

Ордена Ленина

ИАЭ-3212

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

*SV 80 10468*

Е. П. Думан, А. В. Евсеев, А. В. Елецкий,  
А. А. Радциг, Б. М. Смирнов

# Процессы резонансной перезарядки

Москва 1979

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И. В. КУРЧАТОВА

Е.Л.Думан, А.В.Евсеев, А.В.Елецкий,  
А. А. Радциг, Б. М. Смирнов

ПРОЦЕССЫ  
РЕЗОНАНСНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ

Москва  
1979

**Ключевые слова:** резонансная перезарядка, асимптотическая теория, атом, молекула, ион, асимптотический коэффициент, обменное взаимодействие.

Представлены результаты расчетов сечений резонансной перезарядки для положительных и отрицательных атомных и молекулярных ионов. Расчеты выполнены на основании асимптотической теории. Анализируются факторы, влияющие на точность расчетов. Проведено сравнение расчетных данных, охватывающих 28 систем, с экспериментом.

© Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1979

Редактор С. А. Руцкая

Технический редактор Н. А. Малькова

Корректор Н. Н. Черемных

Т-14464. 29.08.79. Формат 60x90 1/16. Уч.-изд. л. 2,00  
Тираж 200. Заказ 1447. Цена 20 коп. Индекс 3624. ИАЭ

1. В работе представлена информация о характеристиках процессов резонансной перезарядки. Эти процессы, к которым относятся резонансная перезарядка положительного и отрицательного иона на атоме



перезарядка молекулярного иона на молекуле



и многозарядного иона на ионе



занимают в физике атомных столкновений особое место. С одной стороны, они отличаются достаточно большими сечениями, превышающими атомные размеры, и поэтому играют определенную роль в различных ситуациях, где имеет место движение ионов в собственном газе. Так, процесс (1) определяет подвижность и коэффициент диффузии ионов в положительном столбе газового разряда и многие свойства такого разряда. Этот же процесс лежит в основе одного из эффективных методов диагностики термоядерной плазмы, он используется для получения пучков быстрых нейтральных атомов в экспериментах по рассеянию частиц. С другой стороны, хорошо разра-

ботанная теория процессов резонансной перезарядки, основанная на использовании асимптотических методов [1], позволяет рассчитать сечения таких процессов с точностью, которая во многих случаях превышает точность современного эксперимента. Указанные причины объясняют интерес исследователей к процессам резонансной перезарядки и большой объем информации на эту тему.

Высокая эффективность асимптотической теории при описании процессов резонансной перезарядки связана с физическими особенностями, определяющими характер этого процесса [1]. Именно, частота перехода электрона от атома к иону того же сорта определяется величиной обменного расщепления термов  $\Delta$ . Последняя оказывается сравнимой с обратным временем соударения атома и иона уже при прицельных параметрах соударения, значительно превышающих характерные атомные размеры. Поэтому при решении задач типа резонансной перезарядки, которые сводятся к расчету величины обменного расщепления термов квазимолекулярного иона на больших расстояниях, достаточно определить асимптотическое поведение волновой функции электрона, соответствующей большим межъядерным расстояниям, в области координат вблизи соединяющей ядра оси. В результате сечение резонансной перезарядки  $\sigma$  представляется в виде разложения по малому параметру  $(R_0 \gamma)^{-1}$ , где  $R_0$  - межъядерное расстояние, при котором потенциал обменного взаимодействия порядка обратного времени соударения, - определяется выражением

$$\sqrt{\frac{\pi R_0}{2\gamma}} \Delta(R_0) = 0,28 \nu \quad (4)$$

(при  $\gamma = \sqrt{2I}$ , где  $I$  - энергия связи электрона в атоме,  $\nu$  - скорость соударения, используются атомные единицы). Сечение резонансной перезарядки выражается через величину  $R_0$ :

$$\sigma = \frac{\pi R_0^2}{2} \left[ 1 + O\left(\frac{1}{\gamma R_0}\right)^2 \right]. \quad (5)$$

Эффективность теоретического определения сечения резонансной перезарядки определяется, с одной стороны, резкой зависимостью  $\Delta(R_0)$ , а с другой стороны, большим значением параметра  $\gamma R_0 \gg 1$ .

Используемое при вычислении потенциала обменного взаимодействия  $\Delta$  асимптотическое выражение для волновой функции электрона в атоме

$$\psi(r) = A e^{-\gamma r} r^{\frac{1}{\gamma} - 1} \quad (6)$$

включает в себя два параметра, точность определения которых влияет на точность расчета сечений резонансной перезарядки. Один из этих параметров,  $\gamma$ , выражается через энергию связи электрона в атоме  $I$  и обычно известен с достаточно высокой точностью. Асимптотический коэффициент  $A$  определяется видом волновой функции электрона в области координат вблизи своего ядра и вычисляется обычно посредством сшивания волновой функции электрона, вычисленной методом Хартри - Фока для этой области, с асимптотическим выражением (6). Выполненные недавно [2-4] довольно надежные хартри-фоковские расчеты волновых функций электронов для широкого круга атомных систем позволяют вычислить сечения резонансной перезарядки практически для всех элементов таблицы Менделеева. В данной статье представлены результаты таких расчетов, которые сравниваются с экспериментом.

2. Проанализируем факторы, влияющие на точность расчета сечения резонансной перезарядки иона на атоме асимптотическим методом. Считая, что формулы (4), (5) точные, получим из них связь между ошибкой в определении сечения резонансной перезарядки  $\delta$  и неопределенностями, характеризующими используемые в расчетах значения  $A$  и  $\gamma$  :

$$\frac{\Delta \delta}{\delta} = \frac{2 \Delta \gamma}{\gamma} \left[ 1 + \frac{2 \left( \frac{1}{\gamma} + \ln R_0 \right)}{\gamma R_0} \right] + \frac{4 \Delta A}{\gamma R_0 A} .$$

Можно ожидать, что ошибка  $\Delta A/A$  при вычислении коэффициента  $A$  на основании хартри-фоковских расчетов волновой функции валентного электрона в атоме того же порядка, что ошибка в определении энергии связи электрона в атоме  $\Delta I/I$  с помощью данной волновой функции. Учитывая это обстоятельство и считая, что мы не располагаем никакой дополнительной информацией об энергии связи электрона, кроме результатов хартри-фоковских расчетов, получим

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} \approx \frac{2\Delta\gamma}{\gamma} \left[ 1 + \frac{2(2 + \frac{1}{\gamma} + \ln R_0)}{\gamma R_0} \right]. \quad (7)$$

Дополнительный источник ошибки в определении сечения резонансной перезарядки связан с приближенным характером выражения (4), в котором оставлен лишь нулевой член асимптотического разложения потенциала обменного взаимодействия по степеням  $1/\gamma R_0$ . Легко получить, что ошибка, связанная с пренебрежением следующими членами разложения, оценивается выражением

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} \approx \frac{2}{\gamma R_0}. \quad (8)$$

Наконец, остановимся на погрешности, вносимой в результат в связи с использованием в выражении (5) для сечения резонансной перезарядки лишь нулевого члена разложения по степеням  $(\gamma R_0)^{-2}$ . Здесь следует заметить, что учет следующего члена разложения дает поправку к величине сечения того же порядка, что и амплитуда осциллирующей сечения резонансной перезарядки, которая по порядку величины равна

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} \approx \frac{1}{\gamma^4 R_0^2} \sqrt{\frac{\nu}{\nu_0}}. \quad (9)$$

Поэтому введение указанной поправки в расчет сечения, не учитывающий осциллирующей его энергетической зависимости, является превышением точности расчета. То же можно сказать и об учете влия-

ния неупругих процессов на сечение резонансной перезарядки. Неупругие переходы возникают в результате пересечения термов основного и возбужденного состояний молекулярного иона, которое имеет место при малых межъядерных расстояниях, где вероятность резонансной перезарядки считается равной 1/2. При учете неупругих процессов мы должны были бы отказаться от этого предположения, т.е. фактически прийти к рассмотрению осцилляций сечения.

3. До сих пор мы рассматривали резонансную перезарядку, предполагая, что в переходе участвует  $S$ -электрон и переходы осуществляются только между двумя состояниями молекулярного иона. Однако если во внешней оболочке атома находятся электроны с отличным от нуля орбитальным моментом  $l$ , то в процессе перезарядки переходы могут происходить между многими состояниями атома и иона. В результате имеется многоканальная резонансная перезарядка, и каждый канал имеет свое сечение  $\sigma_k$ , которое определяется согласно (3) и (4), причем энергия обменного взаимодействия в каждом канале определяется своими  $K$ -ми атомными параметрами  $\Delta_k$ . Поскольку в эксперименте трудно различать эти каналы, то сечение резонансной перезарядки в этом случае определяется как

$$\sigma = \frac{\sum_k g_k \sigma_k}{\sum_k g_k},$$

где  $g_k$  - статистический вес каждого состояния иона или атома. При таком способе усреднения пренебрегаем влиянием сопутствующих процессов (деполяризация момента атома или иона, переходы между состояниями тонкой структуры и т.д.). Однако хотя сечения этих сопутствующих процессов могут значительно превышать сечения резонансной перезарядки, максимальная ошибка в среднем сечении перезарядки, как показал анализ [6], не превышает нескольких процентов. Это связано с тем, что резонансная перезарядка из-за экспоненциальной зависимости обменного взаимодействия



от межъядерного расстояния происходит в очень узкой области изменения этих расстояний и эта область меньше области изменения расстояний, необходимой для эффективного протекания сопутствующих процессов.

4. Из приведенного анализа можно оценить точность рассчитанных сечений резонансной перезарядки. В случае перезарядки иона на атоме при точном знании атомных параметров оцениваем точность расчета не хуже 10%. Такая точность имеет место в перезарядке легких положительных ионов и атомов, во внешней оболочке которых имеются  $s$  - или  $p$  - электроны. Для тяжелых атомов, а особенно переходных атомов (лантаниды и актиниды), из-за отсутствия надежных расчетов для волновых функций внешних электронов точность теории  $\sim 30\%$ .

Сечения резонансной перезарядки положительных и отрицательных и молекулярных ионов на собственных атомах и молекулах приведены на рис. 1-28\*, атомные параметры  $A$  и  $\gamma$  [7] - в таблице. Там, где это возможно, теория сравнивается с экспериментом [6, 9-92]. При расчете сечений резонансной перезарядки молекулярных ионов использовалась развитая в работе [8] методика учета внутренних степеней свободы молекулы и несферичности волновой функции электрона в молекулярном ионе.

---

\* На рисунках сплошная линия - теория.

## Л и т е р а т у р а

1. Смирнов Б.М. Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М., Атомиздат, 1973.
2. Clementi E., Roetti C. - Atomic Data & Nucl. Data Tables, 1974, v. 14, p. 177.
3. Froese-Fischer C. - Atomic Data, 1972, v.4, p.301.
4. Mann J.B. - Atomic Data & Nucl. Data Tables, 1973, v. 12, p. 502.
5. Никитин Е.Е., Овчинников М.Я. - "Усп. физ. наук", 1972, т. 104, с. 379.
6. Думан Е.Л., Смирнов Б.М. - "Теплофизика высоких температур", 1974, т. 12, с. 502.
7. Евсеев А.В., Радциг А.А., Смирнов Б.М. - "Оптика и спектроскопия", 1978, т. 44, с. 833.
8. Евсеев А.В., Радциг А.А., Смирнов Б.М. - ЖЭТФ, 1979, т. 77, с. 560.
9. Беляев В.А., Брежнев Б.Г., Ерастов Е.М. - ЖЭТФ, 1967, т. 52, с. 1170.
10. Hummer D.G., Stebbings R.F., Fite W.L. - Phys. Rev., 1960, v. 119, p. 663.
11. Fite W.L., Smith A.H., Stebbings R.F. - Proc. Roy. Soc., 1962, v. A268, p. 527.
12. McClure G.W. - Phys. Rev., 1966, v. 148, p. 47.
13. Bayfield J.E. - Phys. Rev., 1969, v. 185, p. 105.
14. Dalgarno A., Yadov H.N. - Proc. Phys. Soc., 1953, v. A66, p. 173.
15. Ryding G., Gilbody H.B. Abstr. of the IV Int. Conf. Phys. of Elec. & Atomic Collis. (Quebec, 1965). N.Y., 1965, p. 302.

16. Hasted J.B., Phil D. - Proc. Roy. Soc., 1951, v. A205, p. 421.
17. Hasted J.B., Stedeford J.B.H. - Proc. Roy. Soc., 1955, v. 227, p. 446.
18. Gilbody H.B., Hasted J.B. - Proc. Roy. Soc., 1957, v. 239, p. 334.
19. Porter R.F. - J. Chem. Phys., 1954, v. 22, p. 974.
20. Dillon J.A., Sheridan W.F., Edwards H.D., Ghosh S.N. - J. Chem. Phys., 1955, v. 23, p. 776.
21. Ghosh S.N., Sheridan W.F. - Ind. J. Phys., 1957, v. 31, p. 337.
22. Cramer W.H., Simons J.H. - J. Chem. Phys., 1956, v. 26, p. 1272.
23. Gustafsson E., Lindholm E. - Arkiv. fys., 1960, v. 18, p. 219.
24. Vance D.W., Bailey T.L. - J. Chem. Phys., 1966, v. 44, p. 486.
25. Беляев В.А., Брежнев Б.Г., Ерастов Е.М. - ЖЭТФ, 1968, т. 54, с. 1720.
26. Nagy S.W., Savola W.J., Polack E. - Phys. Rev., 1969, v. 177, p. 71.
27. Латылов З.З., - "Письма в ЖЭТФ", 1970, т. 11, с. 189.
28. Eisele F.L., Nagy S.W. - J. Chem. Phys., 1976, v. 65, p. 752.
29. Hegerberg R., Stefansson T., Elford M.T. - J. Phys., B, 1978, v. 11, p. 133.
30. Helm H. - J. Phys., B, 1977, v. 10, p. 3683.
31. Jones P.R., Ziemba F.P., Moses H.A., Everkart E. - Phys. Rev., 1959, v. 113, p. 182.
32. Hinds E.A., Novick R. - J. Phys., B, 1978, v.11, p. 2201.

33. Vestal M.L., Blakley C.R., Futrell J.H. - *Phys. Rev.*, 1978, v. 17A, p. 1321.
34. Lorents D.C., Black G. - *Phys. Rev.*, 1965, v. 137A, p. 1049.
35. Daley H.L., Perel J. *Proc. 6 Int. Conf. on Phys. Electr. & Atom. Collis.* Boston, 1969, p. 1051.
36. Бухтеев А.М., Быдин Ю.Ф. - "Изв. АН СССР. Сер. физики", 1960, т. XXIУ, № 8, с. 964.
37. Кушнир Р.М., Палюх Б.М., Сена Л.А. - "Изв. АН СССР. Сер. физики", 1959, т. 23, с. 1007.
38. Бухтеев А.М., Быдин Ю.Ф. - *ЖТФ*, 1959, т. 29, с. 12.
39. Палюх Б.М., Савчин А.С. - *ЖТФ*, 1958, т. 38, с. 1061.
40. Perel J., Yahiku A.Y. *Proc. 5 Int. Conf. on Phys. Electr. & Atom. Collis.*, Leningrad, Nauka, 1967, p.400.
41. Gentry W.R., Lee Y., Mahan B.H. - *J. Chem. Phys.*, 1968, v. 49, p. 1758.
42. Кушнир Р.М. - *Укр. физ. журн.*, 1958, т. 3, с. 788.
43. Чкуасели Д.В., Николайшвили У.Д., Гулдамишвили А.И. - "Изв. АН СССР. Сер. физики", 1960, т. 24, с. 970.
44. Чкуасели Д.В., Николайшвили У.Д., Гулдамишвили А.И. - *ЖТФ*, 1960, т. 30, с. 817.
45. Perel J., Vernon R.H., Daley H.L. - *Phys. Rev.*, 1965, v. 138A, p. 937.
46. Кушнир Р.М., Бучма М.М. - "Изв. АН СССР. Сер. физики", 1960, т. 24, с. 986.
47. Marino L.L., Smith A.C.H., Caplinger E. - *Phys. Rev.*, 1962, v. 128, p. 2243.
48. Marino L.L. - *Phys. Rev.*, 1966, v. 152, p. 46.
49. Палюх Б.М., Савчин А.С. - *ЖТФ*, 1968, т. 38, с. 1055.

