

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

© ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пр - 156

К.И.Грингауз, В.И.Пацаев, В.А.Рудаков,  
Ю.В.Ходатаев

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВТОРИЧНОЭЛЕКТРОННОГО ВЧ РАЗРЯДА НА ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ "САЛЮТ", ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

( Доклад, представленный на XXIV Международный астронавтический конгресс, Баку, 1973

МОСКВА - 1974

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пр - 156

К.И.Грингауз, В.И.Лацаев, В.А.Рудаков,  
Л.В.Ходатаев

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВТОРИЧНОЭЛЕКТРОННОГО ЕЧ РАЗРЯДА НА ОРЕБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ "САЛЮТ", ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

( Доклад, представленный на XIII Международном астронавтическом конгрессе, Баку, 1973 )

## 1. В в е д е н и е

На орбитальной станции "Салют" в июне 1971 г. В.И.Пашаевым было проведено исследование высокочастотного вторичноэлектронного резонансного разряда.

Высокочастотным вторичноэлектронным резонансным разрядом называется физический процесс, при котором в высокочастотном (вч) электрическом поле между электродами существует колеблющийся объемный заряд, образованный за счет вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов [1,2]. В литературе этот процесс называют также "вторичноэлектронный резонансный пробой", "мультипакторный разряд", ниже для краткости используется термин "резонансный разряд".

Резонансный разряд возникает в вакууме лавинообразно при случайном попадании электронов в межэлектродное пространство. Это явление было случайно обнаружено в 40-х гг. в таких вакуумных устройствах, как кинескопы и ускорители заряженных частиц. Были выявлены основные закономерности резонансного разряда для плоских

электродов в вакууме [1-4].

Упрощенно явление можно описать следующим образом. Если к плоским электродам, находящимся в вакууме (средняя длина свободного пробега электронов значительно больше межэлектродного расстояния), приложить вч напряжение, то случайно оказавшиеся между электродами электроны могут приобрести энергию, достаточную для создания вторичной эмиссии с поверхности электрода. При определенных соотношениях частоты и амплитуды вч напряжения и межэлектродного расстояния процесс приобретает лавинообразный характер. В результате между электродами создается значительная концентрация электронов. Дальнейшее рассмотрение механизма резонансного разряда весьма сложно.

Отметим, что вч напряжение, при котором возникает разряд (критическое напряжение) зависит от материала и состояния поверхности электродов, от продолжительности разряда; на характер разряда влияет также постоянное напряжение, подаваемое на электроды одновременно вч напряжением. В условиях вакуума увеличением постоянного напряжения удавалось вызвать резонансный разряд.

Результаты лабораторных исследований позволяют предположить, что резонансный разряд может иметь место в системах со сложной конфигурацией электродов, в частности, на антеннах космических аппаратов, причем на характер разряда будут дополнительно влиять свободные электроны окружающей среды. Можно ожидать, что при этом теряется вч мощность и ухудшаются характеристики антенных систем. Однако невозможность достаточно полного моделирования в вакуумных камерах условий космического пространства и эффектов, создаваемых движением космического аппарата, не поз-

Возгла делать уверенные заключения о существовании такого процесса в условиях реального полета в космос.

Целью описываемых в настоящем сообщении исследований являлось экспериментальное обнаружение и изучение явления резонансного разряда в условиях полета космического аппарата в ионосфере с одновременным измерением концентрации ионосферных заряженных частиц. Измерение локальной концентрации заряженных частиц в ионосфере вдоль орбиты космического аппарата, необходимое для более полного понимания результатов исследования резонансного разряда, представляет также самостоятельный интерес.

