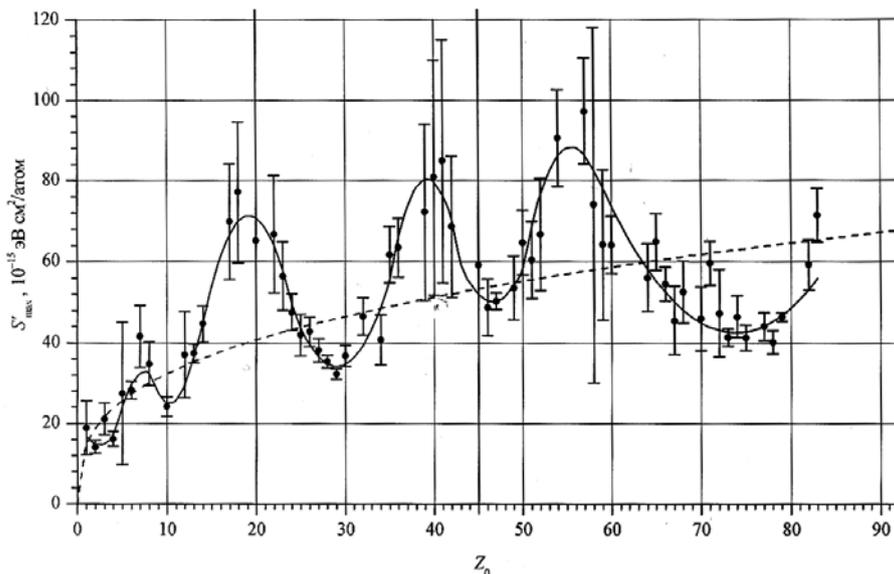


Рис. 3. Величина максимума потерь: — — осцилляции (сглаженная кривая);  
- - - - монотонная часть зависимости

