

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДПороГОВЫХ ЭФФЕКТОВ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ВЫВОДЫ ЦИФРОВЫХ  
МИКРОСХЕМ  
СЕРИЙ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

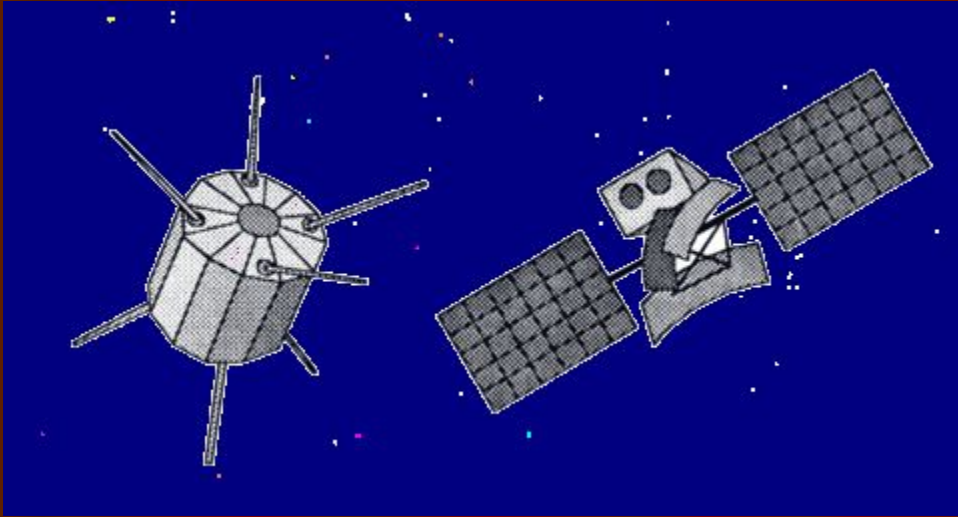
О.А. Герасимчук, К.А. Епифанцев, П.К. Скоробогатов

*ОАО «ЭНПО СПЭЛС»*

По литературным данным до 50% выходов из строя КА связаны с повреждением ЭКБ за счет эффектов электризации

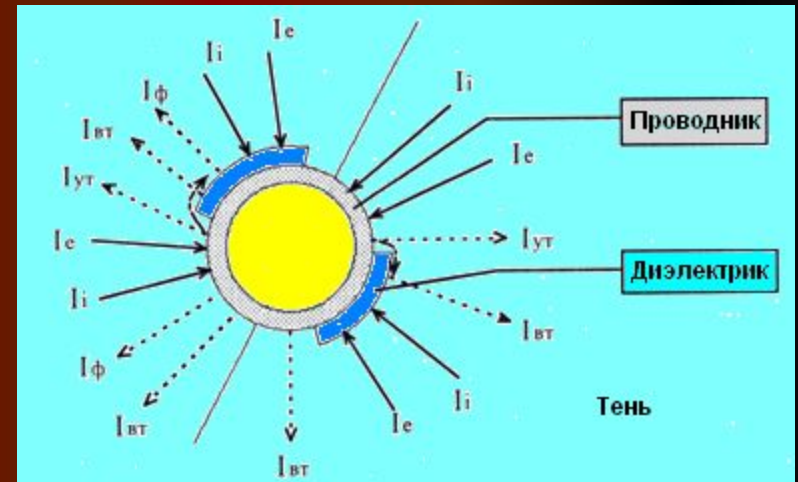
# Физика радиационной электризации в космосе

## Внешняя электризация



С электрофизической точки зрения современный космический аппарат (КА) представляет собой проводящий замкнутый гермоконтейнер, внутри и снаружи которого расположена разветвленная кабельная сеть.

Для обеспечения теплового режима большая часть внешней поверхности КА покрыта теплоизоляцией, представляющей собой многослойные маты перемежающихся между собой слоев диэлектриков и металлической фольги. Наличие разнородных материалов и неравномерного облучения КА приводит к формированию на различных участках КА разности потенциалов.

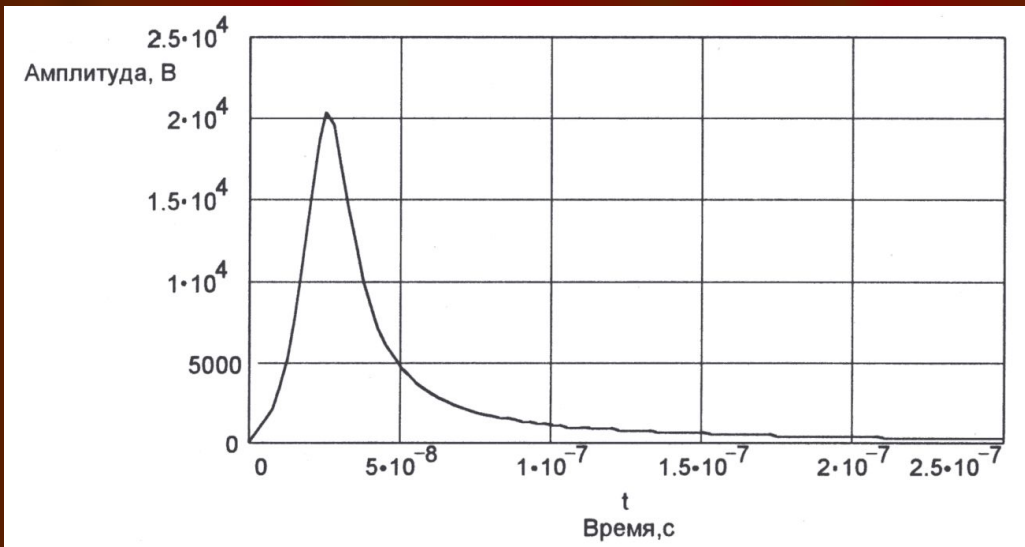


# Физика радиационной электризации в космосе

## Внешняя электризация

На внешней поверхности КА происходят электростатические разряды (ЭСР), отличительной чертой которых является искровой характер при длительности разряда от сотен наносекунд до нескольких микросекунд.