Если бы такие исследования проводились на нештативном космическом аппарате, то недостаточная изученность явления потребовала бы создания весьма сложной автоматической аппаратуры. Возможность непосредственного участия космонавта - исследователя в эксперименте позволила разработать и применить такую аппаратуру и программу эксперимента, которые были бы рассчитаны на активное участие экспериментатора в измерениях. Аппаратура позволяла изменять некоторые условия проведения эксперимента и при этом визуально следить за несколькими физическими характеристиками. В зависимости от наблюдаемых результатов космонавт мог изменять условия, в которых проводился эксперимент.

На первом этапе измерений предусматривалось, главным образом, обнаружение резонансного разряда и выяснение условий его существования. На орбитальной станции "Салют" измерения были выполнены космонавтом В.И.Панелью, который успешно провел первые исследования резонансного разряда в ионосфере.

## 2. Методика измерений и аппаратура

2.1. Исследования резонансного разряда. Резонансный разряд исследовался на электродах трех типов, форм электродов аналогичны формам применявшихся на космических аппаратах антенн, все электроды по постоянному току были изолированы от корпуса станции. В каждый данный момент использовался один из электродов, на который подавались плавно регулируемое импульсное вч напряжение и постоянное напряжение со ступенчатой регулировкой.

Прежде всего надо было зарегистрировать факт возникновения разряда. Для этого был применен измеритель вч тока разряда, основанный на увеличении проводимости среды в межэлектродном пространстве при возникновении разряда. Возможность изменения вч мощности и постоянного напряжения были необходимы для выяснения их влияния на условия возникновения и характер резонансного разряда. Для измерения распределения вч поля вблизи электродов был использован вч зонд - приемник с двумя небольшими антеннами (рамка и симметричный вибратор), установленными на штанге, которая могла перемещаться вблизи электродов.

### 2.2. Измерения локальной концентрации заряженных частиц

В описываемых экспериментах измерялась концентрация положительных ионов  $N_+$  методом конных лонушек [5]. Поскольку ионосфера электрически нейтральна и на высотах полета станции "Салют" отрицательные ионы практически отсутствуют, измерения концентрации  $N_+$  автоматически дают значения электронной концентрации  $N_e$ .

На станции "Салют" были установлены три сферические конные лонушки, две из них были закреплены неподвижно и предназначались

для измерений в невозмущенной среде, третья была установлена на подвижной штанге с присоединенными антеннами (одновременно могли работать две из трех ловушек). При сферических ловушках результаты измерений мало зависят от ориентации ловушки относительно Солнца и вектора скорости набегающего потока частиц (до тех пор, пока ловушка не попадает в конус тень космического аппарата). Внутренний электрод ловушки - коллектор - имел отрицательный постоянный потенциал. Потенциал внешнего электрода - сетки - устанавливался экспериментатором. В случае, когда потенциал сетки изменялся по пилообразному закону, вольтамперные характеристики коллекторного тока позволяли определять концентрацию  $n_1$ .

2.3. Некоторые сведения об аппаратуре. По выбору экспериментатора одна из трех электродных систем, на которых наблюдался разряд, подключалась специальным переключателем к управляемому аттенкатору (0-13 дБ), регулирующему уровень вч мощности от импульсного генератора (импульсная мощность  $P = 300$  Вт, несущая частота около 180 МГц, длительность импульса - 3 мксек). Блок аттенкатора содержал датчики падающей и отраженной мощности.

Все измеряемые параметры регистрировались на кинолентку малогабаритным электронным осциллографом. Пленки с записями были обработаны на Земле после возвращения. Кроме того, космонавт вел записи в бортовом журнале, также доставленном на Землю.

Программа работ космонавта по данному эксперименту была оформлена как часть бортового журнала. Были перечислены все основные операции и было предусмотрено место для фиксации результатов измерений, наблюдаемых эффектов и замечаний.

Первоначально описание последовательности операций было весьма подробным. Однако при подготовке космонавтов выяснилось, что детальная инструкция при повторяющихся операциях не требуется и при участии В.И.Павлова программа была переработана. В окончательном варианте была указана лишь цель той или иной группы операций (например, "запись"), а в конце программы также типовые операции были детально расшифрованы. Были также упрощены таблицы для вписывания результатов наблюдений в боржурналах.