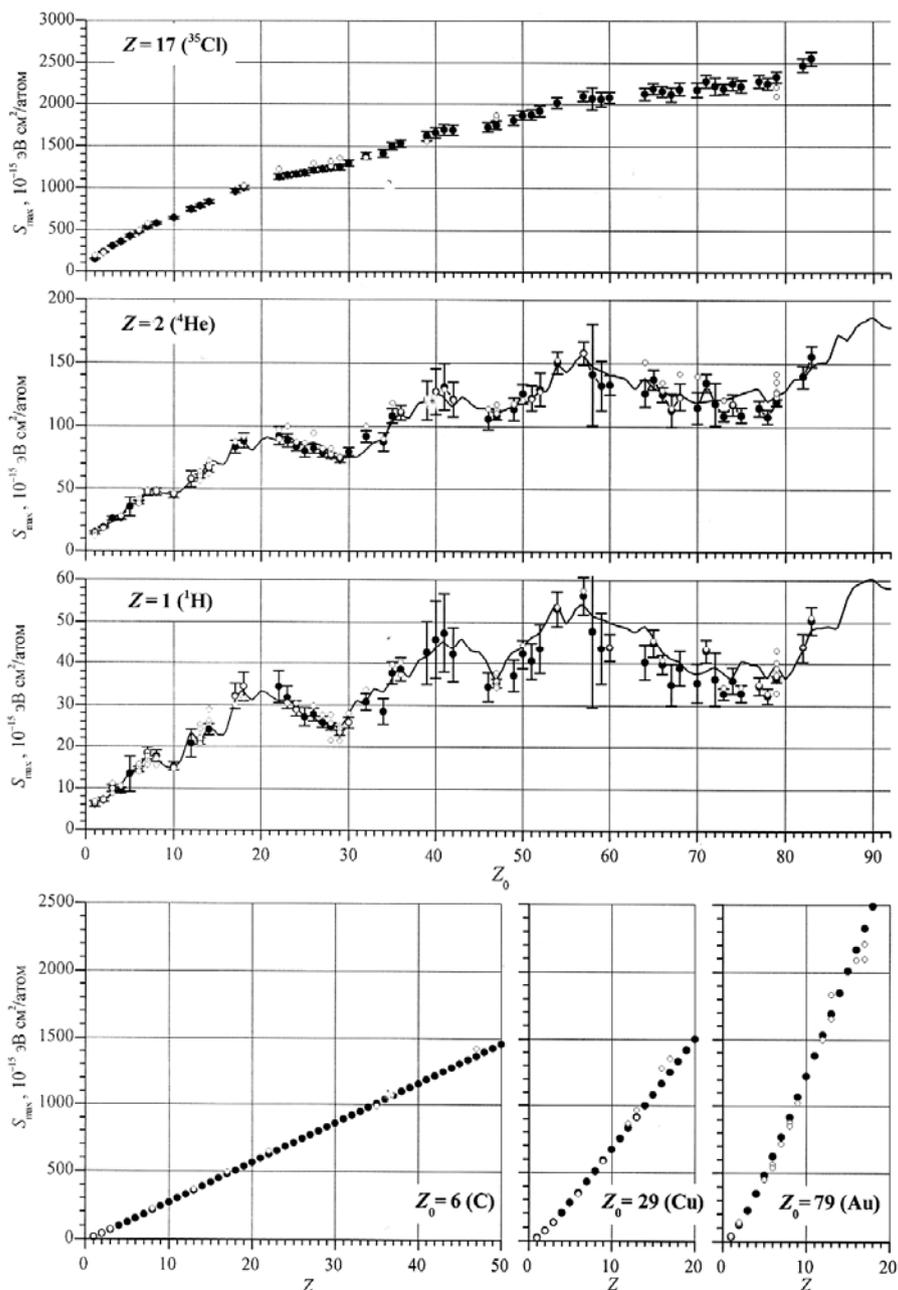


Рис. 4. Величина максимума потерь. Сравнение с результатами других авторов: ● – данная работа; — — Андерсен и Циглер [42, 43]; ○ – экспериментальные данные [1–8, 10–23, 25–27, 30, 32, 33, 36, 38–41, 48–53, 55, 56, 59–61, 65–68, 70, 73, 74, 76–81, 84, 85, 87–90]

### Список литературы

1. Haworth L. J., King L. D. P. // Phys. Rev. 1938. Vol. 54, No. 1. P. 48–50.
2. Dunbar D. N. F., Reynolds H. K., Wenzel W. A., Whaling W. // Bull. Am. Phys. Soc. 1952. Vol. 27, No. 6. P. 6.
3. Phillips J. A. // Phys. Rev. 1953. Vol. 90, No. 4. P. 532–537.
4. Weyl P. K. // Phys. Rev. 1953. Vol. 91, No. 2. P. 289–296.
5. Warters W. D., Fowler W. A., Lauritsen C. C. // Phys. Rev. 1953. Vol. 91, No. 4. P. 917–921.

6. Reynolds H. K., Dunbar D. N. F., Wenzel W. A., Whaling W. // Phys. Rev. 1953. Vol. 92, No. 3. P. 742–748.
7. Bader M., Pixley R. E., Mozer F. S., Whaling W. // Phys. Rev. 1956. Vol. 103, No. 1. P. 32–38.
8. Porat D. I., Ramavaram K. // Proc. Roy. Soc. A. 1959. Vol. 252, No. 1270. P. 394–410.
9. Теплова Я. А., Николаев В. С., Дмитриев И. С., Фатеева Л. Н. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. Вып. 1. С. 44–60.
10. Allison S. K., Cuevas J., Garcia-Munoz M. // Phys. Rev. 1962. Vol. 127, No. 3. P. 792–798.
11. Ormrod J. H., Duckworth H. E. // Can. J. Phys. 1963. Vol. 41, No. 9. P. 1424–1442.