Величина критического поля при котором начинают возникать ЭСР в околоземной космической плазме составляет  $2 \times 10^5$  В/см.

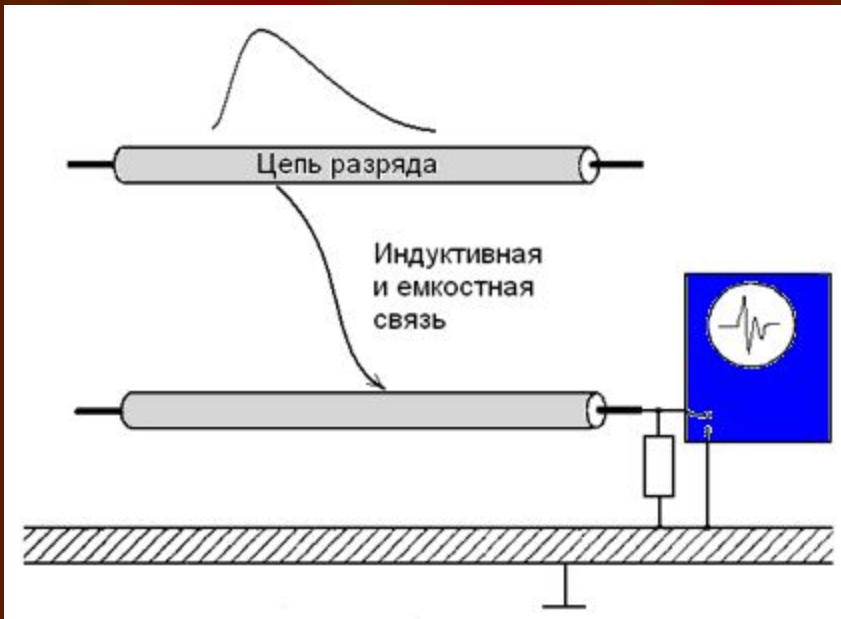


← Характерная усредненная форма помехового импульса, зарегистрированного в кабельной сети КА, не оснащенной системой защиты от влияния радиационной электризации

Разность потенциалов может достигать 20 кВ. Пиковое значение тока разряда 100 А при скорости нарастания тока до  $10^{10}$  А/с, что приводит к излучению в пространство электромагнитной энергии, т.е. сопровождается генерацией электромагнитной помехи для бортовой аппаратуры КА.

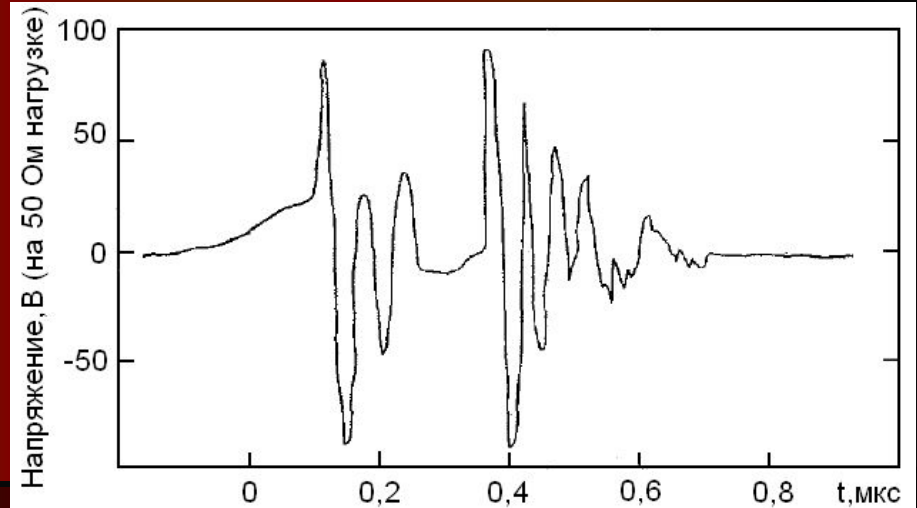
# Физика радиационной электризации в космосе