Управлении всеми приборами комплекса и индикация измеренных параметров сосредоточены в одном приборе — блоке управления, при помощи которого космонавт и осуществлял эксперимент, наблюдая за его ходом. Внешний вид блока управления приведен на рис.1.

В блоке управления, в частности, находились релейные схемы управления приводом аттенюатора вч мощности, приводом подвижной штанги, управление вч переключателями электродов, управление различными режимами записи. Состояние управляемых узлов контролировалось световыми индикаторами, в качестве которых использовались световые диоды красного и зеленого цвета.

Все измеряемые токи и напряжения прежде чем попасть на шкафы осциллографа или стрелочный прибор, усиливались специальными усилителями, находящимися также в блоке управления. Там же находился измерительный приемник со ступенчатым аттенюатором на входе. Усилители зондовых токов позволяли измерять токи в диапазоне от  $10^{-10}$  до  $10^{-5}$  а, разбитом на несколько поддиапазонов. Значения всех измеряемых параметров можно было визуально наблюдать на трех стрелочных приборах, которые по выбору эксперимен-



татора могли включаться в различные цепи. Зондовые характеристики конных ловушек можно было наблюдать на экране электроннолучевой трубки. Фотография конной ловушки (диаметр 10 см) приведена на рис.2.

По виду вольтамперной характеристики на экране экспериментатор мог выбрать оптимальный режим усиления. Угол наклона подвижной штанги регистрировался при помощи стрелочного прибора, подключенного к потенциометрическому датчику.

Несмотря на большую насыщенность лицевой панели органами управления и контроля (7 стрелочных приборов, электронно-лучевая трубка, 16 переключателей, 7 кнопок, 9 выключателей, 6 регуляторов, 11 световых индикаторов, 2 счетчика пленки) обращение с прибором не вызвало особых трудностей у экспериментатора. В записях, сделанных В.И.Папaeвым на борту станции "Салит", нет никаких замечаний о трудностях работы с прибором.

### 3. Результаты измерений

С описанной выше аппаратурой на борту станции "Салит" космонавтом В.И.Папaeвым бы: проведен ряд экспериментов в период с 16 по 27 июня 1971 г. Записи В.И.Папaeва в бортовом журнале и доставленные на Землю осциллографические пленки позволили восстановить ход экспериментов. В.И.Папaeв провел восемь сеансов измерений продолжительностью от 15 до 90 мин. В общей сложности при проведении описываемых экспериментов протяжка пленочного осциллографа включалась 202 раза, каждая запись фиксировала от одного до нескольких десятков циклов измерений. В зависимости

от реальной обстановки. В.И.Падаев корректировал намеченную на Земле программу измерений. Некоторые эксперименты проведены во время, отведенное для отдыха космонавта, что говорит о его интересе к проводимым исследованиям.

На рис.3 на карте показаны проеции орбит станции "Салют", на которых проводились последовательные резонансного разряда. Участки измерений указали двойными тонкими линиями, значок  $\Phi$  указывает терминатор, стрелки указывают направление полета.

Все измерения проводились при вращении станции вокруг направленной на Солнце оси  $Y$  (перпендикулярной продольной - большой - оси станции) с угловой скоростью около 3 град/сек, при этом вч электроды и ионные ловушки всегда были затенены корпусом станции от прямого освещения солнечными лучами, следовательно фотоэмиссия с электродов ловушек отсутствовала.

