

22

**И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

**И Я Ф 67 - 71**

**В.Т.Астрелин, И.А.Богащенко,  
Н.С.Бучельникова, Ю.И.Эйдельман**

**ОБТЕКАНИЕ ПЛАСТИНКИ И ЦИЛИНДРА  
ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМОЙ**

**Новосибирск**

**1971**

В.Т.Астрелин, И.А.Богаченко,  
Н.С.Бучельникова, Ю.И.Эйдельман

### ОБТЕКАНИЕ ПЛАСТИНКИ И ЦИЛИНДРА ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМОЙ

#### А Н Н О Т А Ц И Я

Проведено экспериментальное сравнение обтекания пластинки и цилиндра одинакового размера замагниченной плазмой. Показано, что картины обтекания совпадают при малых значениях параметра  $\frac{1}{2\lambda} \frac{Re}{\rho n_i} \frac{V_{Ti}}{V_0}$ . Исследовано влияние потенциала тел на картину их обтекания.

Электроны имеют максвелловскую функцию распределения с температурой  $T_e \sim T_i$ , ионы - двухтемпературную максвелловскую функцию с  $T_{i1} < T_{i2} \sim T_e$ . Параметры плазмы таковы, что  $e-i$  столкновения не играют роли (длина свободного пробега  $\lambda_{ei} \ll r_D$ ), однако,  $i-i$  столкновения приращивают и выравнивают  $T_{i1}$  и  $T_{i2}$ , могут оказаться существенными.

Магнитное поле колебалось от 500 до 1000 Г, плотность ионы  $n_i \sim 1,0-6,10^9 \text{ см}^{-3}$ , скорость потока плазмы  $V_0 = (1,2-2,0) \cdot 10^6 \text{ см/сек}$ .

Настоящая работа посвящена сравнительному исследованию обтекания пластинки и цилиндра замагниченной плазмой в условиях моделирующих условия обтекания искусственных спутников Земли. Обтекание пластинки и цилиндра незамагниченной плазмой рассматривалось теоретически /1/. Было показано, что картины обтекания пластинки и цилиндра совпадают на достаточно большом расстоянии от тела при достаточно больших значениях параметра  $V_0/V_T$  ( $V_0$  - скорость потока плазмы,  $V_T$  - тепловая скорость). Обтекание замагниченной плазмой ранее не исследовалось ни теоретически, ни экспериментально.

Эксперименты проводились на установке типа  $Q$ -машины. Возможность использования её для исследования обтекания тел замагниченной плазмой была подробно рассмотрена ранее /2/.

Плазма образуется при термической ионизации калия на вольфрамовом ионизаторе диаметром 4 см, нагретом до температуры  $T \approx 2000^\circ \text{K}$ . Плазма удерживается магнитным полем и представляет собой цилиндрический столб, ограниченный с одного торца ионизатором, а с другого - холодным отрицательно-заряженным электродом ( $U = -7\text{в}$ ). Плотность плазмы практически однородна вблизи оси столба в области диаметром  $\sim 2,5$  см. Эксперименты проводились в режиме электронного слоя. В этом случае ионы ускоряются в слое, приобретая направленную скорость  $V_0$  и продольную температуру  $T_{in}$  /3/. Плазма течет от ионизатора к холодному электроду со скоростью  $V_0$ . В режиме электронного слоя поток устойчив.

Электроны имеют максвелловскую функцию распределения с температурой  $T_e \sim T$ , ионы - двухтемпературную максвелловскую функцию с  $T_{in} < T_{i\perp} \sim T$  /2/. Параметры плазмы таковы, что  $e-i$  и  $e-e$  -столкновения не играют роли (длина свободного пробега  $l \gg \lambda$ ), однако,  $i-i$  -столкновения, приводящие к выравниванию  $T_{in}$  и  $T_{i\perp}$ , могут оказаться существенными.

Магнитное поле изменялось от 500 до 1600э, плотность плазмы  $n_0 \sim 1,5-6 \cdot 10^8 \text{см}^{-3}$ , скорость потока плазмы  $V_0 = (1,2 \div 2,1) \cdot 10^5 \text{см/сек}$ ,

температура ионизатора  $T = 2000 + 2500^\circ\text{K}$ .

Измерения плотности проводились с помощью цилиндрических вольфрамовых зондов длиной 2 мм и диаметром 0,25мм; скорость потока определялась по периоду  $Z_H$  продольных осцилляций плотности на оси следа за плоским телом /3/:

$$V_0 = \frac{Z_H \omega_{ni}}{2\pi}$$

Исследовалось обтекание пластинок шириной  $2R_0 = 3,5$  и 7мм и цилиндров таких же диаметров. Высота пластинок и цилиндров 3 см, так что для описания следа тела достаточно двумерной картины. Исследуемое тело помещается в плазму перпендикулярно к потоку в зоне однородной плотности. Эксперименты проводились с отрицательно заряженными телами  $U = -7\text{в}$ .

Условия этих экспериментов хорошо моделируют обтекание тел размером  $R_0 \sim 2\text{ м}$  в ионосфере на высотах  $\sim 200-1000\text{ км}$ , что видно из таблицы 1.

Таблица 1

Эксперимент	Ионосфера
$R_0/z_D$	$30 + 100 \gg 1$ $50 + 1000 \gg 1$
$R_0/\rho_{ne}$	$120 + 270 \gg 1$ $100 + 200 \gg 1$
$R_0/\rho_{ni}$	$0,45 + 1,0$ $0,25 + 1,0$
$V_0/V_{Te}$	$(5 + 8) 10^{-3} \ll 1$ $0,01 \ll 1$
$V_0/V_{Ti}$	$1,3 + 2,1$ $0,8 + 6$
$R_0/l$	$2 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-3} \ll 1$ $3 \cdot 10^{-2} + 10^{-4} \ll 1$

Здесь  $z_D$  - дебаевский радиус,  $\rho_{ne}$ ,  $\rho_{ni}$  - ларморовский радиус электронов и ионов,  $V_{Te}$ ,  $V_{Ti}$  - тепловая скорость электронов и ионов.

На рис.1 приведены результаты измерений относительной плотности плазмы на оси  $j(0,z)/j_0 \approx n(0,z)/n_0$

( $j_0$  - ток зонда и  $n_0$  - плотность в невозмущенном потоке) в разных режимах. В качестве параметра выбрана величина  $R_0/z_H = \frac{1}{2\pi} \frac{R_0}{\rho_{ni}} \frac{V_{Ti}}{V_0}$ , характеризующая отношение продольного размера цилиндра к длине осцилляции плотности в следе. Разумно ожидать, что картина обтекания пластинки и цилиндра будет одинаковой, когда это отношение мало. Из рис.1 видно, что при больших значениях параметра следы пластинки и цилиндра отличаются друг от друга - уровень плотности в следе цилиндра ниже. При малых значениях следы совпадают за исключением ближней зоны за телом.

На рис.2-9 приведены полные картины следа за телом (продольные и поперечные сечения следа). Параметры исследованных режимов приведены в таблице 2.

Таблица 2.

№ рис.	$R_0$ , см	$n_0$ , см <sup>-3</sup>	$T$ , °К	$H$ , эрст	$V_0$ , см/сек	$\frac{eV_0}{T}$	$\frac{R_0}{\rho_{ni}}$	$\frac{V_0}{V_{Ti}}$	$\frac{R_0}{z_H}$ (для цилиндра)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1а									0,076
1б	0,175	$2 \cdot 10^9$	2150	1000	$1,5 \cdot 10^5$	$\cdot 1,5$ x1,2	0,45	$\cdot 1,5$ x1,6	0,048
1в									0,041
1г									0,033
2	0,35	$3 \cdot 10^9$ x $5 \cdot 10^9$	2080	1500	$1,6 \cdot 10^5$	$\cdot 1,8$ x 2,0	1,40	$\cdot 1,6$ x 1,7	0,135
3	0,175	$6 \cdot 10^9$ x $4 \cdot 10^9$	2020	1600	$1,4 \cdot 10^5$ x $1,5 \cdot 10^5$	$\cdot 1,5$ x 1,8	0,75	$\cdot 1,5$ x 1,6	0,076
4	0,35	$2 \cdot 10^9$	2150	700	$1,5 \cdot 10^5$ x $1,6 \cdot 10^5$	$\cdot 1,8$ x 2,0	0,65	$\cdot 1,6$ x 1,7	0,063
5	0,175	$2 \cdot 10^9$	2260	1000	$1,3 \cdot 10^5$	$\cdot 1,0$	0,45	$\cdot 1,3$	0,053

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,175	$2 \cdot 10^9$	2150	1600	$2,1 \cdot 10^5$	3,9	0,70	2,2	0,052
					$\times 2,0 \cdot 10^5$	$\times 3,4$		$\times 2,1$	
7	0,35	$2 \cdot 10^9$	2420	800	$2,1 \cdot 10^5$	3,4	0,70	2,1	0,052
8	0,35	$3 \cdot 10^9$	2150	500	$1,4 \cdot 10^5$	1,5	0,45	1,5	0,048
9	0,175	$4 \cdot 10^9$	1880	700	$1,2 \cdot 10^5$	1,0	0,35	1,3	0,041
10-13			Режим рис. 5						0,053

Рисунки подтверждают, что при больших значениях  $R_0/z_n$  (рис.2,3) след цилиндра лежит ниже следа пластинки, а при малых (рис.8,9) следы практически совпадают за исключением ближней зоны. При одинаковых значениях  $R_0/z_n$ , полученных при разных комбинациях  $R_0, H, V_0$  следы имеют одинаковый характер (рис.5,6), хотя и не во всех случаях (рис.7). Таким образом, параметр  $R_0/z_n$  качественно характеризует взаимную картину обтекания отрицательно-заряженных тел, причем следы совпадают, когда  $R_0/z_n$  мал, т.е. когда продольный размер объемного тела мал по сравнению с длиной осцилляции. Следует отметить, что в ближней зоне следа и при малых значениях  $R_0/z_n$  следы обычно расходятся (рис.1,8).