## Внутренняя электризация



Возможная форма импульса наводки от ЭСР в кабельной сети КА →

← Формирование сигнала наводки от ЭСР в кабельной сети КА



# Физика радиационной электризации в космосе

## Внутренняя электризация

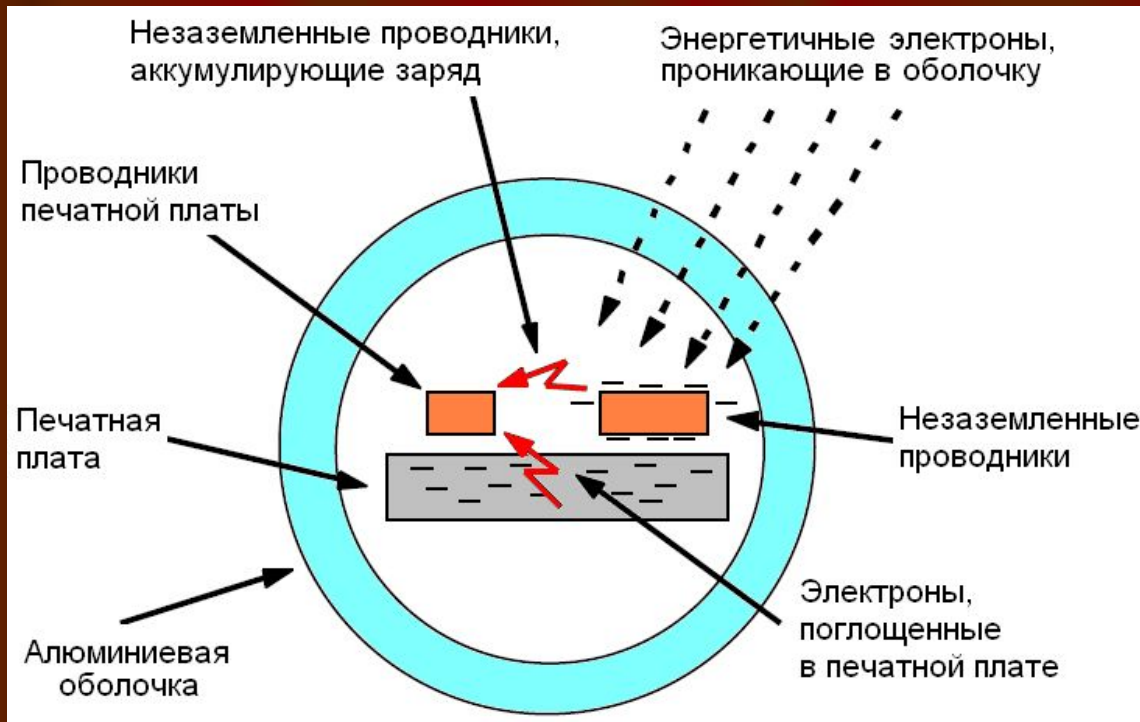
Если внешняя электризация обусловлена воздействием электронов с энергиями от 0 до 50 кэВ, то внутренняя электризация связана с более энергетичными электронами, с энергиями от 100 кэВ до 10 МэВ.



← Области круговых орбит, различающиеся по степени опасности внутренней электризации

# Физика радиационной электризации в космосе

## Внутренняя электризация



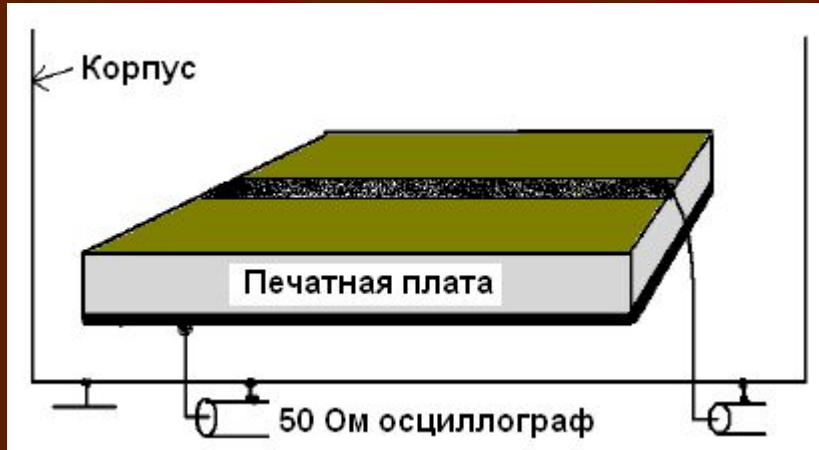
← Основные механизмы внутренней электризации

Источником электризации являются высокоэнергетичные электроны (от 100 кэВ до 10 МэВ), которые проникают внутрь КА.

Источниками электростатического разряда являются электроны, поглощенные в диэлектриках и незаземленных проводниках.

# Физика радиационной электризации в космосе

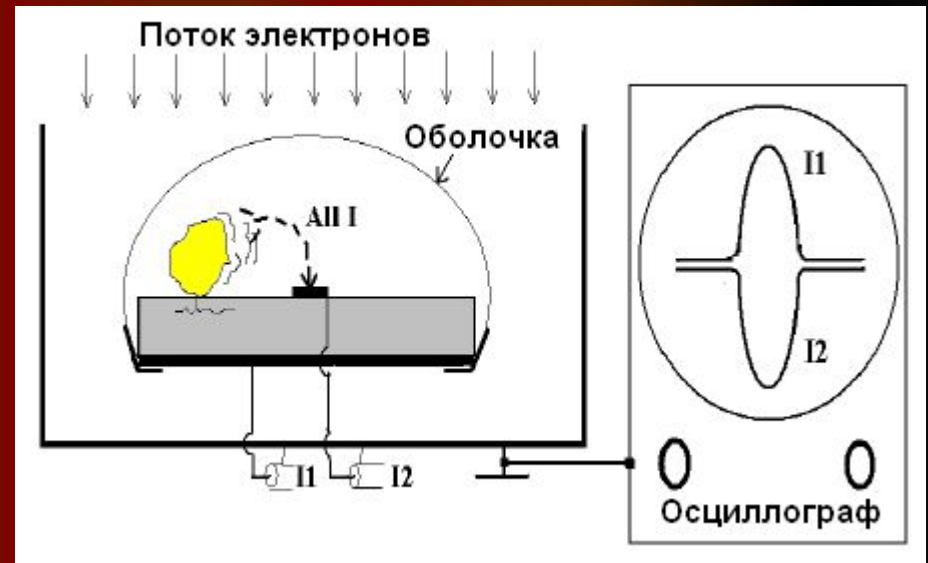
## Внутренняя электризация



Внутренний импеданс источника разряда составлял  $R_r = 22$  кОм. Максимальная выделяемая мощность при  $R_n = 22$  кОм составила 5,5 кВт.