50. Oluwole A.F., Togun E.A., Olaniyi H.B. - J. Phys., B, 1977, v. 10, p. 3483.
51. Ziegler B. - Z. Phys., 1953, v. 136, p. 108.
52. DyHeer F.J., Huisenga W., Kistemarker J. - Physika, 1957, v. 23, p. 187.
53. Флакс И.П., Соловьев Е.С. - ЖТФ, 1958, т. 28, с. 599.
54. Cramer W.H. - J. Chem. Phys., 1958, v. 28, p. 688.
55. Kaneko Y., Kanomata I., Kobayashi N. - J. Phys. Soc. Japan, 1969, v. 27, p. 992.
56. Kobayashi N. - Mass Spectroscopy, 1972, v. 20, p. 123; Kaneko Y., Kobayashi N., Kanomata I. - Mass Spectroscopy, 1970, v. 18, p. 920.
57. Mahadevan P., Magnuson E.D. - Phys. Rev., 1968, v. 171, p. 103.
58. Berry H.W. - Phys. Rev., 1948, v. 74, p. 848.
59. Федоренко Н.В., Афросимов В.В., Каминкер Д.М. - ЖТФ, 1956, т. 26, с. 1929.
60. Sluyters J.M., DeHaas E., Kistemaker J. - Physika, 1959, v. 25, p. 1356.
61. Devienne F.M., Souquet J., Clapier R. - Compt. Rend. Acad. Sci. Colon., 1963, v. 256, p. 2331.
62. Федоренко Н.В. - ЖТФ, 1954, т. 24, с. 2113.
63. Williams J.F. - Canad. J. Phys., 1968, v. 46, p. 2339.
64. Kobayashi N. - J. Phys. Soc. Japan, 1975, v. 38, p. 519.
65. Федоренко Н.В., Флакс И.П., Филиппенко Л.Г. - ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 719.
66. Smith D.L., Futrell J.H. - J. Chem. Phys., 1973, v. 59, p. 463.

67. Amme R.C., Haugsjaa P.O. - Phys. Rev., 1963, v. 165, p. 63.
68. Stebbings R.F., Smith A.C., Ehrhardt H. - J. Geophys. Res., 1964, v. 69, p. 2349; Atom. Collis. Process. III Conf. Amsterdam, 1964, p. 814.
69. Кушнир Р.М., Палюх Б.М., Савчин Л.С. - ЖТФ, 1965, т. 35, с. 2212.
70. Палюх Б.М., Савчин Л.С., Чигинь В.И. - Ж. прикл. спектроск., 1970, т. 13, с. 267.
71. Палюх Б.М., Сена Л.А. - ЖЭТФ, 1950, т. 20, с. 481.
72. Hummer D.G., Stebbings R.F., Fite W.L., Branscob L.M. - Phys. Rev., 1960, v. 119, p. 668.
73. Dalgarno A., McDowell M.R.C. - Proc. Phys. Soc., 1956, v. A69, p. 615.
74. Bardsley J.N. - Proc. Phys. Soc., 1967, v. 91, p. 300.
75. Snudds R.M. e.a. - Phys. Rev., 1971, v. 3A, p. 477.
76. Gurnee E.F., Magee J.L. - J. Chem. Phys., 1957, v. 26, p. 1237.
77. Leventhal J.J., Moran T.F., Friedman L. - J. Chem. Phys., 1967, v. 46, p. 4666.
78. Bates D.R., Reid R.H. - Proc. Royal Soc., 1969, v. A310, p. 1.
79. Rapp I., Fransis E.F. - J. Chem. Phys., 1962, v. 37, p. 2631.
80. Cramer W.H. - J. Chem. Phys., 1961, v. 35, p.836.
81. Koopman D.W. - Phys. Rev., 1967, v. 154, p. 79.
82. Hayden H.C., Amme R.C. - Phys. Rev., 1968, v. 172, p. 104.

83. Smith D.L., Kevan L. - J. Am. Chem. Soc., 1971, v. 93, p. 2113.
84. Moran T.F., Flannery M.R., Cosby P.C. - J. Chem. Phys., 1974, v. 61, p. 1261.
85. Stebbings R.F., Turner B.N., Smith A.C.H. - J. Chem. Phys., 1963, v. 38, p. 2277.
86. Ghosh S.N., Sheridan W.F. - J. Chem. Phys., 1957, v. 27, p. 1436.
87. Utterbac N.G., Miller G.H. - Rev. Sci. Instr., 1961, v. 32, p. 1101.
88. Baer T., Murray P.T., Squires L. - J. Chem. Phys., 1978, v. 68, p. 4901.
89. Varney R.N. - Phys. Rev., 1970, v. A2, p. 370.
90. Gray D.R., Rees J.A. - J. Phys., B, 1972, v. 5, p. 1048.
91. Amme R.C., Utterback N.G. In: Atomic Collision Processes, Amsterdam, 1964, p. 847.
92. Cosby P.C., Moran T.F., Flannery M.R. - J. Chem. Phys., 1974, v. 61, p. 1259.

Асимптотические параметры волновой функции электрона  
(ат. ед.)

Атом, ион	Параметры		
	$\gamma$	A	$\frac{\Delta A}{A}$ , %
1	2	3	4
1. А т о м ы			
He ( $^1S_0$ ), 1s	1,344	2,87	1
Li ( $^2S_{1/2}$ ), 2s	0,629	0,82	3
Be ( $^1S_0$ ), 2s	0,828	1,62	5
B ( $^2P_{1/2}^0$ ), 2p	0,781	0,88	6
C ( $^3P_0$ ), 2p	0,910	1,30	11
N ( $^4S_{3/2}^0$ ), 2p	1,033	1,49	17
O ( $^3P_2$ ), 2p	1,000	1,32	19
F ( $^2P_{3/2}^0$ ), 2p	1,132	1,59	10
Ne ( $^1S_0$ ), 2p	1,259	1,75	11
Na ( $^2S_{1/2}$ ), 3s	0,615	0,74	2
Mg ( $^1S_0$ ), 3s	0,749	1,32	5
Al ( $^2P_{1/2}^0$ ), 3p	0,663	0,61	9
Si ( $^3P_0$ ), 3p	0,774	1,10	10
P ( $^4S_{3/2}$ ), 3p	0,878	1,65	12
S ( $^3P_2$ ), 3p	0,873	1,11	13
Cl ( $^2P_{3/2}^0$ ), 3p	0,978	1,78	8
Ar ( $^1S_0$ ), 3p	1,070	2,11	4
K ( $^2S_{1/2}$ ), 4s	0,565	0,52	10



1	2	3	4
Ca ( $^1S_0$ ), 4s	0,670	0,95	13
Sc ( $^2D_{3/2}$ ), 4s	0,693	1,11	8
Ti ( $^3F_2$ ), 4s	0,708	1,16	7
V ( $^4F_{3/2}$ ), 4s	0,704	1,18	4
Cr ( $^7S_3$ ), 4s	0,705	1,13	6
Mn ( $^6S_{5/2}$ ), 4s	0,739	1,31	6
Fe ( $^5D_4$ ), 4s	0,762	1,40	8
Co ( $^4F_{9/2}$ ), 4s	0,760	1,42	6
Ni ( $^3F_4$ ), 4s	0,749	1,42	2
Cu ( $^2S_{1/2}$ ), 4s	0,753	1,29	2
Zn ( $^1S_0$ ), 4s	0,831	1,69	10
Ga ( $^2P_{1/2}^0$ ), 4p	0,664	0,60	7
Ge ( $^3P_0$ ), 4p	0,761	1,29	9
As ( $^4S_{3/2}^0$ ), 4p	0,849	1,58	10
Se ( $^3P_2$ ), 4p	0,847	1,52	10
Br ( $^2P_{3/2}^0$ ), 4p	0,933	1,83	3
Kr ( $^1S_0$ ), 4p	1,014	2,22	3
Rb ( $^2S_{1/2}$ ), 5s	0,555	0,48	9
Sr ( $^1S_0$ ), 5s	0,647	0,86	10
Y ( $^2D_{3/2}$ ), 5s	0,685	1,02	13
Zr ( $^3F_2$ ), 5s	0,709	1,15	10
Nb ( $^6D_{5/2}^0$ ), 5s	0,711	1,16	11

1	2	3	4
Mo ( $^7S_3$ ), 5s	0,722	1,23	11
Tc ( $^6S_{5/2}$ ), 5s	0,731	1,28	10
Ru ( $^5F_5$ ), 5s	0,736	1,22	11
Rh ( $^4F_{7/2}$ ), 5s	0,740	1,19	14
Pd ( $^1S_0$ ), 4d	0,782	0,26	5
Ag ( $^2S_{1/2}$ ), 5s	0,746	1,18	15
Cd ( $^1S_0$ ), 5s	0,813	1,59	14
In ( $^2P_{1/2}^0$ ), 5p	0,652	0,58	17
Sn ( $^3P_0$ ), 5p	0,734	1,02	15
Sb ( $^4S_{3/2}^0$ ), 5p	0,797	1,67	10
Te ( $^3P_2$ ), 5p	0,814	1,65	9
I ( $^2P_{3/2}^0$ ), 5p	0,876	1,94	9
Xe ( $^1S_0$ ), 5p	0,944	2,37	9
Cs ( $^2S_{1/2}$ ), 6s	0,535	0,39	9
Ba ( $^1S_0$ ), 6s	0,619	0,72	11
La ( $^2D_{3/2}$ ), 6s	0,642	0,72	43
Ta ( $^4F_{3/2}$ ), 6s	0,761	1,31	15
W ( $^5D_0$ ), 6s	0,766	1,35	14
Pt ( $^3D_3$ ), 6s	0,813	1,38	19
Au ( $^2S_{1/2}$ ), 6s	0,823	1,41	20
Hg ( $^1S_0$ ), 6s	0,876	1,82	21
Tl ( $^2P_{1/2}^0$ ), 6p	0,670	0,65	10

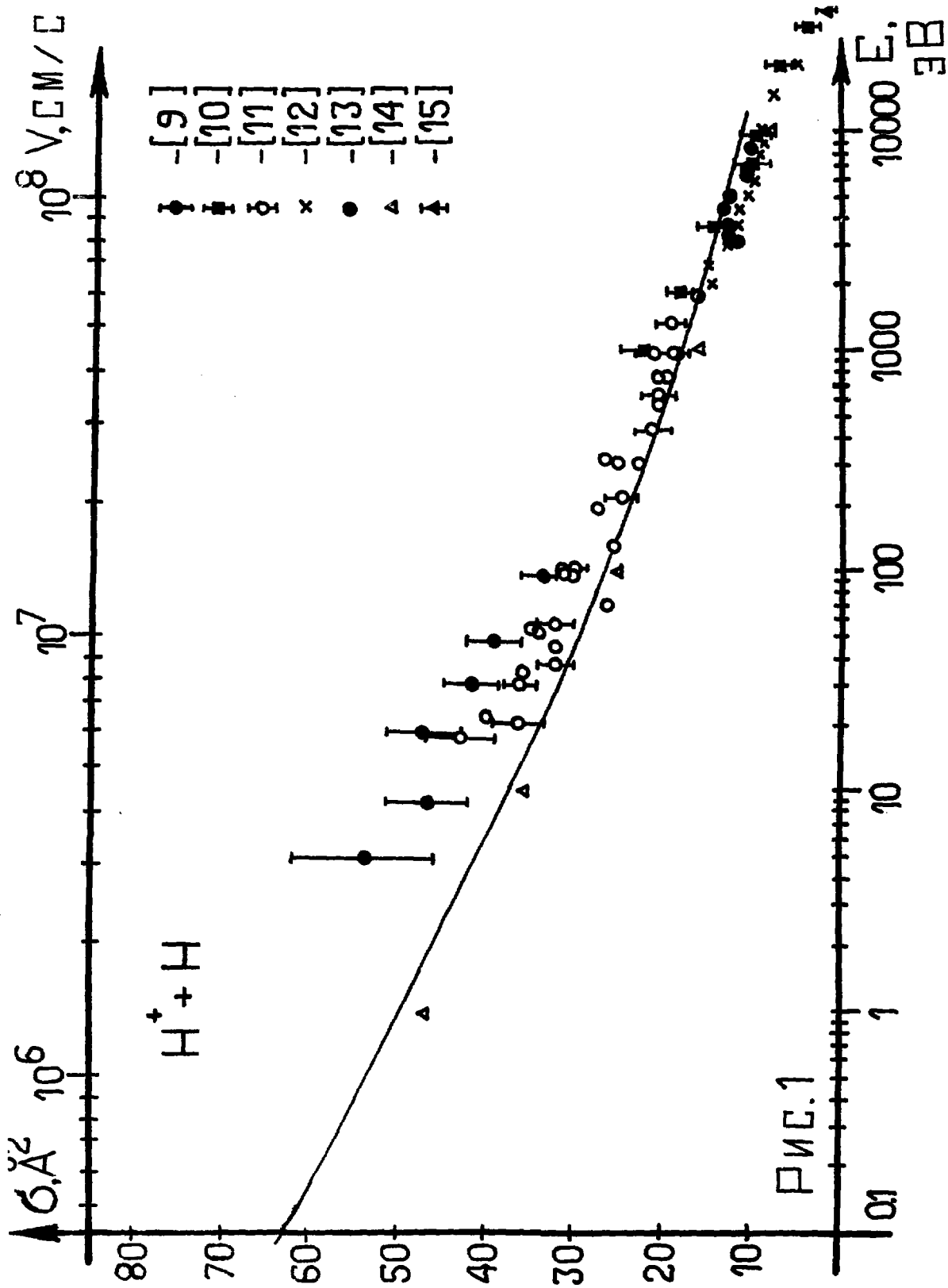
1	2	3	4
Pb ( $^3P_0$ ), 6p	0,739	1,11	28
Bi ( $^4S_{3/2}^0$ ), 6p	0,732	1,54	43
Rn ( $^1S_0$ ), 6p	0,889	2,27	11
Th ( $^3F_2$ ), 7s	0,675	0,94	14
U ( $^5L_6$ ), 7s	0,670	0,89	14
Pu ( $^7F_0$ ), 7s	0,612	0,73	8