Одним из основных результатов этих экспериментов является первое обнаружение существования резонансного разряда на электродах, установленных на поверхности космического корабля во время его полета в ионосфере. На рис.4 воспроизведена одна из снимков В.И.Падаевым осциллограмм, на которой зафиксирован процесс возникновения резонансного разряда. На осциллограмме записаны ток разряда (кривая 1); постоянное напряжение на электроде, равное в данном случае +3,5 в (кривая 2); значения мощности падающей и отраженной волн (кривые 3,4, соответственно, росту этих величин соответствует уменьшение уровней на осциллограмме), метки времени через 1 сек - 5. По мере увеличения высокочастотного напряжения (с ростом падающей и отраженной мощностей) возникает и возрастает

ток разряда, уровень которого выходит за пределы поля записи. (Значения падающей и отраженной мощностей записаны в различных масштабах и записи сдвинуты относительно друг друга на 2 мм по горизонтали). На осциллограмме рис.4 отчетливо видно повторяющееся возникновение высокочастотного вторичноэлектронного резонансного разряда.

При вращении станции вокруг оси  $Y$  ориентация различных участков ее поверхности относительно вектора скорости (направления набегающего потока ионосферной плазмы) непрерывно меняется, причем возможно попадание высокочастотным электродом в газодинамическую тень станции. Влияние этого затенения выявилось в серии из двадцати измерений с интервалом в одну минуту. Каждое измерение состояло из трех циклов изменения высокочастотной мощности, длительность одного цикла 2 сек. В интервалах между измерениями значение мощности было минимальным, при этом разряд отсутствовал. Измерения проводились на дневном участке орбиты. Оказалось, что значения критической мощности и тока разряда меняются в зависимости от изменения положения станции относительно вектора набегающего потока плазмы. На рис.5 приведены в относительном масштабе изменения во времени максимальных значений тока разряда (точки) и значений критической мощности (крести). На этом же графике нанесены сплошные линии синусоиды, период которых соответствует периоду вращения станции. Влияние этого вращения на разрядный ток выражено достаточно отчетливо.

Отметим, что резонансный разряд удалось зарегистрировать только на одной из трех электродных систем.

Измерения концентрации положительных ионов проводилось на нескольких участках полета. Экспериментатор должен был по виду вольтамперной характеристики на экране электроннолучевой трубки выбрать оптимальный режим измерения.

Анализ записей показал, что зондовые усилители блочного управления работали не вполне нормально (этих отклонений в работе прибора В.И.Пацаев видеть не мог, они сказывались только на записи). Тем не менее на некоторых участках получены поддающиеся дешифровке зондовые характеристики. Также записи получены, например, 16 июня 1971 г. на отрезке орбиты длиной примерно 3000 км. Измерения начались в районе терминатора, незадолго до вхождения станции в тень. Высота полета была 250 км, широта изменялась от  $42^{\circ}$  до  $50^{\circ}$  в.ш. Полученные данные приведены в таблице I (расстояния со знаком минус соответствуют освещенному Солнцем участку орбиты).

В этих измерениях, наряду с полученными данными, интерес представляет сам факт успешных космосферных измерений при помощи управляемого космонавтом прибора. В бортовом журнале отсутствуют какие-либо замечания о трудностях измерений. Таким образом, проверена работоспособность устройства, позволяющего измерять концентрацию ионов в сложных условиях, которые могут возникнуть при исследовании резонансного разряда, при необходимости существенного изменения диапазона измеряемых значений концентрации и потенциалов на электродах доушек.

Таблица I

Расстояние от генератора, км	Концентрация $n$ , $10^5$ см <sup>-3</sup>
-500	1,6
-25	1,8; 1,55
250	1,55; 1,55
500	1,45; 1,35; 1,35
750	1,35; 1,35
1000	1,25; 1,2; 1,25; 1,2
1250	1,25; 1,35
1500	0,85; 1,0; 0,85
1750	0,85
2000	0,85
2250	0,85; 0,75; 0,85
2500	0,85; 0,85

### З а к л ю ч е н и е

В настоящем докладе описаны эксперименты по исследованию высокочастотного вторичноэлектронного резонансного разряда в условиях моноосфер, приведены основные характеристики применявшейся аппаратуры и некоторые полученные результаты.