Было исследовано влияние потенциала тела на картину обтекания. В этих экспериментах существенную трудность представляет работа с потенциалами, близкими к потенциалу плазмы. Дело в том, что при работе с щелочными плазмами существенную роль могут играть контактные разности потенциала (КРП), возникающие из-за образования на теле пленки щелочного металла (при работе с калием КРП может достигать 2-3 в) /3/. Поскольку площадь пластинки и цилиндра довольно велика, существенной может оказаться неоднородность КРП. Поэтому представляется не очень надежным независимое определение по

тенциала плазмы (например, по вольтамперной характеристике зонда).

Оказалось, что форма радиального сечения следа существенно меняется при переходе из области отрицательного потенциала в область положительного (см.рис.10). Это понятно, поскольку при положительном потенциале на теле электроны, попадающие в след, поглощаются телом, так что сечение следа приближается к геометрическому сечению тела. Строя набор кривых  $n(r)$  в каком-нибудь сечении при различных потенциалах с шагом 0,1 в, можно определить переходную точку с точностью  $\sim 0,2$ в. Этот потенциал перехода и принимался за потенциал плазмы  $U_0$ . В рабочем режиме (режим рис.5) он оказался равным -2,8в для пластинки и -3,3в для цилиндра. Правильность измеренного потенциала плазмы можно проверить, определяя плавающий потенциал  $U_{\text{плав}}$  и сравнивая разность  $U_{\text{плав}} - U_0$  с расчетным значением плавающего потенциала относительно потенциала плазмы  $\varphi_{\text{плав}} - \varphi_0$  /3/. Оказалось, что  $U_{\text{плав}} - U_0 = 0,7$  в хорошо согласуется с  $\varphi_{\text{плав}} - \varphi_0 = 0,8$ в, так что принятая методика позволяет определять потенциал плазмы достаточно точно. Отметим, что абсолютная величина потенциала плазмы в рабочем режиме согласно расчету /3/ равна  $\varphi_0 \sim 0,2$  в.

На рис.10 приведены радиальные сечения следа в максимуме осцилляции при разных потенциалах тел. Измерения проводились в режиме рис.5 ( $2R_0 = 3,5$  мм,  $H = 1000$ э,  $V_0 = 1,4 \cdot 10^5$  см/сек). Из рис.10 четко видно изменение характера следа при переходе в область положительных потенциалов. Видно, что при увеличении как положительного, так и отрицательного потенциала растет глубина следа и его ширина. Это указывает на существенную роль слоя объемного заряда у поверхности заряженного тела. С ростом потенциала растет размер слоя, т.е. возрастает эффективный размер тела и, следовательно, ширина и глубина следа должна возрастать.

Следы пластинки и цилиндра совпадают при потенциале плазмы и более положительных потенциалах, а также при более отрицательных вплоть до плавающего (рис.10-13). При дальнейшем увеличении отрицательного потенциала след цилиндра становится более глубоким, чем след пластинки. Это видно из рис.10, 11 и из сравнения рис.12 ( $U = U_0$ ) и рис.5 ( $U = -7$ в). При этом след пластинки при  $U = -7$ в практически не отличается от следа при  $U = U_0$ , а след цилиндра становится более глубоким. Это

указывает на более быстрый рост эффективной поверхности слоя цилиндра.

При дальнейшем увеличении потенциала слой начинает существенно влиять и на след пластинки (рис.10).

Таким образом, можно выделить следующие области при возрастании отрицательного потенциала.

1.  $U = U_0$ . При обтекании основную роль должны играть геометрические факторы. Совпадение или различие следа пластинки и цилиндра должно определяться параметром  $R_0/z_H$ .

2.  $U \leq U_0$ . Размер слоя мал, слой практически не влияет на обтекание в дальней зоне ( $U = U_{\text{плав}}$  на рис.10), но, возможно, сказывается в ближней. Параметр  $R_0/z_H$  сохраняет свою роль.

3. Слой заметно влияет на след цилиндра, но не влияет на след пластинки ( $U = -7\text{в}$  на рис.10), кроме ближней зоны. В параметре  $R_0/z_H$   $R_0$  следует заменить эффективным размером  $R_{\text{эфф}} > R_0$ .

4. Слой заметно влияет на след и пластинки и цилиндра ( $U = -20\text{в}$  на рис.10). В этой области и пластинка имеет эффективный продольный размер, так что сравнительная картина становится более сложной и требует специального учета влияния слоя.

Граничные потенциалы для этих областей, естественно, зависят от характеристик потока плазмы и тела - таких, как  $R_0, \rho_H, V_0, V_T$ . Так, для различных режимов граничные потенциалы области 3 и 4 равны:

$R_0/z_H$	0,033 (режим рис.1д)	0,053 (режим рис.5)	0,087
$U_3$	-10в	-4в	~ (-3)в
$U_4$	-15в	-10в	~ (-7)в

Таким образом, при заданном потенциале тел различные режимы могут оказаться в различных областях (например, при  $U = -7\text{в}$  режим с  $R_0/z_H = 0,087$  - обл.4, режим 5 - обл.3, режим 1д - обл. 2). При этом сравнительная картина следов пластинки и цилиндра должна определяться параметром  $R_{\text{эфф}}/z_H$ , меняющимся от  $R_0/z_H$  в области 2 до  $R_{\text{эфф}}/z_H > R_0/z_H$  в области 3. Экспери-

ментальные результаты (рис.1-9), показывают, что качественно картину можно описать с помощью параметра  $R_0/z_H$ .

Сравнение картины обтекания при  $U = U_0$  и  $U = -7\text{в}$  показывает, что совпадение следов пластинки и цилиндра при

$U = -7\text{в}$  наблюдается при меньших значениях  $R_0/z_H$ , чем в случае  $U = U_0$ . Действительно, при  $U = U_0$  следы расхо-

дятся в режимах с  $R_0/z_H = 0,087$  и  $0,073$  и совпадают в режиме 5 и 1д, в то время как при  $U = -7\text{в}$  совпадают в режиме 1д и расходятся в режимах 5 и 3. Таким образом, при  $U = U_0$  параметр перехода лежит в пределах  $0,07 > R_0/z_H > 0,05$ , а при

$U = -7\text{в}$  -  $0,05 > R_0/z_H > 0,04$ . Это подтверждает предположение о том, что при потенциале плазмы (обл.1) обтекание определяется параметром  $R_0/z_H$ , а при более отрицательных потенциалах (обл.3) - параметром  $R_{\text{эфф}}/z_H > R_0/z_H$ .

Обращает на себя внимание, что при  $U = U_0$ , в отличие от случая  $U = -7\text{в}$ , совпадение наблюдается не только в дальней, но и в ближней зоне (рис.12). Таким образом, можно предполагать, что различие следов пластинки и цилиндра в ближней зоне при  $U = -7\text{в}$  в режимах, когда в дальней зоне следы совпадают (рис.1), обусловлено влиянием слоя объемного заряда.

Авторы благодарны А.В.Гуревичу за постоянное сотрудничество и ценные обсуждения и К.Тинчурину за помощь в измерениях.

Л и т е р а т у р а

/1/ А.В.Гуревич, Л.П.Питаевский, В.В.Смирнова. УФН 99, 3, 1969.

/2/ И.А.Богаченко, А.В.Гуревич, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман.  
ЖЭТФ 59, 1540, 1970.

/3/ А.В.Гуревич, Р.А.Салимов, Н.С.Бучельникова. Теплофизика  
высоких температур 7, 852, 1969.