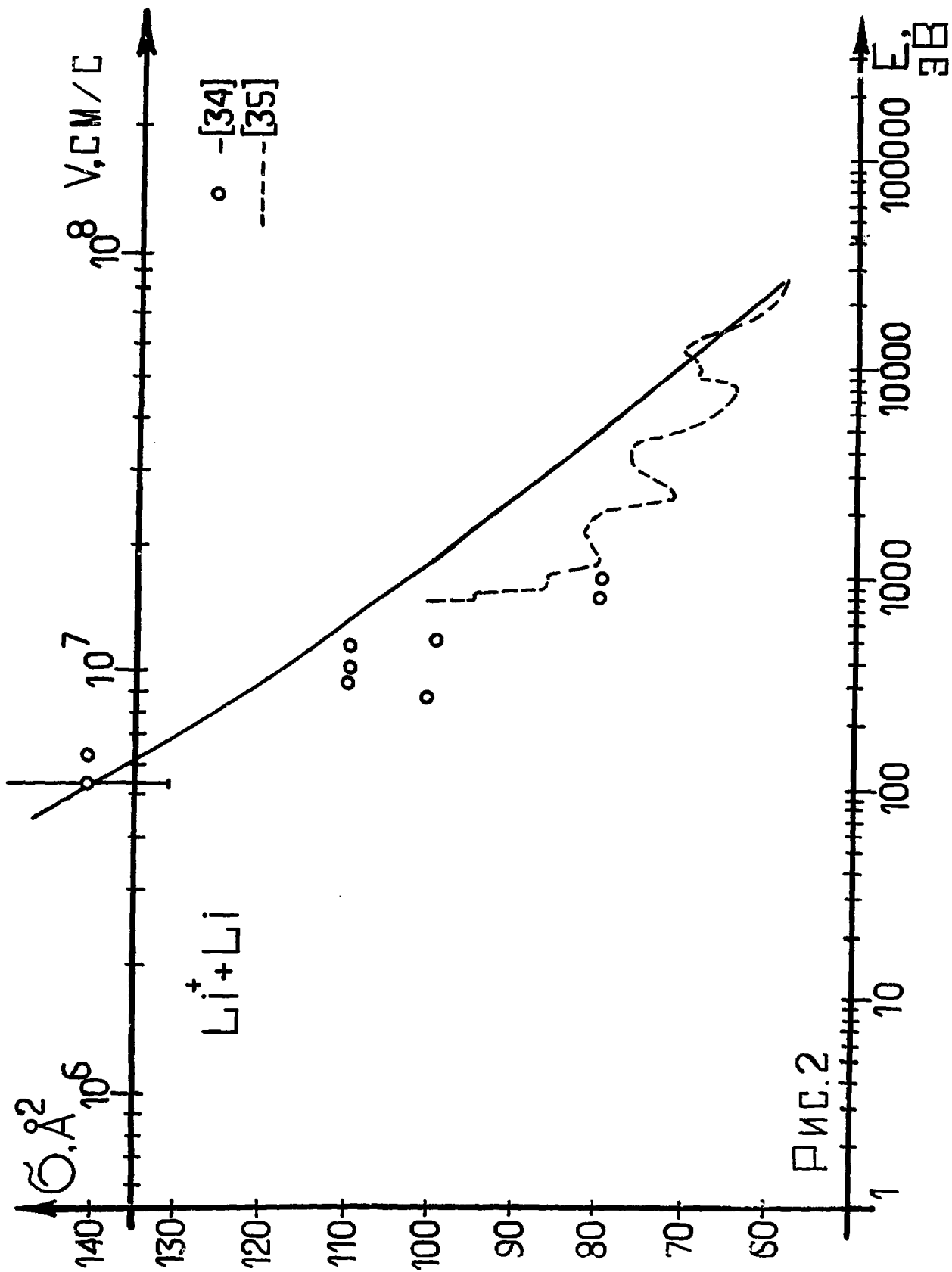
2. Положительные ионы

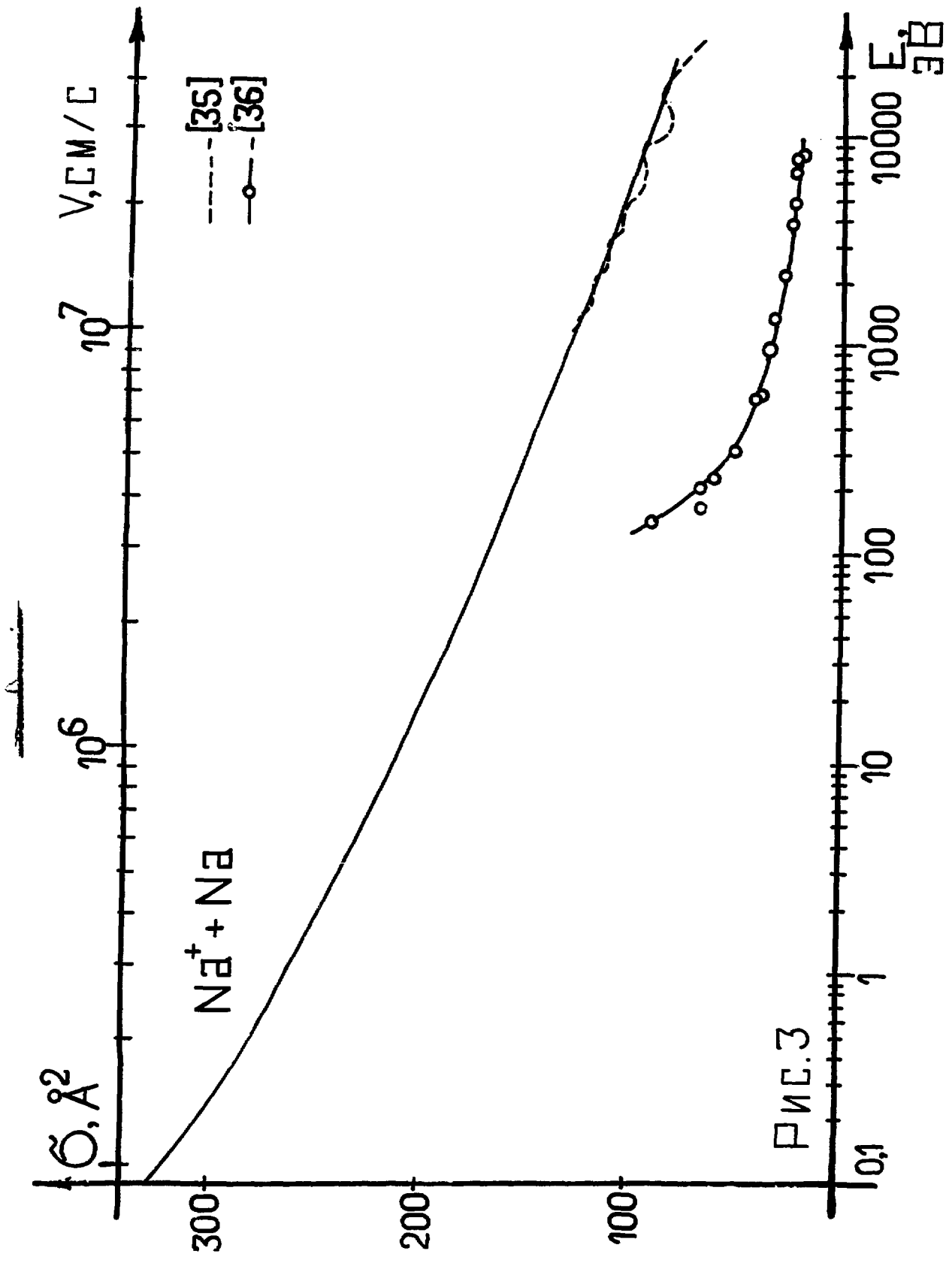
Li <sup>+</sup> ( $^1S_0$ ), 1s	2,357	6,48	6
Be <sup>+</sup> ( $^2S_{1/2}$ ), 2s	1,157	2,67	1
B <sup>+</sup> ( $^1S_0$ ), 2s	1,360	6,57	18
C <sup>+</sup> ( $^2P_{1/2}^0$ ), 2p	1,339	2,54	6
N <sup>+</sup> ( $^3P_0$ ), 2p	1,475	2,89	9
O <sup>+</sup> ( $^4S_{3/2}^0$ ), 2p	1,609	3,36	9
F <sup>+</sup> ( $^3P_2$ ), 2p	1,604	3,11	11
Ne <sup>+</sup> ( $^2P_{3/2}^0$ ), 2p	1,738	3,41	11
Na <sup>+</sup> ( $^1S_0$ ), 2p	1,865	3,68	11
Mg <sup>+</sup> ( $^2S_{1/2}$ ), 3s	1,050	2,29	1
Al <sup>+</sup> ( $^1S_0$ ), 3s	1,176	3,03	8
Si <sup>+</sup> ( $^2P_{1/2}^0$ ), 3p	1,095	1,80	13
P <sup>+</sup> ( $^3P_0$ ), 3p	1,200	2,51	14
S <sup>+</sup> ( $^4S_{3/2}^0$ ), 3p	1,311	3,24	11

1	2	3	4
$Cl^+(^3P_2), 3p$	1,322	3,14	8
$Ar^+(^2F_{3/2}^0), 3p$	1,424	3,38	15
$K^+(^1S_0), 3p$	1,529	3,88	12
$Ca^+(^2S_{1/2}), 4s$	0,935	1,58	2
$Ti^+(^4F_{3/2}), 4s$	1,00	2,01	3
$Fe^+(^6D_{9/2}), 4s$	1,091	2,61	6
$Cu^+(^1S_0), 3d$	1,222	0,47	22
$Zn^+(^2S_{1/2}), 4s$	1,150	2,92	6
$Br^+(^3P_2), 4p$	1,185	2,67	19
$Kr^+(^2P_{3/2}^0), 4p$	1,393	3,68	10
$Rb^+(^1S_0), 4p$	1,409	3,83	2
$Sr^+(^2S_{1/2}), 5s$	0,898	1,34	3
$Ag^+(^1S_0), 4d$	1,257	0,72	38
$Cd^+(^2S_{1/2}), 5s$	1,115	2,64	8
$J^+(^3P_2), 5p$	1,194	2,89	13
$Xe^+(^2P_{3/2}^0), 5p$	1,245	3,25	11
<b>3. Отрицательные ионы</b>			
$Li^-(^1S), 2s$	0,212	1,25	44
$B^-(^3P), 2p$	0,148	0,25	54
$C^-(^4S), 2p$	0,306	0,58	34
$O^-(^2P), 2p$	0,329	0,42	37

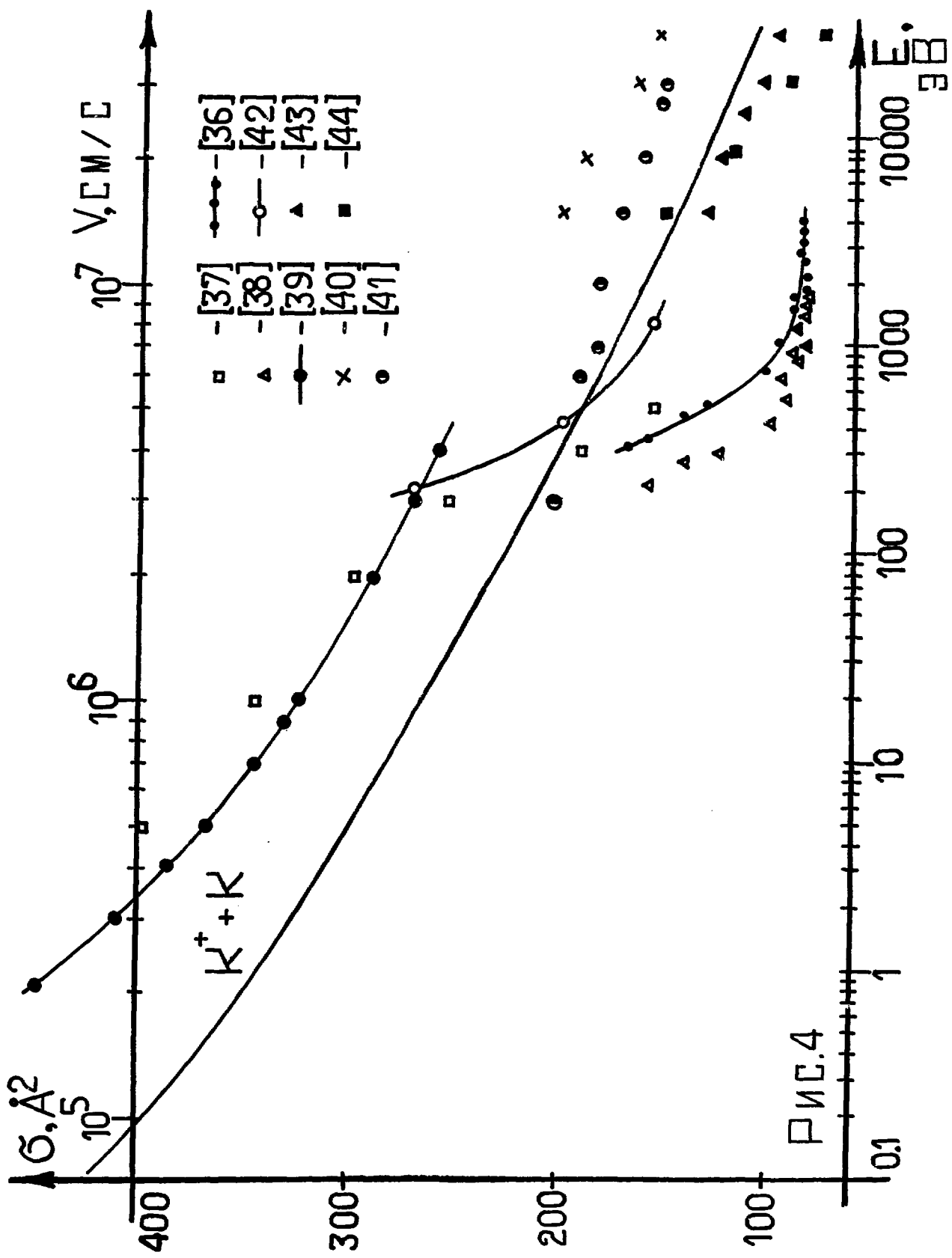
1	2	3	4
$F^{-}(^1S), 2p$	0,504	0,70	18
$Na^{-}(^1S), 3s$	0,199	1,22	48
$Al^{-}(^3P), 3p$	0,192	0,49	39
$Si^{-}(^4S), 3p$	0,320	0,98	35
$P^{-}(^3P), 3p$	0,238	0,52	53
$S^{-}(^2P), 3p$	0,390	0,93	20
$Cl^{-}(^1S), 3p$	0,515	1,26	10
$K^{-}(^1S), 4s$	0,192	1,23	76
$Fe^{-}(^4F), 4s$	0,171	0,83	24
$Co^{-}(^3F), 4s$	0,257	1,50	43
$Ni^{-}(^2D), 4s$	0,309	1,98	68
$Cu^{-}(^1S), 4s$	0,301	1,83	58
$Se^{-}(^2P), 4p$	0,385	1,08	19
$Br^{-}(^1S), 4p$	0,498	1,41	6
$Rb^{-}(^1S), 5s$	0,189	1,54	122
$Ag^{-}(^1S), 5s$	0,309	2,00	70
$Sn^{-}(^4S), 5p$	0,303	1,16	46
$Sb^{-}(^3P), 5p$	0,278	0,90	42
$Te^{-}(^2P), 5p$	0,374	1,31	27
$J^{-}(^1S), 5p$	0,474	1,76	23