Частота импульсов разрядов доходила до 1/мин.

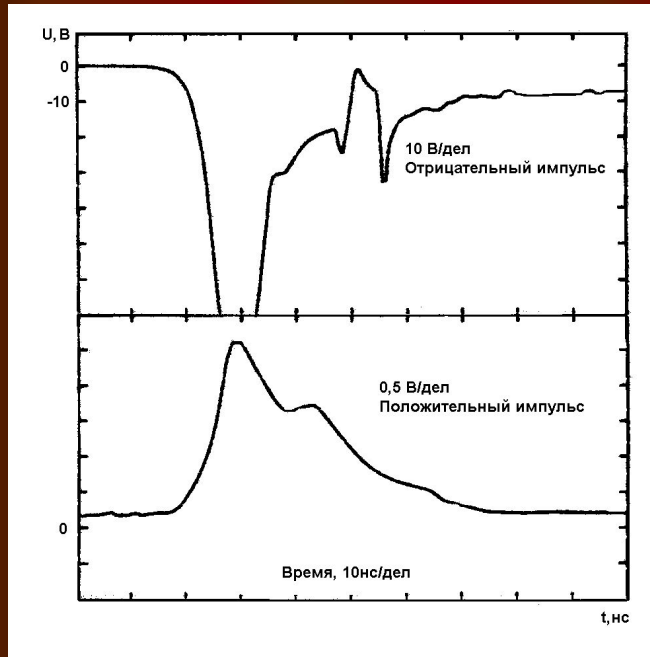
Эксперименты проводились в поле высокоэнергетического потока электронов с энергиями от 100 кэВ до 1 МэВ.





# Физика радиационной электризации в космосе

## Внутренняя электризация



← Примеры импульсов напряжения, формируемых со 100 см<sup>2</sup> печатной платы

Таким образом:

- При обеспечении электростатической защиты от разрядов внешней электризации, остается угроза от внутренней электризации.
- Электростатические разряды внутренней электризации КА также могут представлять серьезную угрозу для ЭКБ;

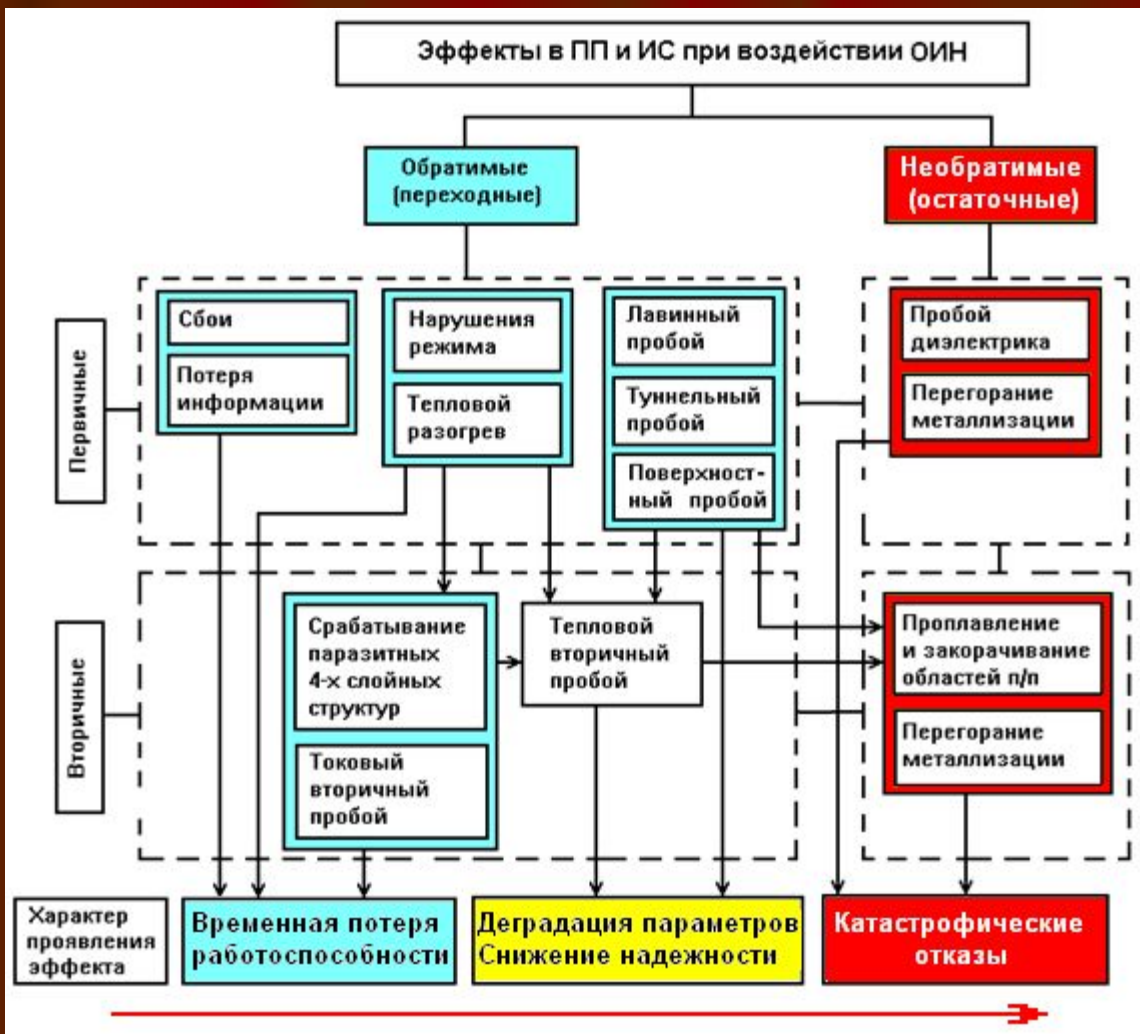
## Основные параметры электрических сигналов, вызванные электризацией КА

- Широкий диапазон амплитуд импульсов (от долей вольта до киловольт);
- Широкий диапазон длительностей импульсов (от долей микросекунды до единиц микросекунд);
- Высокий внутренний импеданс источника (до десятков кОм);
- Многократный характер воздействия.