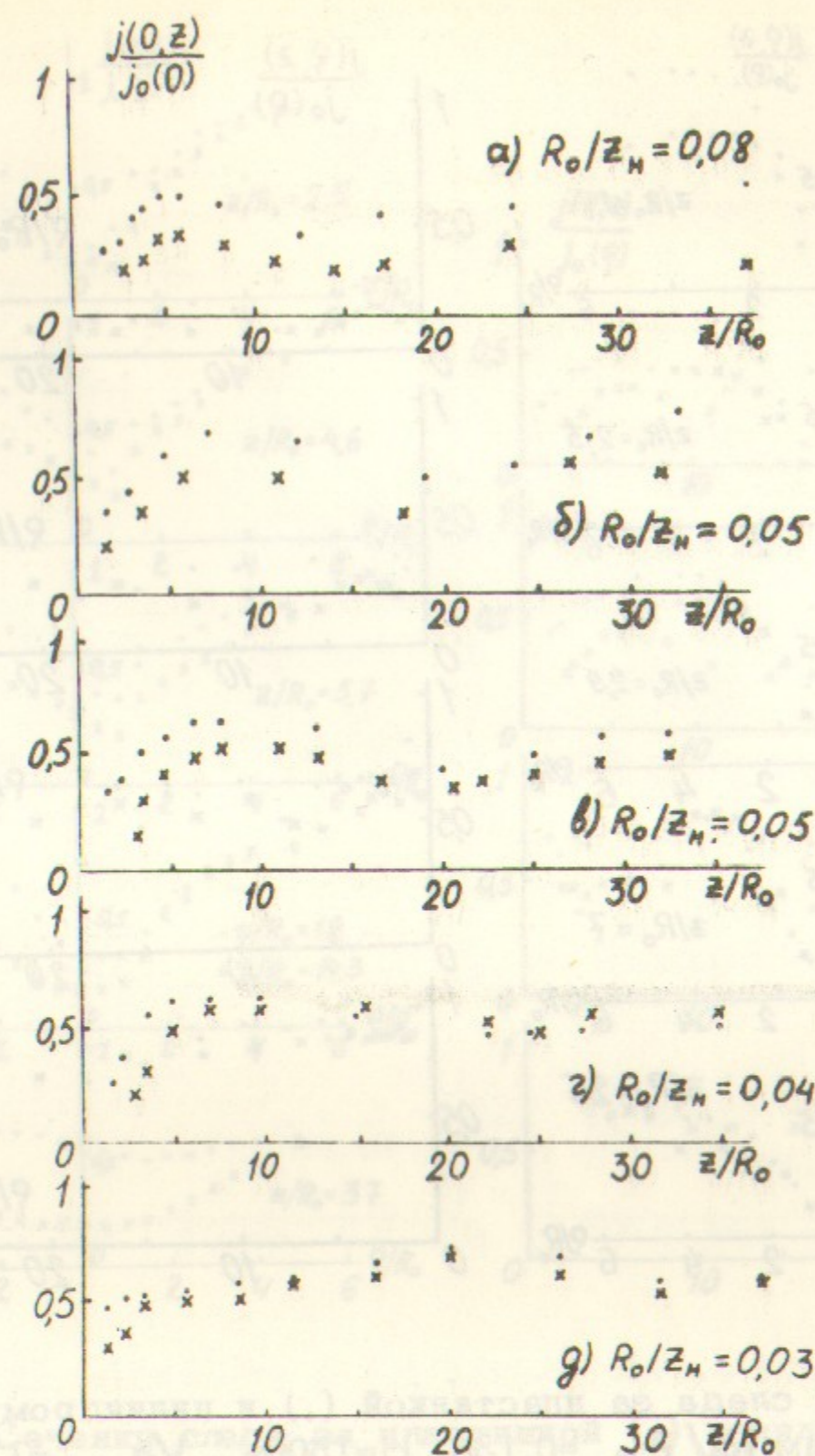


Рис.1. Сечения следа на оси за пластинкой (.) и цилиндром (x) при различных значениях  $R_0/z_n$ .

$R_0 = 1,75\text{мм}$ ; а)  $H=1600\text{э}$ ,  $V_0 = 1,4 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$  (.),  
 $V_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$  (x); б)  $H=1600\text{э}$ ,  $V_0 = 2,0 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$  (.),  
 $V_0 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$  (x); в)  $H=1000\text{э}$ ,  $V_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ ;  
 г)  $H=700\text{э}$ ,  $V_0 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ ; д)  $H=700\text{э}$ ,  $V_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ .

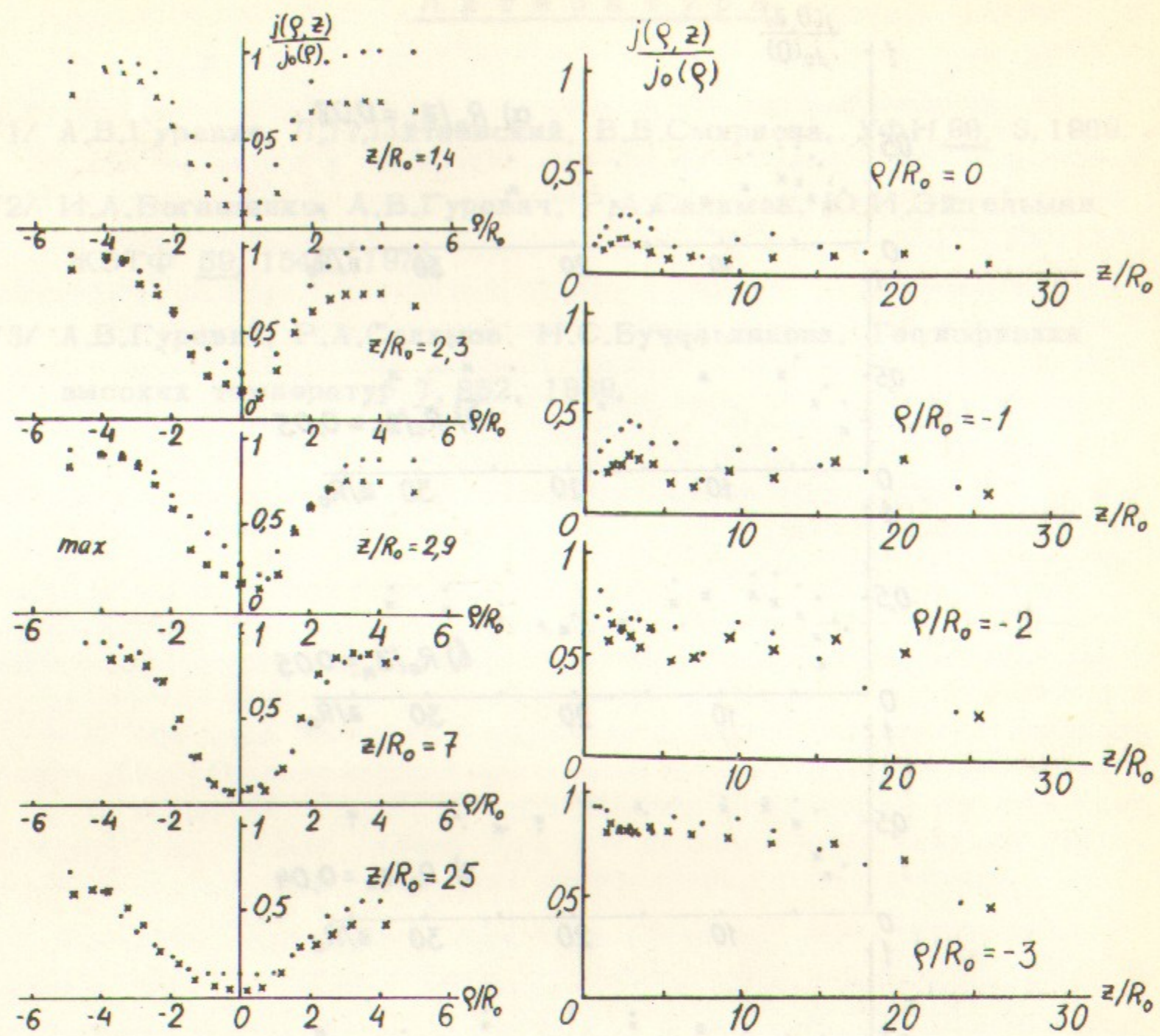


Рис.2. Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x)  
 $R_0 = 3,5 \text{ мм}$ ,  $R_0/z_H = 0,135$ ,  $H = 1500 \text{ э}$ ,  $V_0 = 1,6 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ .

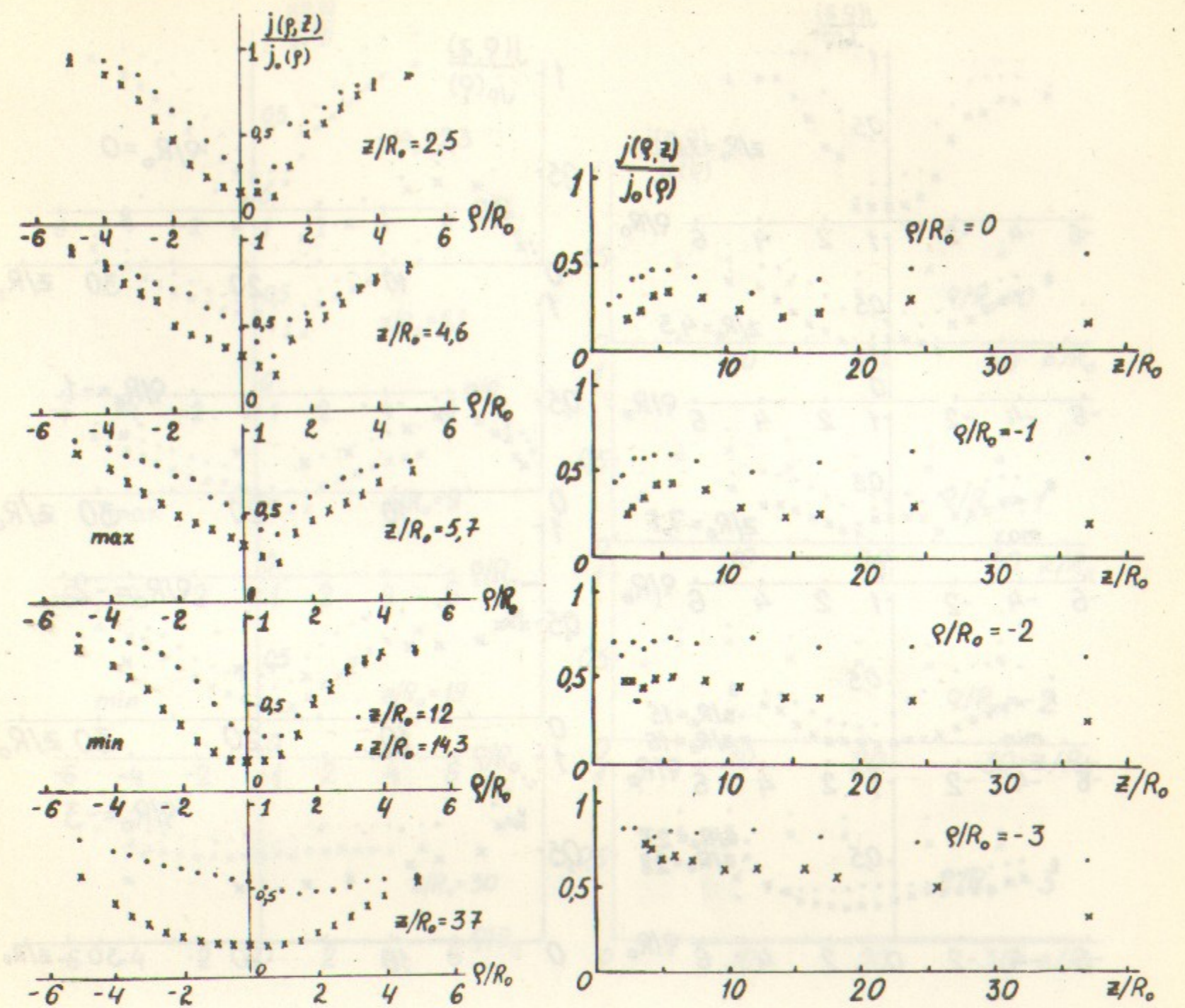


Рис.3. Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x).  
 $R_0 = 1,75 \text{ мм}$ ,  $R_0/z_H = 0,076$ ,  $H = 1600 \text{ э}$ ,  $V_0 = 1,4 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$  (.),  
 $V_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$  (x).



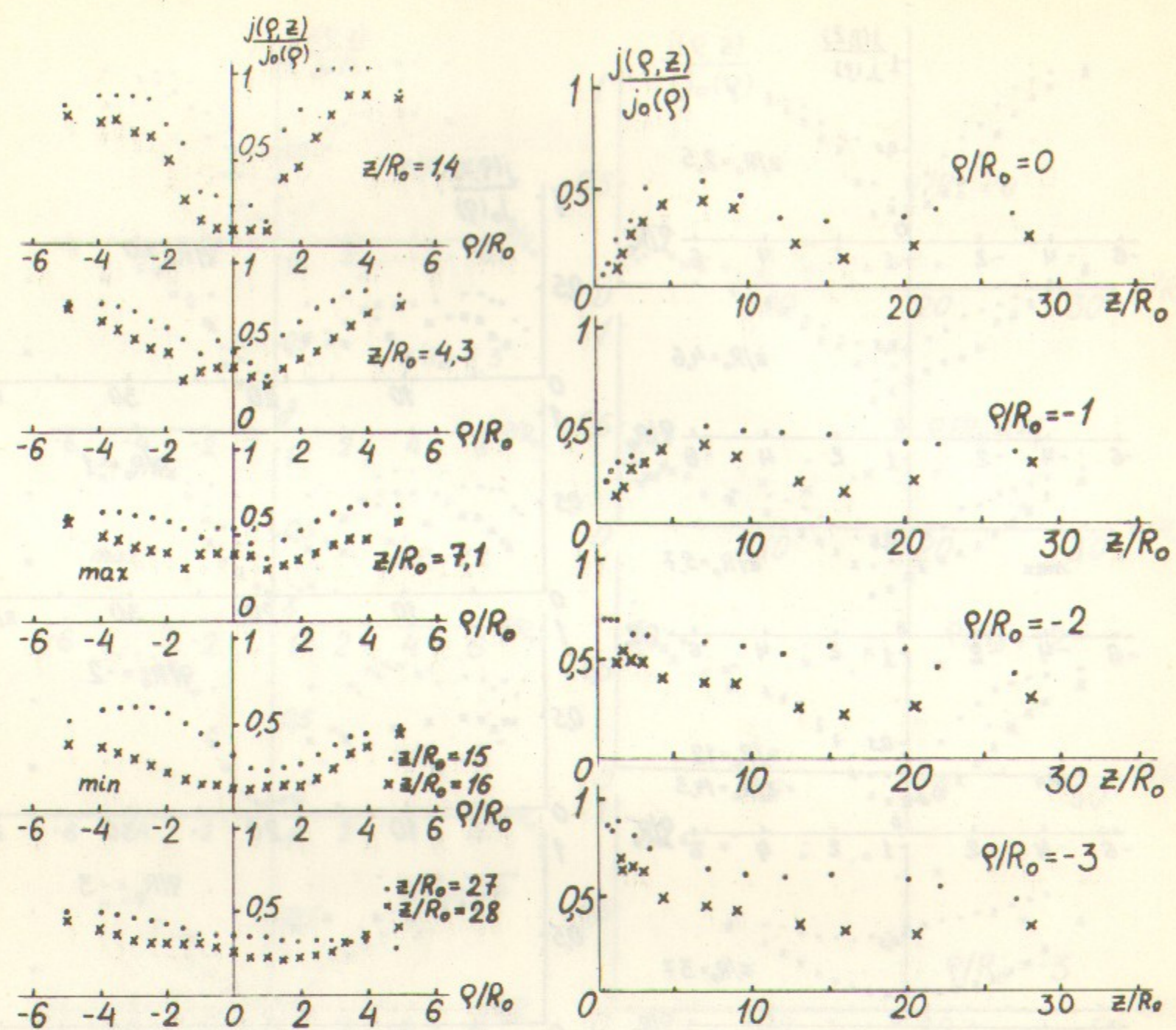


Рис.4. Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x).

$R_0 = 3,5 \text{ мм}$ ,  $R_0/z_H = 0,063$ ,  $H = 700 \text{ э}$ ,  $V_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$  (.),  
 $V_0 = 1,6 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$  (x).

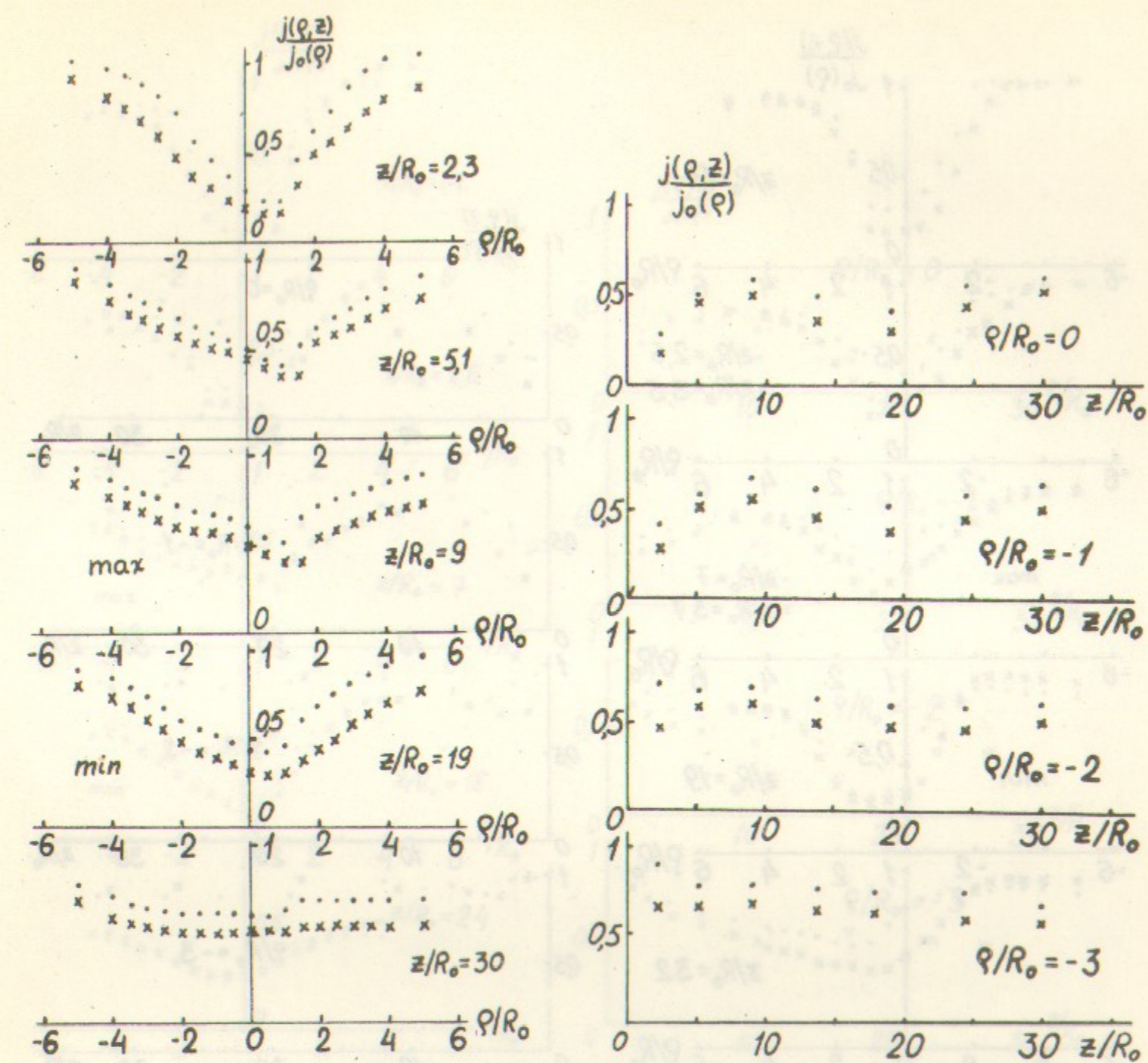


Рис.5. Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x).