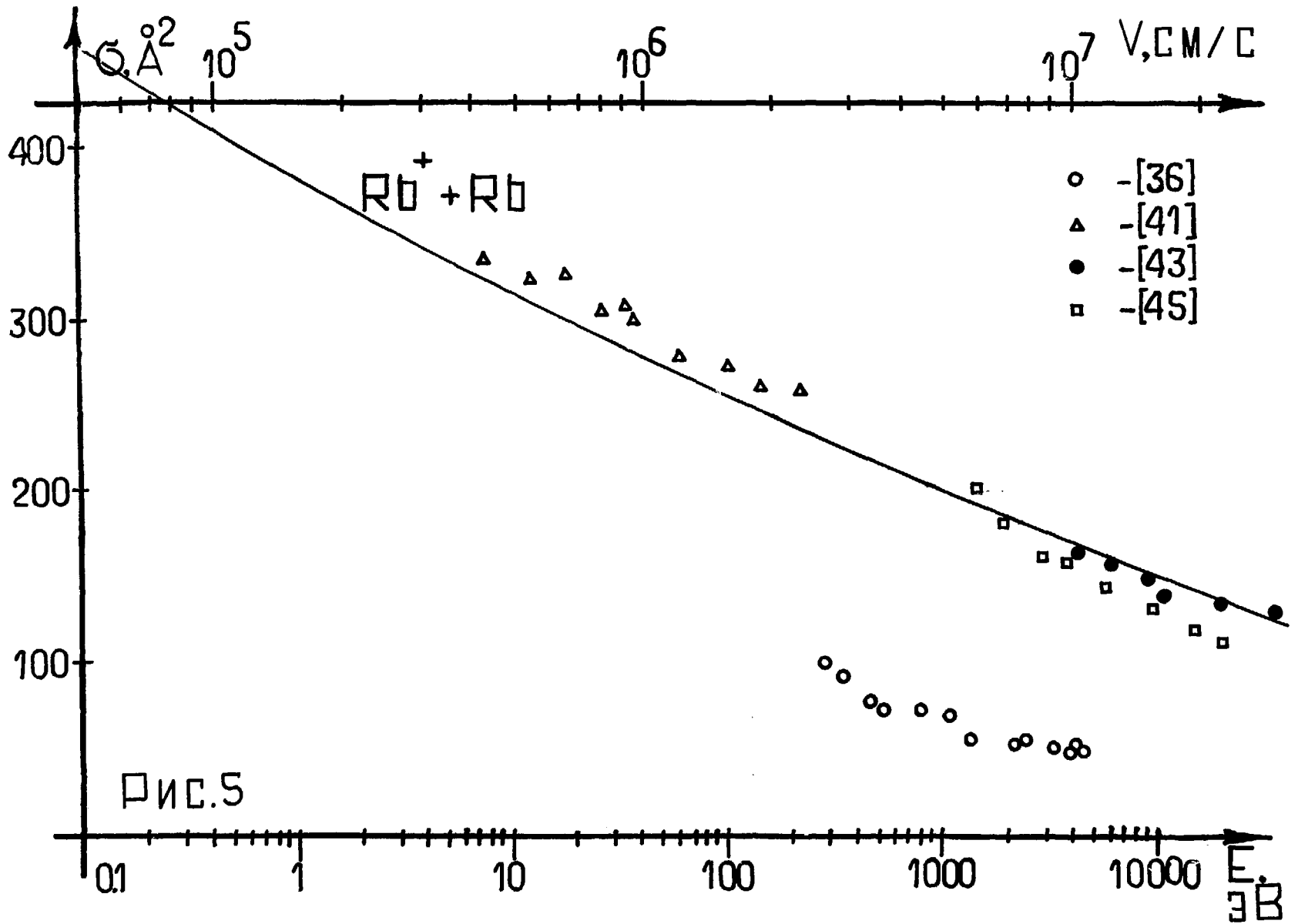


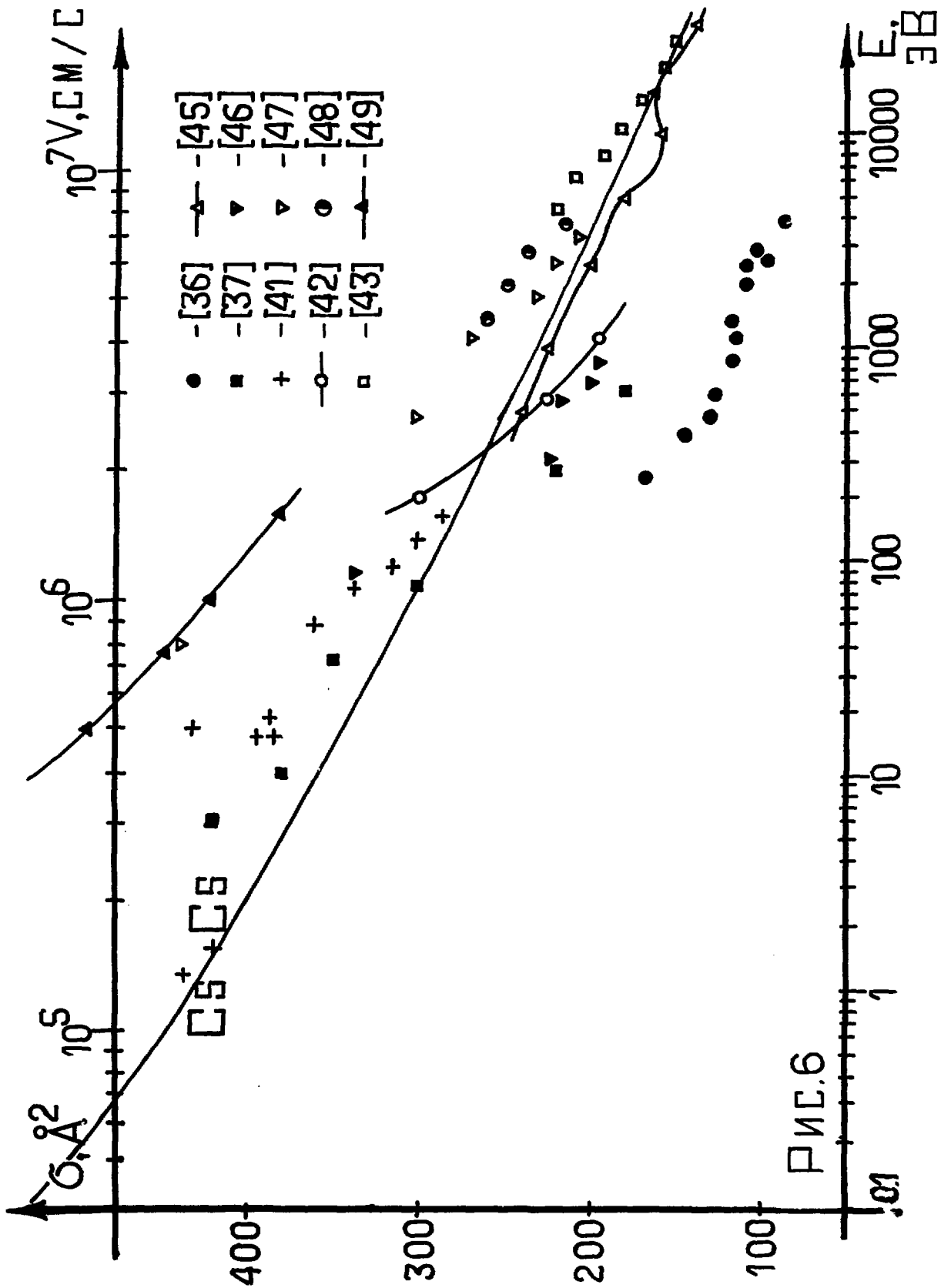












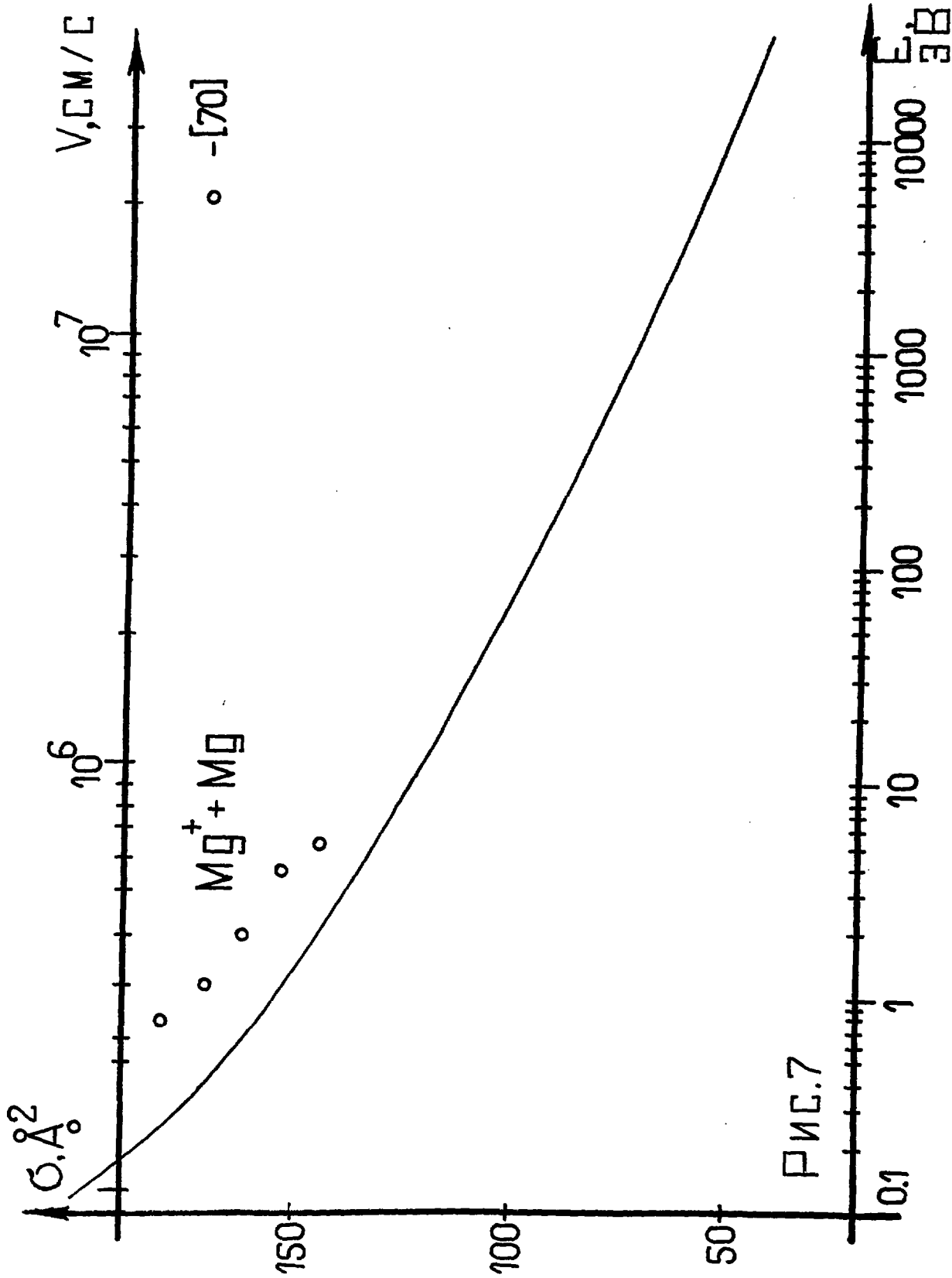
