

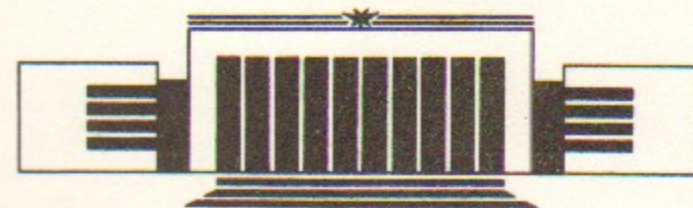


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР 12

В.Ф. Быковский, С.Б. Горячев, А.А. Дорошкин,
Р.М. Лапик, И.Н. Мешков, В.Н. Мозгунов,
В.Н. Поляков, И.А. Селезнев, Л.Н. Смирных,
Е.М. Сыресин, А.А. Тютин

КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ
АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА "ЭЛЕКТРОН-1"
С ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В
ИОНОСФЕРУ

ПРЕПРИНТ 91-62



НОВОСИБИРСК

Комплекс аппаратуры и результаты
активного эксперимента "ЭЛЕКТРОН-1"
с инъекцией электронного пучка в ионосферу

*В.Ф. Быковский, С.Б. Горячев, А.А. Дорошкин,
Р.М. Лапик, И.Н. Мешков, В.Н. Мозгунов,
В.Н. Поляков, И.А. Селезнев, Л.Н. Смирных,
Е.М. Сыресин, А.А. Тютин*

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Описан комплекс научной аппаратуры "Электрон", предназначенный для активных экспериментов с инъекцией электронных пучков с борта космических аппаратов. В состав комплекса входят инжектор электронов с высокочастотным модулятором, блок бортовой диагностической аппаратуры и три отделяемых диагностических контейнера. Представлены результаты эксперимента по взаимодействию модулированного электронного пучка в током 0,5 А и энергией 6,5–8 кэВ с ионосферной плазмой на высотах 90–150 км. Приведены спектры энергии возвратных электронов и ионов, приходящих на метеоракету. Оценен потенциал ракеты. Получены спектрограммы ВЧ-радионизлучения в диапазоне частот 100–500 МГц, а также представлены данные по трассированию радиоволн с частотой 23,7 МГц через область инъекции.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных методов исследований ионосферы и магнитосферы является инъекция электронных пучков с борта космических аппаратов. Такие эксперименты позволяют выявить ряд основных характеристик пучково-плазменных взаимодействий, таких как возникновение пучково-плазменного разряда, возбуждение электромагнитных колебаний в широком диапазоне частот, возможности распространения электронных пучков на большие расстояния. Проведенные ранее эксперименты подобного типа [1–6] поставили ряд задач, требующих дальнейших исследований.

Для проведения активных экспериментов на высотах 100–200 км с использованием метеоракет типа МР-12 – МР-20 разработан комплекс научной аппаратуры "Электрон", включающий бортовой инжектор электронов, блок диагностической аппаратуры и блок отделяемых автономных диагностических контейнеров (рис. 1) [7].

Отличительными особенностями комплекса являются: применение инжектора с высокоперевансной электронной пушкой ($0,7 \text{ мкА/В}^{3/2}$) и модуляцией пучка в НЧ и ВЧ диапазонах с целью возбуждения волновых процессов в ионосферной плазме: использование трех автономных диагностических контейнеров, два из которых отделяются в диаметрально противоположных направлениях перпендикулярно оси ракеты, а третий вверх вдоль от ракеты.

Первый эксперимент с аппаратурой "Электрон" на ракете МР-12 проведен 28 октября 1989 г. в районе г. Волгограда. Целью эксперимента являлось определение параметров пучка и возмущенной им плазмы, ис-

следование пучково-плазменного разряда (ППР), измерение электрических полей в области инжекции и анализ волнового излучения, возникающего при инжекции модулированного электронного пучка.

1. БОРТОВОЙ ИНЖЕКТОР ЭЛЕКТРОНОВ

Инжектор электронов [8] выполнен на базе трехэлектродной пушки, что обеспечивает формирование пучков с различным первеансом при фиксированной энергии частиц и модуляцию тока пучка в широком диапазоне частот. Вес пушки инжектора 3 кг, диаметр 170 мм, высота 90 мм.

Катод пушки диаметром 5,3 мм выполнен из гексаборида лантана, что предпочтительнее для активных экспериментов в космосе, так как он требует умеренной мощности подогрева, порядка 200 Вт/см², допускает в холодном состоянии контакт с воздухом и может работать вплоть до давления 10⁻² Торр. В качестве исходной взята геометрия электродов Пирса. Их положение и форма (рис. 2) выбраны в результате стендовых испытаний. Следует отметить, что управляющий электрод пришлось приблизить к катоду по сравнению с геометрией эквипотенциалей в пушке Пирса, чтобы увеличить ее первеанс до 0,8 мкА/В^{3/2} и осуществить управление при низком напряжении на управляющем электроде. Напряжение между катодом и управляющим электродом, при котором происходит полное запираение пушки, составляет — 1,5 кВ. При инжекции пучка напряжение на управляющем электроде равно +0,5 кВ. Вольтамперная характеристика пушки по управляющему электроду приведена на рис. 3. При выбранной геометрии пушки токооседание на управляющий электрод и анод составляет, соответственно, 10 и 0,5% от тока эмиссии.

“Платой” за высокий первеанс пушки и возможность управления при низком напряжении на управляющем электроде является относительно высокая угловая расходимость пучка. На выходе из пушки угловая расходимость составляет 25° при токе пучка 0,6–0,7 А. Дефокусирующее воздействие на пучок вносит управляющий электрод, приближенный к катоду.

Блок-схема основных функциональных элементов ускорителя приведена на рис. 4. Нить накала катода *НН* электронной пушки *ЭП* питается переменным током от преобразователя *Пр1* через разделительный трансформатор *Тр3*. Выводы катода пушки *К* и управляющего электрода *У* шунтированы последовательно соединенными источниками смещения *У_{см}* и управления *У_{упр}*. Выпрямитель источника смещения через согласующий трансформатор *Тр2* присоединен параллельно нити накала

катода, находящейся под высоким напряжением — *U*. Выпрямитель источника управления через разделительный трансформатор *Тр1* и электронный коммутатор *ЭК* присоединен непосредственно к выходу преобразователя *Пр1*. Переменное напряжение с выхода преобразователя *Пр2* через повышающий трансформатор *Тр4* поступает на высоковольтный выпрямитель *ВВ*, заряжающий емкостной накопитель *ЕН*. Преобразователи *Пр1*, *Пр2* питаются от автономного источника батареи из 14 последовательно соединенных аккумуляторов СЦ25.

Система управления, измерения и контроля работы ускорителя — СУИК обеспечивает включение преобразователей и электронного коммутатора в заданные моменты времени, эта система обеспечивает также измерение и контроль основных параметров работы ускорителя.

При включении преобразователя *Пр1* через нить накала катода *НН* начинает протекать ток около 13 А, а на выходе источника смещения *U* появляется постоянное запирающее пушку напряжение около 1,5 кВ. После разогрева катода (около 45 с) включается преобразователь *Пр2*, обеспечивающий высокое катодное напряжение *U*. При нарастании напряжения до заданного уровня (в нашем случае — 8 кВ) включается электронный коммутатор *ЭК* и на выходе источника управления *U_{упр}* появляется напряжение порядка 2 кВ. Поскольку источники *U_{см}* и *U_{упр}* включены встречно (см. рис. 4), то на управляющем электроде пушки *У* появляется положительное напряжение относительно катода и пушка открывается.

Электронный коммутатор включается с частотой 1,25 кГц при длительности импульса 400 мкс, что приводит к модуляции тока пучка по плотности. Емкость между катодом пушки и управляющим электродом сглаживает глубину модуляции тока на этой частоте до 80%. Из-за пульсаций напряжения на выходе источника управления имеет место также модуляция тока пушки на частоте 20 кГц, с глубиной порядка 20% (удвоенная частота работы преобразователя *Пр1*).

В результате работы пушки напряжение на емкостном накопителе уменьшается и при нижнем заданном его значении (в нашем случае — 6 кВ) источник управления *U_{упр}* отключается, пушка запирается, а емкостной накопитель энергии вновь начинает заряжаться от преобразователя *Пр2*, работающего в непрерывном режиме. При достижении катодным напряжением верхнего заданного уровня вновь включается источник управления *U_{упр}* и цикл работы повторяется (см. рис. 5).

Высокочастотная модуляция электронного пучка по скорости обеспечивается резонансным модулятором. Емкостная часть резонансного контура — плоский конденсатор, образуемый анодной пластиной элек-

тронной пушки и закрепленной над ней на керамических изоляторах фигурной пластиной с центральным отверстием диаметром 10 мм. Переменный потенциал этой пластины и моделирует пучок по энергии. Индуктивная часть контура выполнена в виде отрезка гибкой коаксиальной линии с закорачивающим поршнем. Контур настраивается на минимум КСВ при достаточно низкой добротности во избежание существенной расстройки при проникновении в зазор плазмы. На резонансной частоте модуляции 150 мГц КСВ-1,2, добротность $Q=8$. Возбуждение резонансного контура осуществляется от генератора мощностью $P=1$ Вт (на согласованной нагрузке 50 Ом) через коаксиальную линию, гальванически связанную с короткозамкнутой линией контура. Напряжение на емкости модулятора определяется выражением

$$U_m = \sqrt{2P\rho Q},$$

где $\rho = \sqrt{L/c}$ — характеристическое сопротивление, вычисляемое из сравнения значений добротности с шунтирующим резонатором и без него. Эта оценка дает величину для условий эксперимента $U_m \approx 50$ В. Отметим, что уровень ВЧ-модуляции энергии электронов будет несколько ниже, поскольку модулятор работает во времяпролетном режиме, т. е. в режиме, когда частота модуляции сравнима с обратным временем движения электронов пучка в поле потенциальной пластины модулятора. Электроны пучка быстро ускоряются в открытом резонаторе, а затем сравнительно медленно тормозятся в поле потенциальной пластины модулятора. Как показывают расчеты уровень ВЧ-модуляции энергии электронов в отсутствие ионосферной плазмы составляет 20 – 30 эВ.

2. БЛОК ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

В состав блока диагностической аппаратуры комплекса входят многокамерная электронная ловушка МЭЛФ, плоский сеточный анализатор ионов ПСАИ, сеточная электронная ловушка СЭЛ, блок сбора распределения данных БСРД, блок преобразователей питающих и анализирующих напряжений. Анализатор возвратных электронов МЭЛФ состоит из 6 цилиндрических ловушек Фарадея, входные отверстия которых перекрыты сетками с задерживающими потенциалами, фиксированными для каждой ловушки и имеющими одно из значений 10, 100, 250, 500, 1000, 2000 В. Конструкция ловушки показана на рис. 6,а. Ловушки расположены в двух блоках, по три в каждом. Блоки размещены так, что входные

отверстия ловушек направлены перпендикулярно оси ракеты. Каждая ловушка имеет свой индивидуальный усилитель. Порог чувствительности усилителей ловушек изменяется в зависимости от величины задерживающего потенциала ловушки от 10^{-10} А до 10^{-7} А. Каждый усилитель имеет два линейных выхода с коэффициентами усиления 1 и 50. Вес блока электронных ловушек составляет 1,4 кг, его габариты 70 × 120 × 100 мм. Блок преобразователя — делителя запирающего напряжения весит 0,3 кг при габаритах 100 × 100 × 30 мм.

Датчики электронов и ионов СЭЛ и ПСАИ — сеточные анализаторы с задерживающим изменяющимся потенциалом и плоской геометрией системы сетки-коллектор. Каждый измеритель представляет собой цилиндрический стакан с входным отверстием диаметром 20 мм (рис. 6,б,в). Входы датчиков закрыты защитными сетками, находящимися под потенциалом корпуса датчиков. Анализирующие сетки, на которые подается пилообразное напряжение (от -1 до +15 В для ПСАИ и от +1 до -15 В для СЭЛ), отделены от антидинаatronных сеток (их потенциал — 20 В для ПСАИ и 0 В для СЭЛ) экранными заземленными сетками. За антидинаatronной сеткой располагается сплошной плоский коллектор. Коллектор “подвешен” относительно входа усилителя на -10 В для ПСАИ и +6 для СЭЛ. Расстояния между сетками одинаковы и равны 4 мм. Каждый усилитель ПСАИ и СЭЛ имеет три линейных выхода с коэффициентами усиления входного тока 1:1, 1×5 и 1×50. Порог чувствительности усилителей составляет $10^{-9} - 10^{-7}$ А/В. Общее число выходов датчиков ПСАИ и СЭЛ равно 8 (по 3 измерительных выхода для каждого датчика и 2 выхода контроля анализирующего напряжения).

Вес каждого из датчиков СЭЛ и ПСАИ составляет 0,3 кг, их размеры вместе с усилителями — 40 × 40 × 100 мм.

Блок сбора-распределителя данных БСРД предназначен для регистрации быстропротекающих процессов в микросекундном диапазоне. Система телеметрии РТС-8 метеоракеты МР-12 имеет ограниченные возможности по скорости передачи информации и не может быть использована непосредственно для регистрации скоростных процессов. Блок БСРД используется для программированного опроса-коммутации бортовых измерительных систем, записи информации в оперативное запоминающее устройство ОЗУ программированного считывания информации на бортовую систему телеметрии. Вторая задача, решенная при создании БСРД, заключается в том, что в момент инъекции пучка может происходить “сбой” сигнала телеметрии из-за возможных помех при возникновении ППР. Для предотвращения возможной потери информации БСРД передает записанный в ОЗУ цикл опроса датчиков на вход

бортовой телеметрии дважды: первый раз непосредственно в процессе считывания/записи цикла и второй раз после окончания инъекции.

Блок БСРД имеет размеры $125 \times 125 \times 55$ мм, вес 0,4 кг.

Блок преобразователей питающих и анализирующих напряжений обеспечивает стабилизированными двухполярными напряжениями усилители МЭЛФ, ПСАИ и СЭЛ. Он также используется для питания БСРД, обеспечивает напряжение антидинаatronных сеток СЭЛ и ПСАИ, и питания преобразователя для высоковольтных каналов МЭЛФ. Потребление блока от первичного источника 14 В составляет не более 20 Вт. Блок питания имеет габариты $125 \times 125 \times 65$ мм, его вес равен 0,4 кг.

3. БЛОК ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ

Существенной особенностью экспериментов активного типа является необходимость обеспечения многопозиционных измерений. Эти особенности определяются прежде всего значительными пространственно-временными градиентами параметров исследуемых явлений.

В экспериментах с ионными инжекторами [9, 10] производилось радиальное отделение диагностических контейнеров. Однако, в обоих случаях для этой цели использовались большие ракеты, позволяющие разместить на их борту достаточно объемные контейнеры.

Несмотря на весьма ограниченные возможности, имеющиеся на средних метеорокетах типа МР, удалось разработать блок, включающий, как указывалось выше, три отделяемых автономных диагностических контейнера, обеспечивающих возможность сканирования пространства вокруг ракеты.

Диагностическая аппаратура двух контейнеров АК-3 (зондовых), отделяемых в диаметрально противоположных направлениях перпендикулярно оси ракеты, предназначена для зондовых измерений параметров плазмы, электрических и магнитных полей.

В состав диагностической аппаратуры контейнеров АК-3 входят:

- измеритель напряженности электрического поля в диапазоне частот до 1кГц;
- измеритель концентрации положительных ионов;
- измеритель концентрации электронов;
- измеритель продольной (вдоль оси контейнера) составляющей геомагнитного поля H_{\parallel} ;

— измеритель поперечной составляющей геомагнитного поля H_{\perp} .

