

**ХХХХІV МЕЖДУНАРОДНАЯ (ЗВЕНИГОРОДСКАЯ) КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ  
СИНТЕЗУ**

**Звенигород 13-17 февраля 2017г**

**55 ЛЕТ ЭВОЛЮЦИИ ТОКАМАКОВ  
ВИДИМЫЕ ПРЕДЕЛЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**С.В.Мирнов**

*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» ул Пушкиновых 12 АО Троицк,  
Москва 108 840 РФ*

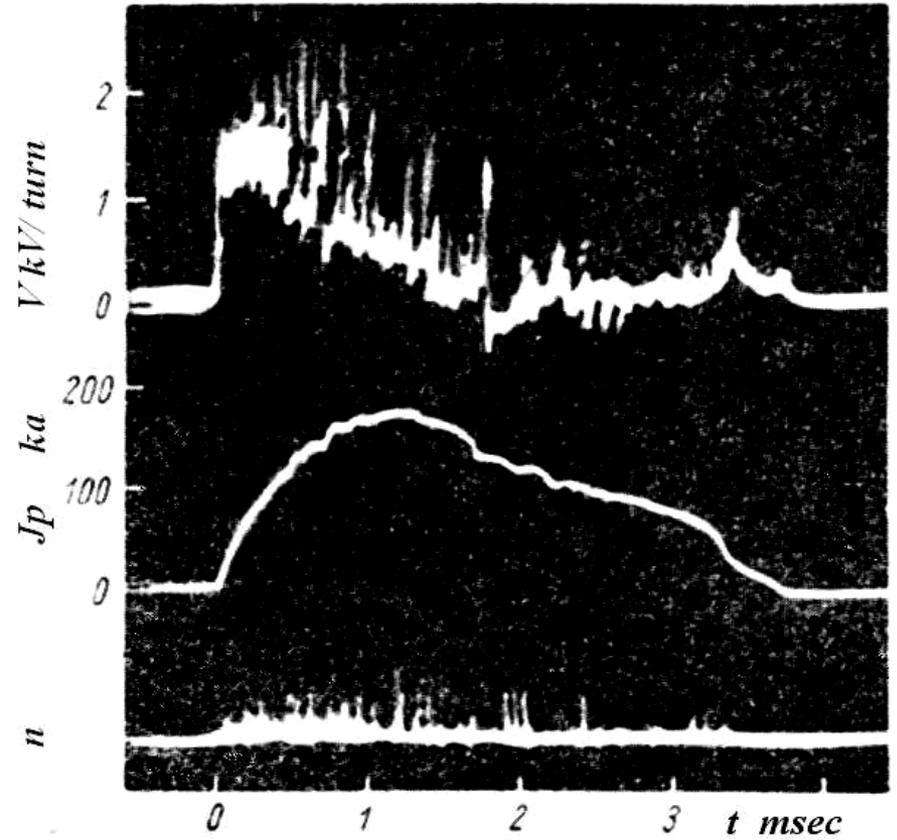
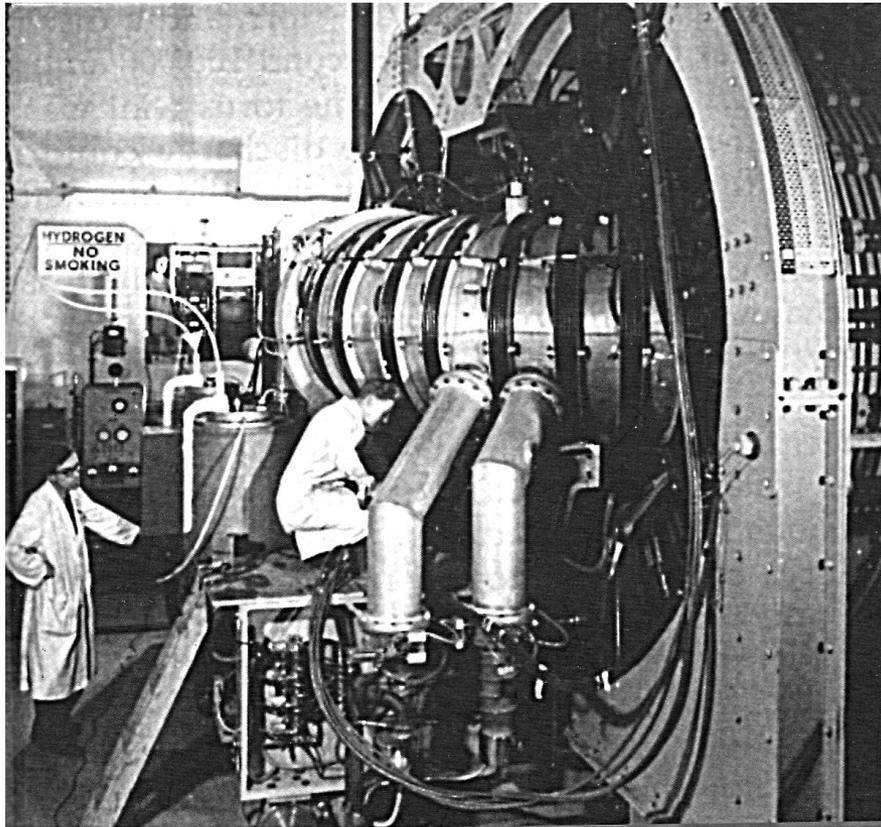
*НИЯУ МИФИ Каширское ш. 31 Москва, 115409 РФ*