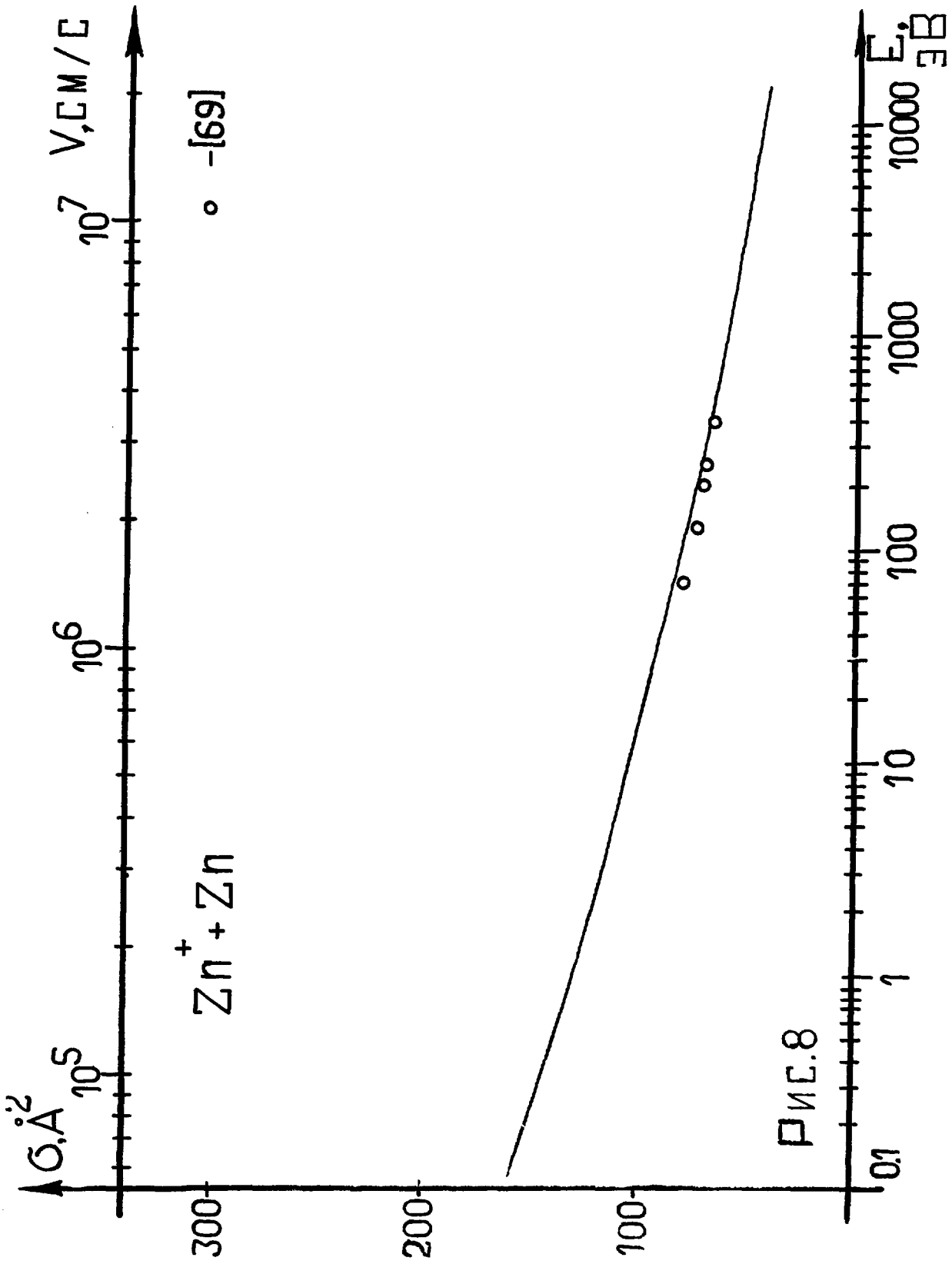
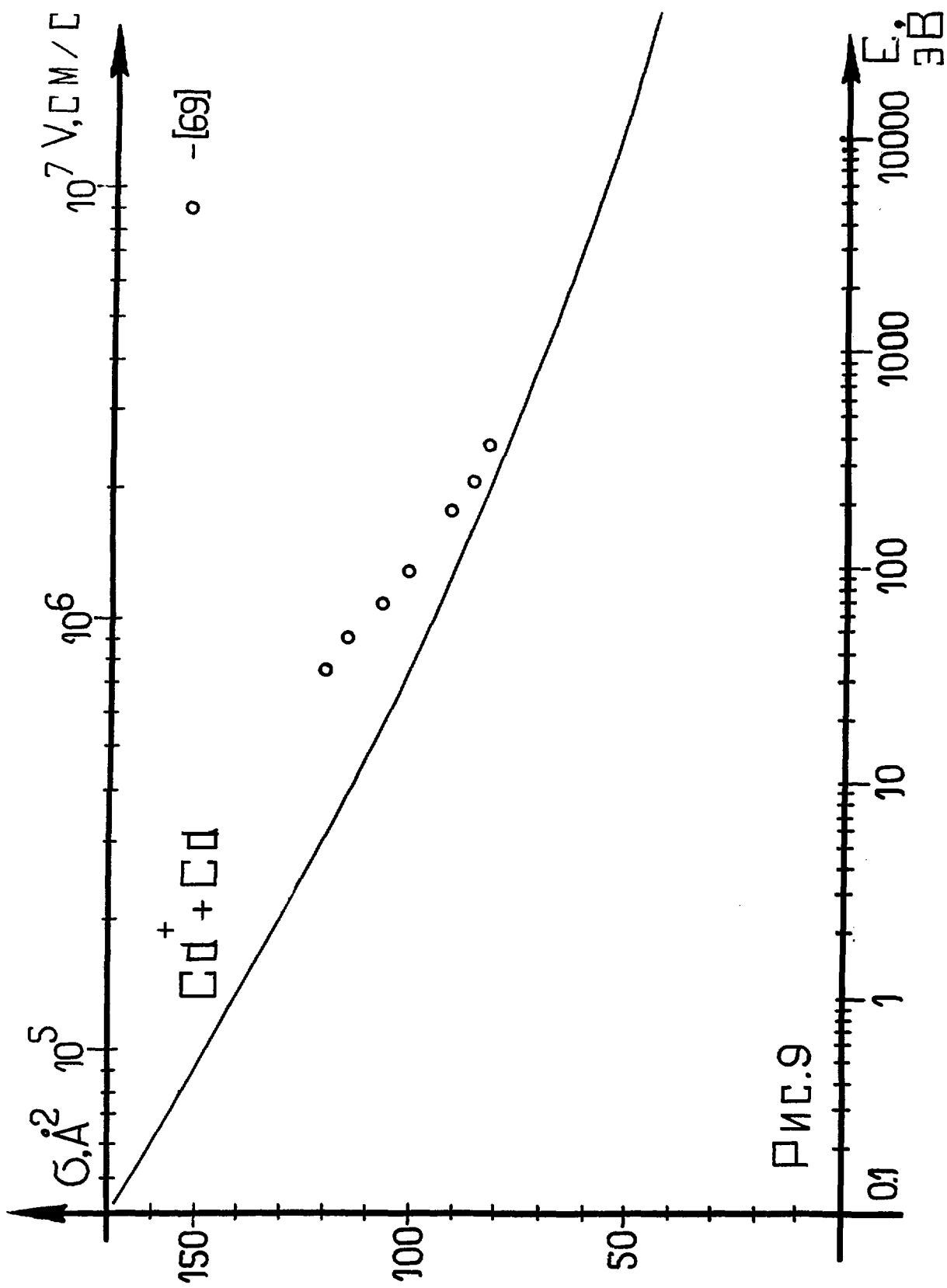
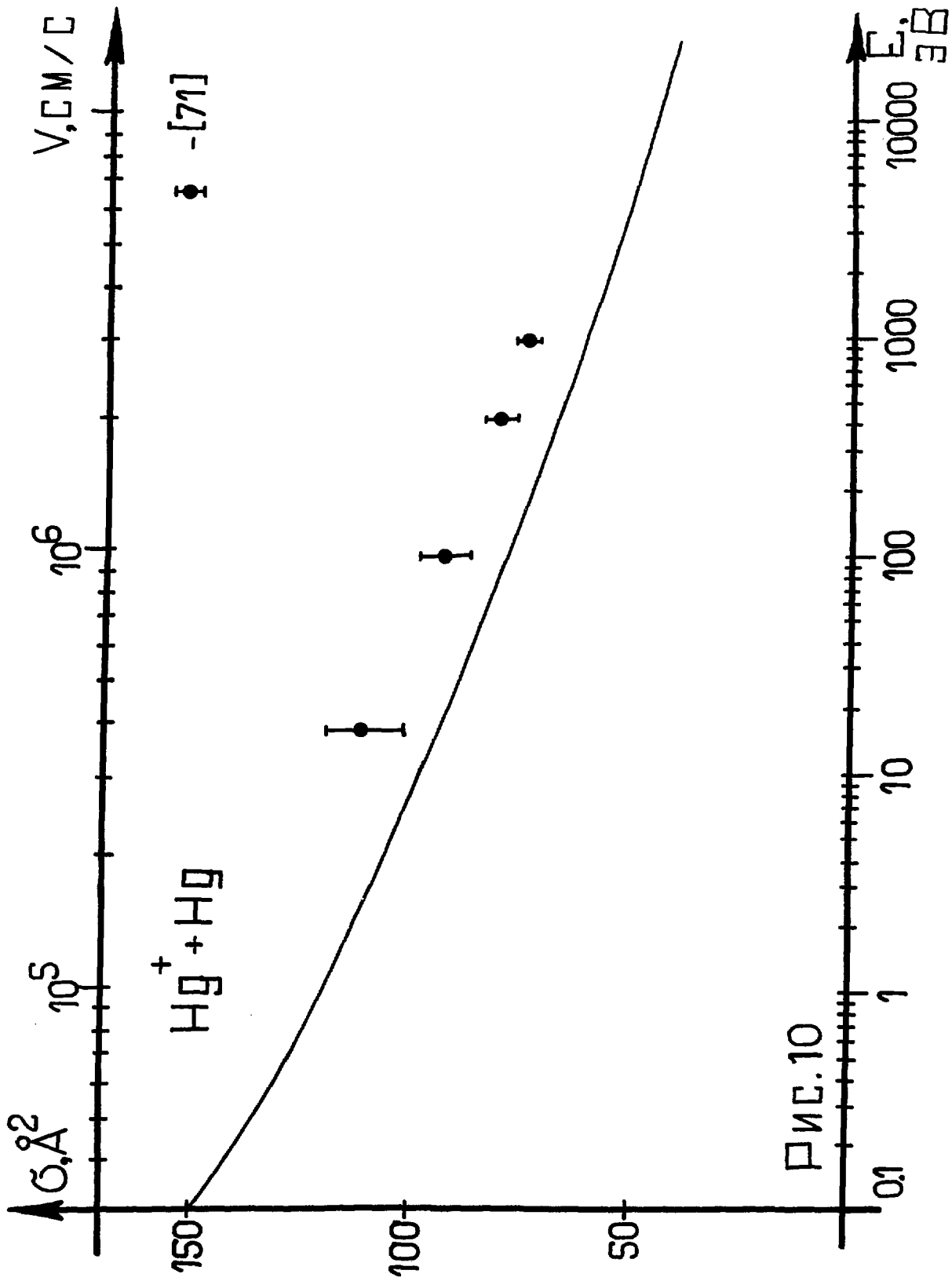
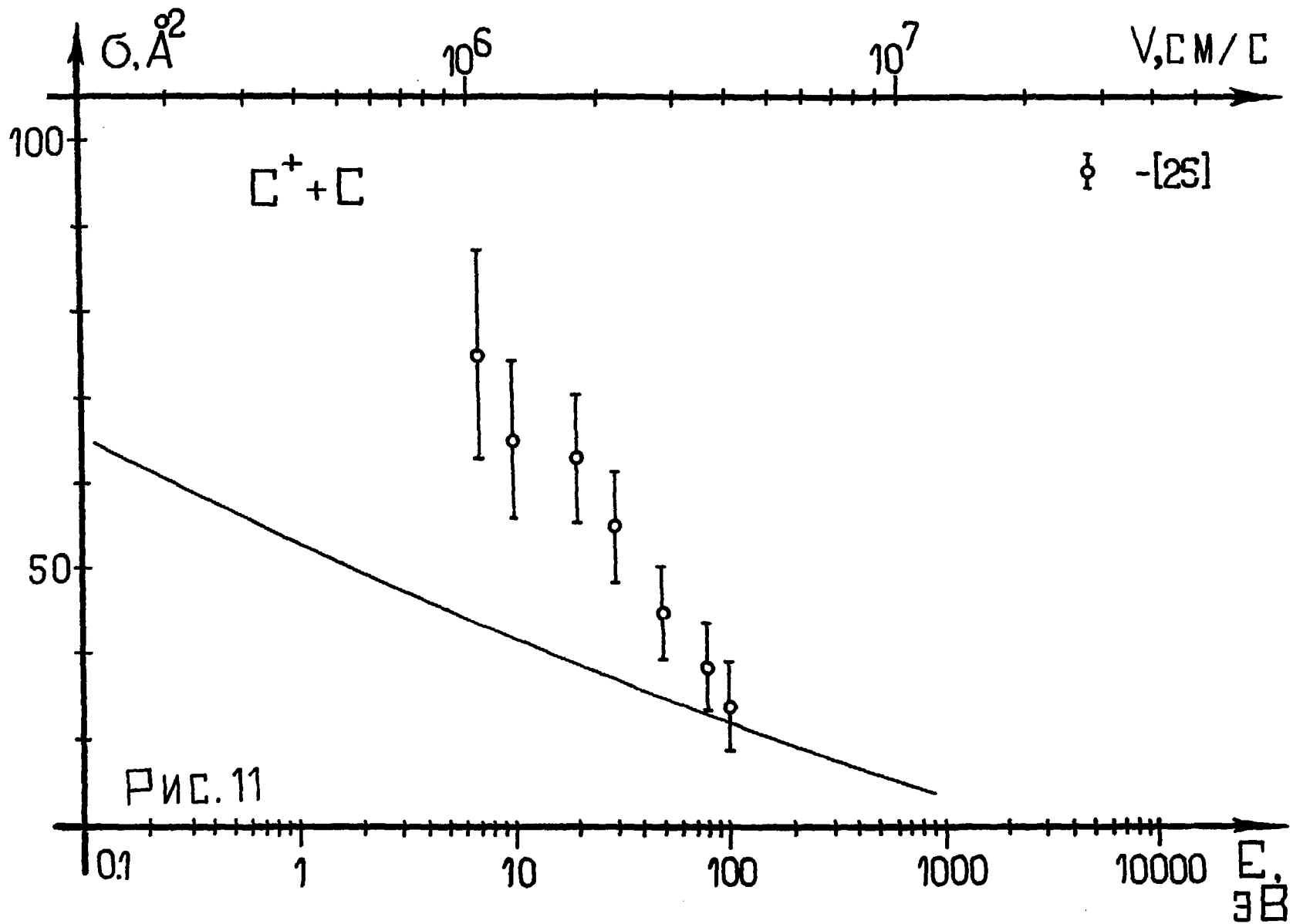