12. Wolke R. L., Bishop W. N., Eichler E. et al. // *Phys. Rev.* 1963. Vol. 129, No. 6. P. 2591–2596.
13. Park J. T., Zimmerman E. J. // *Phys. Rev.* 1963. Vol. 131, No. 4. P. 1611–1618.
14. Cuevas J., Garcia-Munoz M., Torres P., Allison S. K. // *Phys. Rev.* 1964. Vol. 135, No. 2A. P. 335–345.
15. Booth W., Grant I. S. // *Nucl. Phys.* 1965. Vol. 63, No. 3. P. 481–495.
16. Sautter C. A., Zimmerman E. J. // *Phys. Rev.* 1965. Vol. 140, No. 2A. P. 490–498.
17. White W., Mueller R. M. // *J. Appl. Phys.* 1967. Vol. 38, No. 9. P. 3660–3662.
18. Bridwell L. B., Northcliffe L. C., Datz S. et al. // *Phys. Rev.* 1967. Vol. 159, No. 2. P. 276–277.
19. Ormrod J. H. // *Can. J. Phys.* 1968. Vol. 46, No. 6. P. 497–502.
20. Pierce T. E., Blann M. // *Phys. Rev.* 1968. Vol. 173, No. 2. P. 390–405.
21. Chu W. K., Powers D. // *Phys. Rev.* 1969. Vol. 187, No. 2. P. 478–490.
22. White W., Mueller R. M. // *Phys. Rev.* 1969. Vol. 187, No. 2. P. 499–503.
23. Thompson D. A., Mackintosh W. D. // *J. Appl. Phys.* 1971. Vol. 42, No. 10. P. 3969–3976.
24. Rousseau C. C., Chu W. K., Powers D. // *Phys. Rev. A.* 1971. Vol. 4, No. 3. P. 1066–1070.
25. Bourland P. D., Chu W. K., Powers D. // *Phys. Rev. B.* 1971. Vol. 3, No. 11. P. 3625–3635.
26. Chu W. K., Powers D. // *Phys. Rev. B.* 1971. Vol. 4, No. 1. P. 10–15.
27. Ward D., Graham R. L., Geiger J. S. // *Can. J. Phys.* 1972. Vol. 50, No. 19. P. 2302–2312.
28. Chu W. K., Powers D. // *Phys. Lett. A.* 1972. Vol. 38, No. 4. P. 267–268.
29. Powers D., Chu W. K., Robinson R. J., Lodhi A. S. // *Phys. Rev. A.* 1972. Vol. 6, No. 4. P. 1425–1435.
30. Valenzuela A., Meckbach W., Kestelman A. J., Eckardt J. C. // *Phys. Rev. B.* 1972. Vol. 6, No. 1. P. 95–102.
31. Chu W. K., Ziegler J. F., Mitchell I. V., Mackintosh W. D. // *Appl. Phys. Lett.* 1973. Vol. 22, No. 9. P. 437–439.
32. Ziegler J. F., Brodsky M. H. // *J. Appl. Phys.* 1973. Vol. 44, No. 1. P. 188–196.
33. Lin W. K., Olson H. G., Powers D. // *Phys. Rev. B.* 1973. Vol. 8, No. 5. P. 1881–1888.
34. Ziegler J. F., Chu W. K. // *At. Data Nucl. Data Tables.* 1974. Vol. 13, No. 5. P. 463–498.
35. Lodhi A. S., Powers D. // *Phys. Rev. A.* 1974. Vol. 10, No. 6. P. 2131–2140.
36. Lin W. K., Matteson S., Powers D. // *Phys. Rev. B.* 1974. Vol. 10, No. 9. P. 3746–3755.
37. Latta B. M., Scanlon P. J. // *Phys. Rev. A.* 1975. Vol. 12, No. 1. P. 34–39.
38. Harris J. M., Nicolet M.-A. // *Phys. Rev. B.* 1975. Vol. 11, No. 3. P. 1013–1019.
39. Langley R. A. // *Phys. Rev. B.* 1975. Vol. 12, No. 9. P. 3575–3583.
40. Langley R. A., Blewer R. S. // *Nucl. Instr. Meth.* 1976. Vol. 132. P. 109–117.