### Выводы:

1. (Позитивный) Параметры электрических сигналов, вызванных электризацией КА находятся в пределах значений параметров одиночных импульсов напряжения (ОИН), используемых при определении импульсной электрической прочности (ИЭП) элементной базы, испытываемой по фактору K22!
2. (Негативный) Испытания по фактору K22 носят однократный характер (одиночный импульс напряжения). А воздействие электрических сигналов, вызванных электризацией КА, могут носить многократный характер!

# Основные эффекты повреждения ПП и ИС и их связь с параметрами ОИН



← Классификация эффектов, возникающих в ПП и ИС при воздействии ОИН

Те же эффекты возникают и при воздействии сигналов электризации КА

## Скрытые эффекты повреждения ПП и ИС

При ЭСР возможно также возникновение небольшого повреждения, которое тем не менее приводит к отказу устройства при эксплуатации в начальный период. Скрытые дефекты могут проявиться не сразу после воздействия разряда, а спустя месяцы или годы. Их можно разбить на три категории:

- нанесенный ущерб настолько мал, что прибор полностью соответствует паспортным характеристикам. Вероятность безотказной работы в течение всего срока службы высока;
- поврежденный элемент прибора по параметрам слегка выходит за установленные пределы и вполне способен выполнять свои функции в системе. Однако имеется достаточная вероятность преждевременного отказа;
- прибор работоспособен, но не отвечает всем предъявляемым к нему требованиям. Надежность прибора существенно ослаблена.

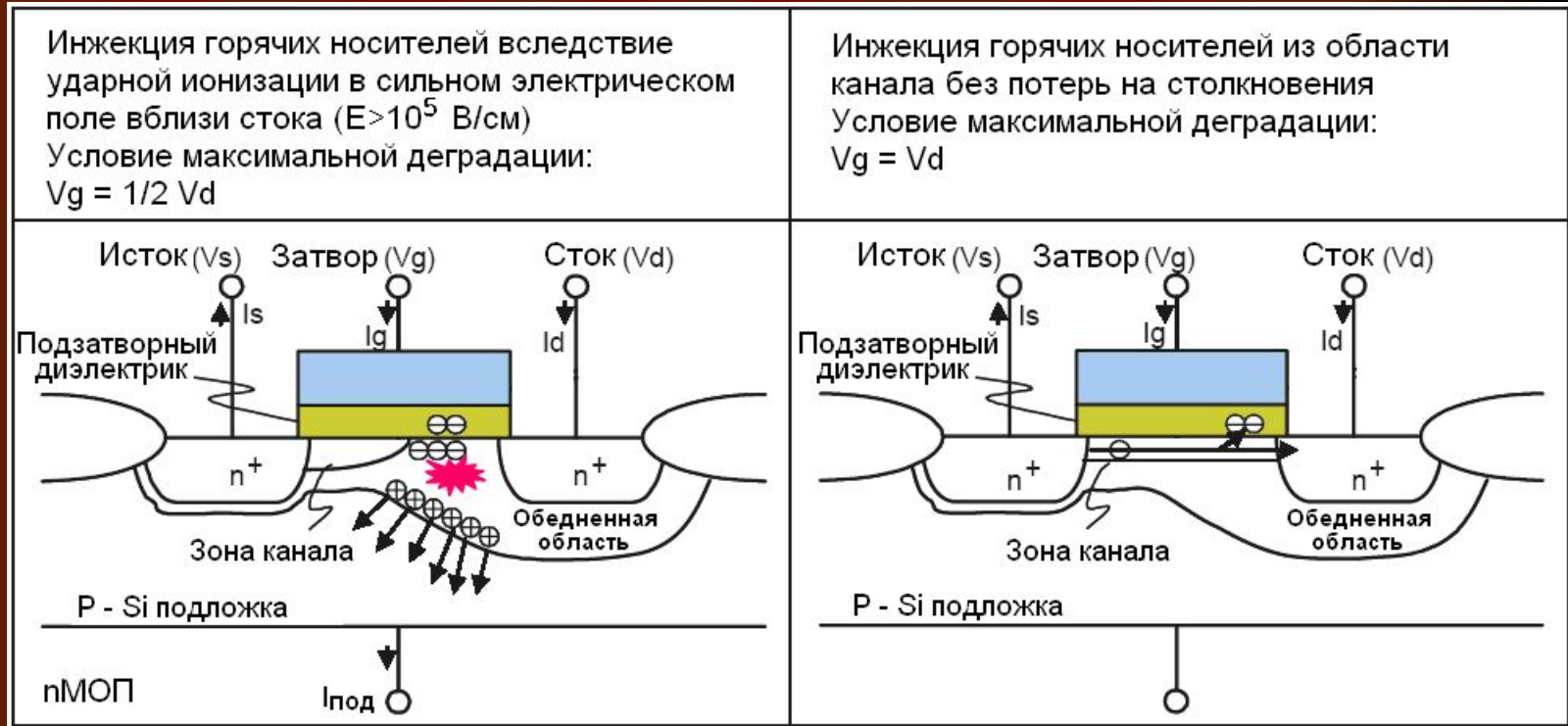
По физическому принципу скрытые дефекты делятся тоже на три группы.