Датчик электрического поля выполнен по схеме двойного зонда (две сферы диаметром 40 мм, разнесенные при раскрытых штангах на расстояние 1,0 м друг от друга диаметрально симметрично относительно продольной оси контейнера). Чувствительность измерителя 10 мВ/м. Динамический диапазон измерения поля 40 дБ.

Измеритель H_{\parallel} — датчик Холла, помещенный между двумя симметричными ферритовыми стержнями, расположенными вдоль оси контейнера. Чувствительность измерителя H_{\parallel} составляет 10–15 мВ/мТ.

Измеритель H_{\perp} — две катушки, разнесенные по противоположным бортам контейнера.

Измерители концентрации положительных ионов и электронов — плоские сеточные ловушки, аналогичные установленным на приборном отсеке ракеты. Датчики расположены на штангах, раскрывающихся симметрично оси контейнера. Ось датчиков после раскрытия штанг расположена параллельно оси контейнера. Каждый из датчиков представляет собой цилиндр, по торцам которого расположены входы для измеряемых частиц. В средней плоскости цилиндра находится коллектор, принимающий частицы одновременно с двух торцевых входов. Входные отверстия датчиков перекрыты защитными сетками, находящимися под потенциалом корпуса контейнера. Между этой сеткой и коллектором расположены антидинаatronные сетки. Расстояние каждого датчика от оси контейнера (при раскрытых штангах) равно 200 мм.

Телеметрическая система контейнеров АК-3 осуществляет параллельный опрос датчиков с последовательной передачей. Общее число каналов 8, в том числе один служебный. Частота опроса каждого канала 50 Гц. Служебный канал предназначен для автокалибровки и синхронизации наземного приемного устройства. Амплитуда сигналов датчиков преобразуется в частоту, модулирующую СВЧ-сигнал. Несущие частоты телеметрических передатчиков разнесены (1778 и 1782 мГц), что позволяет разделить сигналы двух контейнеров на приемном устройстве. Импульсная мощность телеметрических СВЧ-передатчиков составляет $0,7 \div 0,9$ Вт.

Конструктивно автономный контейнер АК-3 выполнен в виде цилиндра из нержавеющей стали диаметром 120 мм и высотой 190 мм. На боковой поверхности цилиндра выдавлены 4 прямоугольных паза размерами 20×10 мм, равномерно распределенные по поверхности. В пазы укладываются штанги-держатели зондов электрического поля и датчиков частиц. На нижнем торце контейнера установлена штыревая СВЧ-

антенна ТМ-передатчика. Вес контейнера АК-3 — 5 кг.

В состав контейнера АК-В (волновой) входят датчики электрического и магнитного полей, работающие в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц, магнитометр, тридцатидвухканальная телеметрическая система и передатчик на частоте 136 мГц, а также счетчик бортового времени. Датчик электрического поля представляет собой зонд Ленгмюра диаметром 50 мм. Для измерения электрического поля используется система из двух датчиков, расположенных на раскрывающих штангах. Магнитное поле измеряется индукционным датчиком. Чувствительность датчиков составляет по квазипостоянному электрическому полю — 2,5 мВ/м, по переменному электрическому полю 50 кВ/мГц^{1/2}, по переменному магнитному полю 40 нА/мГц^{1/2}. Питание аппаратуры контейнера АК-В осуществляется от аккумуляторов, потребляемая ею мощность составляет 10 Вт. Вес контейнера 7 кг, он выполнен в виде усеченного конуса высотой 300 мм с диаметром нижнего основания 260 мм и диаметром верхнего основания 105 мм.

4. ГОЛОВНАЯ ЧАСТЬ “ЭЛЕКТРОН-1”

На базе описанного выше комплекса аппаратуры разработана головная часть (ГЧ) метеоракеты типа МР “Электрон-1”. Общий вид блока научной аппаратуры “Электрон-1” показан на рис. 1. В состав научной аппаратуры входят электронный инжектор с высокочастотным модулятором, блок бортовой диагностической аппаратуры, три отделяемых контейнера, блок сбора и распределения данных, блок коммутации и управления системой телеметрии и блок командно-временного устройства. Электронный инжектор размещается в гермоотсеке над блоком служебной аппаратуры метеоракеты. Его пушка герметично крепится на верхнем фланце гермоотсека под углом 23° к оси метеоракеты. В гермоотсеке вместе с инжектором также размещены БСРД, блок преобразователей питающих и анализирующих напряжений и генератор высокочастотного модулятора. В носовом конусе на верхнем фланце гермоотсека установлена транспортная плита, на которой крепятся контейнеры вместе с устройствами их удержания и сброса. Система отделения контейнеров механическая. При отделении контейнера АК-3 они закручиваются вокруг своей вертикальной оси с угловой скоростью 1–2 об/с после раскрытия штанг. Раскрытие штанг происходит через 8–10 с после отделения, когда контейнеры отойдут от ракеты на расстояние около 10 м, что исключает возможность поломки штанг. Скорость отделения контейнеров АК-3 составляет порядка 5 м/с. Контейнер АК-В отделяется

вперед со скоростью 2 м/с. Раскрытие штанг с измерительными датчиками контейнера АК-В происходит до отделения от приборного отсека.

На транспортной плите размещены также диагностические датчики СЭЛ, ПСАИ и МЭЛФ. Датчики размещены так, что входные окна СЭЛ и ПСАИ “смотрят” вдоль от ракеты, а МЭЛФ перпендикулярно.

5. НАЗЕМНАЯ ДИАГНОСТИКА

Наряду с корпускулярными и волновыми измерениями на борту метеоракеты и на отделяемых контейнерах в эксперименте “Электрон” предусмотрена регистрация излучения в радио и оптическом диапазоне наземной диагностической аппаратурой. Для регистрации электромагнитного излучения в диапазоне частот 100–500 МГц использован панорамный анализатор спектра СЧ-60 с предусилителем (коэффициент усиления 40 дБ), сигнал на который поступает от слабонаправленной широкополосной антенны. Анализатор применяется в режиме автоматической развертки с длительностью 10 мс без синхронизации с инжекцией пучка. С целью индикации возникновения неоднородностей плазмы при инжекции пучка в эксперименте используется ионосферная станция, работающая в диапазоне частот 1–15 МГц. Имеется также возможность трассирования радиоволн с частотой 23,7 МГц через область инжекции пучка на базе Казань (излучатель) — Волгоград (рассеиватель) — Новочеркасск (приемник) (рис. 7). Угол рассеяния составляет около 60°, расстояния рассеиватель — приемник примерно равно 450 км. Оптические наблюдения проводятся с помощью телескопов, совмещенных с телекамерами. На один из телескопов установлен интерферометр Фабри—Перро для измерения температуры ионов. Однако в эксперименте оптические средства наблюдения не удалось использовать из-за неблагоприятных погодных условий в пункте наблюдения.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Траектория ракеты и основные этапы эксперимента показаны на рис. 8 и представлены в табл. 1.

Инжекция электронного пучка началась со 193 секунды, когда ракета находилась в апогее на высоте 150 км, и продолжалась во всем нисходящем участке траектории до высот примерно 30 км. Со 193 по 210 с на высоте 150 – 152 км (окрестности апогея) инжекция пучка сопровождалась пробоями в пушке. С 210 по 316 с при падении ракеты с высоты

150 км до высоты 95 км инжектор работал в штатном режиме, ускоряющее напряжение за время импульса инжекции изменялось от 8 до 6,5 кВ, ток инжекции составлял 0,45 А, частота следования импульсов 3 Гц, длительность импульсов — 40 мс.

Геометрия инжекции и область, занятая пучком вблизи ракеты, показаны на рис. 9. Размеры этой области определяются угловым разбросом пучка и вращением ракеты (частота 5 Гц). Угловой разброс пучка при токе 0,45 А составляет 15° . При длительности импульса 40 мс метеорокета поворачивается вокруг своей оси на угол примерно 70° .

Таблица 1

Уч. траектории	Высота, км	Время, с	Событие
1	2	60	Начало нагрева катода
2	85	85	Отделение контейнеров АК-В
3	105	105	Отделение контейнеров АК-3
4		105	Включение ускоряющего напряжения на пушке
5-6	150-152	193-210	Инжекция пучка, сопровождающаяся пробоями в пушке
6-7	152-95	210-316	Штатный режим работы пушки 8 кВ; 0,45 А; $f=3$ Гц
7-8	95-30	316-373	Инжекция пучка, сопровождающаяся пробоями в пушке
9	30	373	Последний импульс инжекции

Профиль концентрации невозмущенной ионосферной плазмы получен в результате зондовых измерений на контейнерах АК-3, когда они удалились от ракеты на расстояние более 700 метров (220 — 316 с, высота 150-95 км) рис.10. Зависимость электронной концентрации от высоты совпадает по форме с зависимостью концентрации ионов, но абсолютное значение плотности электронов определить не удалось, поскольку контейнер в ионосферной плазме приобретает "плавающий" потенциал $\varphi = 7T_0/e = 2$ В [6]. Здесь T_0 — температура электронов невозмущен-

ной плазмы. При инжекции пучка электронный ток зонда контейнера, удаленного от ракеты на расстояние порядка 1 км, изменяется на 10 — 15%.

Параметры плазмы в окрестности ракеты получены в измерениях потоков тепловых электронов и ионов сеточными анализаторами СЭЛ и ПСАИ (рис.11, 12), а также радиоизлучения из области инжекции.

Результаты измерений приведены для двух моментов времени: спустя 32,6 и 49,4 мс после начала инжекции. Температура электронов в момент 32,6 мс составляет 1,7 эВ, для 49,4 мс она равна 0,5 эВ. Концентрация электронов, полученная в измерении на высоте 110 км, составляет $6 \cdot 10^4$ см⁻³. Как видно из рис. 11, наряду с тепловыми электронами с температурой 1,7 эВ в момент 32,6 мс после начала инжекции существует группа надтепловых электронов с энергией выше 15 эВ, а по окончании инжекции (49,4 мс) надтепловых электронов нет. Энергия ионов в момент времени 32,6 мс равна 1,5 эВ, без пучка (49,4 мс) она понижается до величины примерно 0,2 эВ. Ионный ток ПСАИ примерно в 100 раз ниже чем электронный. Ток ионов на ракету, по-видимому, связан с перекompенсацией электронного пучка и их уходом из области пучка на ракету.

Зависимость от высоты полного тока электронов, регистрируемого СЭЛ при нулевом потенциале на анализирующей сетке и усредненного по 10 импульсам для момента времени 32,6 мс, приведена на рис. 13. При этом концентрация электронов с температурой около 2 эВ, дающих основной вклад в сигнал, примерно соответствует концентрации фоновой плазмы, хотя, по-видимому, (это следует из результатов радионаблюдений) концентрация плазмы в окрестности метеорокеты при инжекции пучка существенно выше.

Спектр электронов в диапазоне энергий от 10 эВ до 2 кэВ получен с помощью многокамерных ловушек Фарадея с анализирующей сеткой (рис. 14). Из этих результатов следует, что существуют две группы возвратных электронов: надтепловые электроны плазмы с температурой около 75 эВ и концентрацией порядка $5 \cdot 10^3$ см⁻³ и электроны с энергией на уровне 1 кэВ и концентрацией порядка 10 см⁻³.

Поток надтепловых электронов, зарегистрированный анализатором возвратных электронов МЭЛФ при запирающем напряжении на анализирующей сетке 10 В в момент времени $\tau=5$ мс, примерно в 50 раз выше по сравнению с потоком надтепловых электронов, зарегистрированным СЭЛ в момент времени 32,6 мс. Это по-видимому, связано с расположением МЭЛФ, окна которых находятся в области инжекции перекompенсированного электронного пучка, а окна СЭЛ расположены в "тени"

для электронов пучка. Поскольку при давлениях $P > 10^{-5}$ Торр пучок перекомпенсирован и положительно заряжен [10], то электроны плазмы уходят на ракету вдоль пучка, в результате чего поток надтепловых электронов в области распространения пучка может быть существенно выше, чем вне этой области.

По результатам измерений спектра возвратных электронов можно оценить потенциал ракеты во время инъекции пучка, поскольку этот спектр зависит от температуры электронов и величины потенциала. На рис. 14 приведены расчеты зависимости тока возвратных электронов при различных значениях потенциала ракеты:

$$I = neS \left(\frac{m}{2\pi T} \right)^{1/2} \int_0^{\infty} \left(v^2 + \frac{2e(\varphi_p - U)}{m} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{mv^2}{2T} \right) dv,$$

где φ_p , U — потенциал ракеты и анализирующей сетки МЭЛФ, S — площадь окна МЭЛФ. Теоретические и экспериментальные кривые близки при потенциале ракеты, не превышающем +50 В.

Плотность плазмы в области инъекции пучка может быть также определена на основе данных радиозондирования на базе Казань — Волгоград — Новочеркасск (рис. 7). В эксперименте зафиксировано рассеяние радиоволн с частотой 23,7 МГц во время инъекции пучка вблизи апогея (150 км). Сигнал, зарегистрированный в Новочеркасске, в зависимости от времени показан на рис. 15. Учитывая, что рассеяние радиоволн на большие углы (в эксперименте угол рассеяния составляет 60°) на неоднородностях плазмы происходит, когда ленгмюровская частота сравнима с частотой радиоволн, можно оценить плотность плазмы в области инъекции пучка. Для частоты 23,7 МГц она составляет $6 \cdot 10^6$ см $^{-3}$, что на порядок превышает плотность фоновой плазмы.

Одной из особенностей эксперимента "Электрон-1" является исследование волнового излучения в диапазоне 100 – 500 МГц, возникающего при инъекции модулированного электронного пучка в ионосферу. Высокочастотная модуляция пучка по энергии на частоте, близкой к частотам спонтанного излучения плазмы, приводит к трансформации спектра излучения (в зависимости от положения частоты модуляции относительно спектра спонтанной генерации излучение становится монохроматическим на частоте модуляции, либо имеет сложный спектр, в котором присутствуют и монохроматическая и широкополосная компоненты), возрастает на 7–10 дБ интегральная по спектру интенсивность

излучения. Таким образом, с помощью ВЧ-модуляции пучка слабым сигналом (глубина модуляции пучка по энергии составляет порядка 0,2%) можно эффективно управлять параметрами электромагнитного излучения, возникающего при взаимодействии модулированного пучка с плазмой. Наземным приемником излучения в этом диапазоне частот служит панорамный анализатор спектра (см. п.5)

Отметим, что высокий уровень помех затруднял идентификацию радиоизлучения из околоракетной области. На рис. 16,а показана спектрограмма, полученная в отсутствие инъекции пучка и характеризующая стационарный уровень шумов в поле приема, на фоне которого регистрируются полезные сигналы. Интенсивные сигналы, имеющие вид узкополосного пика на частоте модуляции, наблюдались на начальной стадии инъекции. Их уровень на 50 дБ превышает уровень фона и широкополосного излучения в интервале 150–250 МГц с интенсивностью на 20 дБ выше фоновой. Генерация электромагнитного излучения в этом диапазоне частот на высотах около 150 км, по-видимому, была связана с влиянием "собственной" атмосферы метеоракеты, когда она еще находилась на восходящем участке траектории. Затем было зарегистрировано несколько событий с незначительным превышением уровня широкополосного сигнала над фоновым (уровень 5 дБ). Снова интенсивные сигналы наблюдались на 311 и 316 с на спуске и высоте 95 км (рис. 16,б). На этих высотах наблюдалось как широкополосное излучение, так и монохроматическое. Причем положение монохроматического пика излучения в ряде импульсов инъекции не совпадает с частотой модуляции, что связано, по-видимому, с автоподстроечными процессами возбуждения волн на плазменной частоте.

Приведенные выше результаты позволяют предполагать, что локальный ППР с плотностью $(2-4) \cdot 10^8$ см $^{-3}$ зажигается на высотах 150 и 100 км. Наблюдаемые уровни излучения позволяют оценить коэффициент преобразования энергии пучка в энергию электромагнитных волн. Для монохроматического излучения (рис. 16,б) при внешней модуляции пучка эта оценка дает величину 10^{-2} .