$R_0 = 1,75 \text{ мм}$ ,  $R_0/z_H = 0,053$ ,  $H = 1000 \text{ э}$ ,  $V_0 = 1,3 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ .

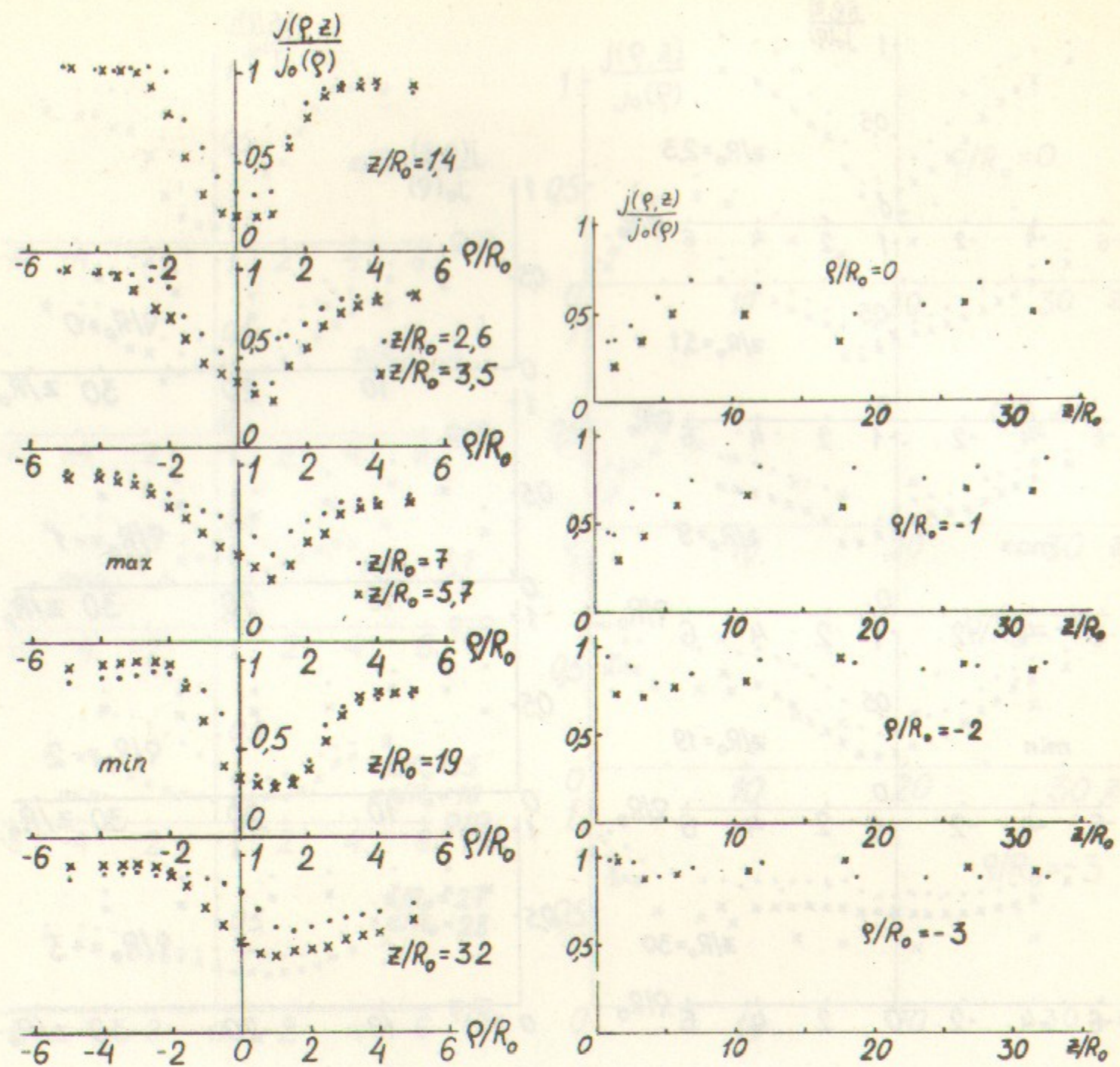


Рис.6. Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x).  
 $R_0 = 1,75$  мм,  $R_0/z_H = 0,052$ ,  $H = 1600\text{э}$ ,  $V_0 = 2,0 \cdot 10^5$  см/сек (.),  
 $V_0 = 2,1 \cdot 10^5$  см/сек (x).

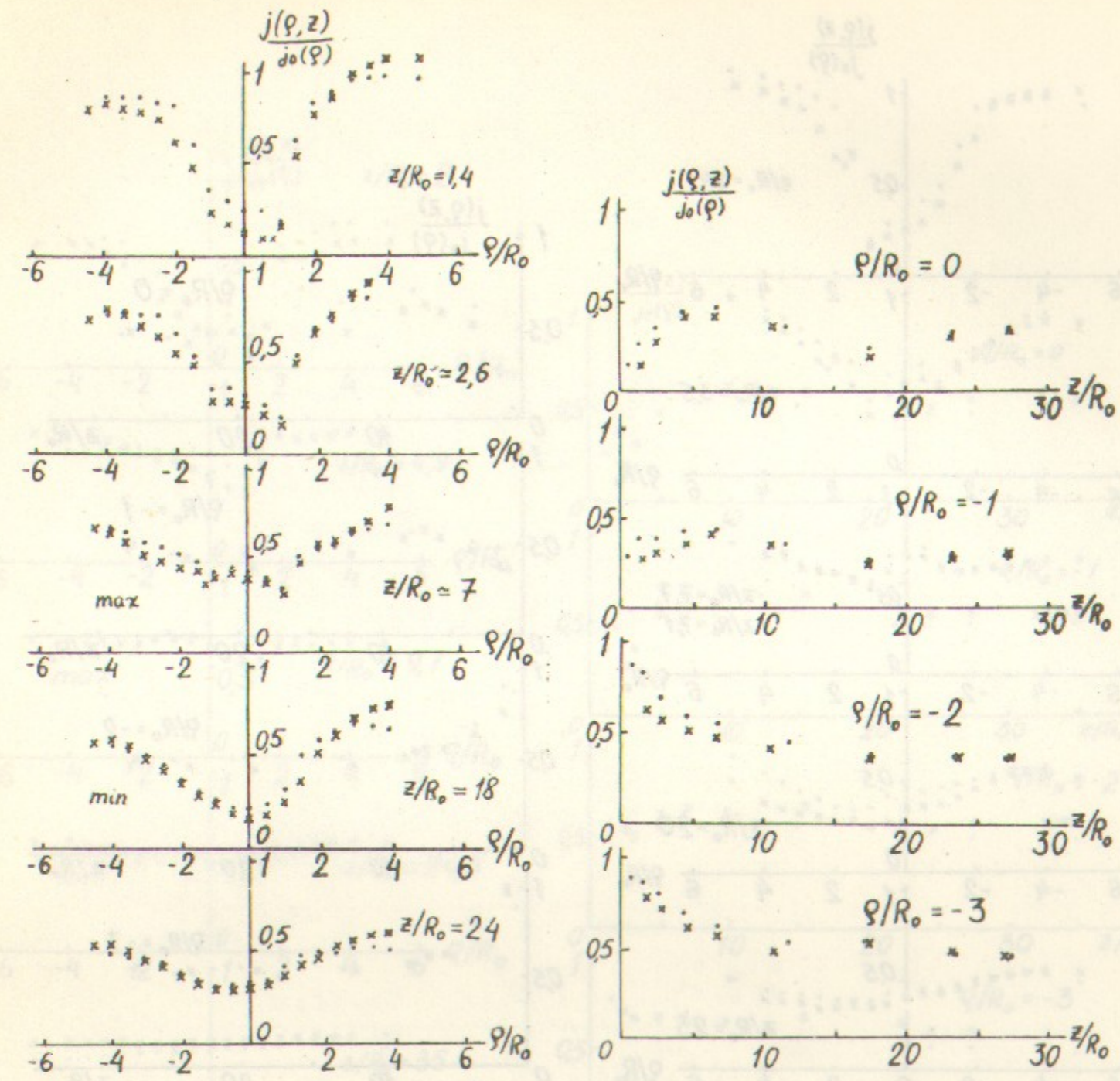


Рис.7. Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x).  
 $R_0 = 3,5$  мм,  $R_0/z_H = 0,052$ ,  $H = 800\text{э}$ ,  $V_0 = 2,1 \cdot 10^5$  см/сек.