Основные выводы:

1) Обнаружен высокочастотный вторичноэлектронный резонансный разряд на электродах вблизи поверхности лезиной в моноосфере орбитальной станции.

2) Высокочастотный ток разряда и мощность, при которой разряд возникает, зависят от ориентации станции относительно вектора ее скорости и меняются при переходе с ночной части орбиты на дневную.

Размер настоящего доклада позволил привести только часть полученных результатов. Так, в частности, не описаны влияние на разряд постоянного потенциала на электродах, зависимость характера разряда от его длительности, влияние разряда на соседние электроды.

## Литература

1. E.W.Gill, A.von Engel, Proc.Roy.Soc., A 192, 446 (1948).
2. A.J.Hatch, A.B.William, J.Appl.Phys., 25, 417 (1954).
3. Б.А.Загер, В.Г.Ташин, ИФ, 34, 297 (1964).
4. И.Н.Словнов и др. Электрический пробой и разряд в вакууме, Атомиздат, Москва, 1966.
5. К.И.Грингауз, В.В.Безруких, В.Д.Озеров. В сб. "Искусств.спутники Земли", вып.6, 63 (1961).

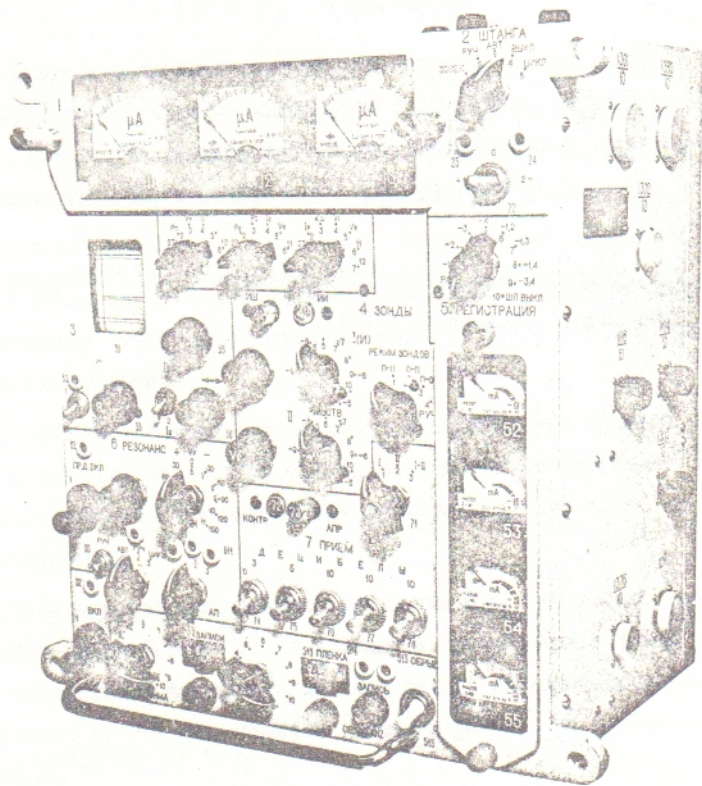


Рис. I. Внешний вид блока управления.