Рис. 7











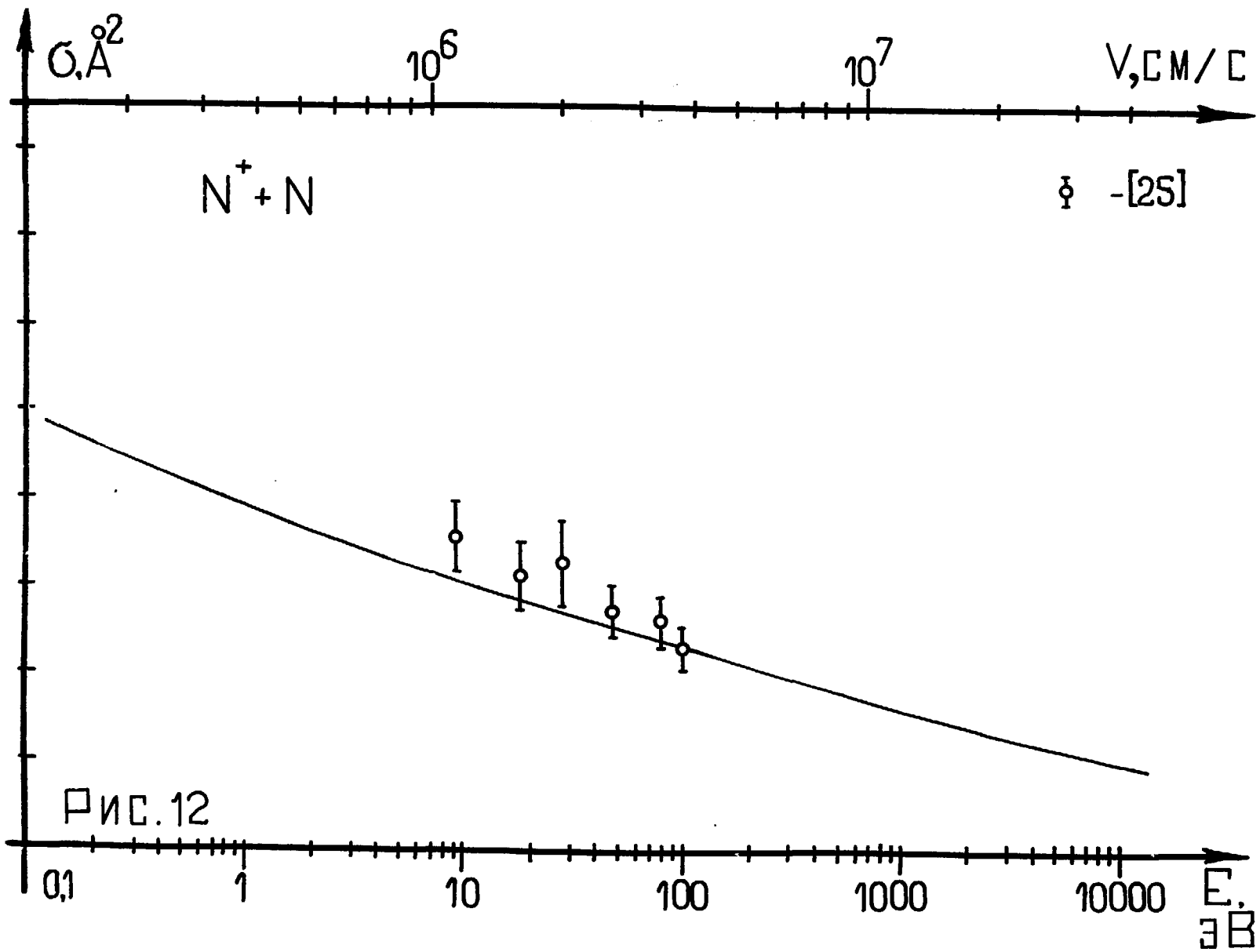


Рис. 12

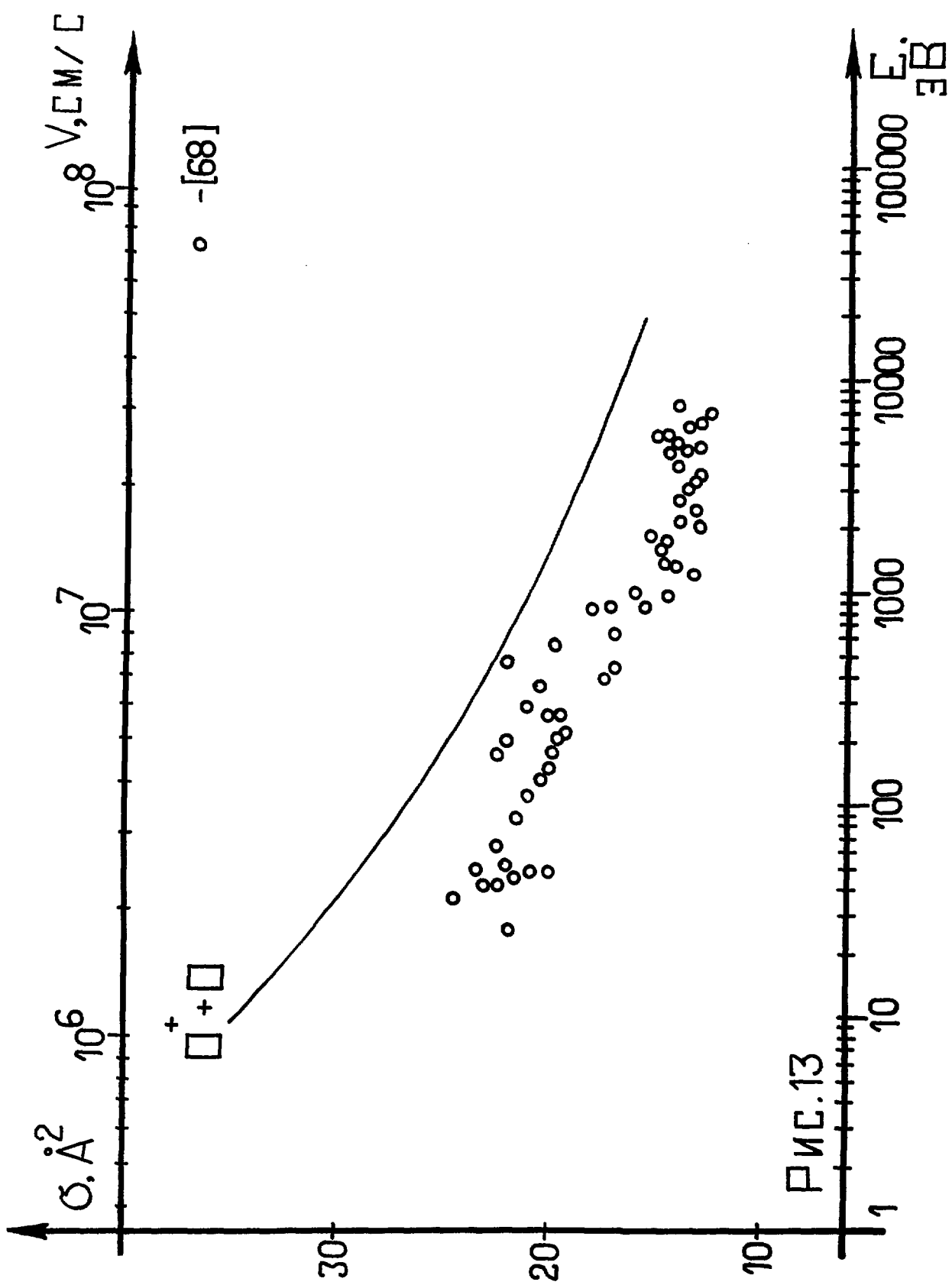
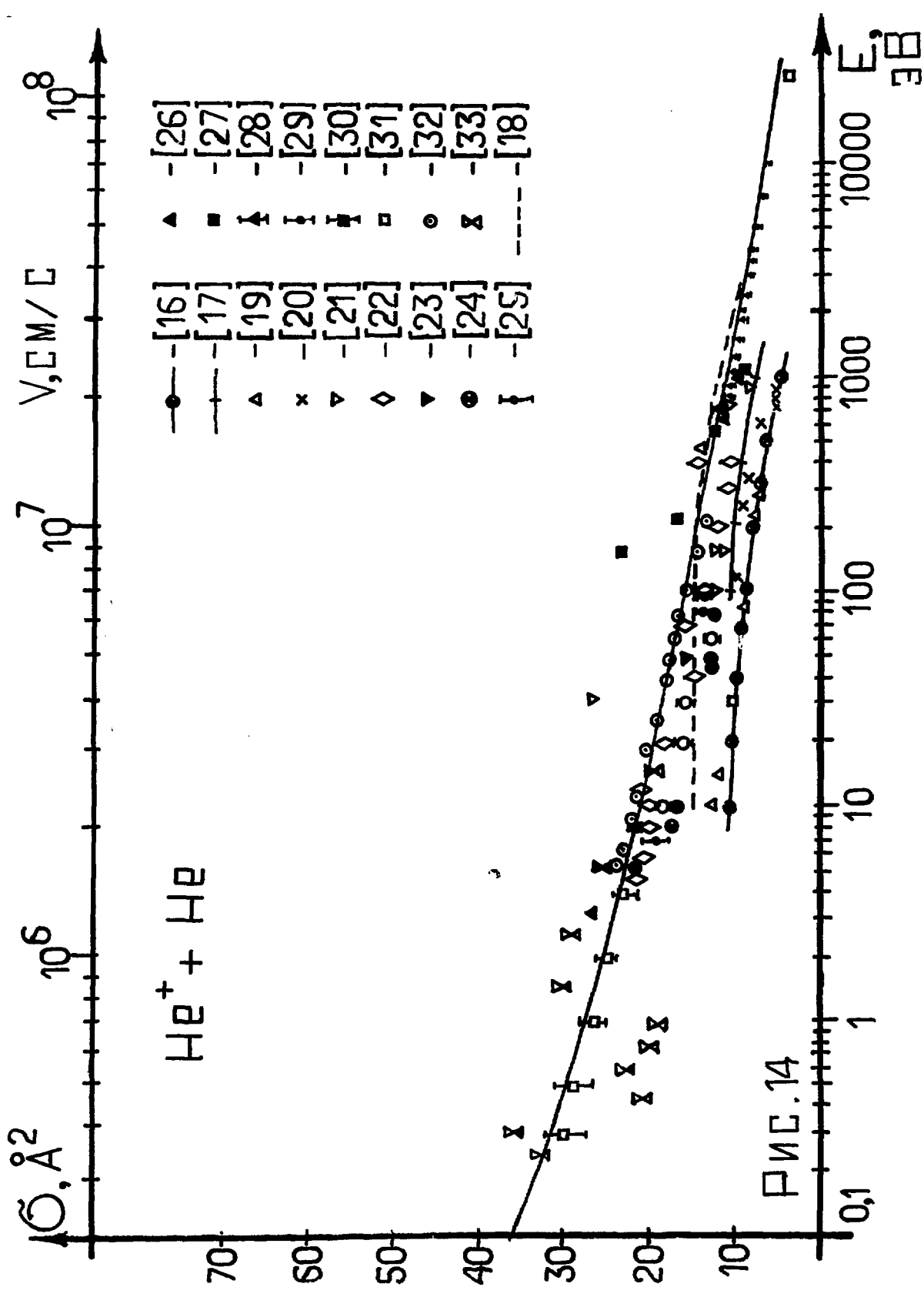
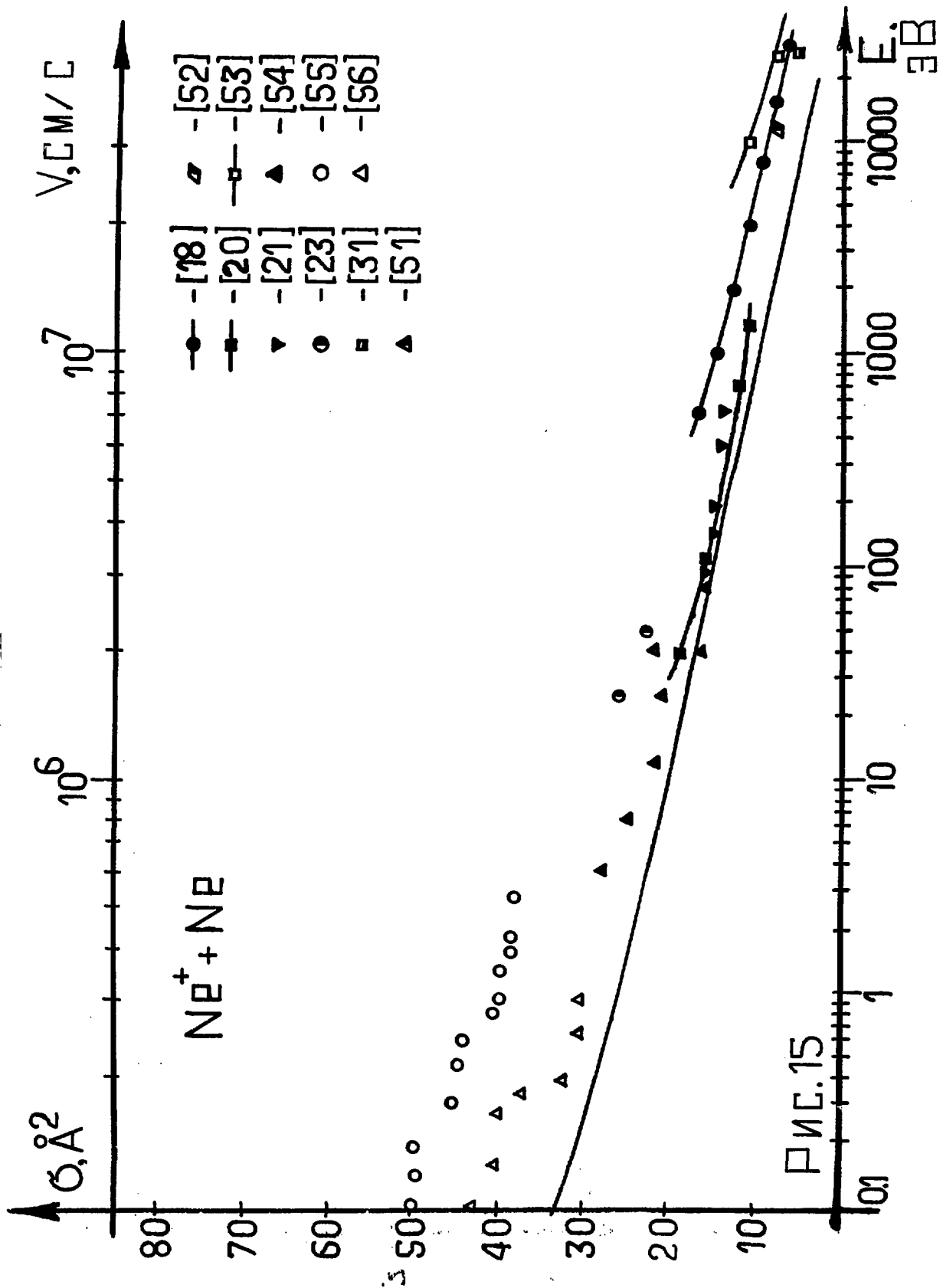
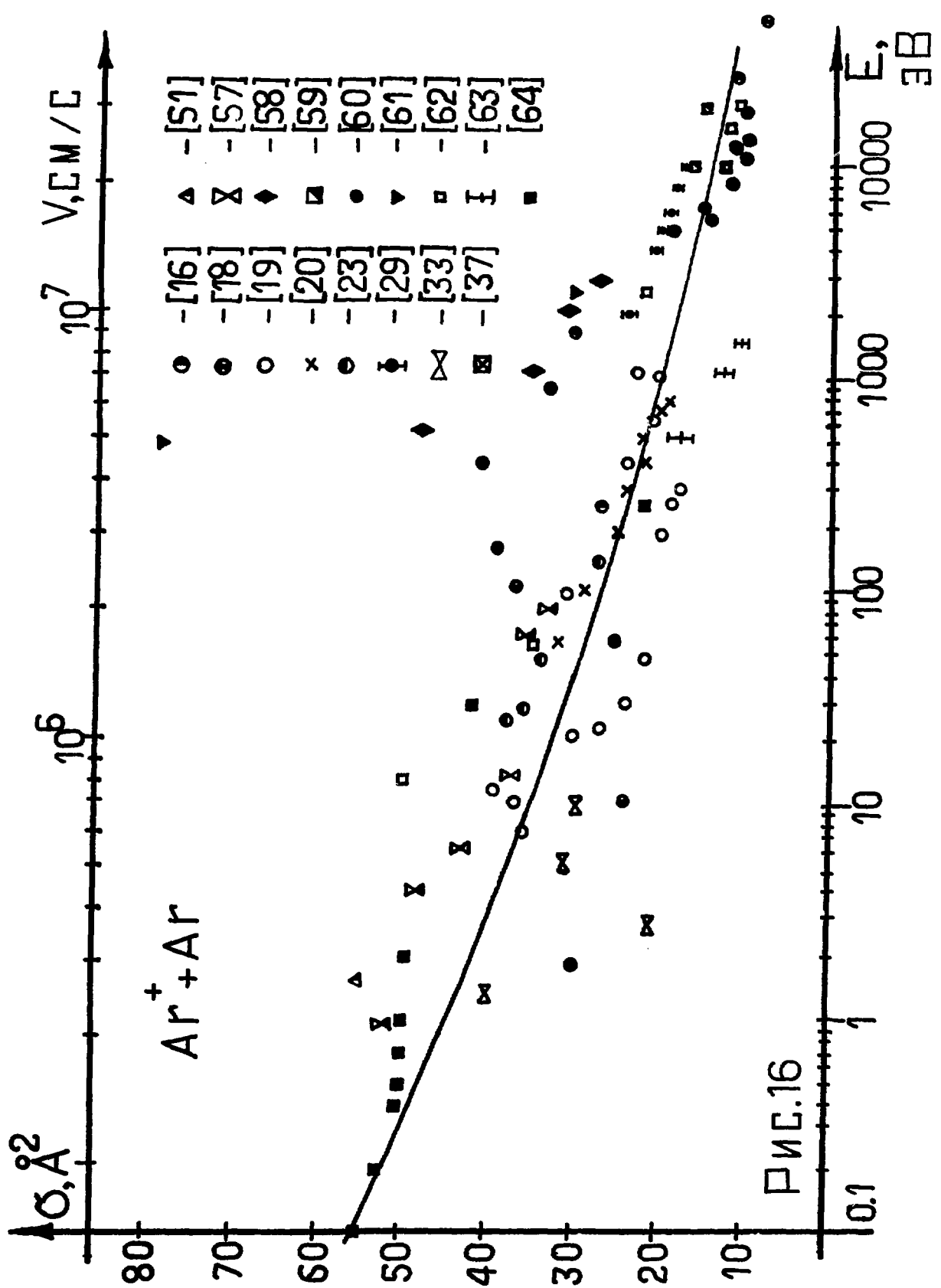
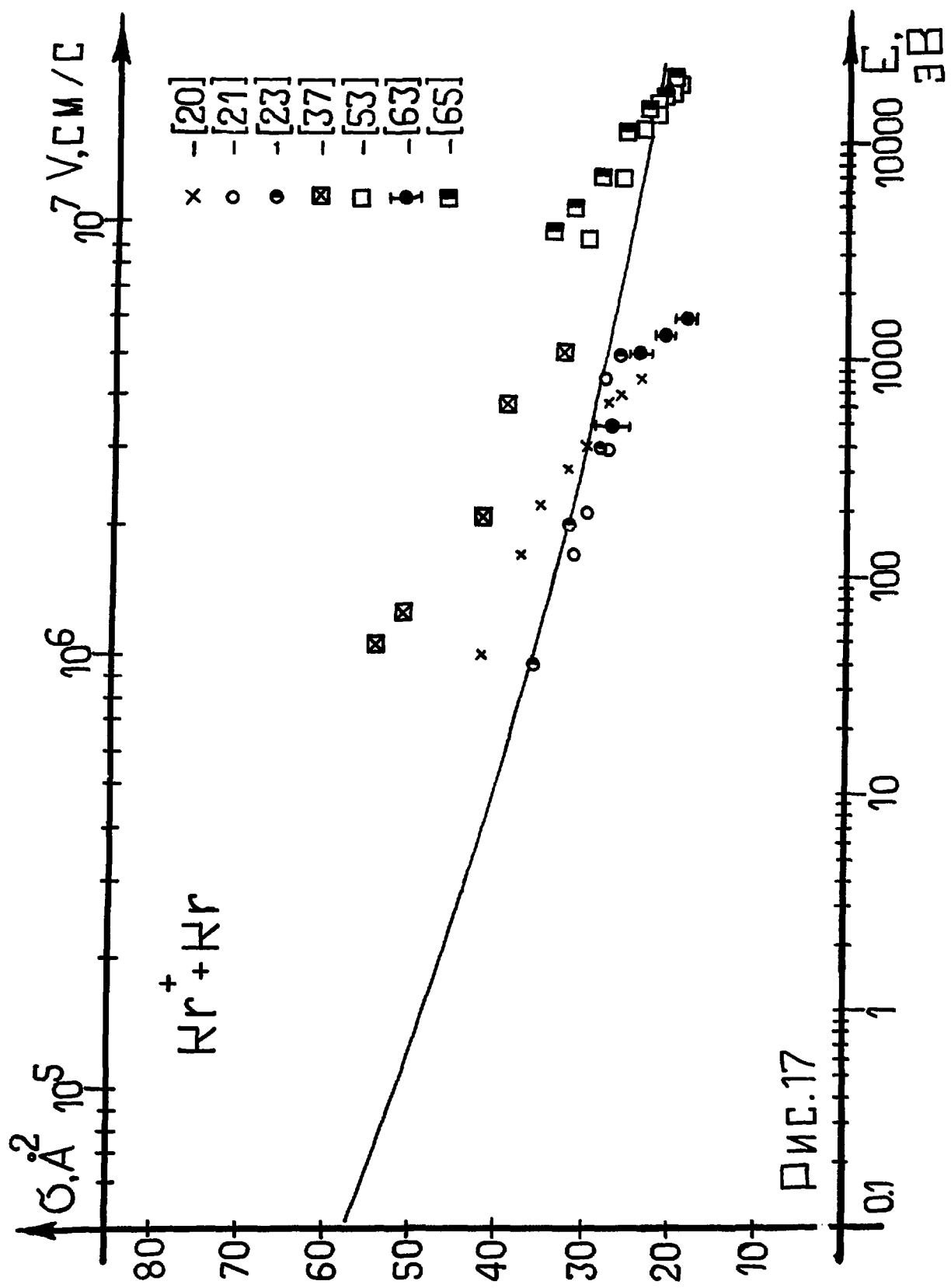