**Параметрическая деградация ИС, в частности деградация оксида.**

**Дефекты металлизации.**

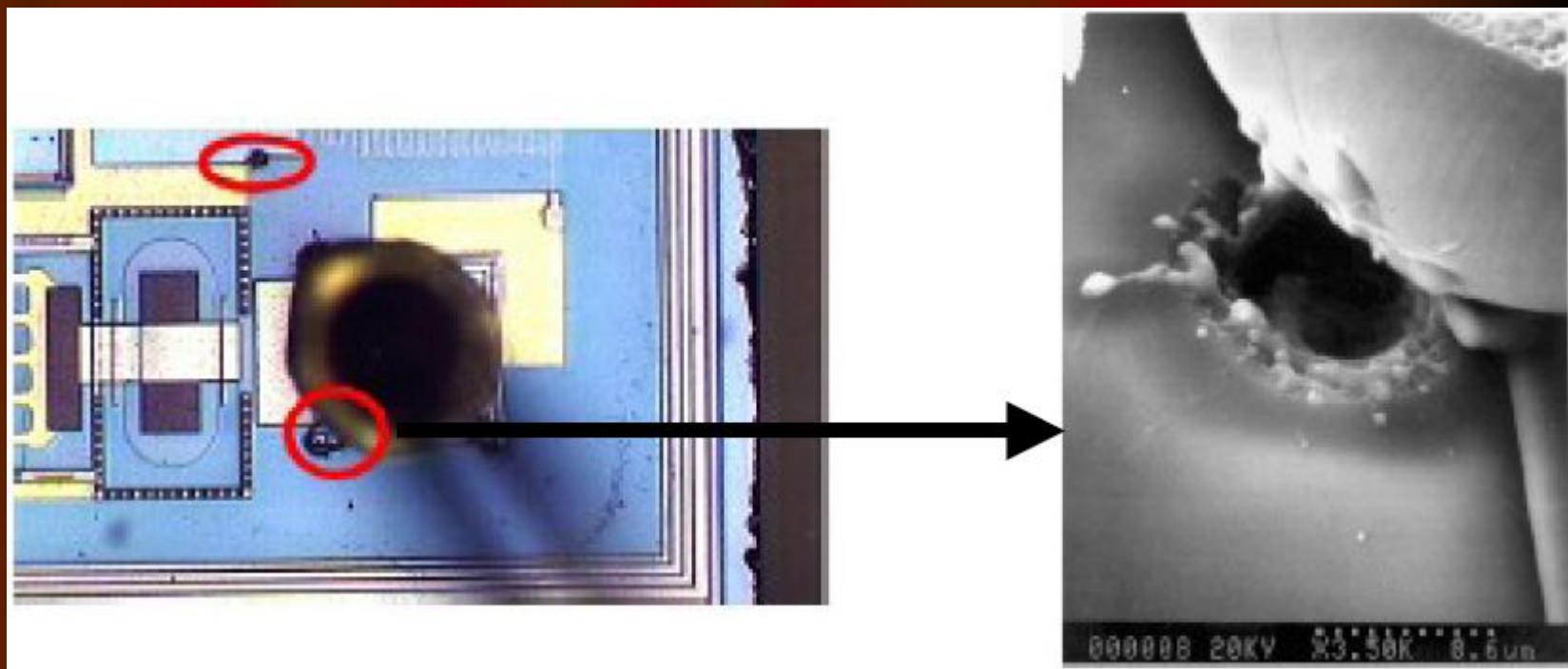
**Дефекты, связанные с расплавлением объемных участков кремния,** не влияющие на выходные параметры изделия.

# Возможная параметрическая деградация ИС при воздействии ОИН



↑ Один из возможных механизмов параметрической деградации ИС за счет влияния перенапряжений

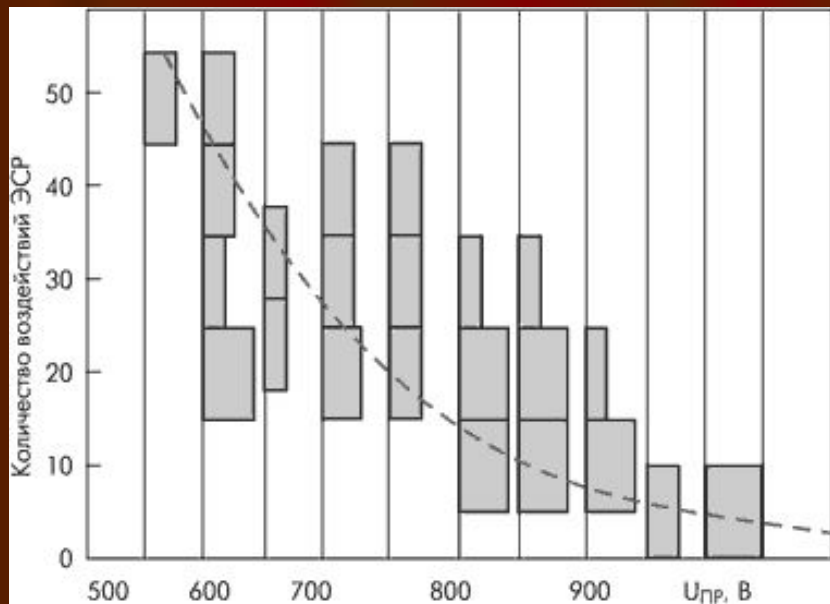
## Снижение надежности ИС при воздействии ОИН