Уровень низкочастотных волн до 1 кГц получен с помощью датчика электрического поля, размещенного на контейнере АК-3. На расстоянии около 1 км от ракеты в диаметральной направлении уровень электрических полей составлял порядка 10 мВ/м и был на пределе чувствительности датчика.

7. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С целью моделирования физических процессов, возникающих при инъекции пучка в космическую плазму, приведены лабораторные эксперименты. В этих экспериментах использованы полетные варианты электронной пушки и диагностических датчиков. Эксперименты выполнены на двух вакуумных стендах. Первый стенд имеет рабочую камеру в виде прямоугольного объема ($1,0 \times 0,6 \times 0,8$ м) и присоединенной к нему трубы длиной 1,8 м и диаметром 30 см. Результаты экспериментов, полученные на этом стенде, представлены в [13–15]. С целью уменьшения влияния стенок вакуумной камеры на параметры пучка и плазмы проведены эксперименты на втором стенде. Его рабочая камера имеет диаметр 1 м, а длина 1,7 м. Схема установки приведена на рис. 17.

Исследование пучково-плазменных взаимодействий проводится на основе оптических и зондовых измерений. В эксперименте обнаружено, что с увеличением давления развитие разряда происходит пороговым образом и сопровождается резким возрастанием интенсивности свечения газа (рис. 18). Аналогичный эффект наблюдателя в ракетном эксперименте, когда уровень радиоизлучения с 5 дБ пороговым образом возрастает до 20 дБ на высоте 95 км. При увеличении давления выше порогового сигнала с ФЭУ растет только до определенного значения, которое зависит от параметров пучка. Снижение интенсивности и срыв ППР при давлении $7 \cdot 10^{-3}$ Торр связано с влиянием столкновений электронов с нейтралами на развитие пучково-плазменной неустойчивости.

Параметры плазмы, образуемой при развитии ППР, в лабораторных экспериментах измерены сеточными зондами, в том числе и теми, что установлены на ракете. На рис. 19 и 20 представлены зависимости электронного тока от напряжения на анализирующей сетке для СЭЛ и МЭЛФ. Как видно из рис. 19, в плазме существуют две группы электронов: тепловые с энергией около 5 эВ и быстрые с энергией 10 – 20 эВ. Более детальный спектр быстрых электронов получен с помощью анализатора МЭЛФ и показан на рис. 20. Наряду с электронами с энергией около 15 эВ существует группа электронов с энергией около 100 эВ и плотностью в 5 раз меньшей.

Спектральные характеристики электронного тока, полученные в лабораторных экспериментах (рис. 19, 20) находятся в согласии с экспериментальными результатами ракетного эксперимента (рис. 11, 14).

Зависимость коллекторного тока МЭЛФ от давления в вакуумной камере при потенциале U_a на анализирующей сетке, равном 12,5 В, приведена на рис. 21. Кривые 1 и 2 представлены для двух моментов времени

после начала инъекции: $\tau=1$ мс (кривая 1) и $\tau=5$ мс (кривая 2). Как видно из этих данных, пучково-плазменный разряд формируется спустя несколько миллисекунд после начала инъекции. Порог развития разряда по давлению, полученный из результатов зондовых измерений, находится в согласии с данными оптических наблюдений.

Параметры ионов в лабораторном эксперименте получены анализатором ионов ПСАИ, перед входным отверстием которого установлен постоянный магнит, формирующий поперечное к оси датчика поле. Величина поля выбрана такой, чтобы оно не возмущало траектории ионов, но препятствовало прохождению электронов. Зависимость ионного тока от напряжения на анализирующей сетке при давлениях $4 \cdot 10^{-4}$ Торр и $3 \cdot 10^{-3}$ Торр показана на рис. 22. При давлении $4 \cdot 10^{-4}$ Торр, когда еще не происходит развитие разряда, энергия ионов составляет около 0,5 эВ (кривая 1), концентрация $6 \cdot 10^7$ см⁻³. При зажигании разряда плотность ионов возрастает до $2,5 \cdot 10^8$ см⁻³ ($P = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр), а их энергия достигает 5 эВ (кривая 2), что, по-видимому, связано с перекомпенсацией пучка и ускорением ионов в его электрическом поле.

Таким образом, лабораторные эксперименты указывают, что в условиях, близких к условиям натурального эксперимента “Электрон-1” (давление $10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ Торр, что соответствует высотам около 100 км), развивается пучково-плазменный разряд и образуется плазма с плотностью $2 \div 5 \cdot 10^8$ см⁻³.

В лабораторных экспериментах проведено исследование пространственной структуры разряда. Поперечный размер пучка на расстоянии 1,7 м от инжектора составляет 20 см. Зависимость плотности тепловых электронов от радиуса на расстоянии 1,4 м от пушки показана на рис. 23.

Как видно из рис. 23, плотность плазмы на расстоянии 30 см от оси пучка падает в 5 раз. Заметное влияние на профиль плотности плазмы при $r = 20 \div 30$ см оказывают металлические стенки камеры (радиус камеры 0,5 м), вблизи которых плотность плазмы заметно понижена. Существенно, что поток электронов не зависит от ориентации анализатора.

Результаты измерений функции распределения электронов пучка по энергии (рис. 24) указывают на его интенсивное взаимодействие с плазмой. В режиме ППР пучок подвергается сильному возмущению в результате взаимодействия с плазмой и передает ей около 30% своей энергии.

В лабораторных экспериментах исследованы процессы зарядки ракеты при инъекции с нее электронного пучка. С этой целью проведен эксперимент с полетным вариантом инжектора [8], работающим от аккумуляторных батарей автономно от электросети. Электронная пуш-

ка установлена на изоляторах внутри вакуумной камеры, ее потенциал изменяется осциллографом, "оторванным от земли". При давлении $4 \cdot 10^{-4}$ Торр потенциал корпуса электронной пушки при инжекции пучка с током 0,2 А составляет 70 В.

8. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАКЕТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализ экспериментальных результатов в ракетном эксперименте "Электрон-1" свидетельствует об интенсивном взаимодействии электронного пучка с ионосферной плазмой. На это указывают следующие экспериментальные факты.

1. Наличие рассеянного излучения при зондировании радиосигналами с частотой 23,7 МГц на высотах около 150 км говорит о возможности образования крупномасштабного разряда с плотностью плазмы порядка $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (рис. 15).

2. Данные радионаблюдений излучения с частотой 100 – 400 МГц (рис. 16) с высоты порядка 95 км. Его присутствие можно объяснить существованием "тонкой" структуры разряда в области, занятой пучком, где плотность плазмы составляет $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$. По-видимому, в области с размерами в несколько метров вблизи ракеты развивается локальный ППР, плотность плазмы в котором существенно выше, чем в области крупномасштабного разряда. Это связано с перекомпенсацией пучка и его высокой плотностью вблизи ракеты.

3. Данные корпускулярных измерений, показывающие, что инжекция пучка приводит к нагреву электронов плазмы с исходной концентрацией порядка 10^5 см^{-3} до температуры 1,5 – 2 эВ (рис. 11); при этом появляется группа надтепловых электронов с энергией 75 эВ и концентрацией порядка 10^4 см^{-3} (рис. 14).

4. Потенциал ракеты, как это следует из анализа спектра быстрых электронов, спустя 5 мс после начала инжекции не превышает +50 В.

5. Электронный пучок на высотах 100 – 150 км вблизи ракеты перекомпенсирован.

Это подтверждается лабораторными экспериментами на стенде и результатами измерений ионного тока на ракете.

Обсудим приведенные выше факты подробнее. Генерация электромагнитного излучения (2), по-видимому, связана с образованием плазмы с плотностью порядка $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$ в области инжекции пучка в окрестности метеоракеты, что наблюдается и в лабораторных экспериментах при давлении в камере $10^{-3} - 7 \cdot 10^{-3}$ Торр. Развитие локального

разряда и образование плазмы с плотностью $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$, в области занятой пучком, обусловлено его перекомпенсацией и высокой плотностью вблизи ракеты. Так, в лабораторном эксперименте плотность пучка на расстоянии 1,7 м от инжектора составляла $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. На этом расстоянии пучок теряет до 30% своей энергии, что приводит к интенсивным пучково-плазменным взаимодействиям и к образованию плотной плазмы. Полагая, что в окрестности метеоракеты на высоте около 100 км реализовались условия, близкие к тем, что были в лабораторных экспериментах, можно предположить, что генерация радиоизлучения с частотой 100 – 400 МГц связана с образованием плазмы в области пучка с поперечными размерами 20 – 30 см и длиной в несколько метров (сравни рис. 23). Спектральные зависимости радиоизлучения с частотой 100 – 400 МГц, аналогичные приведенным на рис. 16, наблюдались и в лабораторных экспериментах, проведенных на установке "Плазмотрон" [16]. Включение бортового ВЧ-модулятора при инжекции пучка в камеру приводило к сужению спектра излучения и к увеличению на несколько порядков его уровня. Плотность плазмы, образуемой пучком, в этом эксперименте также составляла $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$ [16].

Крупномасштабный ППР с плотностью плазмы порядка 10^6 см^{-3} , на образование которого указывают данные (1), (3), может развиваться благодаря наличию потока надтепловых электронов с энергией 75 эВ и концентрацией около 10^4 см^{-3} (рис. 14), которые являются интенсивным источником ионизации нейтральных атомов. Наличие быстрых электронов с такими параметрами, как показывают оценки (см., п.7), приводит к образованию плазмы с плотностью порядка 10^6 см^{-3} . Как это следует из результатов измерений датчиком СЭЛ, температура электронов этой плазмы равна примерно 2 эВ. При такой температуре и концентрации 10^6 см^{-3} скорость ионизации электронами плазмы благодаря незначительной доли быстрых электронов на хвосте функции распределения сравнивается со скоростью ионизации быстрыми электронами с энергией 75 эВ, что приводит к развитию лавинной ионизации газа.

Таким образом, механизм развития крупномасштабного разряда в эксперименте "Электрон-1", по-видимому, может быть следующим. Инжекция в ионосферную плазму электронного пучка приводит к появлению надтепловых электронов с температурой 75 эВ и концентрацией $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Это в свою очередь ведет к ионизации ими атомов газа и образованию плазмы с температурой около 2 эВ и концентрацией порядка 10^6 см^{-3} , а затем к развитию разряда и лавинной ионизации газа. На возможность реализации этого предположения указывают данные (1).

Появление надтепловых электронов с энергией 75 эВ и концентраци-

ей 10^4 см^{-3} может быть обусловлено рядом причин. Электроны с такой энергией могут, в принципе, появляться в результате ионизации нейтралов пучком и последующего ускорения родившихся электронов в электрических полях ракеты и пучка. Однако, этот механизм, по-видимому, не реализуется. На это указывают два обстоятельства. Первое — сеточный анализатор СЭЛ расположен так, что он “не видит” плазменных электронов, уходящих вдоль пучка на ракету. Интенсивность потока быстрых электронов (с энергией $\geq 10 \text{ эВ}$) которую он регистрирует, в 50 раз меньше чем МЭЛФ. Это означает отсутствие заметного ускоряющего потенциала на ракете. Второе — при давлении выше 10^{-5} Торр пучок перекомпенсирован, в результате его электронное поле существенно ниже, чем для некомпенсированного электронного пучка. Дополнительным подтверждением перекомпенсации пучка является высокий ток ионов с энергией несколько эВ, зарегистрированный ПСАИ. Ионы уходят из области положительно заряженного пучка на ракету даже при ее зарядке.

Наиболее вероятной причиной нагрева электронов плазмы до температуры около 75 эВ является пучково-плазменная неустойчивость, вызывающая возбуждение ленгмюровских волн, которые поглощаются электронами под действием затухания Ландау.

Концентрация электронов плазмы с температурой около 1,5 – 2 эВ, зарегистрированная СЭЛ, близка к концентрации фоновой плазмы и равна $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, однако этот уровень более чем на порядок ниже значения, которое следует из результатов измерений рассеянного радиоизлучения ($\approx 10^6 \text{ см}^{-3}$). Это, по-видимому, связано с уходом электронов из области разряда, где их концентрация может быть порядка 10^6 см^{-3} вдоль положительно заряженного пучка, в результате чего они не попадают на СЭЛ.

Существенную роль здесь играет движение ракеты. За время выноса ракеты из области, занятой пучком, плазма не успевает продиффундировать поперек магнитного поля в область, где расположен СЭЛ. Причиной низкой концентрации электронов, попадающих на СЭЛ, может также быть влияние металлических конструкций ракеты, вблизи которых плотность плазмы понижена. Этот эффект наблюдался и в лабораторных экспериментах (рис. 23): поток электронов плазмы на расстоянии 15 – 20 см от стенок камеры был в 5 раз ниже чем в области перекомпенсированного пучка (и не зависел от ориентации анализатора). Аналогично, в натурном эксперименте концентрация электронов плазмы, зарегистрированная СЭЛ, может быть существенно ниже чем в области разряда.

Высокий уровень тока ионов, зарегистрированный ПСАИ в условиях,

когда ракета положительно заряжена, по-видимому, связан с перекомпенсацией электронного пучка и уходом ионов из области пучка на ракету.

Анализ спектра быстрых электронов (рис. 14) показывает, что через 5 мс после начала инжекции пучка потенциал ракеты не превышает +50 В. Это не противоречит результатам измерений параметров плазмы анализаторами СЭЛ и ПСАИ. По спектру тепловых электронов (рис. 11) может быть сделан вывод, что потенциал ракеты через 32 мс после начала инжекции составляет несколько вольт. Это, возможно, связано с временем развития разряда. Как следует из лабораторных экспериментов (рис. 21), оно составляет несколько миллисекунд. Поэтому через 5 мс после начала инжекции, когда происходит только формирование разряда, потенциал ракеты выше, чем через 32 мс, когда разряд уже зажегся.

9. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАКЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сравним основные результаты эксперимента “Электрон-1” с аналогичными активными экспериментами [1 – 6, 9, 17, 18]. До настоящего времени проведено около двадцати ракетных экспериментов с инжекцией электронных пучков в ионосферную плазму. Основные из них представлены в табл. 2. В силу уникальности космических экспериментов, их неповторяемости, в настоящее время еще остается ряд вопросов, связанных с особенностями взаимодействия электронных пучков с космической плазмой и механизмами зарядки и нейтрализации ракеты. Это прежде всего касается условий развития пучково-плазменного разряда. Так, например, в эксперименте “Эхо-5” ($U=37 \text{ кВ}$, $I=0,5 \text{ А}$) [6] несмотря на высокую мощность инжектора разряд не зажегся. В эксперименте “Аракс” [4] при близких параметрах электронного пучка ($U=27 \text{ кВ}$, $I=0,5 \text{ А}$) вероятнее всего происходит развитие разряда и образование плазмы с плотностью $10^6 - 10^7 \text{ см}^{-3}$.

Потенциал ракеты в эксперименте “Грузия — Спурт” ($U=6,2 \text{ кВ}$, $I=0,5 \text{ А}$) [18] на высотах порядка 130 км в момент инжекции пучка достигает 1,2 кВ, в эксперименте “Зарница-2” ($U=7 \text{ кВ}$, $I=0,5 \text{ А}$) [17] он равен около 50 В.