**1. 55 лет назад, зимой 1961-62гг в Отделе Плазменных Исследований (ОПИ) Курчатовского института на токамаке ТМ-2 (токамак малый-2) Е.П.Горбуновым и К.А.Разумовой был впервые получен макроскопически устойчивый плазменный разряд с электронной температурой более чем 100эВ.**

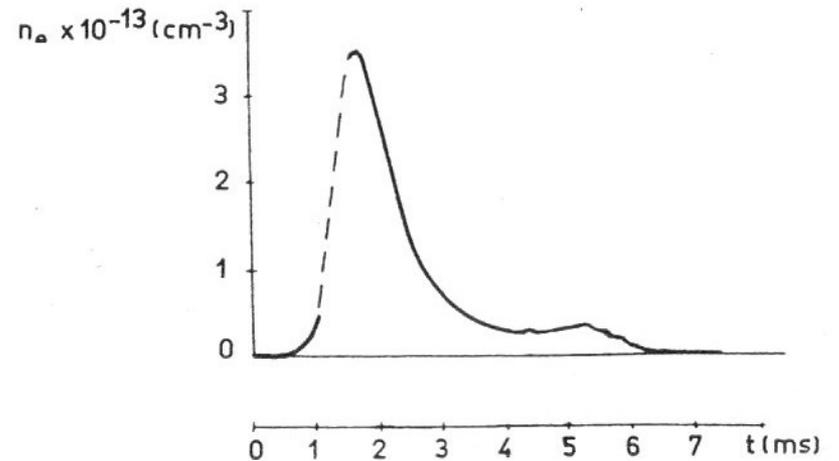
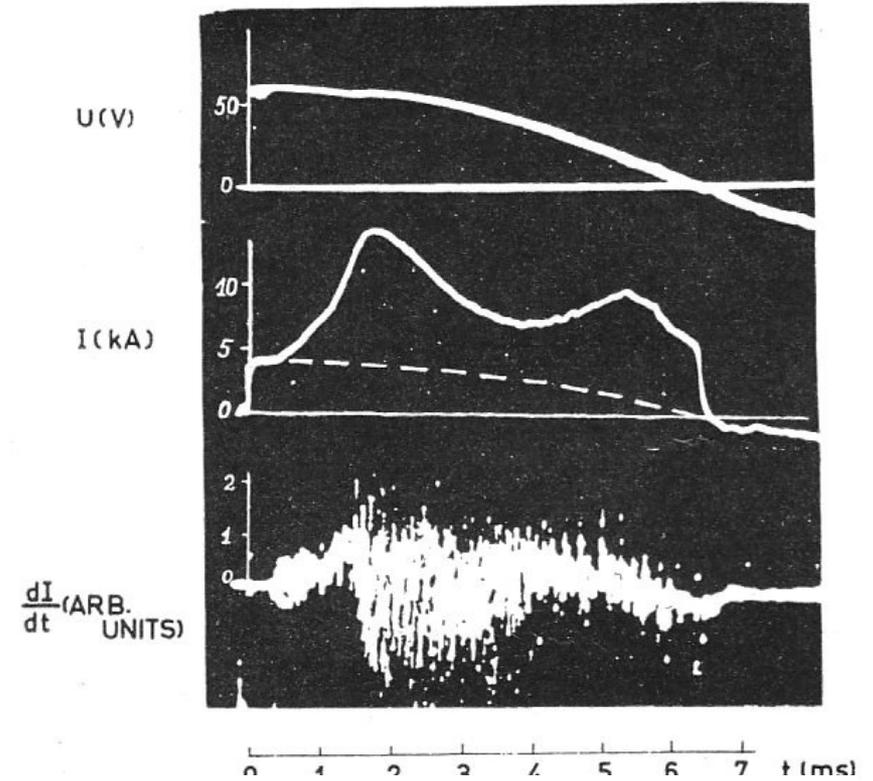
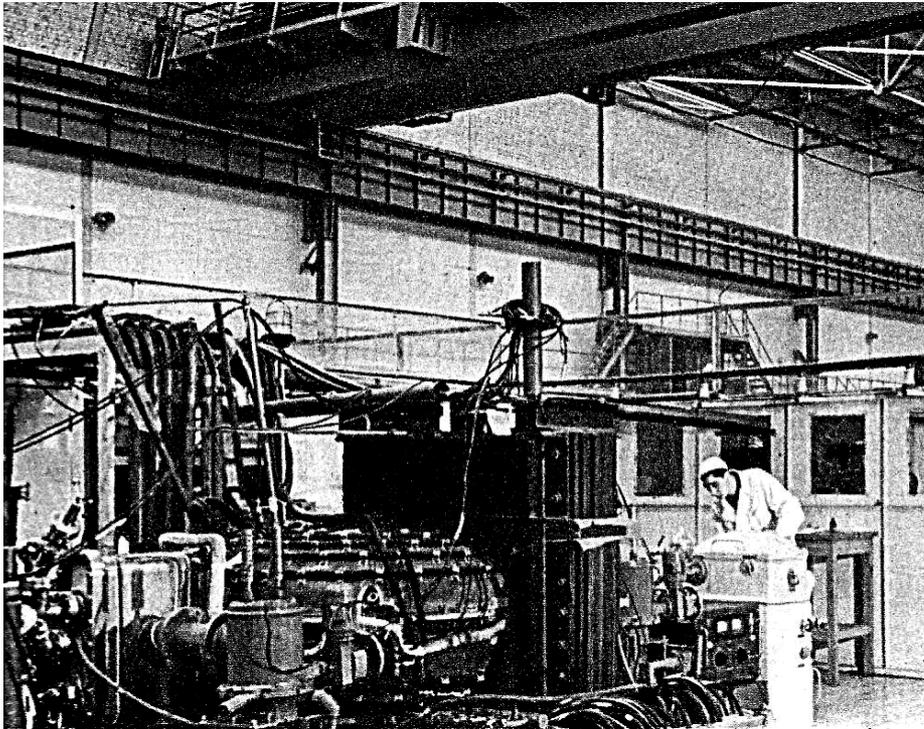
**2. С 17 по 22 октября прошлого года в Киото прошла очередная 26я конференция МАГАТЭ по энергии синтеза. Куда направлен вектор развития токамаков сегодня?**