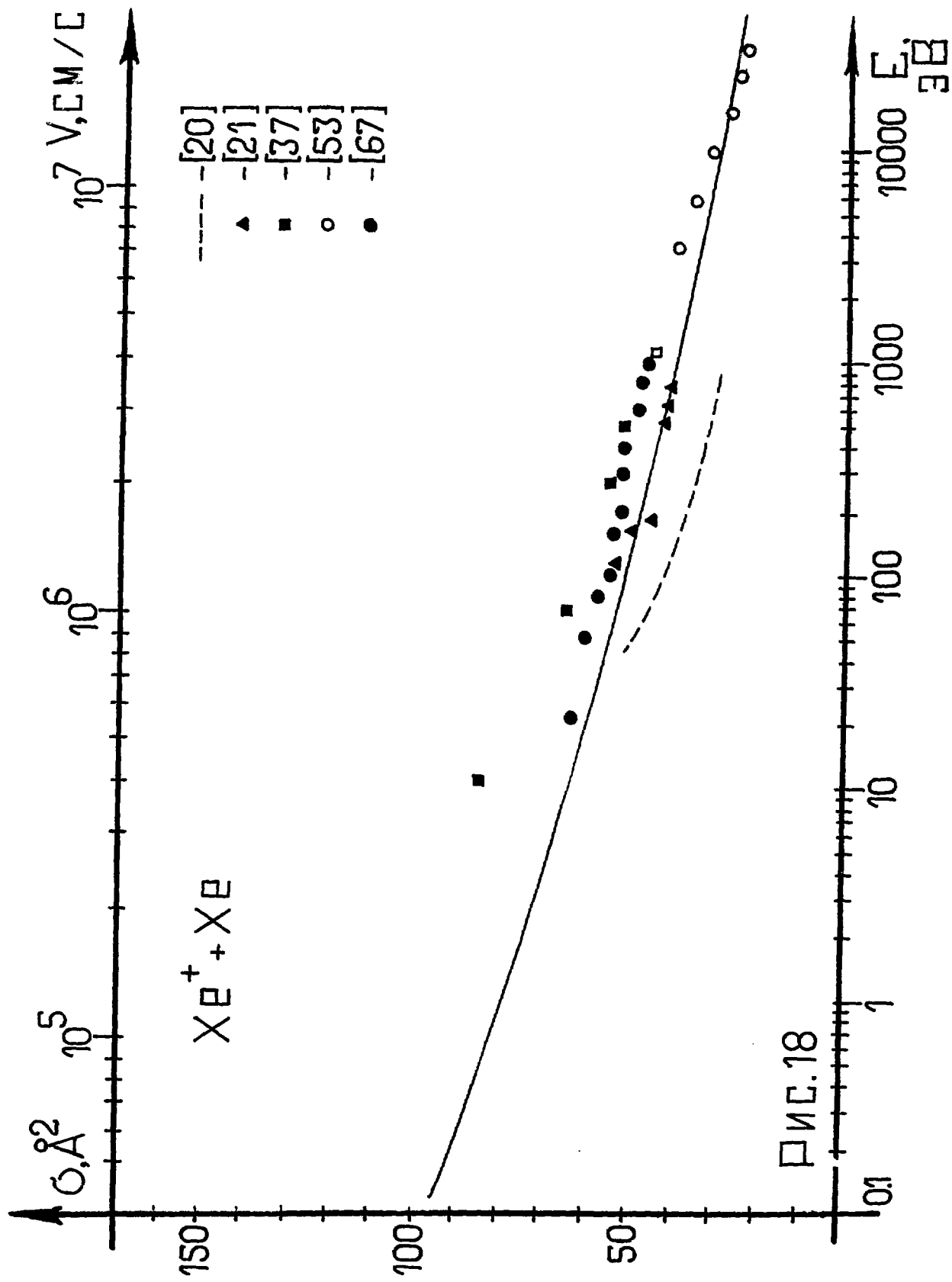
Рис. 13

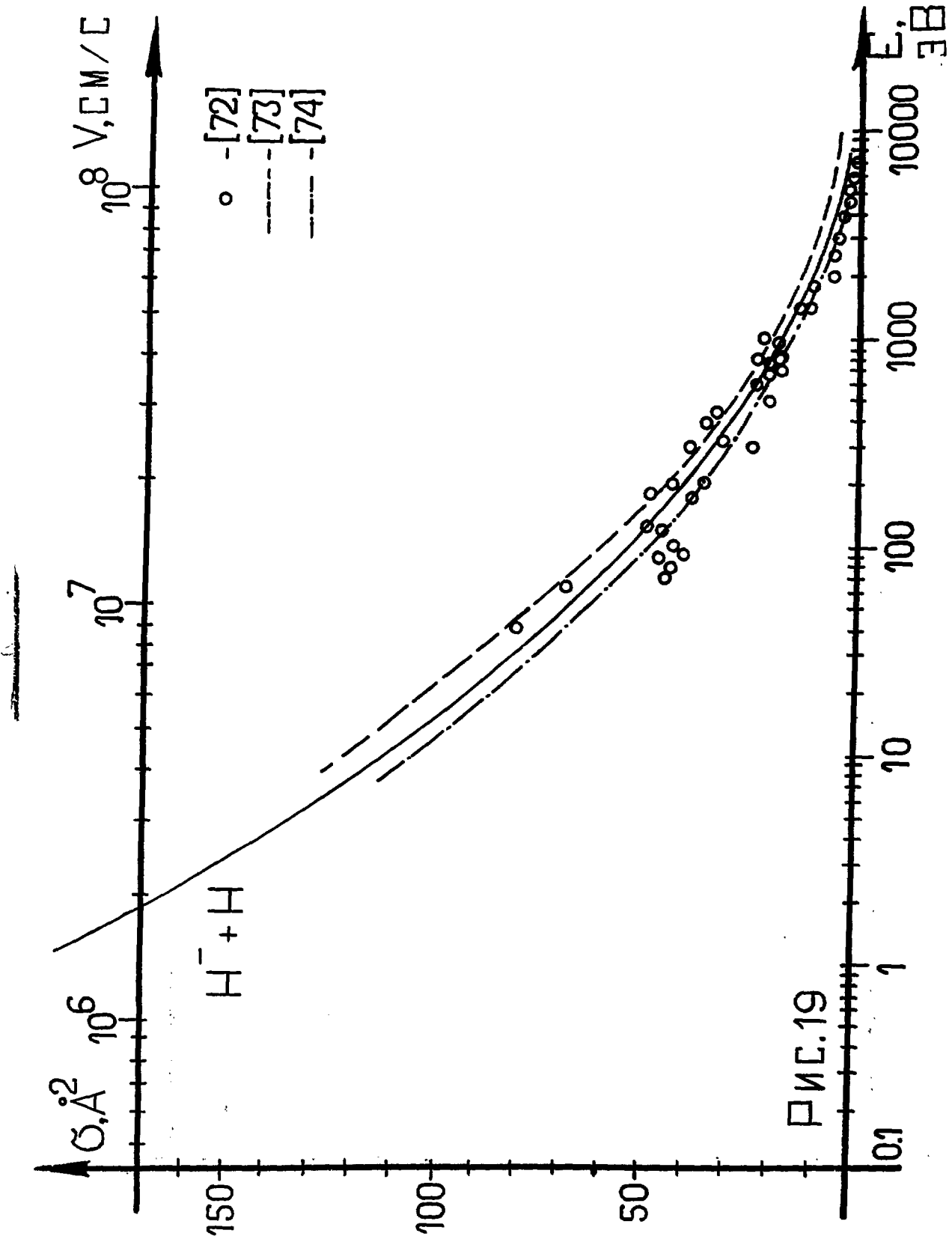




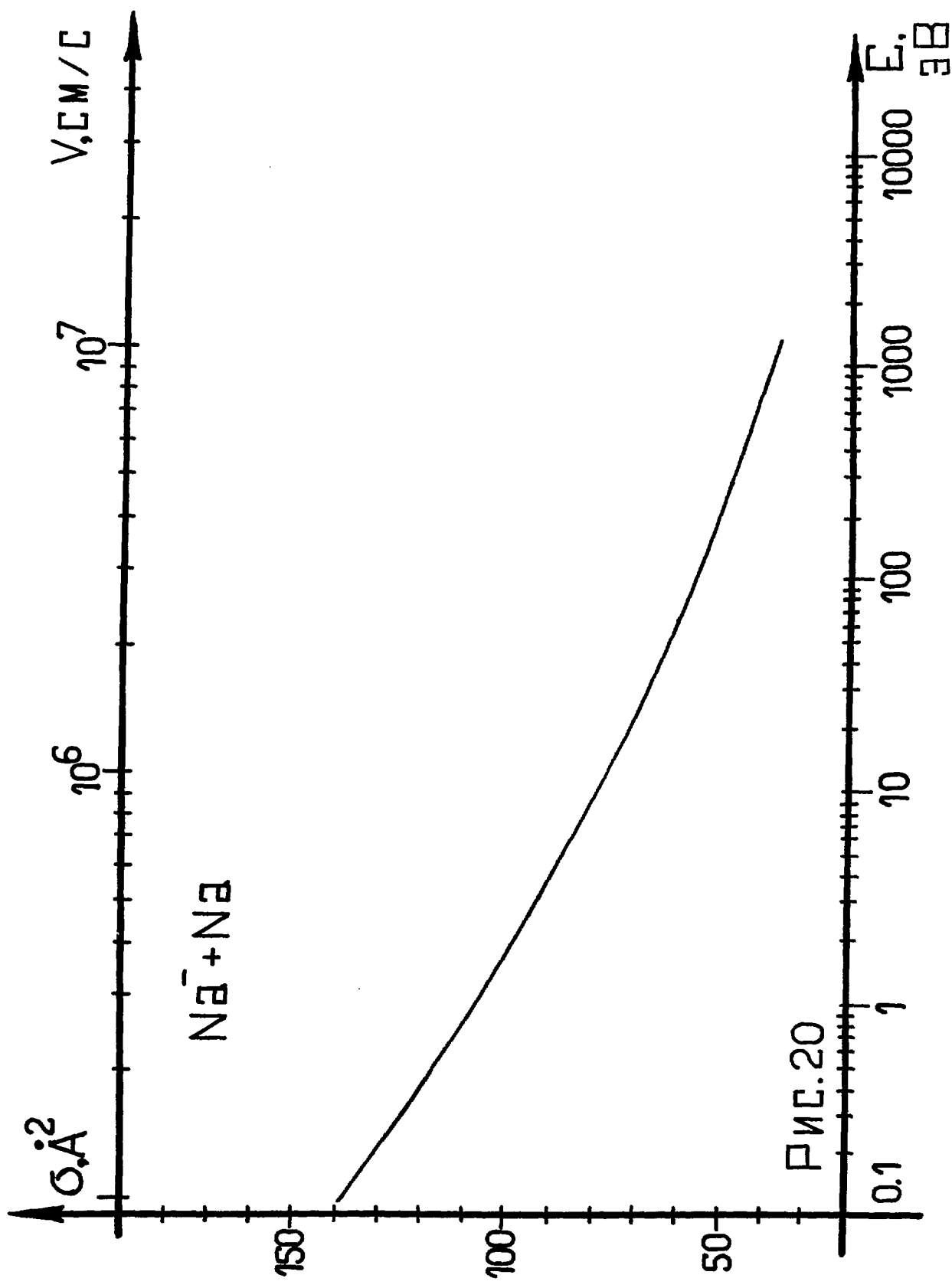


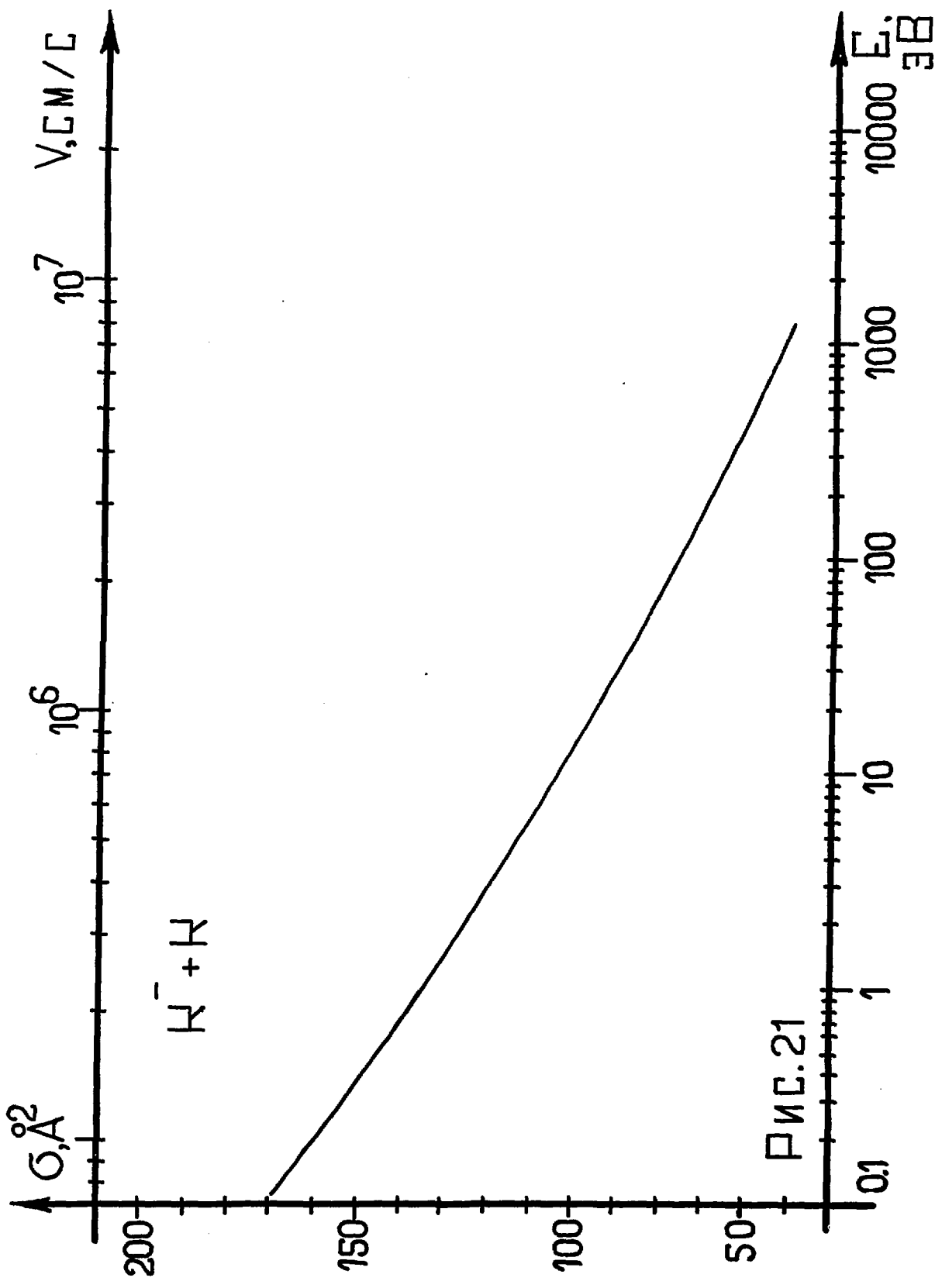


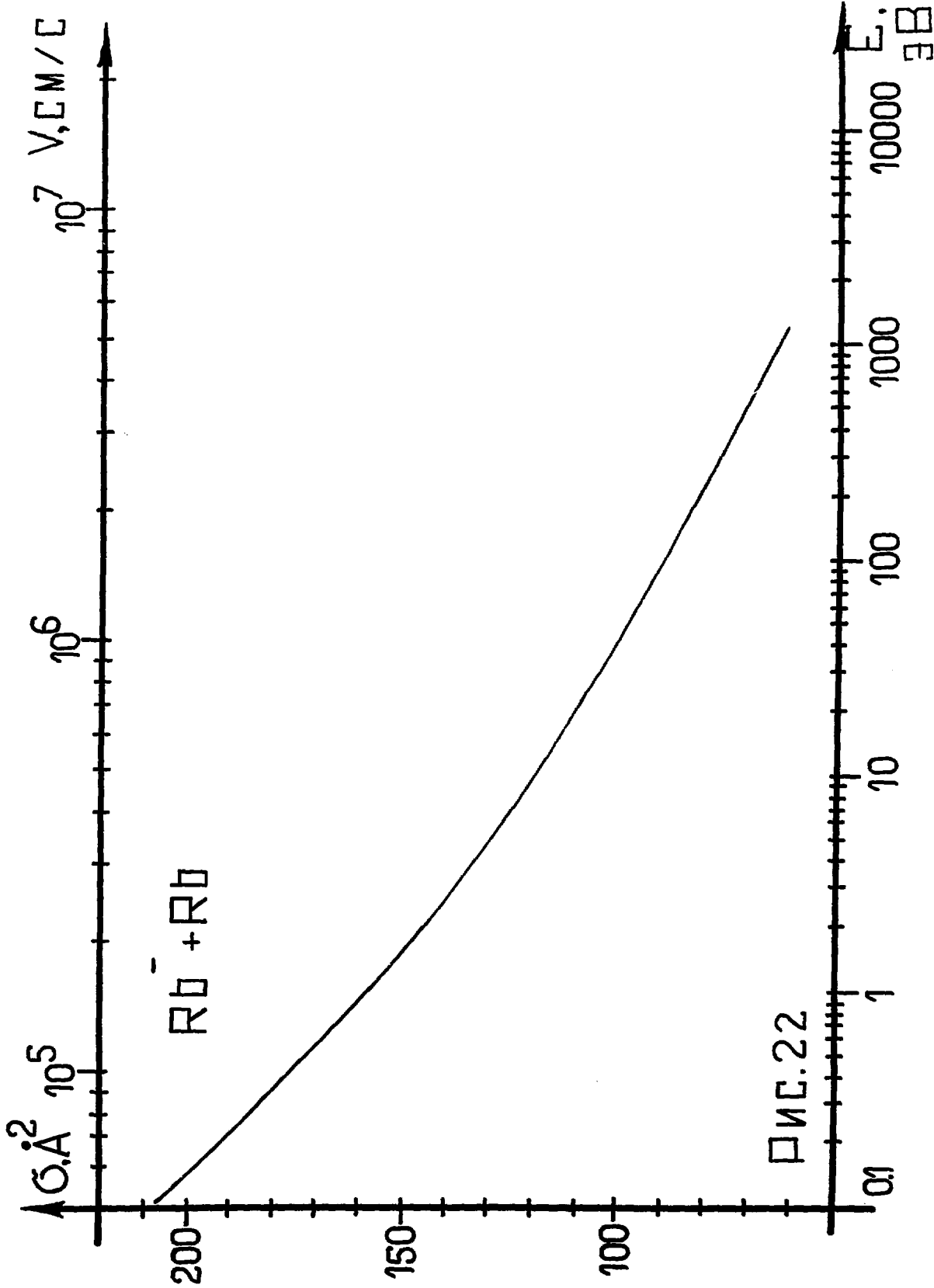


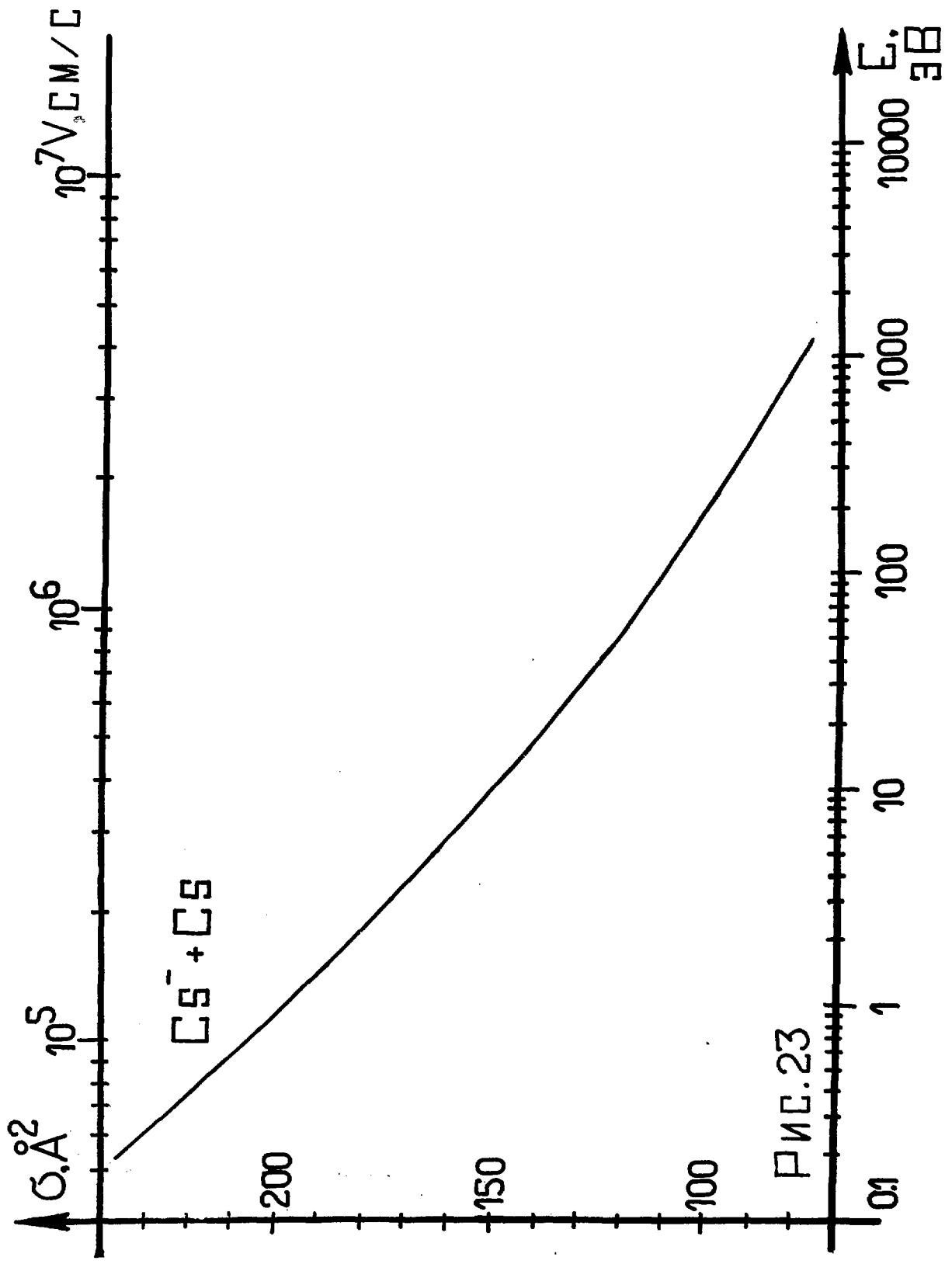


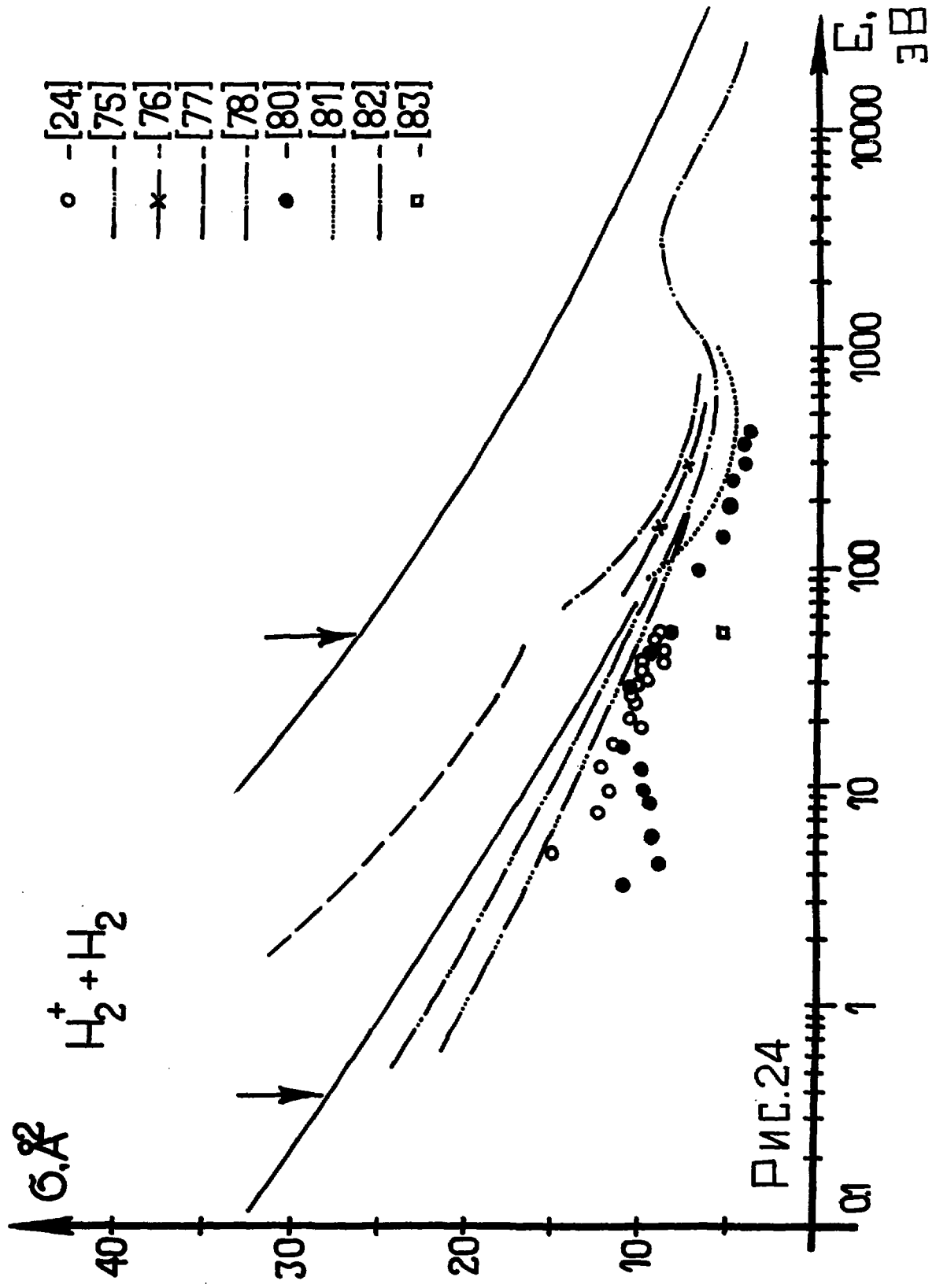