Если температура плазмы в экспериментах “Аракс” и “Зарница-2” составляет порядка 150 эВ [4], то в эксперименте “Поляр-5” ($U=10 \text{ кВ}$, $I=0,13 \text{ А}$) [6] она равна около 1 эВ. Результаты эксперимента “Электрон-1” находятся в разумном согласии с данными экспериментов “Аракс” и “Зарница”. Это касается прежде всего плотности плазмы в области

Таблица 2
Активные эксперименты с электронными пучками в космосе

Эксперимент	Страна	Год	Высота, км	Энергия электронов, кэВ	Ток пучка, А	Развитие разряда	Плотность плазмы, см ⁻³	Температура плазмы, эВ	Потенциал ракеты, В
Хесс [1]		1969							
Эхо-1 [6]	США	1970	210	45	0,07	нет			
Эхо-2 [6]	США	1972	210	45	0,07	нет			
Зарница-1 [2, 4]	СССР	1973	150	6,4	0,4				
Полар-3 [6]	Норвегия	1974	220	20					
Зарница-2 [4]	СССР	1974	155	7	0,5	да	10 ⁷		40
Аракс [4, 9]	СССР								
Эхо-4 [6]	Франция	1975	175	27	0,5	возможно	10 ⁷	150	
Полар-5 [6]	США	1976	210	45	0,07	нет			
Берштейн [6]	Норвегия	1976	220	10	0,3	возможно	10 ⁵ - 10 ⁶	1	1000
010 АЕ	США	1978	240	4	0,1				
Электрон-2 [6]	Норвегия								
Дюпре [6]	США	1978	190	10	0,1	возможно	10 ⁵	0,15	
Эхо-5 [6]	США	1979	338	8	0,1				
Иксид [6]	США	1979	210	37	0,8	нет			
Грузия-Спурт [18]	США	1979	128	3	20	да	10 ¹⁰		200
	СССР	1981	1500	6,2	0,5	возможно	10 ⁵ - 10 ⁶		8000

разряда и потенциала ракеты. Хотя, необходимо отметить, что в эксперименте "Электрон-1" наряду с формированием крупномасштабного разряда с плотностью порядка 10^6 см⁻³ происходит развитие локального разряда в области пучка недалеко от инжектора с плотностью плазмы $10^8 - 10^9$ см⁻³. Локальный разряд, по-видимому, является интенсивным источником радиоизлучения в диапазоне частот 100 - 400 МГц. Инжекция модулированного электронного пучка на частоте 150 МГц приводит к монохроматизации излученного и к увеличению его уровня на 20 дБ, что является одной из особенностей данного эксперимента.

Наиболее существенное различие между данными эксперимента "Электрон-1" и "Аракс" касается температуры плазмы в области разряда. По данным лабораторных исследований и ракетного эксперимента "Электрон-1" температура плазмы составляет несколько эВ. В эксперименте "Аракс" она равна более 100 эВ. Возможно, это связано с особенностью эксперимента "Аракс", мощность инжектора в котором составляет 13 кВт. Хотя необходимо отметить, что нагрев плазмы до такой температуры в других экспериментах не обнаружен. В экспериментах "Полар-5", "Грузия - Спурт", "Эхо" как и в эксперименте "Электрон-1", она составляет несколько эВ.

Данные по измерению спектра надтепловых электронов в диапазоне энергии до 250 эВ находятся в согласии с результатами, полученными в эксперименте "Полар-5" (рис. 25). Спектр при энергии выше 250 эВ в нашем случае, по-видимому, определяется замедленными электронами пучка.

Возможность создания плотной плазмы в космосе продемонстрирована в эксперименте "Иксид", где она составляла 10^{10} см⁻³. Необходимо отметить, что мощность инжектора в этом эксперименте достигала 60 кВт.

Результаты, полученные в эксперименте "Электрон-1" указывают на возможность создания локального разряда в области пучка с плотностью плазмы порядка $5 \cdot 10^8$ см⁻³, который может быть мощным источником радиоизлучения особенно при внешней высокочастотной модуляции электронного пучка.

10. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

На основе экспериментальных данных, полученных в эксперименте "Электрон-1", в качестве одного из возможных механизмов развития

разряда предполагается следующий. Инжекция электронного пучка в ионосферную плазму приводит к появлению надтепловых электронов с температурой 75 эВ и концентрацией $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, что в свою очередь ведет к ионизации ими газа и образованию плазмы с температурой около 2 эВ и концентрацией 10^6 см^{-3} . При таких параметрах скорость ионизации электронами плазмы сравнивается со скоростью ионизации быстрыми электронами, что приводит к лавинной ионизации газа. Предполагается, что тепловые электроны с $T \approx 2$ эВ имеют максвелловскую функцию распределения, и ионизация газа происходит электронами с энергией, большей энергии ионизации, находящимися на хвосте функции распределения.

Действительно, появление надтепловых электронов с температурой 75 эВ и плотностью $n_* \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$ приводит к образованию плазмы с плотностью:

$$n \approx n_* \sigma_i v_* N \tau_y \approx 1 \div 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}, \quad (1)$$

здесь N — концентрация нейтральных атомов, v_* и σ_i — скорость надтепловых электронов и сечение ионизации, τ_y — время ухода электронов пучка из области разряда, обусловленное движением ракеты, $\tau_y \approx a/v_R$, $a \approx 3$ м — поперечный размер области разряда, v_R — скорость ракеты. В зависимости от скорости ракеты время ухода на высотах 150 – 100 км составляет $10^{-2} - 2 \cdot 10^{-3}$ с. Концентрация нейтральных атомов на этих высотах равна $10^{11} - 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Плотность плазмы в зависимости от высоты инжекции составляет $1 \div 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, температура плазмы порядка 2 эВ (это следует из результатов измерений СЭЛ).

Критическая концентрация плазмы с температурой $T \approx 2$ эВ, при которой скорости ионизации плазменными и надтепловыми электронами сравниваются, равна

$$n_k \approx n_* e^{J/T} \left(\frac{\epsilon_* T}{J^2} \right)^{1/2} \approx 10^6 \text{ см}^{-3}, \quad (2)$$

где J — энергия ионизации атомов, ϵ_* — энергия надтепловых электронов. Начиная с этой концентрации, возможен лавинный процесс ионизации газа и самоподдерживающийся разряд при условии, что температура плазмы остается фиксированной.

Появление надтепловых электронов с температурой 75 эВ и концентрацией 10^4 см^{-3} , по-видимому, связано с развитием пучково-плазменной неустойчивости, в результате которой происходит возбуждение ленгмюровских волн: их энергия поглощается надтепловыми электронами вслед-

ствие затухания Ландау. Скорость нагрева надтепловых электронов равна [19].

$$\frac{dn_* \epsilon_*}{dt} \approx \gamma W, \quad (3)$$

где $\gamma \approx n_*/n\omega_p$ — декремент затухания волн на быстрых электронах, ω_p — плазменная частота, ϵ_* — энергия быстрых электронов, W — плотность энергии затухающих волн W_0 , возбуждаемых пучком, превышает порог модуляционной неустойчивости и определяется балансом между генерацией волн, их переходом в коротковолновую область и распадом вследствие модуляционной неустойчивости

$$\gamma_b W_0 \approx \nu_{ef} W_0 \approx \gamma_m W, \quad (4)$$

где $\gamma_b \approx \omega_p (n_b/n) (V_b/\Delta V)^2$, $\gamma_m \approx \omega_p (m/M \cdot W/nT)^{1/2}$ — инкремент пучково-плазменной неустойчивости, ν_{ef} — эффективная частота рассеяния волн, $\nu_{ef} \approx \omega_p W/nT$, $v_b, \Delta v$ — скорость пучка и разброс по скоростям электронов пучка. Из этих двух соотношений находим плотность надтепловых электронов и их энергию:

$$n_* \approx \left(\frac{m n_b V}{M n \Delta V} \right)^2 n_b \approx n_b \approx 10^4 \text{ см}^{-3},$$

$$\epsilon_* \approx \epsilon_b \left(\frac{\omega_p l n \epsilon_b}{v_b W} \right)^{2/3} \approx 0,03 \epsilon_b \approx 250 \text{ эВ}, \quad (5)$$

где ϵ_b — энергия электронов пучка, l — длина релаксации пучка [20]:

$$l \approx \frac{v_b}{10\omega_p} \left(\frac{\Delta v}{v_b} \right)^4 \frac{\epsilon_b}{T} \sqrt{\frac{M}{m} \frac{n}{n_b}} \approx 10^2 \text{ м}. \quad (6)$$

Эти оценки находятся в согласии с результатами измерений анализатора электронов МЭЛФ.

И в заключение обсудим возможность развития локального ППР в области пучка на высотах 95 – 100 км. Для формирования разряда необходимо, чтобы время нагрева электронов плазмы τ_n было меньше, чем время ухода пучка $\tau_y \approx a/v_R$, обусловленное движением метеоракеты [4],

$$\tau_n < \tau_y. \quad (7)$$

Время нагрева электронов равно [4]

$$\tau_n \approx \nu_{en}^{-1} \frac{nT}{W_0} \approx \nu_{en}^{-1} \frac{n}{n_b} \left(\frac{\Delta V}{V_b} \right)^2, \quad (8)$$

где ν_{en} — частота столкновений электронов с нейтралами. Из соотношений (7) и (8) найдем плотность плазмы при формировании ППР:

$$n \approx n_b \left(\frac{V_b}{\Delta V} \right)^2 \nu_{en} \frac{a}{v_R} \approx 10^3 n_b \approx 10^9 \text{ см}^{-3}. \quad (9)$$

Как следует из результатов лабораторных экспериментов, при давлении порядка $3 \cdot 10^{-3}$ Торр диаметр пучка равен примерно 20 см, а его плотность 10^6 см^{-3} . Предполагая, что в окрестности метеоракеты реализовались условия, близкие к лабораторным, получаем, что в области пучка плотность плазмы может быть порядка 10^9 см^{-3} . Эта оценка находится в согласии с данными по регистрации радиоизлучения в диапазоне частот 100 – 500 МГц. Длина релаксации пучка (см. (6)), когда он теряет порядка 20 – 30% своей энергии, составляет 3 – 5 м и характеризует протяженность локального разряда в околоракетной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенном эксперименте наблюдалось интенсивное взаимодействие электронного пучка с ионосферной плазмой. На это указывают результаты сравнения корпускулярных измерений на ракете и на автономных контейнерах, результаты измерений радиоизлучения в диапазоне частот 100 – 150 МГц, данные радиотрассирования с регистрацией излучения с частотой 23,7 МГц, рассеянного на угол 60° на базе 450 км. Обнаружено, что инжекция электронного пучка приводит к нагреву плазмы до температуры 1,5 – 2 эВ, при этом появляется группа надтепловых электронов с температурой 75 эВ и концентрацией порядка 10^4 см^{-3} . Надтепловые электроны, по-видимому, приводят к развитию пучково-плазменного разряда и к образованию плазмы с плотностью порядка 10^6 см^{-3} . Потенциал ракеты во время инжекции пучка не превышает +50 В.

Экспериментально исследовано влияние внешней модуляции пучка на характеристики разряда в активном эксперименте в космосе. Показано, что наличие высокочастотной модуляции ($f_m = 150 \text{ МГц}$, даже при ее низкой глубине — $5 \cdot 10^{-3}$) приводит к генерации монохроматического

излучения, уровень которого на 20 дБ превышает уровень широкополосного излучения, возникающего в отсутствие внешней модуляции пучка.

Сравнение результатов ракетного эксперимента “Электрон-1” с другими аналогичными экспериментами показало, что они находятся в разумном согласии между собой, но имеют и свои существенные особенности, связанные в частности с высокочастотной модуляцией электронного пучка, с существованием локального разряда, с формой спектра надтепловых электронов

ЛИТЕРАТУРА

1. Hess W.N., Trichel M.C., Davis T.N. a.o. Artificial Aurora Experiment. Experiment and Principal Results. J. Geophys. Res., 1971, v.76, p.6067.
2. Сагдеев Р.З., Жулин И.А. Активные эксперименты в ионосфере и магнитосфере. ДАН СССР, 1975, т.12, с.874.
3. Ляхов С.Б., Манагадзе Г.Г. Процессы нейтрализации заряда и определение потенциала ракеты в условиях инъекции мощного пучка электронов в эксперименте "Аракс". Физика плазмы, 1977, т.3, с.1370.
4. Мишин Е.В., Ружин Ю.Я., Телегин В.А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
5. Sagdeev R.Z., Managadze G.G., Mayorov A.D. a.o. Peculiarities of the Environment Disturbance During the Electron Beam Injection from the Rocket. Adv. Space Res. 1981. COSPAR. v.1, p.77-87.
6. Искусственные пучки частиц в космической плазме. М.: Мир, 1985.
7. Быковский В.Ф., Горячев С.Б., Дорошкин А.А. и др. Взаимодействие электронного пучка с ионосферной плазмой в эксперименте "Электрон-1". Проект АПЭКС. Научные задачи, моделирование и техника проведения экспериментов. М.: ИЗМИРАН, 1991.
8. Горячев С.Б., Лапик Р.М., Мешков И.Н., Мозгунов В.Н., Сыресин Е.М. Атомный инжектор для плазменных исследований ПТЭ, 1991, N2.
9. Галеев А.А., Докукин В.С., Жулин И.А. и др. В кн. Исследования по проблемам солнечно-земной физики. М.: ИЗМИРАН, 1977, с.152.
10. Haerendel G. Project PORCUPINE: Summary of Scientific Objectives and Instrumentation. Munchen. 1976.
11. Альперт Я.П., Гуревич А.В., Пятаевский Л.П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М.: Наука, 1964.

12. Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.Л., Шатурич Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пучках. М.: Энергоатомиздат, 1989, с.152.
13. Голубев В.А., Гусельников В.И., Коробейников М.В., Медведко К.А., Мешков И.Н., Нагайцев С.С., Сыресин Е.М. Взаимодействие электронного пучка с разреженным газом. Физика космической и лабораторной плазмы, Новосибирск, 1989, с.130.
14. Мешков И.Н., Нагайцев С.С., Селезнев И.А., Сыресин Е.М. Пучково-плазменный разряд при инъекции электронного пучка в разреженный газ. Физика плазмы, 1990, т.16, с.1119.
15. Мешков И.Н., Нагайцев С.С., Сыресин Е.М. Пучково-плазменный разряд, стимулированный электростатическими пробками. ДАН СССР, 1990, т.314, N5, с.1332.
16. Кочмарев Л.Ю., Чмиль А.И., Шустин Е.Г. Свойства пучково-плазменного разряда с модулированным электронным пучком. Физика плазмы, 1985, т.11, с.1231.
17. Докукин В.С., Ружин Ю.Я. Потенциал ракеты в эксперименте с инъекцией пучка электронов. М.: ИЗМИРАН, 1982.
18. Гагуа Т.И., Клаосс Э., Лалиашвили А.Н. и др. Особенности плазменных процессов, возникающих в зоне инъекции пучка электронов с высотного зонда. Процессы нейтрализации. ИКИ, М, 1983.
19. Брейзман Б.Н., Ерофеев В.И. Оценки параметров горячих электронов при пучковом нагреве плазмы в магнитном поле. Препринт ИЯФ СО АН СССР 84-32. Новосибирск, 1984.
20. Galeev A.A., Sagdeev R.Z., Shapiro V.D., Shevchenko V.I. Beam-Plasma Discharge and Superthermal Electron Tails. Active Experiments in Space. Albach, 1983, p.151.