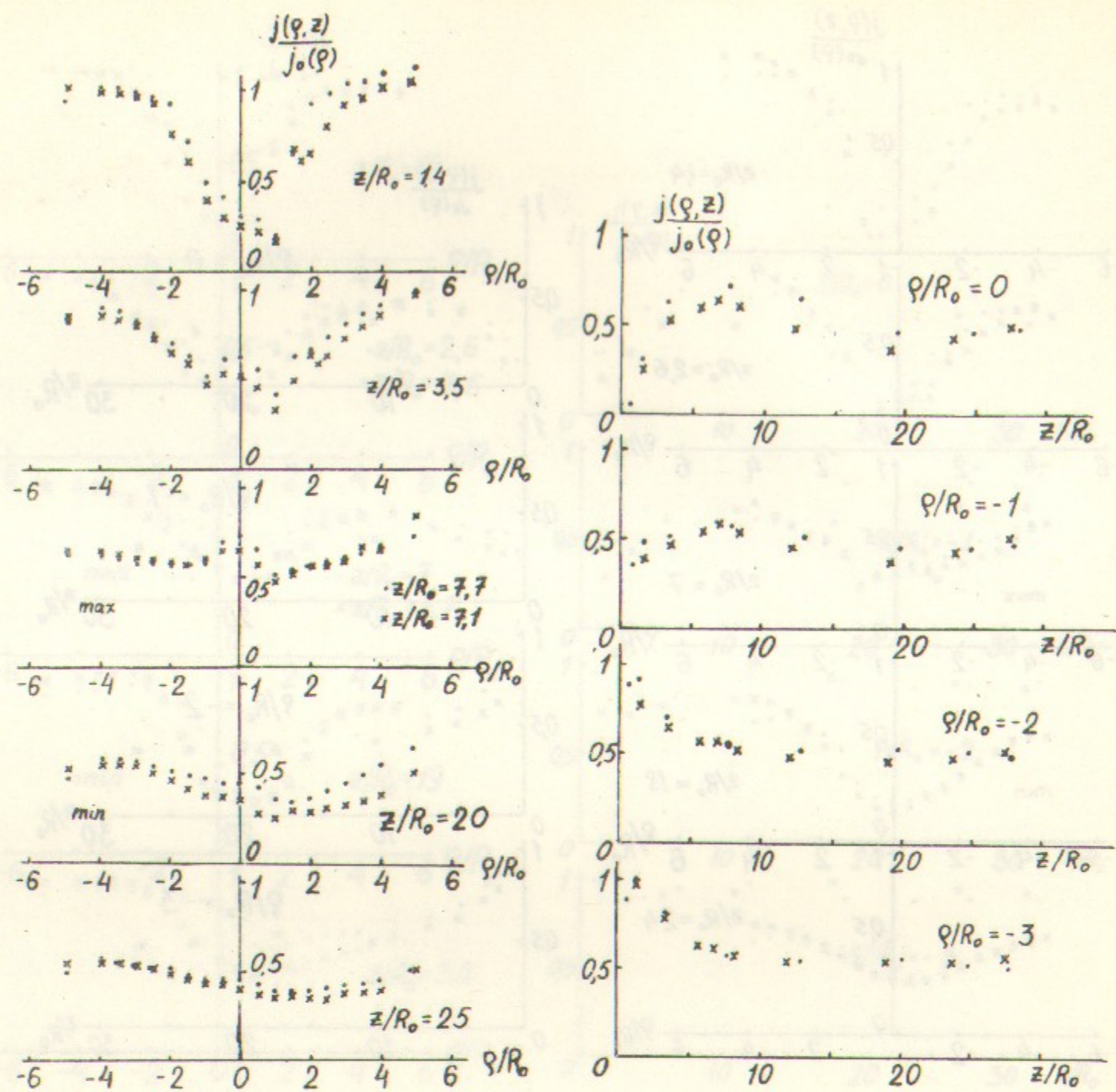


Рис.8. Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x).

$$R_0 = 3,5 \text{ мм}, R_0/z_H = 0,048, H = 500 \text{ э}, V_0 = 1,4 \cdot 10^5 \text{ см/сек.}$$

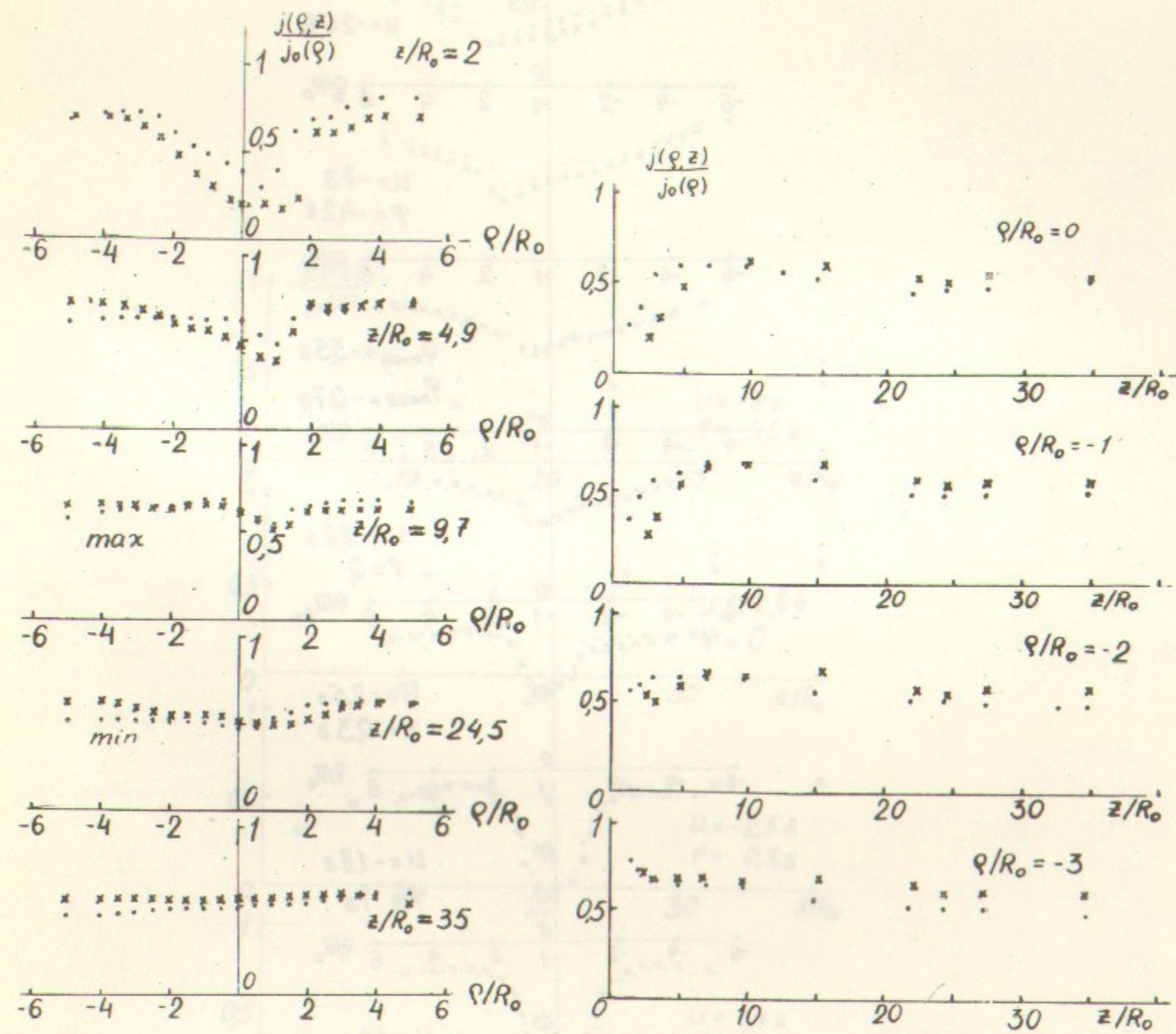


Рис.9. Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x).

$$R_0 = 1,75 \text{ мм}, R_0/z_H = 0,041, H = 700 \text{ э}, V_0 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ см/сек.}$$