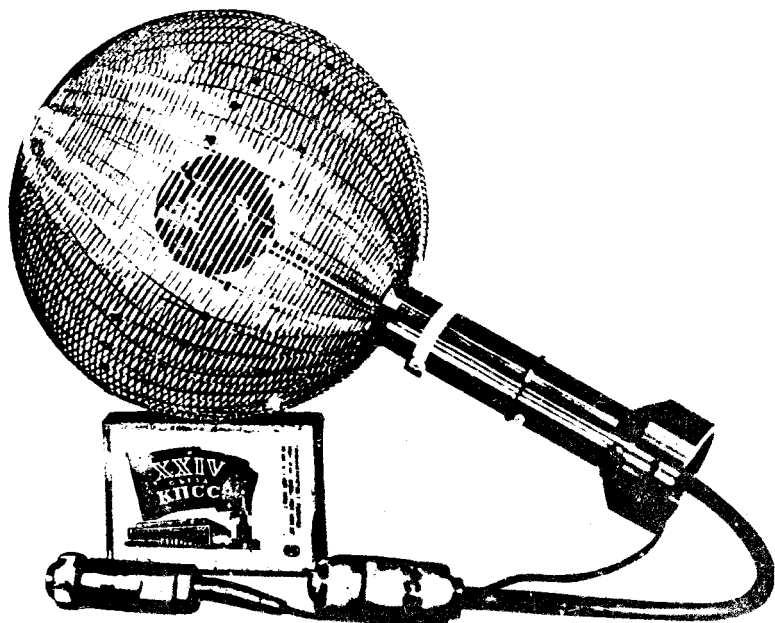


Рис.2. Сферическая зонная ловушка (диаметр 10 см), установленная на станции "Салют".



Рис.3. Проекция орбит станции "Салют", на которых проводились исследования резонансного разряда. Участки измерений указаны двойными точками линиями, значок ⊙ указывает терминатор (переход от света к тени или наоборот), стрелки указывают направление полета.

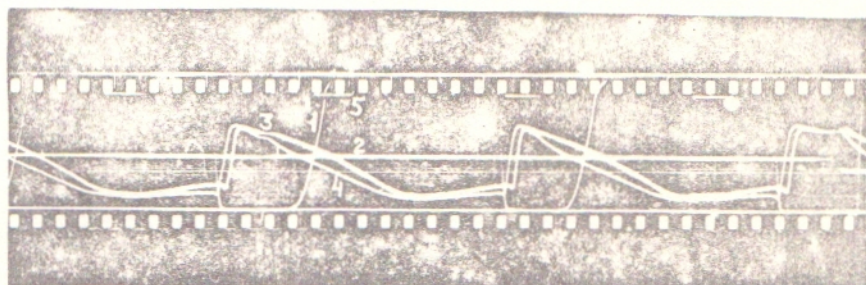


Рис.4. Осциллограмма с регистрацией возникновения резонансного разряда, полученная 25 июня 1971 г. в 23 ч.30 мин. моск. времени. 1 - ток разряда, 2 - постоянное напряжение на электроде, 3 и 4 - мощность падающей и отраженной волн, соответственно.

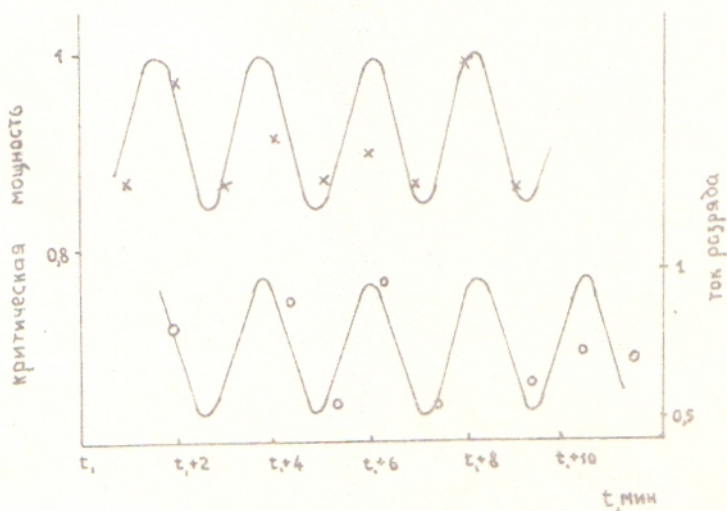


Рис.5. Максимальные значения тока разряда (точки) и значения критической мощности (кресты), измеренные с интервалом 1 мин. 26 июня 1971 г. в 11 ч.35 мин. моск. времени. По вертикали масштаб относительный. Период сплошной синусоидальной кривой соответствует периоду вращения станции.