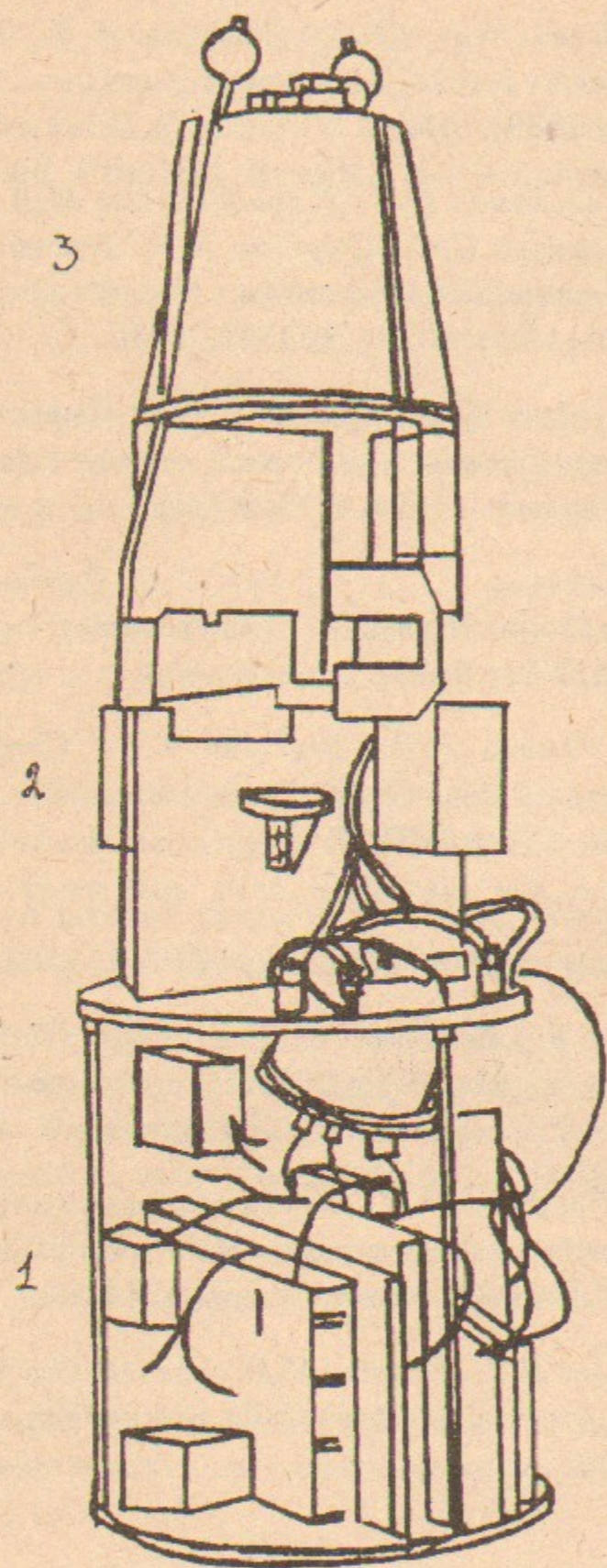


Рис. 1. Комплекс научной аппаратуры "Электрон":
 1 — инжектор электронов, 2 — блок диагностической аппаратуры,
 3 — контейнер АК-В, контейнеры АК-3 сняты.

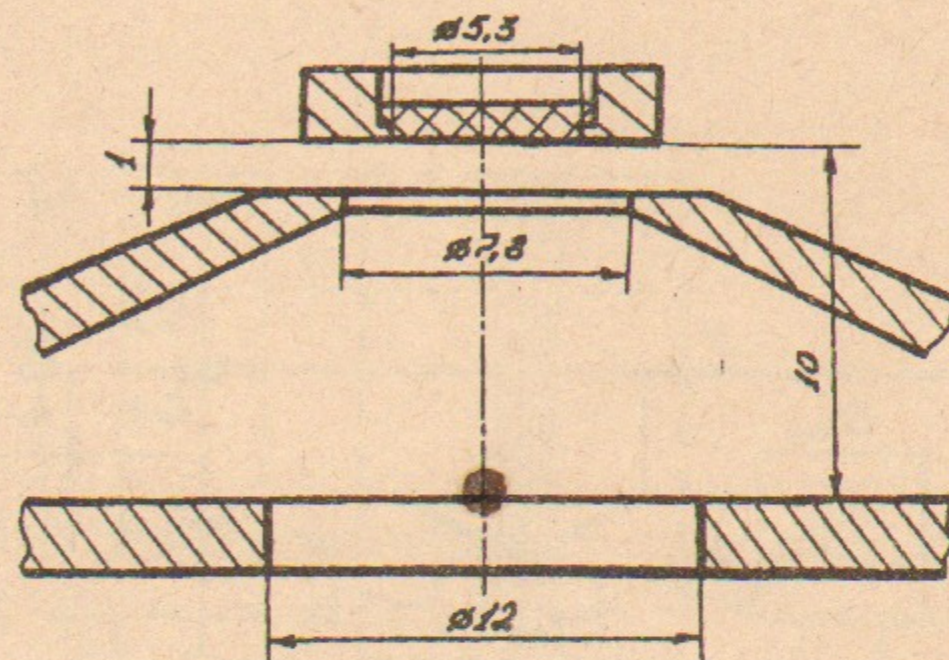


Рис. 2. Геометрия электронной пушки.

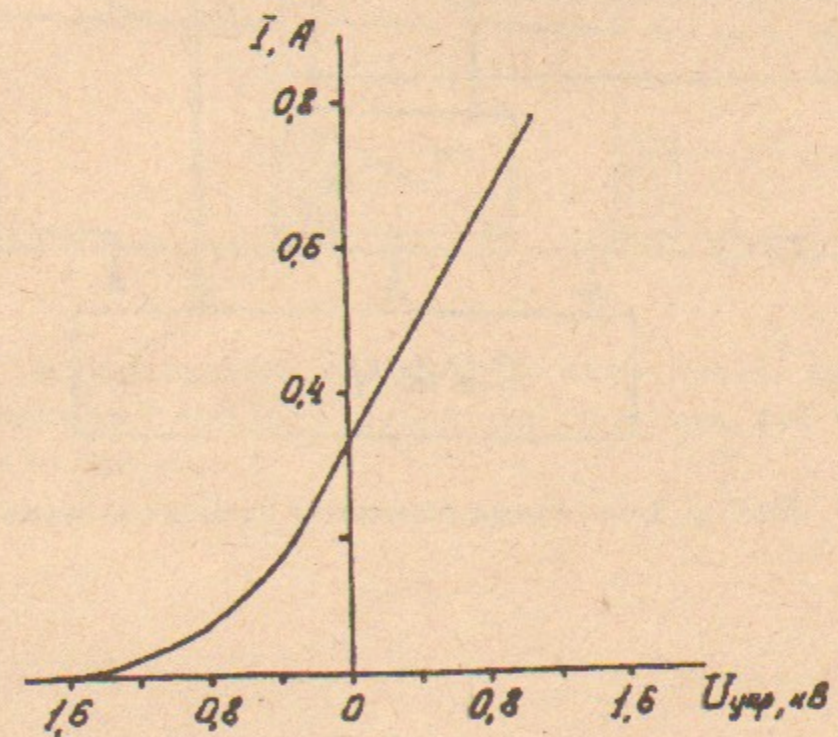


Рис. 3. Вольтамперная характеристика электронной пушки по управляющему электроду при $U = 10$ кэВ.

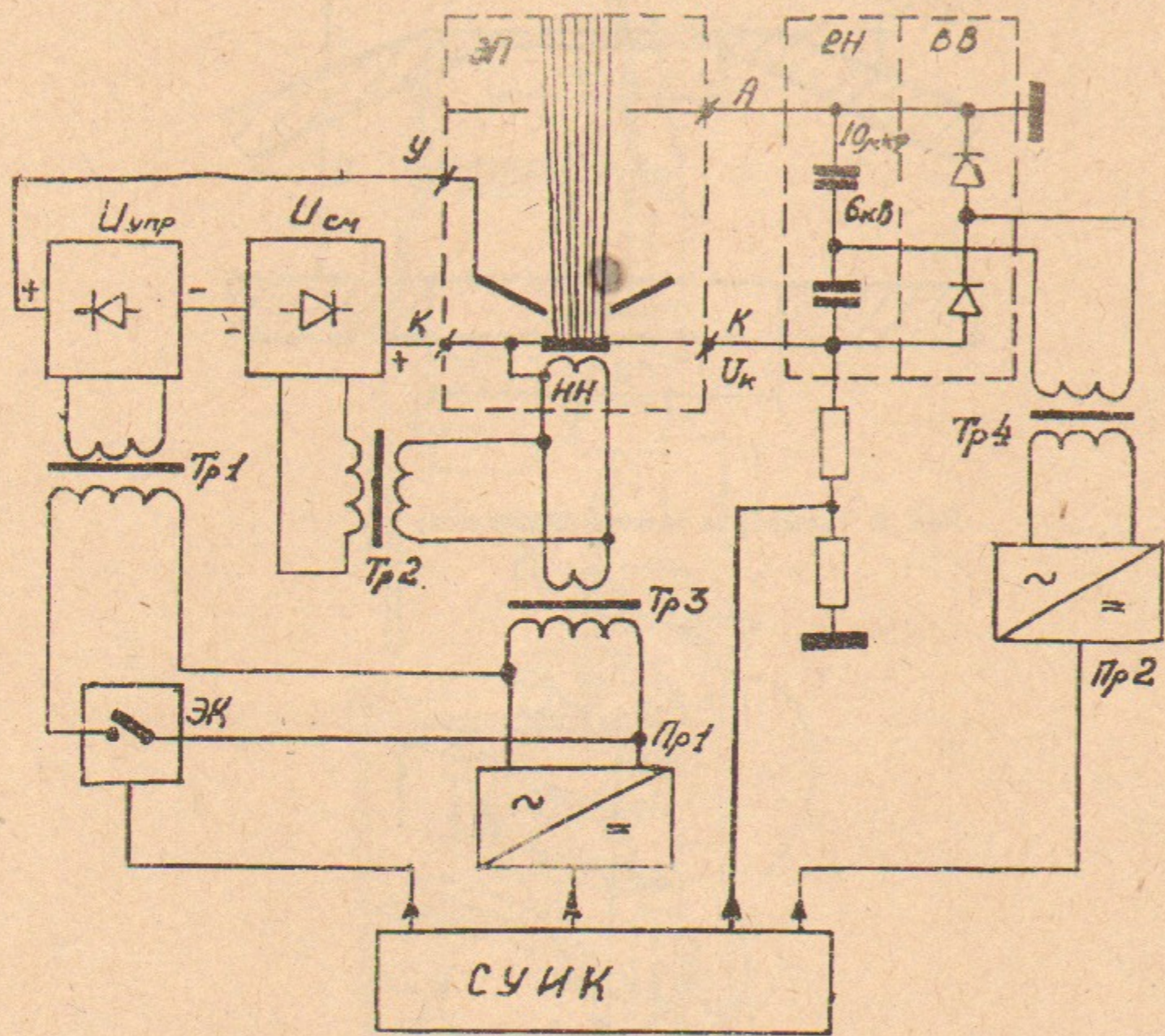


Рис. 4. Блок схема основных элементов инжектора.

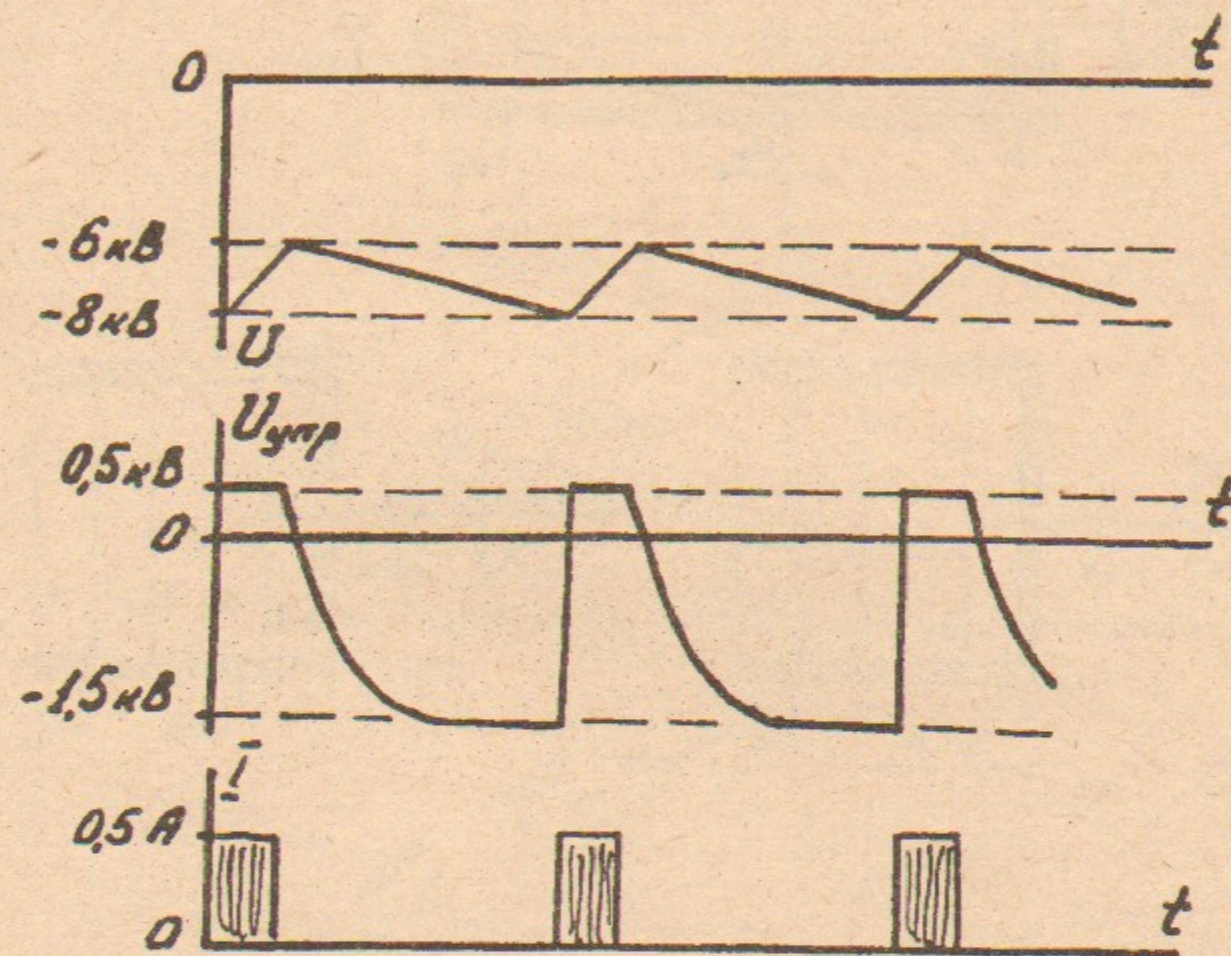


Рис. 5. Осциллограммы ускоряющего напряжения, напряжение на управляющем электроде относительно катода, ток пучка в зависимости от времени.