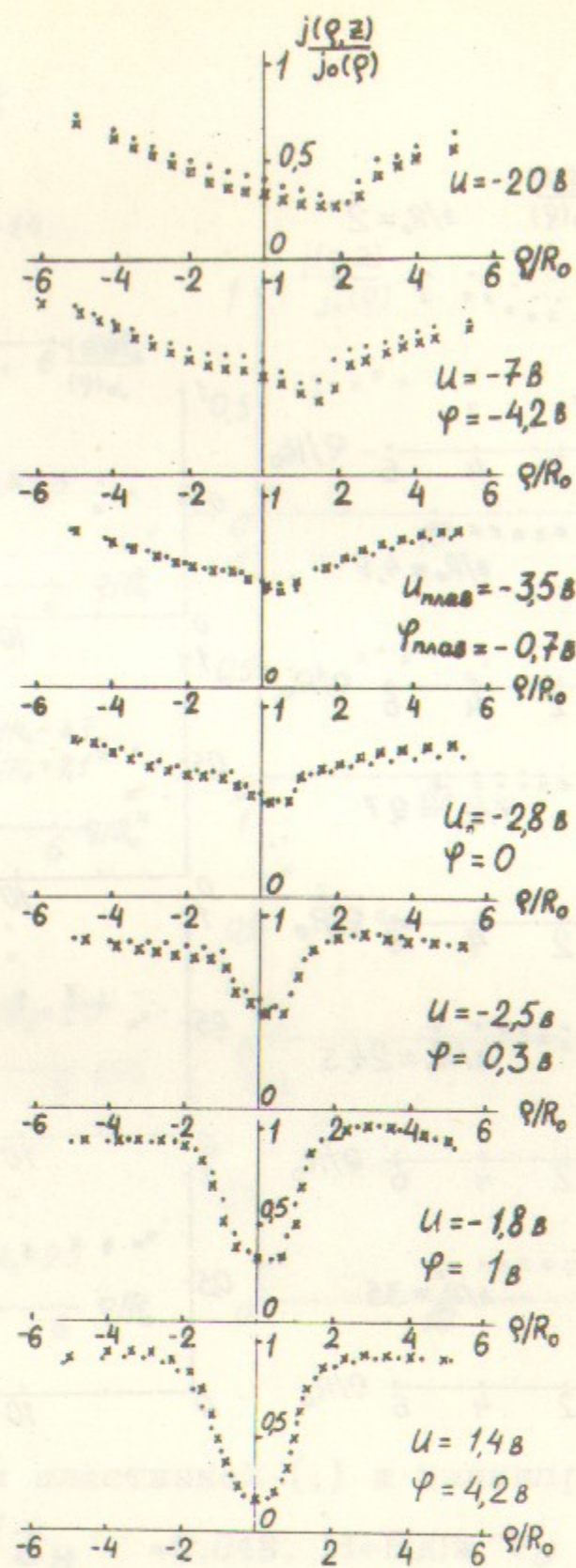


Рис.10.Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x) в максимуме осцилляции ( $z/R_0 = 9$ ) при различных потенциалах тел.

$U$  - потенциал пластинки,  $\varphi$  - потенциал тела относительно потенциала плазмы  $\varphi = U - U_0$ .

$R_0 = 1,75\text{мм}$ ;  $R_0/z_H = 0,053$ ,  $H = 1000\text{э}$ ,  $V_0 = 1,3 \cdot 10^5 \text{см/сек}$ .

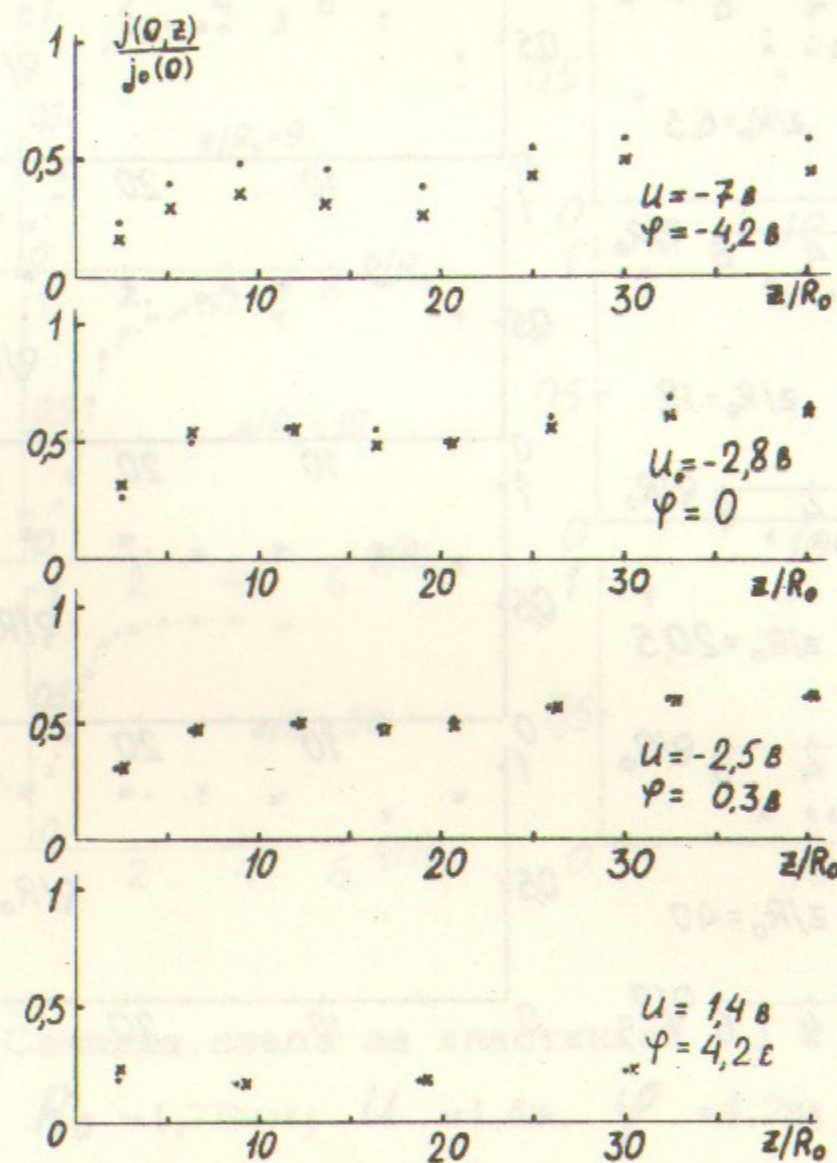


Рис.11.Сечения следа на оси за пластинкой (.) и цилиндром (x) при различных потенциалах тел.

$R_0 = 1,75 \text{мм}$ ; режим рис.10.

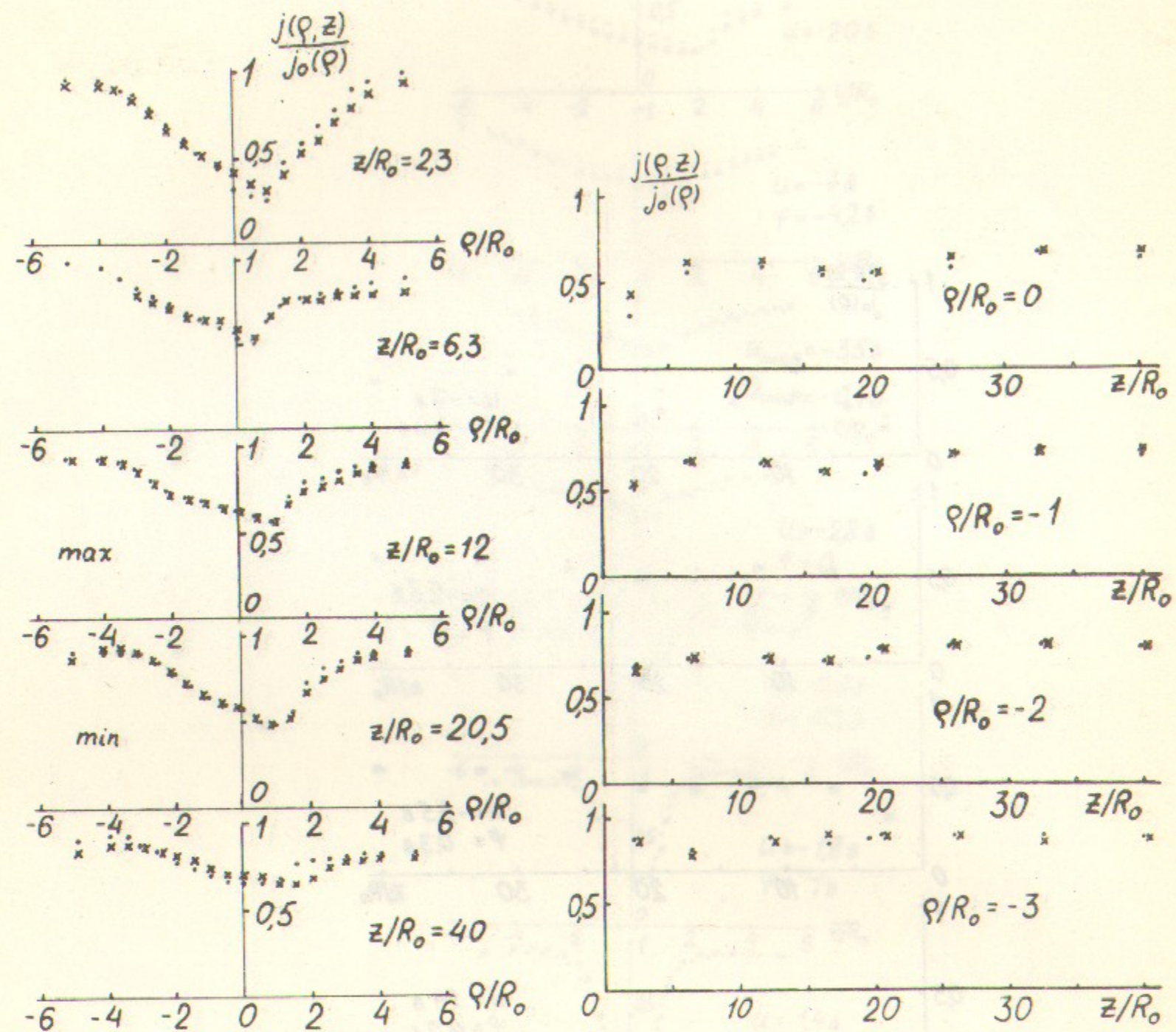


Рис.12 Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x).