41. Forster J. S., Ward D., Andrews H. R. et al. // *Nucl. Instr. Meth.* 1976. Vol. 136, No. 2. P. 349–359.
42. Andersen H. H., Ziegler J. F. *Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements. (The Stopping and Ranges of Ions in Matter. Vol. 3.)* N.Y.: Pergamon Press, 1977.
43. Ziegler J. F. *Helium: Stopping Powers and Ranges in All Elemental Matter. (The Stopping and Ranges of Ions in Matter. Vol. 4.)* N.Y.: Pergamon Press, 1977.
44. Matteson S., Powers D., Chau E. K. L. // *Phys. Rev. A.* 1977. Vol. 15, No. 3. P. 856–864.
45. Chau E. K. L., Brown R. B., Lodhi A. S. et al. // *Phys. Rev. A.* 1977. Vol. 16, No. 4. P. 1407–1414.
46. Chau E. K. L., Powers D., Lodhi A. S., Brown R. B. // *J. Appl. Phys.* 1978. Vol. 49, No. 4. P. 2346–2349.
47. Ziegler J. F. // *Nucl. Instr. Meth.* 1978. Vol. 149, No. 1–3. P. 129–135.
48. Matteson S., Harris J. M., Pretorius R., Nicolet M.-A. // *Nucl. Instr. Meth.* 1978. Vol. 149, No. 1–3. P. 163–167.
49. Carnera A., Della Mea G., Drigo A. V. et al. // *Phys. Rev. B.* 1978. Vol. 17, No. 9. P. 3492–3500.
50. Fontell A., Luomajarvi M. // *Phys. Rev. B.* 1979. Vol. 19, No. 1. P. 159–162.
51. Mertens P., Krist Th. // *Nucl. Instr. Meth.* 1980. Vol. 168, No. 1–3. P. 33–39.
52. Knudsen H., Andersen H. H., Martini V. // *Nucl. Instr. Meth.* 1980. Vol. 168, No. 1–3. P. 41–50.
53. Demond F. J., Kalbitzer S., Mannsperger H., Muller G. // *Nucl. Instr. Meth.* 1980. Vol. 168, No. 1–3. P. 69–74.
54. Geissel H., Armbruster P., Kitahara T. et al. // *Nucl. Instr. Meth.* 1980. Vol. 170, No. 1–3. P. 217–219.
55. Santry D. C., Werner R. D. // *Nucl. Instr. Meth.* 1980. Vol. 178, No. 2–3. P. 523–530.
56. Santry D. C., Werner R. D. // *Nucl. Instr. Meth.* 1980. Vol. 178, No. 2–3. P. 531–537.
57. Gertner I., Meron M., Rosner B. // *Phys. Rev. A.* 1980. Vol. 21, No. 4. P. 1191–1196.
58. Geissel H., Laichter Y., Schneider W. F. W., Armbruster P. // *Nucl. Instr. Meth.* 1982. Vol. 194, No. 1–3. P. 21–29.
59. Mertens P., Krist Th. // *Nucl. Instr. Meth.* 1982. Vol. 194, No. 1–3. P. 57–60.
60. Baumgart H., Arnold W., Berg H. et al. // *Nucl. Instr. Meth.* 1983. Vol. 204, No. 2–3. P. 597–604.
61. Krist Th., Mertens P. // *Nucl. Instr. Meth.* 1983. Vol. 218, No. 1–3. P. 790–794.
62. Gowda R., Olson H. G., Powers D. // *Phys. Rev. A.* 1983. Vol. 27, No. 6. P. 3365–3368.
63. Ribas R. V., Seale W. A., Rao M. N. // *Phys. Rev. A.* 1983. Vol. 28, No. 6. P. 3234–3237.
64. Powers D., Olson H. G., Gowda R. // *J. Appl. Phys.* 1984. Vol. 55, No. 5. P. 1274–1277.
65. Bauer P., Aumayr F., Semrad D., Scherzer B. M. U. // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1984. Vol. 1, No. 1. P. 1–8.