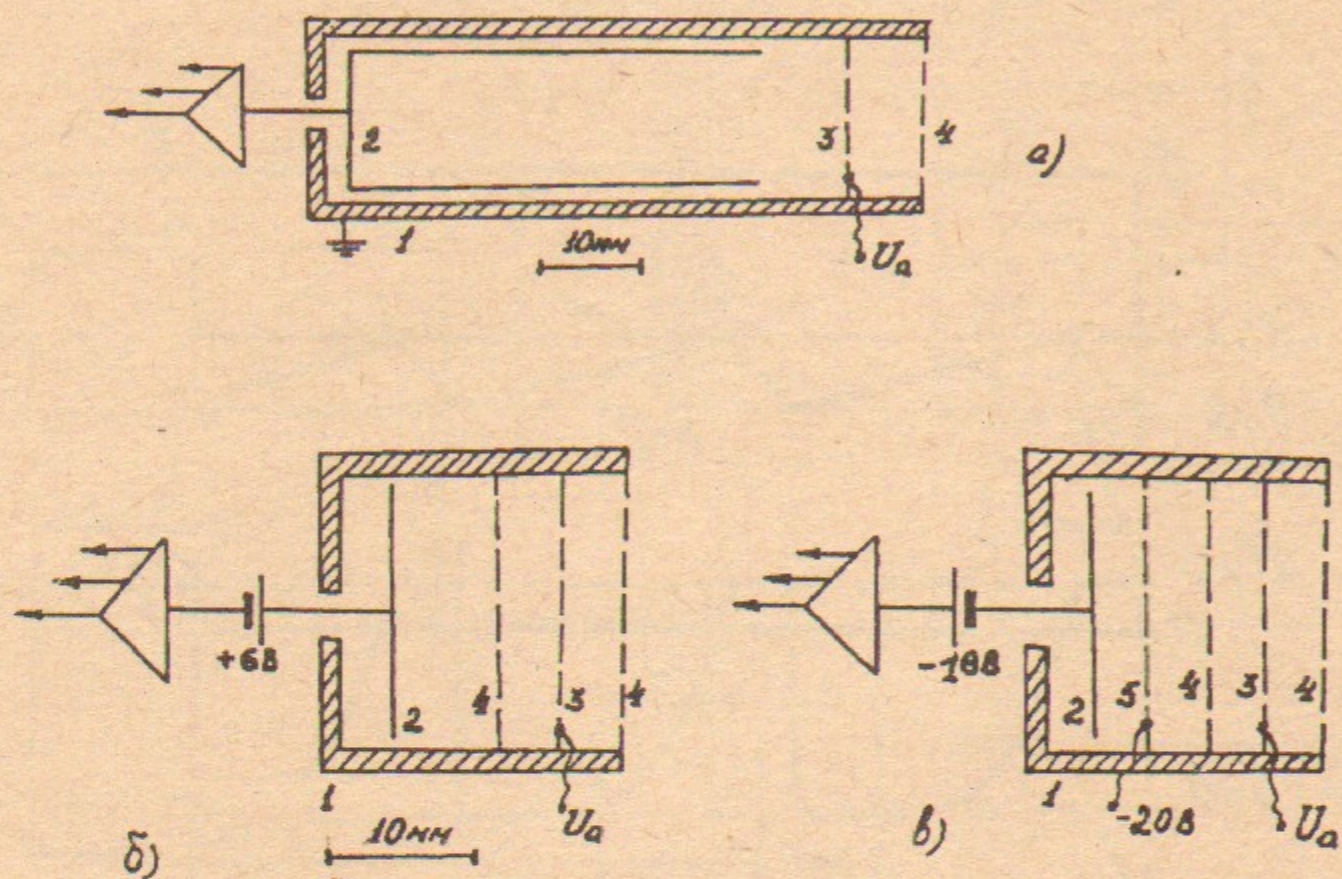


Рис. 6. а) Конструктивная схема одной из 6 ловушек анализатора МЭЛФ:

1 — корпус, 2 — коллектор, 3 — анализирующая сетка, 4 — экранирующая сетка.

б) Конструктивная схема СЭЛ:

1 — корпус, 2 — коллектор, 3 — анализирующая сетка, 4 — экранирующие сетки, находящиеся под потенциалом корпуса.

в) Конструктивная схема ПСАИ:

1 — корпус, 2 — коллектор, 3 — анализирующая сетка, 4 — экранирующая сетка, 5 — антифотоэлектронная сетка.

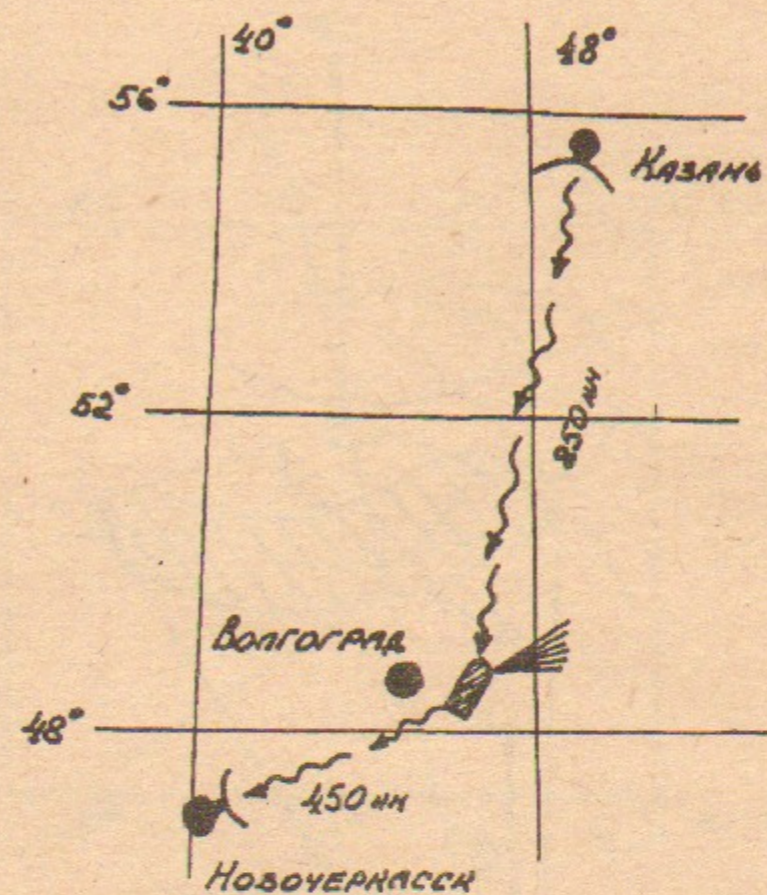


Рис. 7. Схема эксперимента по трассированию радиоволн через область инжекции.

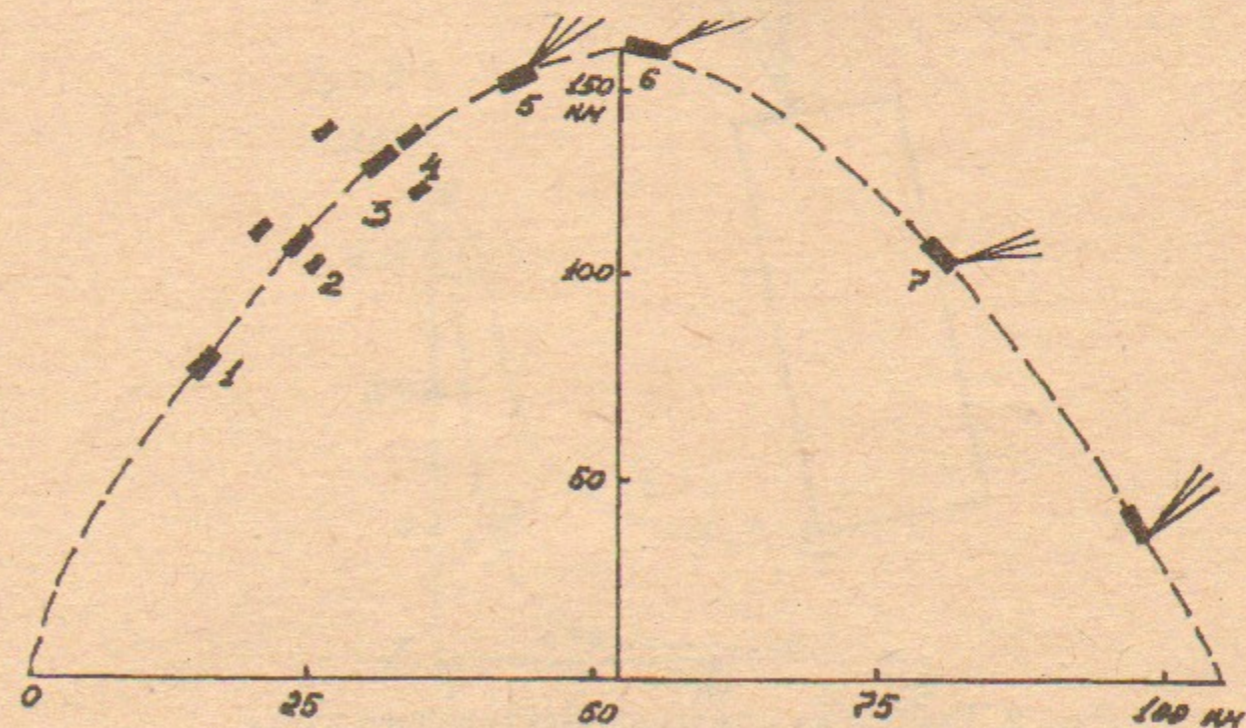


Рис. 8. Траектория ракеты.

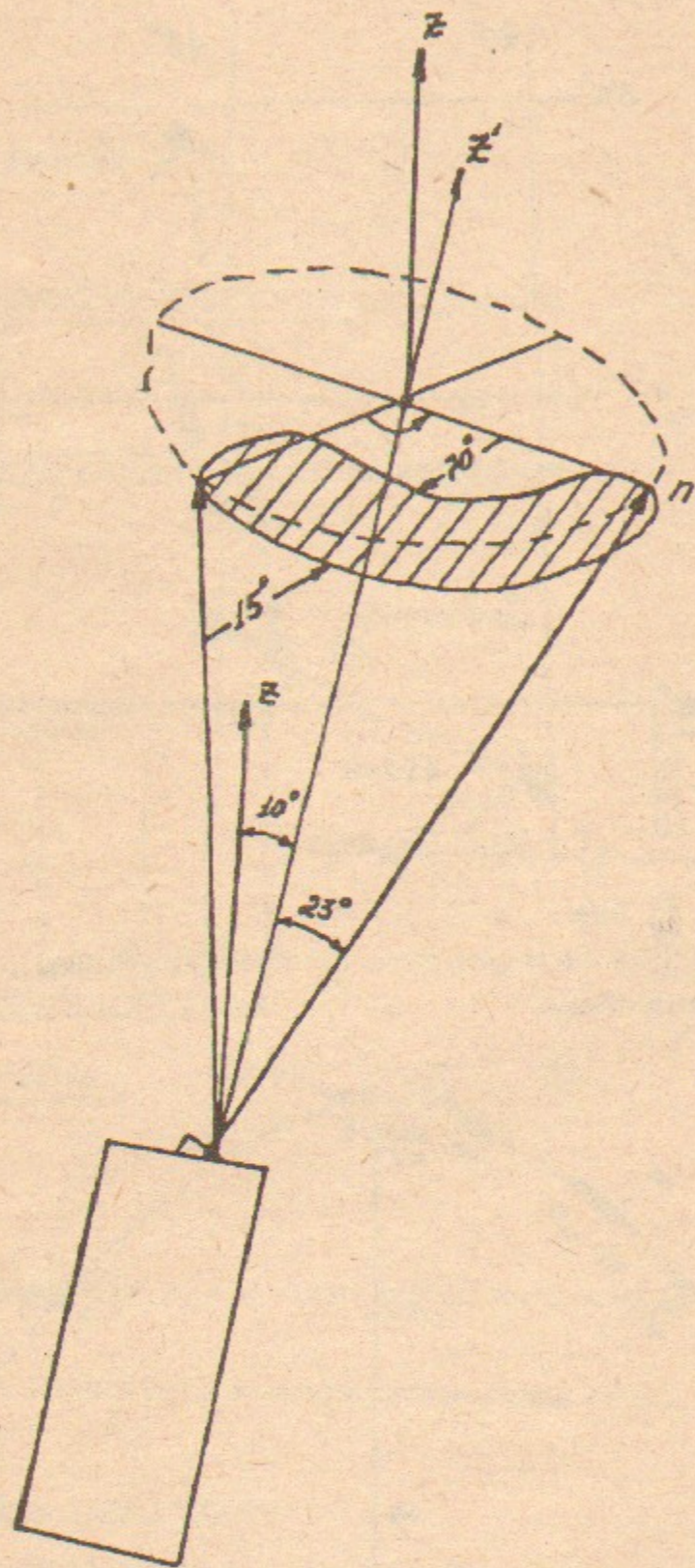


Рис. 9. Геометрия инъекции электронного пучка:
 z — вертикаль, z' — ось ракеты, \vec{n} — направление инъекции.

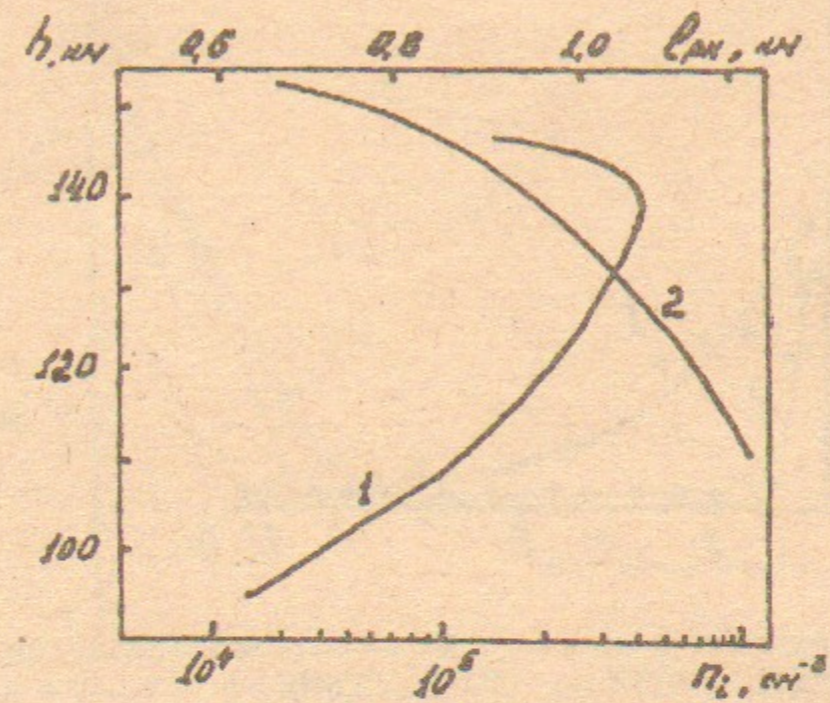


Рис. 10. Зависимость концентрации ионов невозмущенной ионосферной плазмы от высоты (кривая 1). Расстояние между контейнером АК-3 и ракетой (кривая 2).

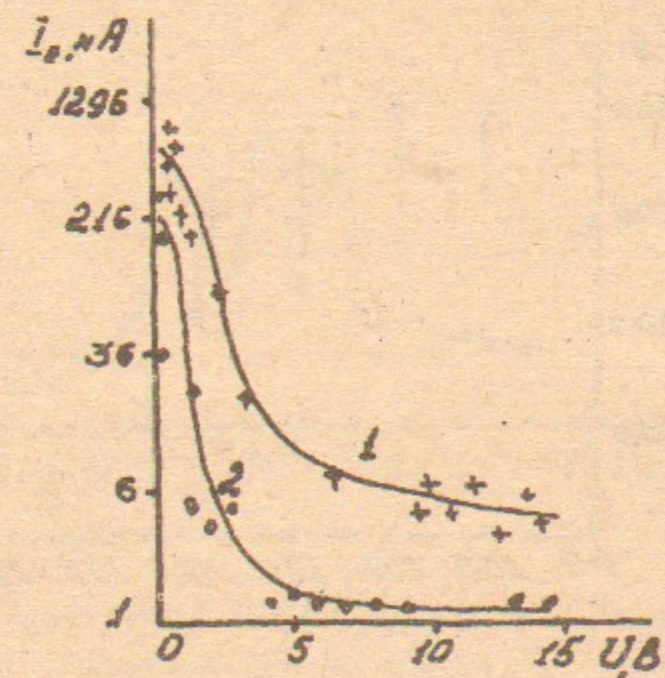


Рис. 11. Зависимость электронного тока от потенциала на анализирующей сетке СЭЛ: $h = 110$ км; 1 — $\tau = 32,6$ мс, 2 — $\tau = 49,4$ мс.