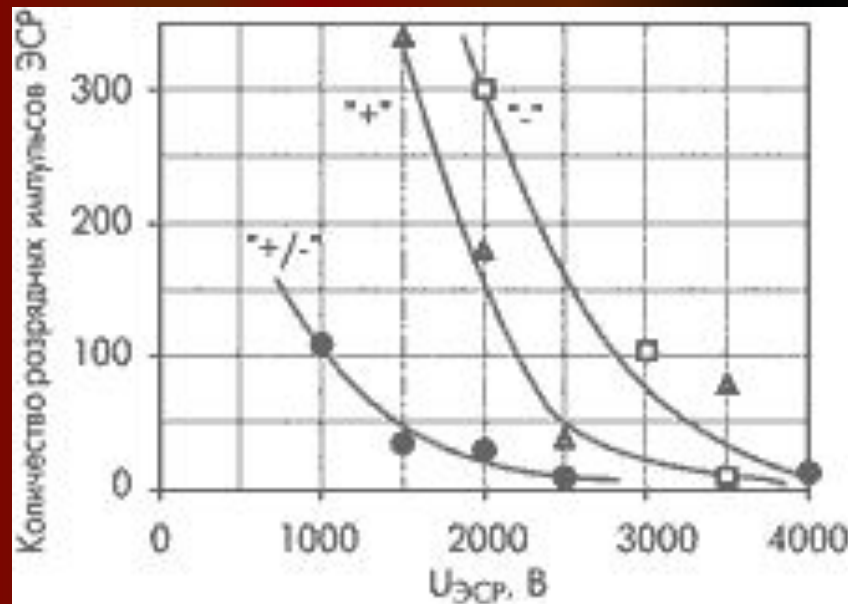
↑ Визуальная деградация балочного вывода ИС

Скрытые эффекты повреждения ИС, вызванные воздействием ОИН, зачастую трудно поддаются идентификации. Прибор продолжает нормально функционировать, электрические параметры остаются в норме, но падает его надежность.

# Результаты экспериментов по многократному воздействию подпороговых электростатических разрядов

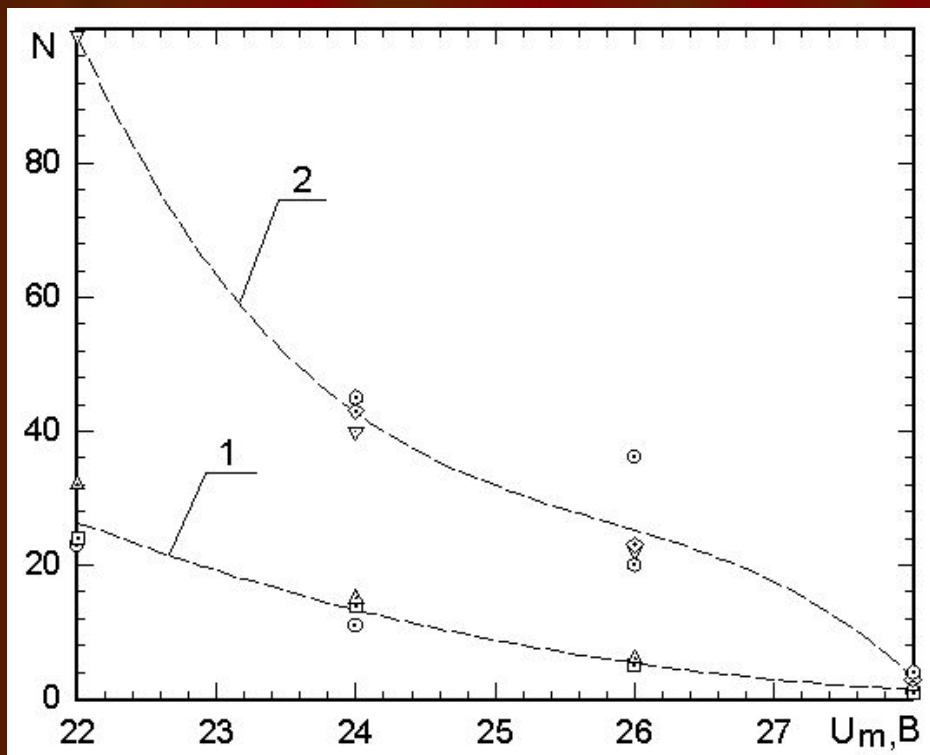


↑ Зависимость количества импульсов ЭСР, приводящих к повреждению БИС КР1005ВИ1, от напряжения ЭСР



↑ Зависимость количества импульсов ЭСР, приводящих к повреждению ИС К561ЛН2, от напряжения ЭСР для импульсов различной полярности