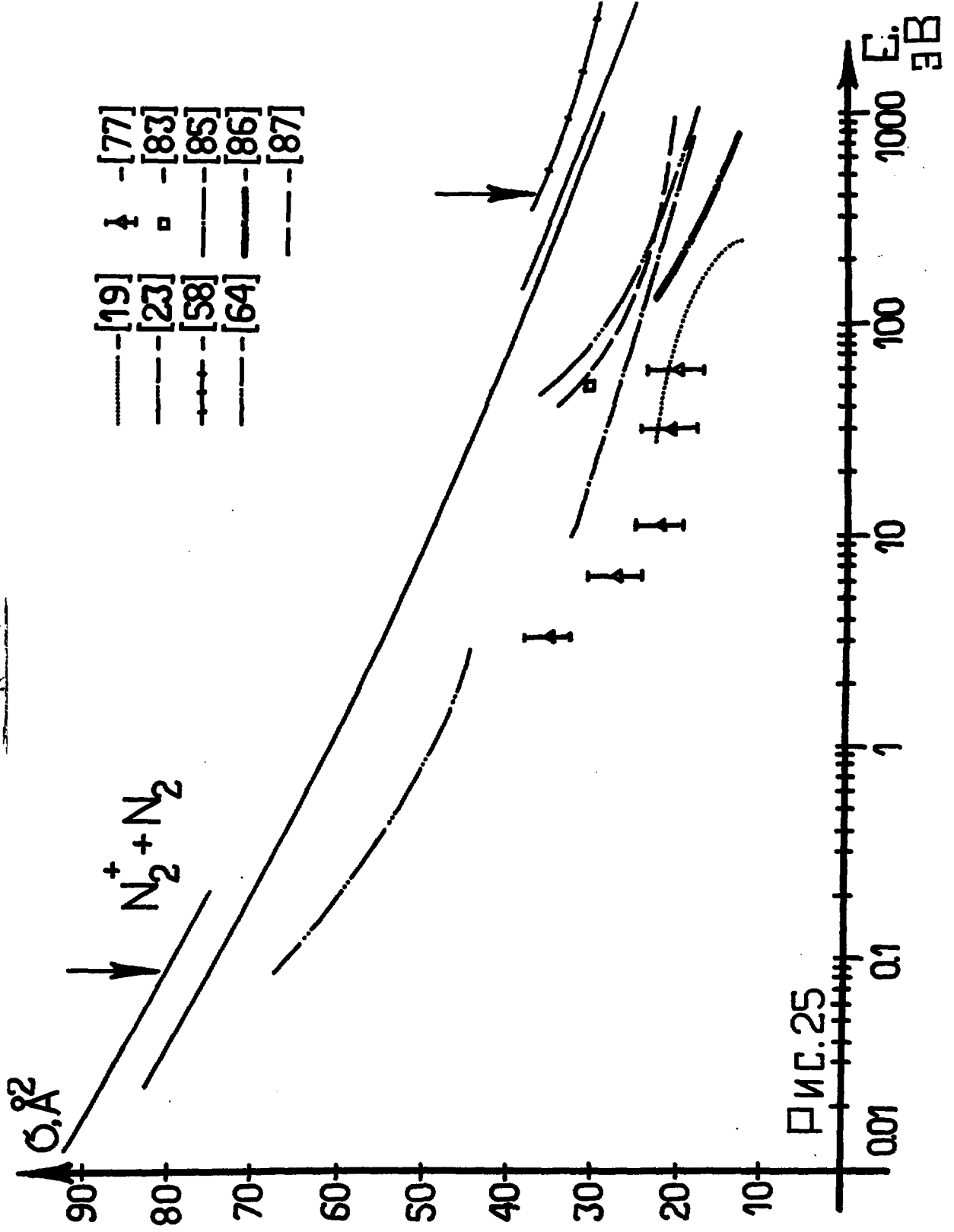


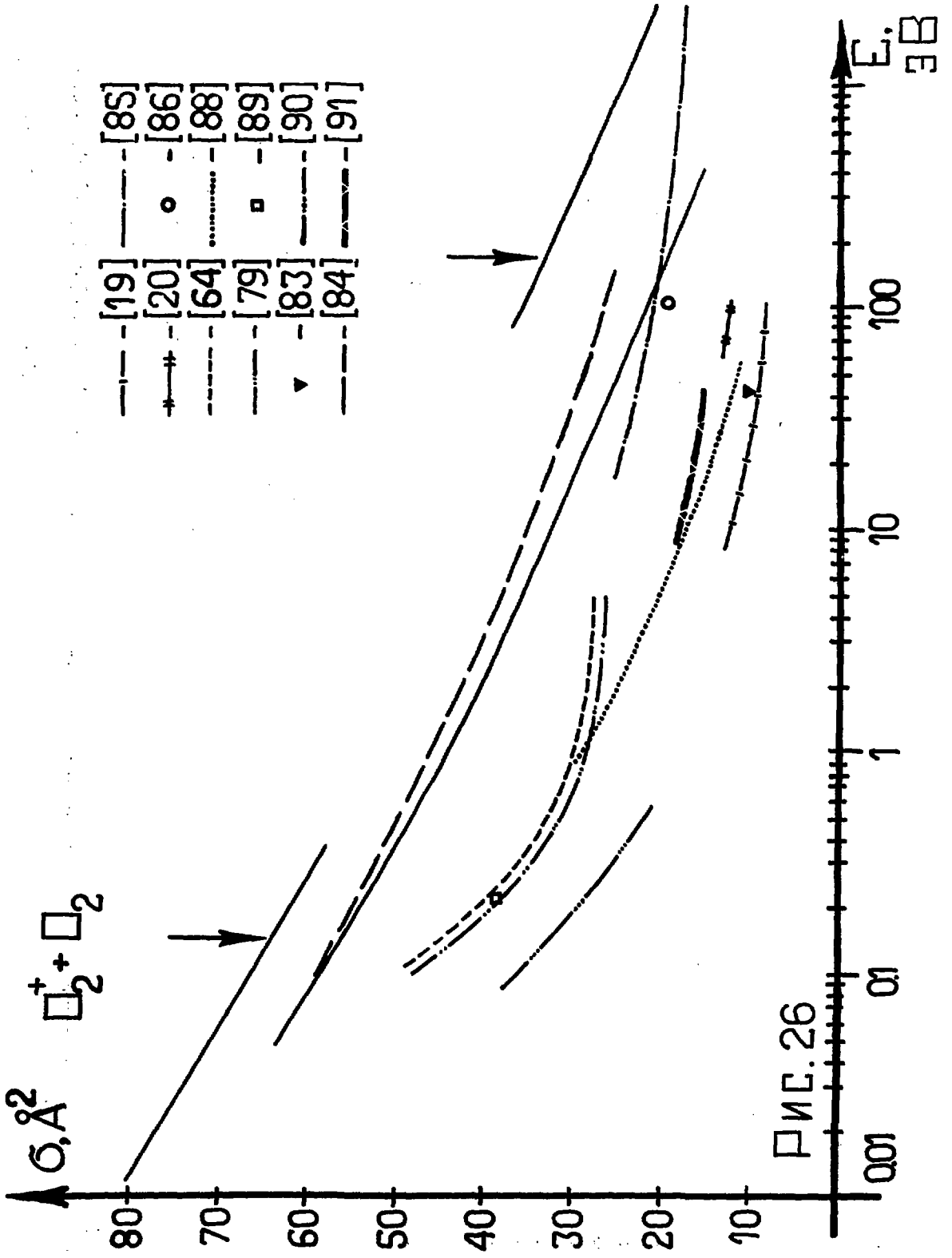


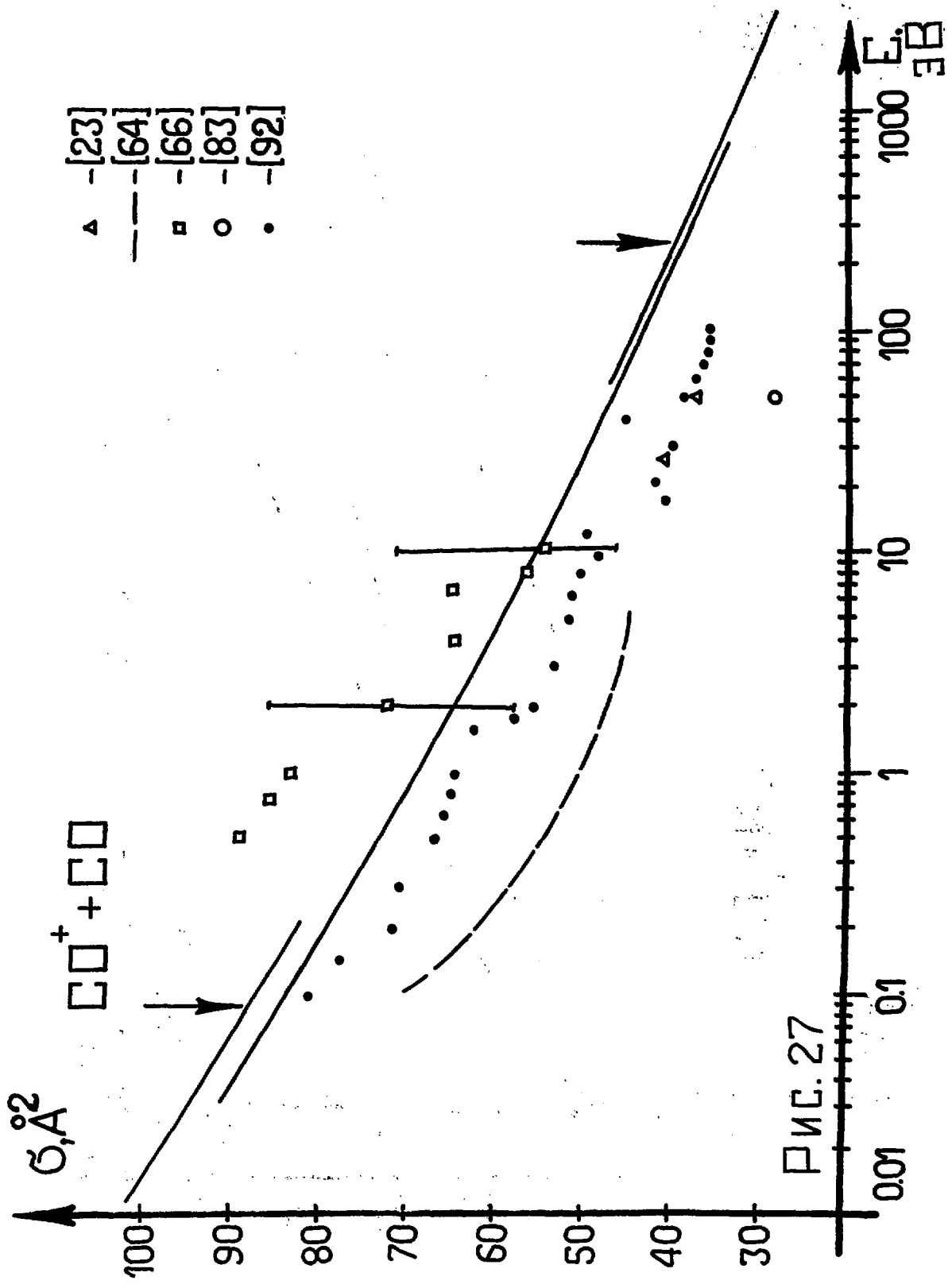




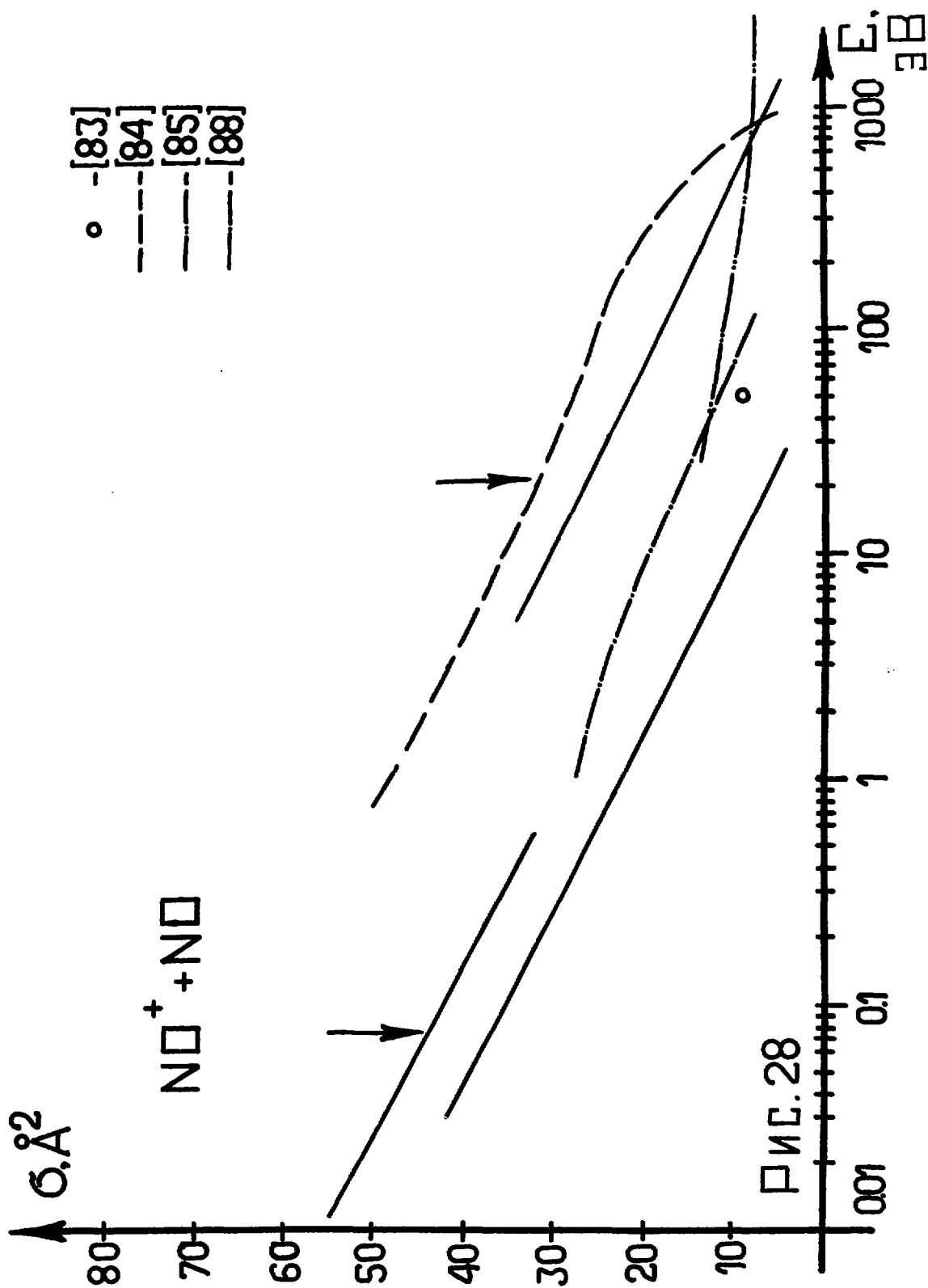
- - [24]
- [75]
- × - [76]
- [77]
- [78]
- - [80]
- [81]
- [82]
- - [83]











20 коп.

Индекс 3624