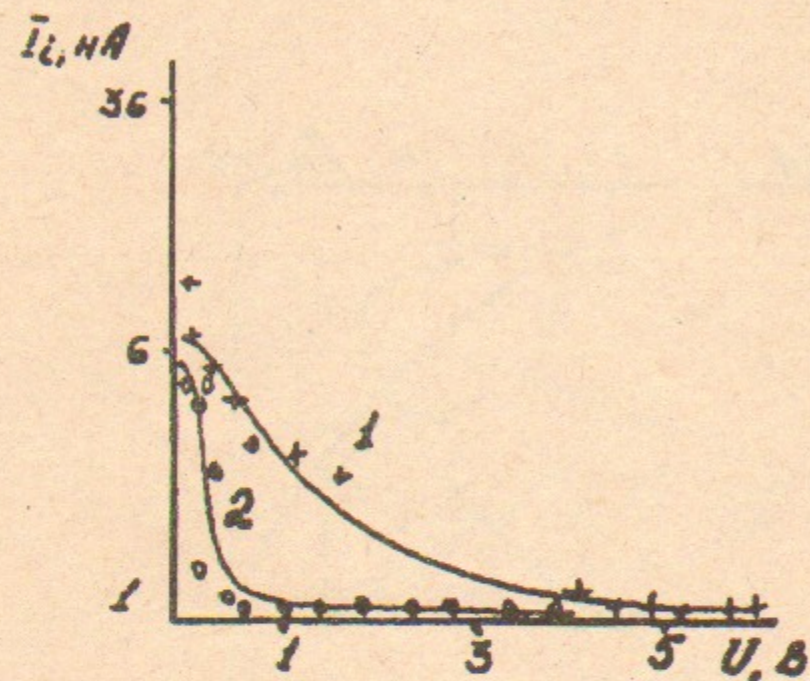


Рис. 12. Зависимость ионного тока от потенциала на анализирующей сетке ПСАИ: $h = 110$ км; 1 — $\tau = 32,6$ мс, 2 — $\tau = 49,4$ мс.

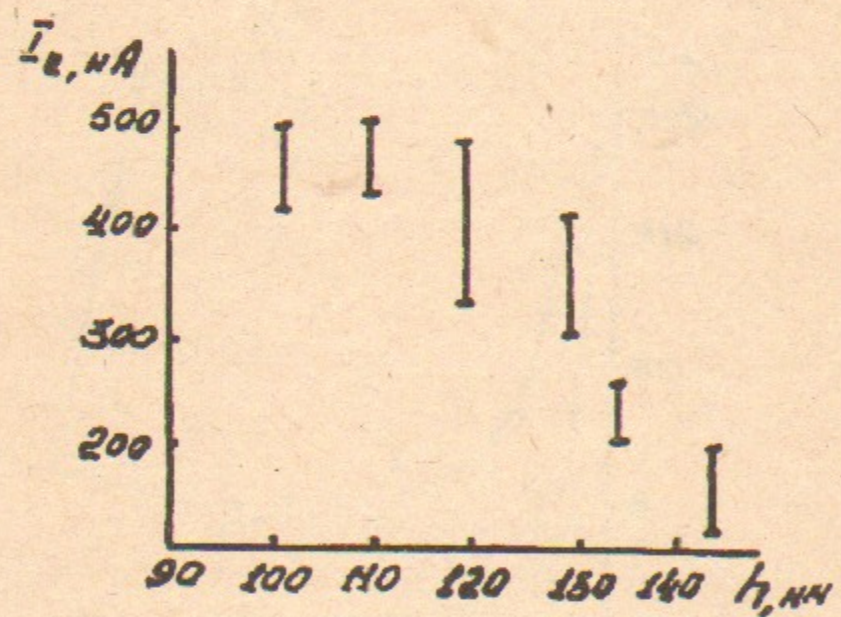


Рис. 13. Зависимость электронного тока СЭЛ от высоты инжекции при нулевом напряжении на анализирующей сетке.

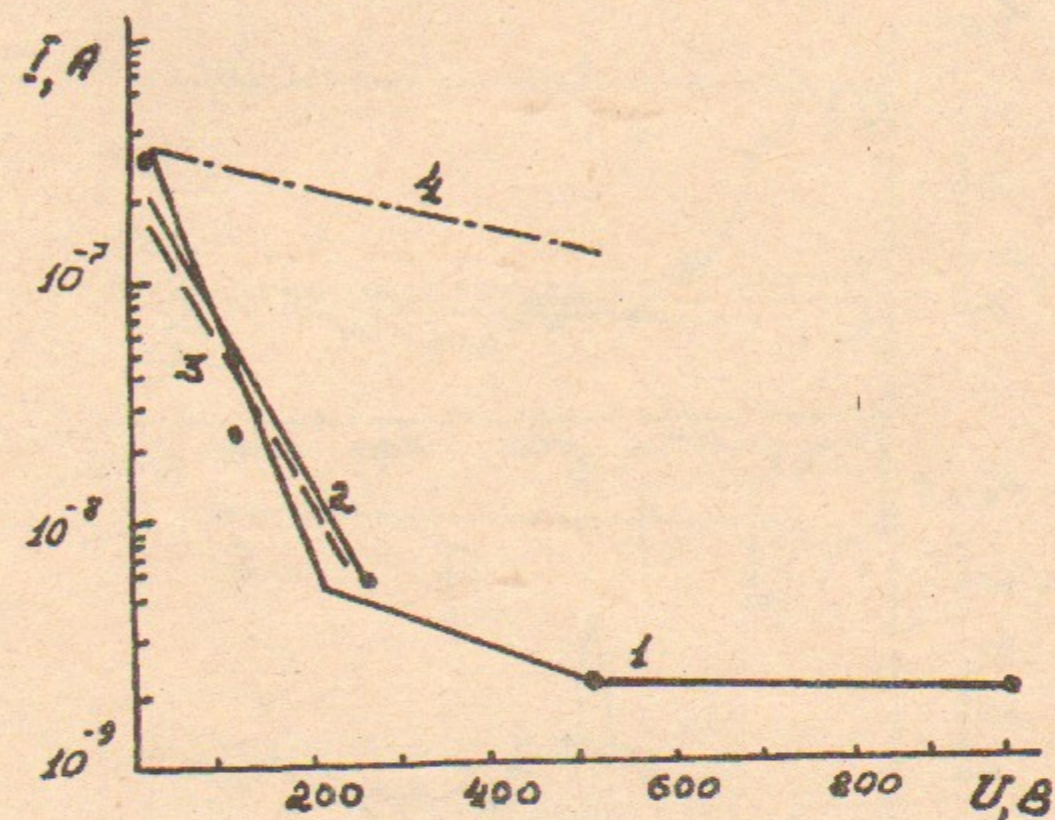


Рис. 14. Зависимость тока возвратных электронов от энергии. $h = 130$ км; 1 — эксперимент, 2-4 — расчет: 2 — $\varphi_p = 10$ В, 3 — $\varphi_p = 50$ В, 4 — $\varphi_p = 0,50$ кВ.

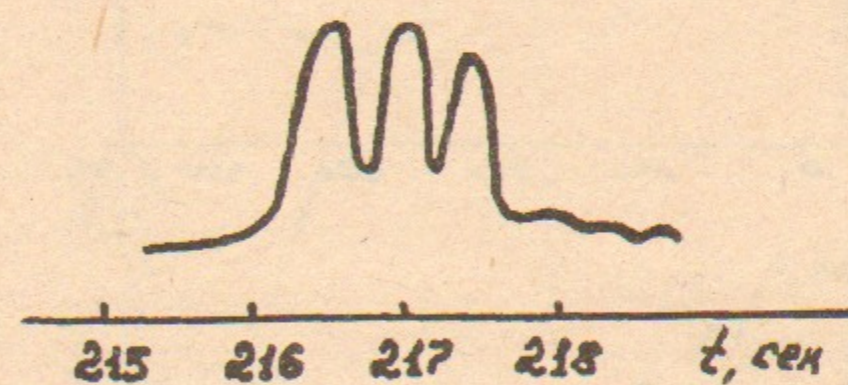


Рис. 15. Сигнал рассеянного излучения с частотой 23,7 МГц в зависимости от времени при $h = 150$ км.

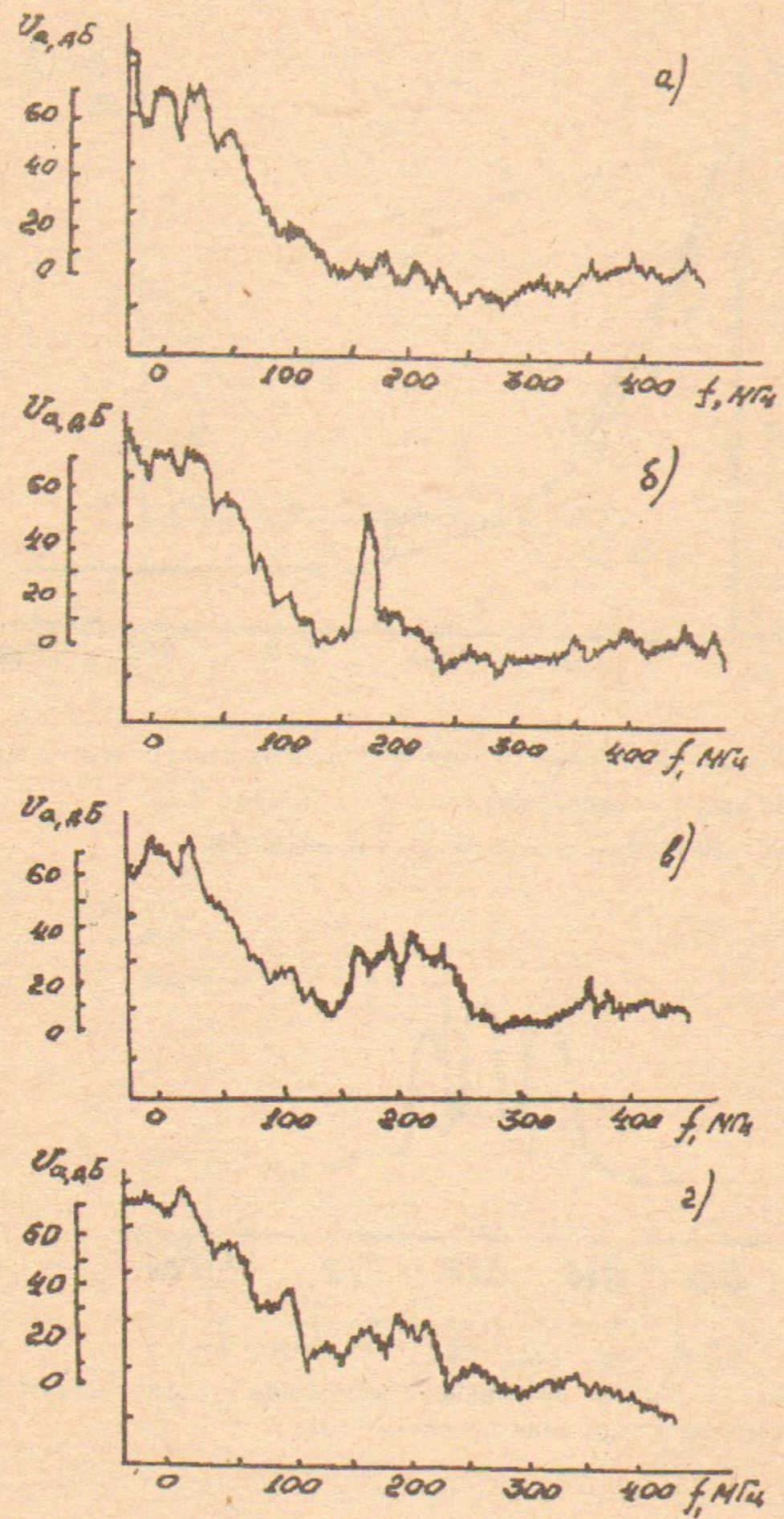


Рис. 16. Спектры радиоизлучения:
 а — 180 с, б — 190 с, в — 193 с, г — 316 с.

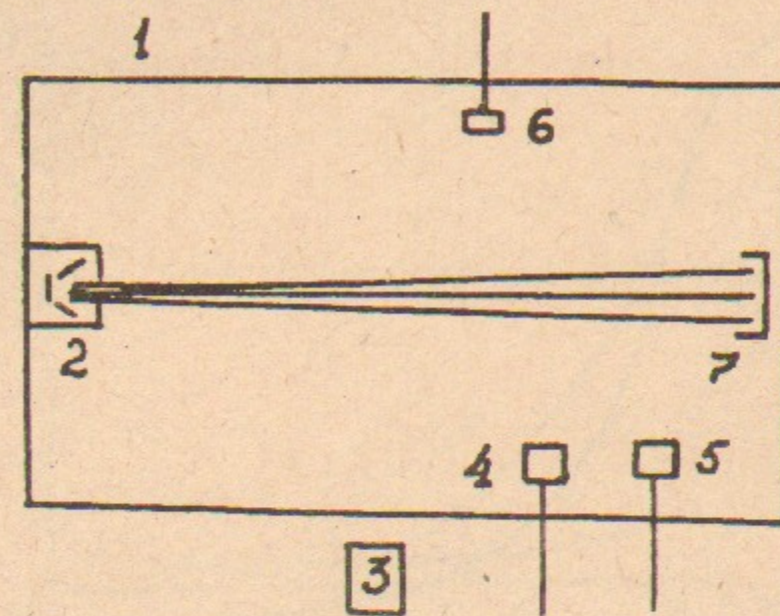


Рис. 17. Схема установки "Электрон":
 1 — рабочая камера, 2 — электронная пушка, 3 — ФЭУ, 4 — СЭЛ, 5 — ПСАИ, 6 — МЭЛФ, 7 — коллектор пучка.

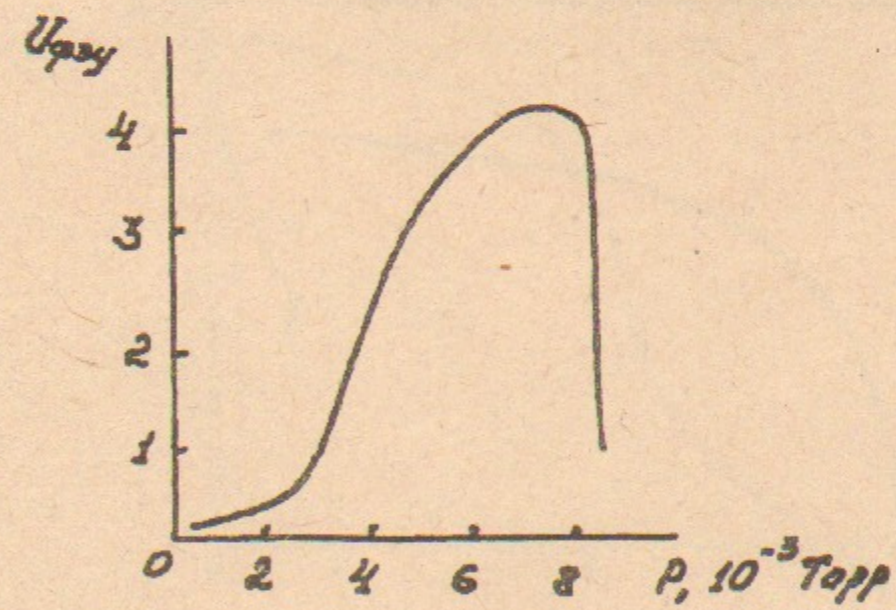


Рис. 18. Зависимость интенсивности свечения линии кислорода $\lambda=550$ нм от давления, $I=0,5$ А.