## Результаты экспериментов по многократному воздействию подпороговых ОИН

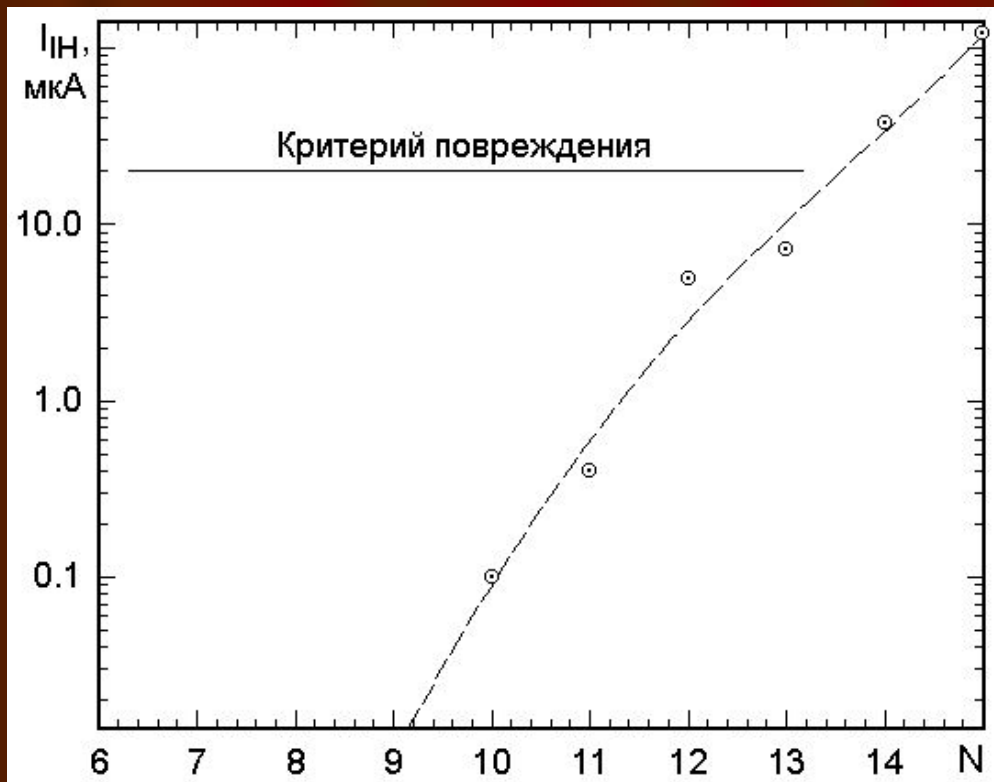


Эксперименты по исследованию ИЭП входных цепей ИС 1533ЛАЗ показали, что наиболее критичным параметром является входной ток высокого уровня. Эксперименты были выполнены при комнатной температуре и номинальном напряжении питания (+5 В). Вначале наблюдается параметрический отказ по входному току, а затем, при подаче дополнительных импульсов, - функциональный отказ (отсутствие переключения).

Зависимость числа импульсов длительностью 10 мкс, необходимых для повреждения ИС 1533ЛАЗ по входу, от амплитуды напряжения: 1 - параметрический отказ; 2 - функциональный отказ



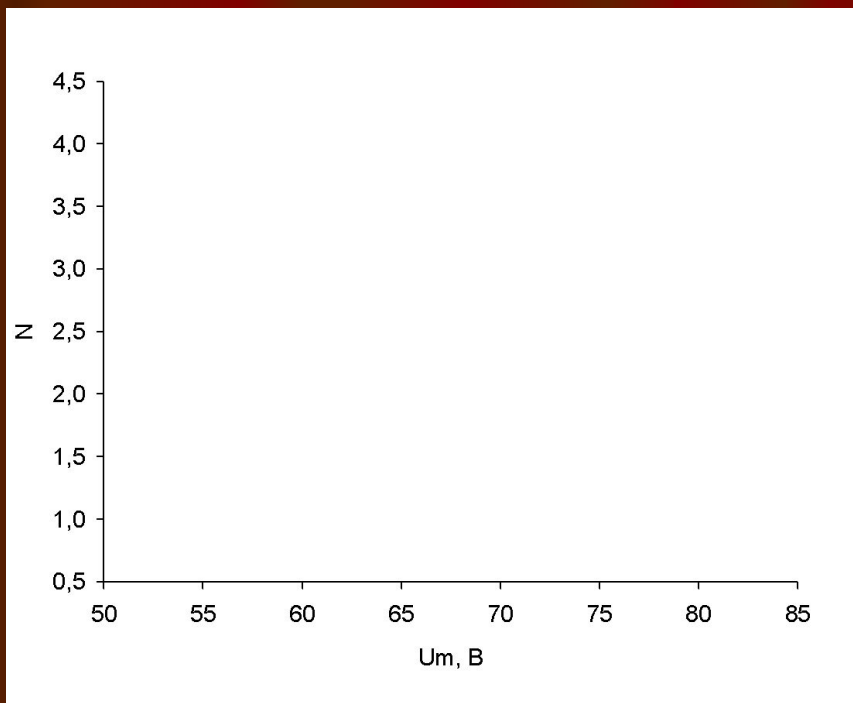
## Результаты экспериментов по многократному воздействию подпороговых ОИН



С целью определения вклада каждого импульса в деградацию входного тока высокого уровня ИС, была снята зависимость входного тока от числа воздействующих импульсов длительностью 10 мкс с подпороговой амплитудой 24 В. Результаты экспериментов показывают отсутствие видимой деградации входного тока до тех пор, пока число воздействующих подпороговых импульсов не достигнет 9

Зависимость входного тока высокого уровня ИС 1533ЛАЗ от числа импульсов амплитудой 24 В и длительностью 10 мкс

## Результаты экспериментов по многократному воздействию подпороговых ОИН



Результаты экспериментов показали наличие аддитивного эффекта при воздействии периодических импульсов напряжения с амплитудой ниже порога повреждения по функциональным отказам. На рис. изображена зависимость необходимого количества ОИН длительностью 10 мкс каждый, подаваемых на входную цепь КМОП ИС 537РУ6, для повреждения микросхемы.

Зависимость числа импульсов длительностью 10 мкс, необходимых для повреждения КМОП ИС 537РУ6 по входу, от амплитуды импульса напряжения

## Заключение

- Для предварительной оценки стойкости ЭКБ к воздействию электрических сигналов, вызванных воздействием электризации КА можно пользоваться данными, накопленными в ходе проведения испытаний ПП и ИС на стойкость к воздействию ОИН.
- Необходимо проведение дополнительных исследований по определению стойкости ЭКБ к воздействию многократных импульсов напряжения допороговой энергии с целью выяснения их влияния на электрические параметры ЭКБ и их надежность.