66. Baumgart H., Berg H., Huttel E. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1984. Vol. 2, No. 1–3. P. 145–148.
67. Bauer P., Semrad D., Golser R. // Nucl. Instr. Meth. B. 1984. Vol. 2, No. 1–3. P. 149–152.
68. Shima K., Ishihara T., Mikumo T. // Nucl. Instr. Meth. B. 1984. Vol. 2, No. 1–3. P. 222–226.
69. Sirotinin E. I., Tulinov A. F., Khodyrev V. A., Mizguin V. N. // Nucl. Instr. Meth. B. 1984. Vol. 4, No. 3. P. 337–345.
70. Santry D. C., Werner R. D. // Nucl. Instr. Meth. B. 1984. Vol. 5, No. 3. P. 449–454.
71. Sabin J. R., Oddershede J. // Phys. Rev. A. 1984. Vol. 29, No. 4. P. 1757–1762.
72. Kaneko T. // Phys. Rev. A. 1984. Vol. 30, No. 4. P. 1714–1720.
73. Semrad D., Mertens P., Bauer P. // Nucl. Instr. Meth. B. 1986. Vol. 15, No. 1–6. P. 86–90.
74. Reiter G., Baumgart H., Kniest N. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1987. Vol. 27, No. 2. P. 287–292.
75. Sirotinin E. I. // Nucl. Instr. Meth. B. 1987. Vol. 27, No. 2. P. 323–325.
76. Lantschner G. H., Eckardt J. C., Jakas M. M. et al. // Phys. Rev. A. 1987. Vol. 36, No. 10. P. 4667–4671.
77. Mertens P., Bauer P. // Nucl. Instr. Meth. B. 1988. Vol. 33, No. 1–4. P. 133–137.
78. Kuronen A., Raisanen J., Keinonen J. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1988. Vol. 35, No. 1. P. 1–6.
79. Eppacher Ch., Semrad D. // Nucl. Instr. Meth. B. 1988. Vol. 35, No. 2. P. 109–117.
80. Abdesselam M., Stoquert J. P., Guillaume G. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1991. Vol. 61, No. 4. P. 385–393.
81. Abdesselam M., Stoquert J. P., Guillaume G. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1992. Vol. 72, No. 3–4. P. 293–301.
82. Kaneko T. // At. Data Nucl. Data Tables. 1993. Vol. 53, No. 2. P. 271–340.
83. Cui N., Wang Y.-N., Ma T.-C. // Nucl. Instr. Meth. B. 1993. Vol. 73, No. 2. P. 123–129.
84. Valdes J. E., Martinez Tamayo G., Lantschner G. H. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1993. Vol. 73, No. 3. P. 313–318.
85. Niemann D., Oberschachtsiek P., Kalbitzer S., Zeindl H. P. // Nucl. Instr. Meth. B. 1993. Vol. 80/81, Pt. I. P. 37–40.
86. Chadderton L. T., Zhu J. L., Cruz S. A. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1994. Vol. 91, No. 1–4. P. 168–171.
87. Bak H. J., Bae Y. D., Kim C. S., Kim M. S. // Nucl. Instr. Meth. B. 1994. Vol. 93, No. 3. P. 234–240.
88. Eppacher Ch., Diez Muino R., Semrad D., Arnau A. // Nucl. Instr. Meth. B. 1995. Vol. 96, No. 3–4. P. 639–642.
89. Martinez-Tamayo G., Eckardt J. C., Lantschner G. H., Arista N. R. // Phys. Rev. A. 1996. Vol. 54, No. 4. P. 3131–3138.
90. Vakevainen K. // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. Vol. 122, No. 2. P. 187–193.
91. Hu Bitao, Wu Ying, Zhang Xiaodong et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 2000. Vol. 160, No. 2. P. 195–202.
92. Sakamoto N., Ogawa H., Tsuchida H. // Nucl. Instr. Meth. B. 2000. Vol. 164/165. P. 250–258.

Статья поступила в редакцию 25.12.2004.