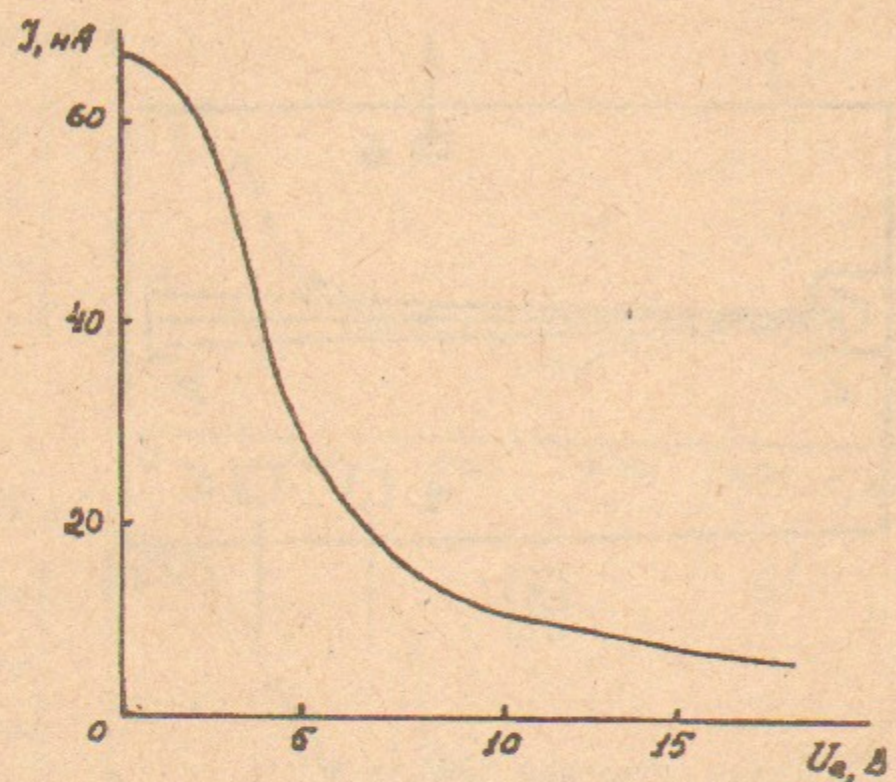


Рис. 19. Зависимость электронного тока от потенциала на анализирующей сетке СЭЛ: $P = 8 \cdot 10^{-4}$ Торр, $I = 0,5$ А.

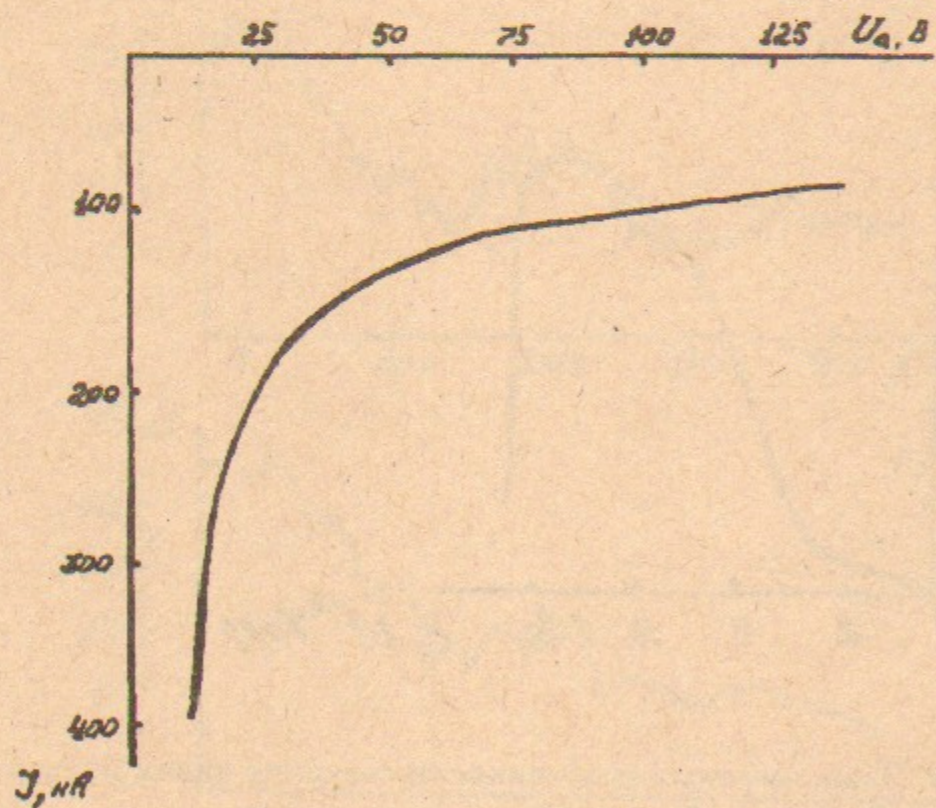


Рис. 20. Зависимость электронного тока от потенциала на анализирующей сетке МЭЛФ: $P = 6 \cdot 10^{-4}$ Торр, $I = 0,5$ А.

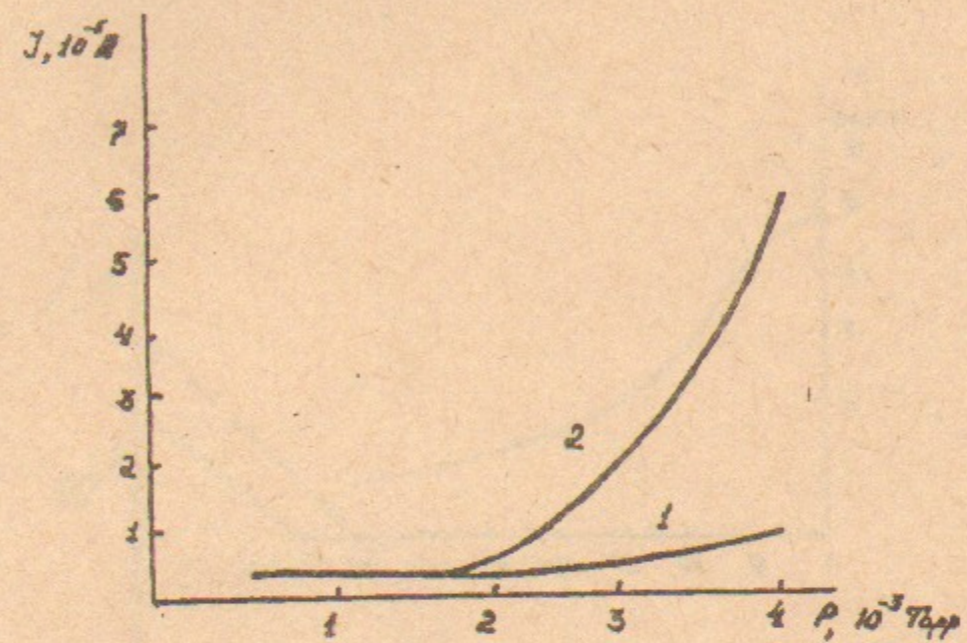


Рис. 21. Зависимость электронного тока МЭЛФ от давления, потенциал на анализирующей сетке 12 В, $I = 0,5$ А: кривая 1 — $\tau = 1$ мс; кривая 2 — $\tau = 5$ мс.

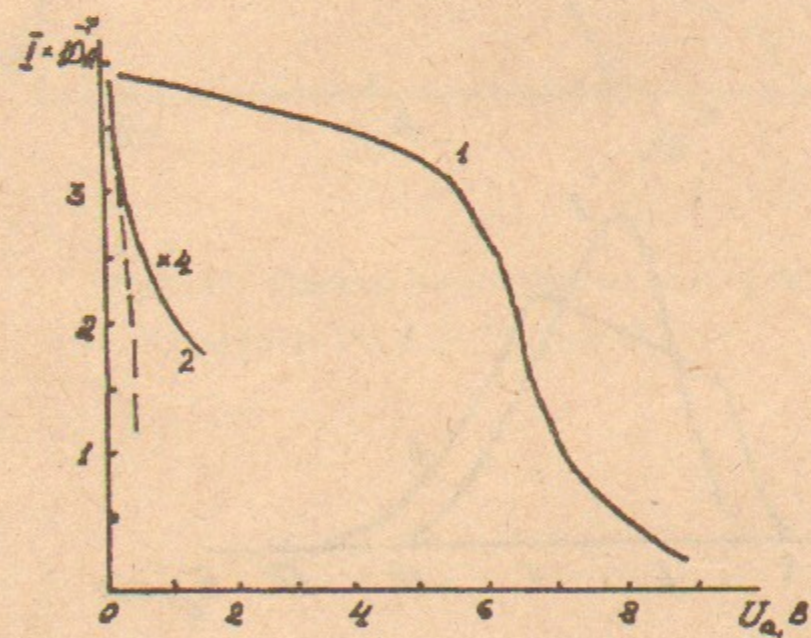


Рис. 22. Зависимость ионного тока от напряжения на анализирующей сетке, $I = 0,5$ А: 1 — $P = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр; 2 — $P = 4 \cdot 10^{-4}$ Торр.

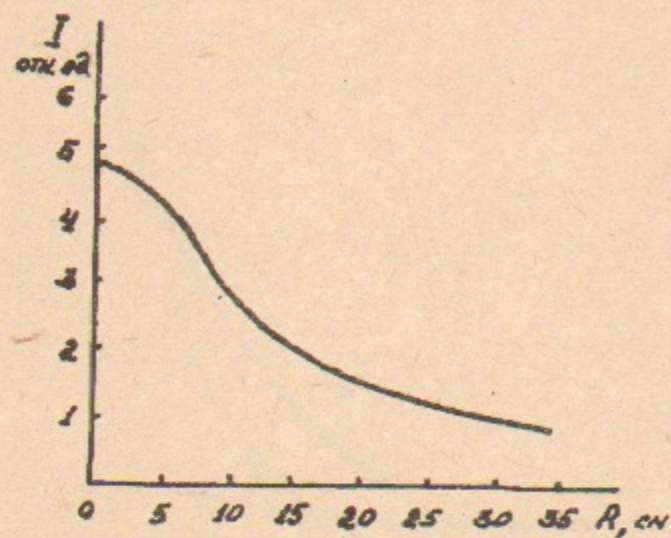


Рис. 23. Распределение концентрации электронов по радиусу.

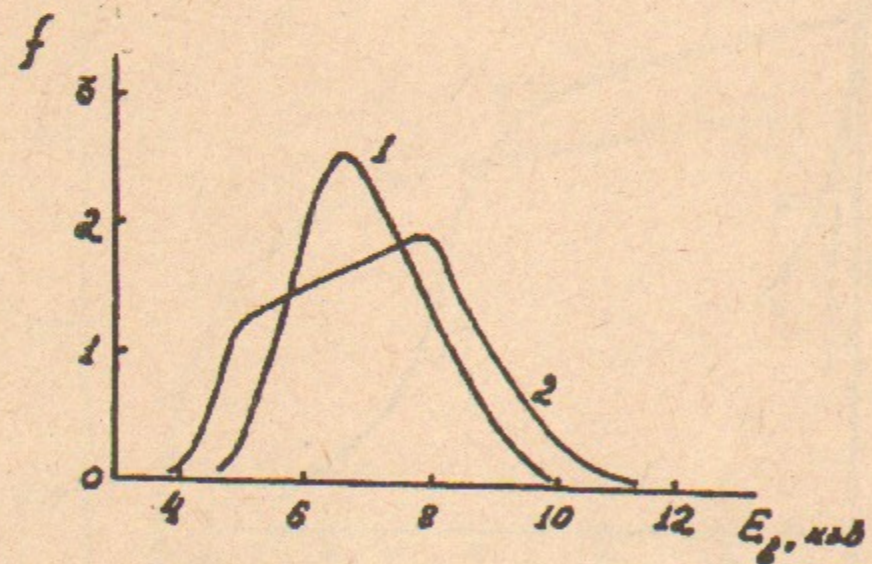


Рис. 24. Функция распределения электронов пучка по энергиям:
1 — без ППР; 2 — при ППР; $I=0,4$ А, $U=10$ кВ.

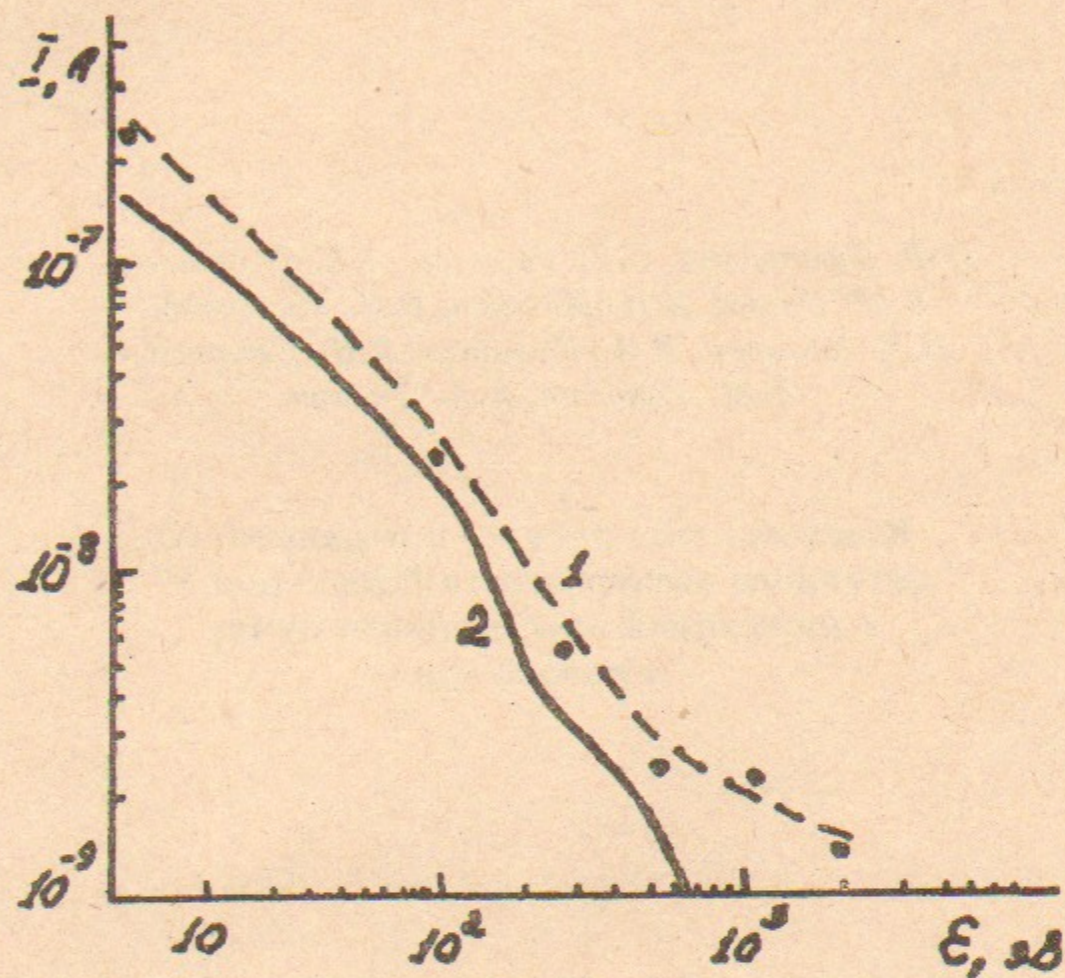


Рис. 25. Спектр надтепловых электронов:
1 — "Электрон-1", 2 — "Поляр-5".

*В.Ф. Быковский, С.Б. Горячев, А.А. Дорошкин,
Р.М. Лапик, И.Н. Мешков, В.Н. Мозгунов,
В.Н. Поляков, И.А. Селезнев, Л.Н. Смирных,
Е.М. Сыресин, А.А. Тютин*

**Комплекс аппаратуры и результаты
активного эксперимента "Электрон-1"
с инъекцией электронного пучка
в ионосферу**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 14 июня 1991 г.

Подписано в печать 19.06 1991 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 3,1 печ.л., 2,5 уч.-изд.л.

Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ N 62

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР,

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.