$R_0 = 1,75\text{мм}; U = -2,8\text{в}$   $\varphi = 0$ ; режим рис.10.

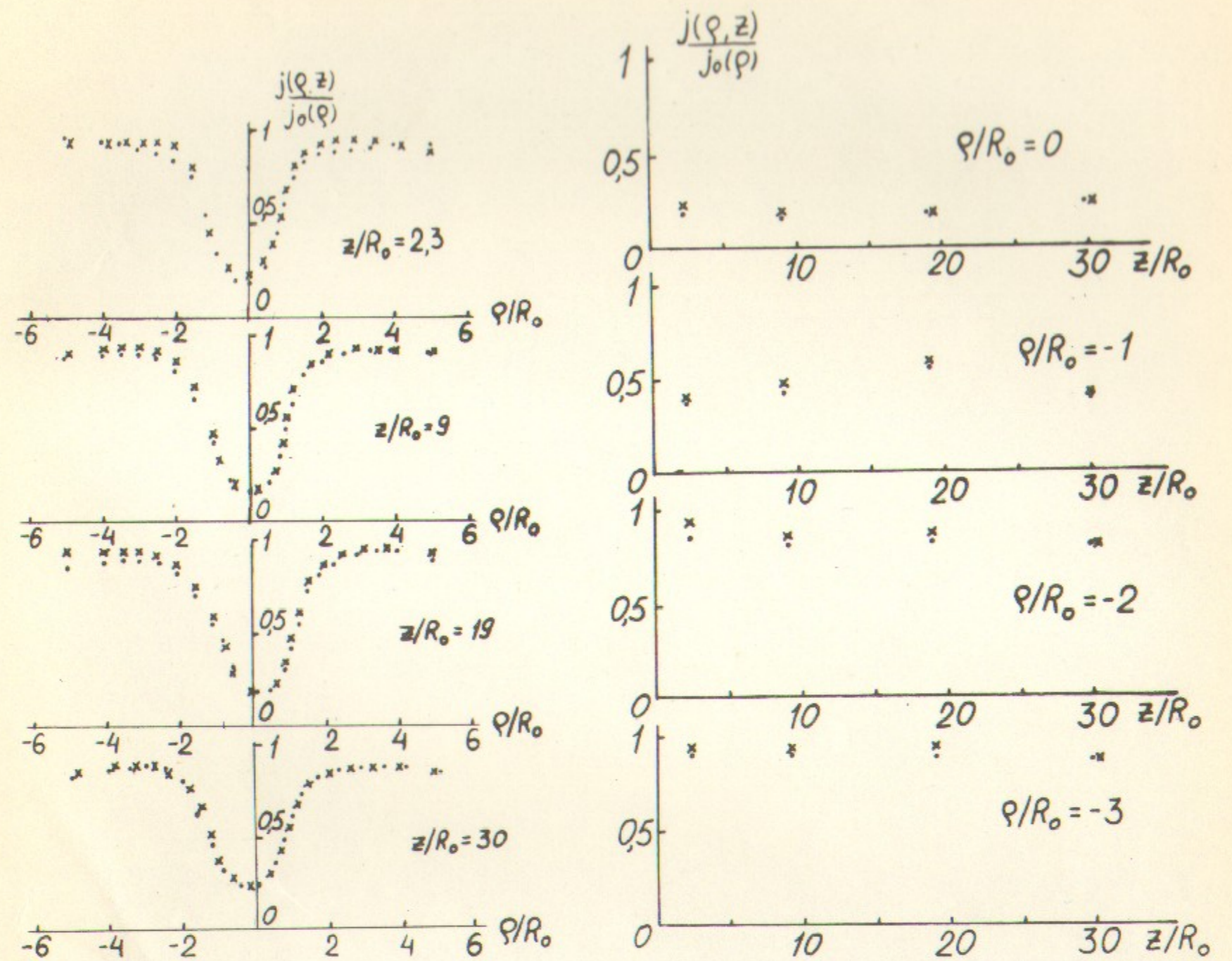


Рис.13 Сечения следа за пластинкой (.) и цилиндром (x).

$R_0 = 1,75\text{мм}; U = 1,4\text{в}, \varphi = 4,2\text{в}$ ; режим рис.10.

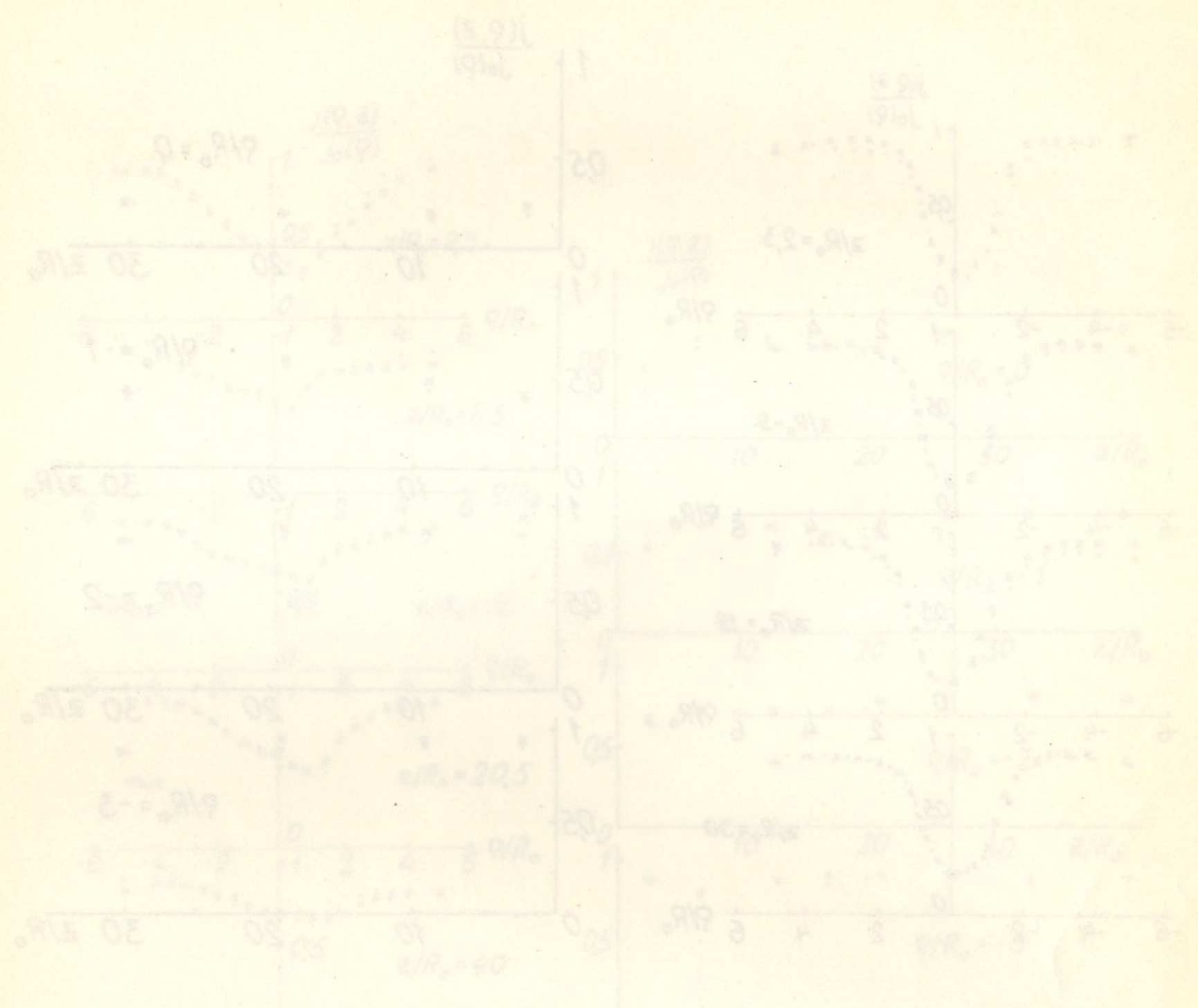


Рис. 1. Расчеты для квантовых (I) и классических (II) систем.  
 Я0 = 1.0; N = 1.0; U = 1.0; J = 1.0; J0 = 1.0.  
 Рис. 2. Расчеты для квантовых (I) и классических (II) систем.

---

Ответственный за выпуск Ю.И.Эйдельман  
 Подписано к печати 28.10.1971г. МН 15224  
 Усл. 0,6 печ.л., тираж 250 экз. Бесплатно.  
 Заказ № 67 . ПРЕПРИНТ.

---

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР, вг.