**55 лет назад до ТМ-2**

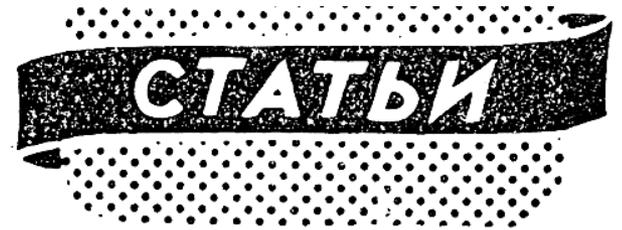
# ZETA (1958 UK)



# Токамак-2 (1961 СССР)



# 1962г

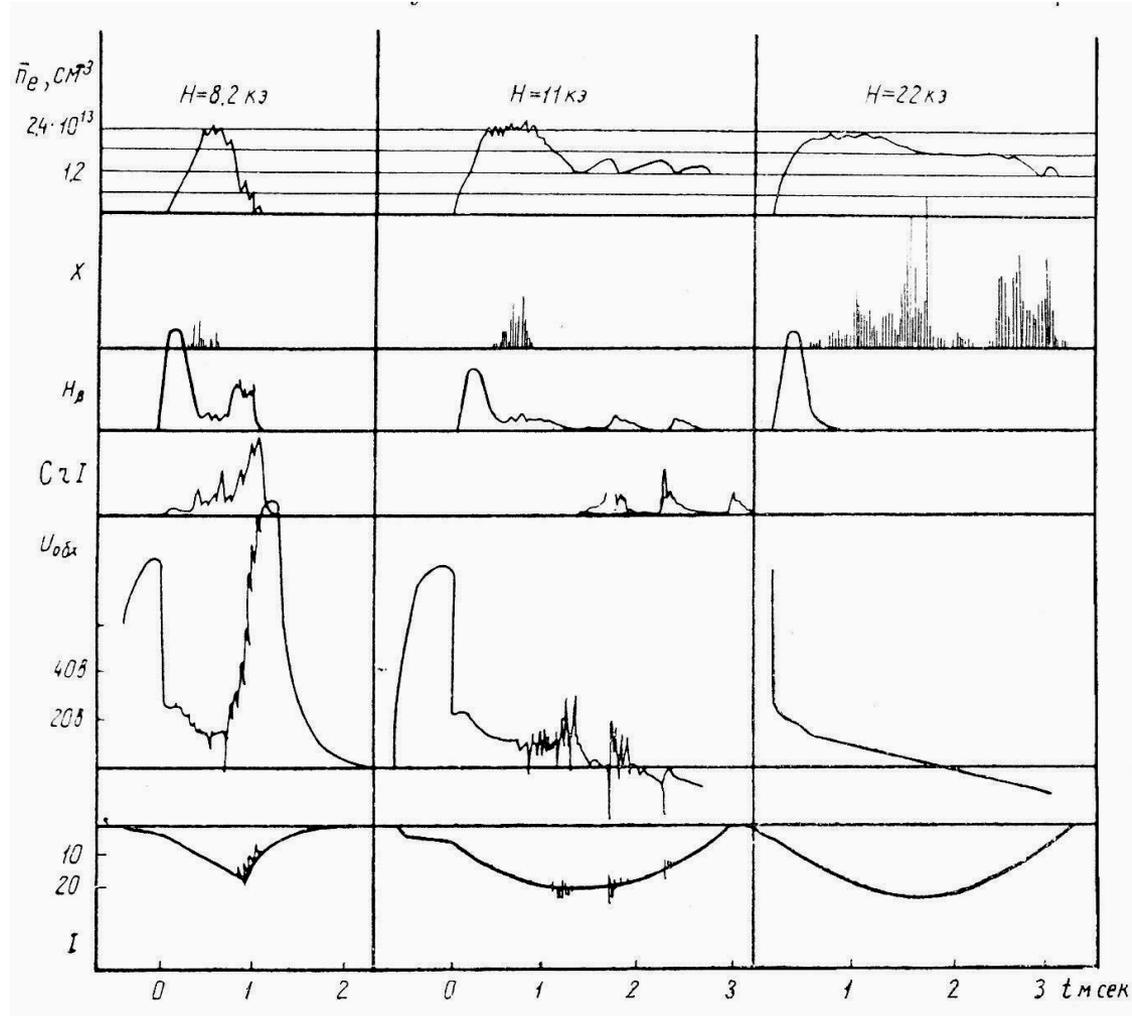
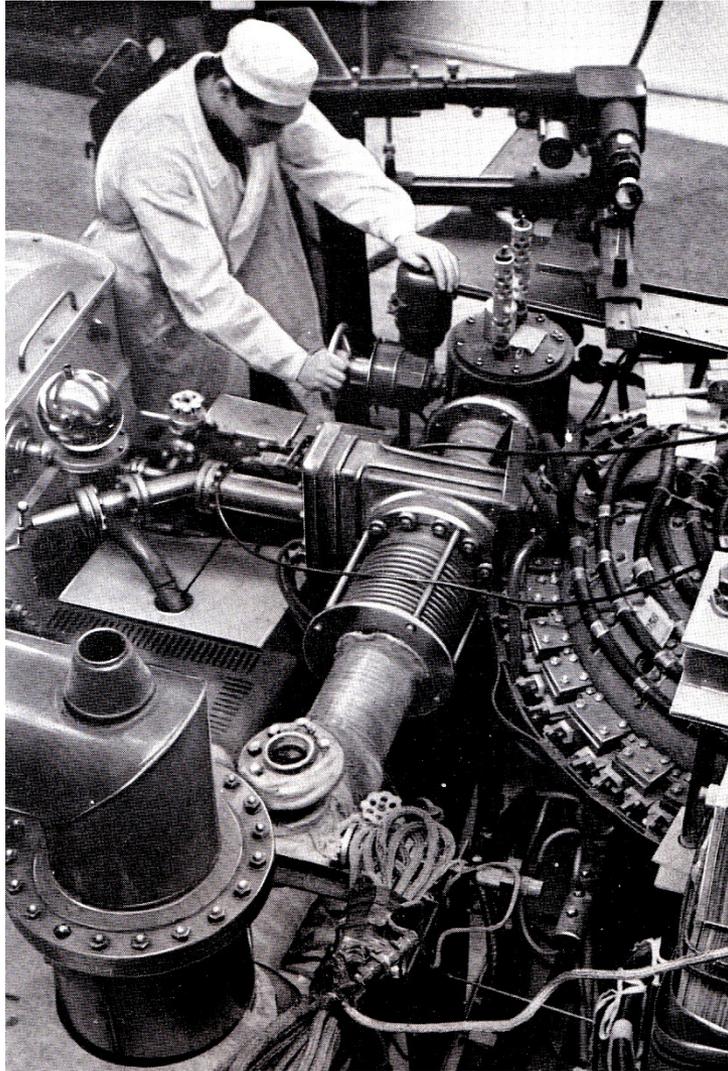


УДК 533.9

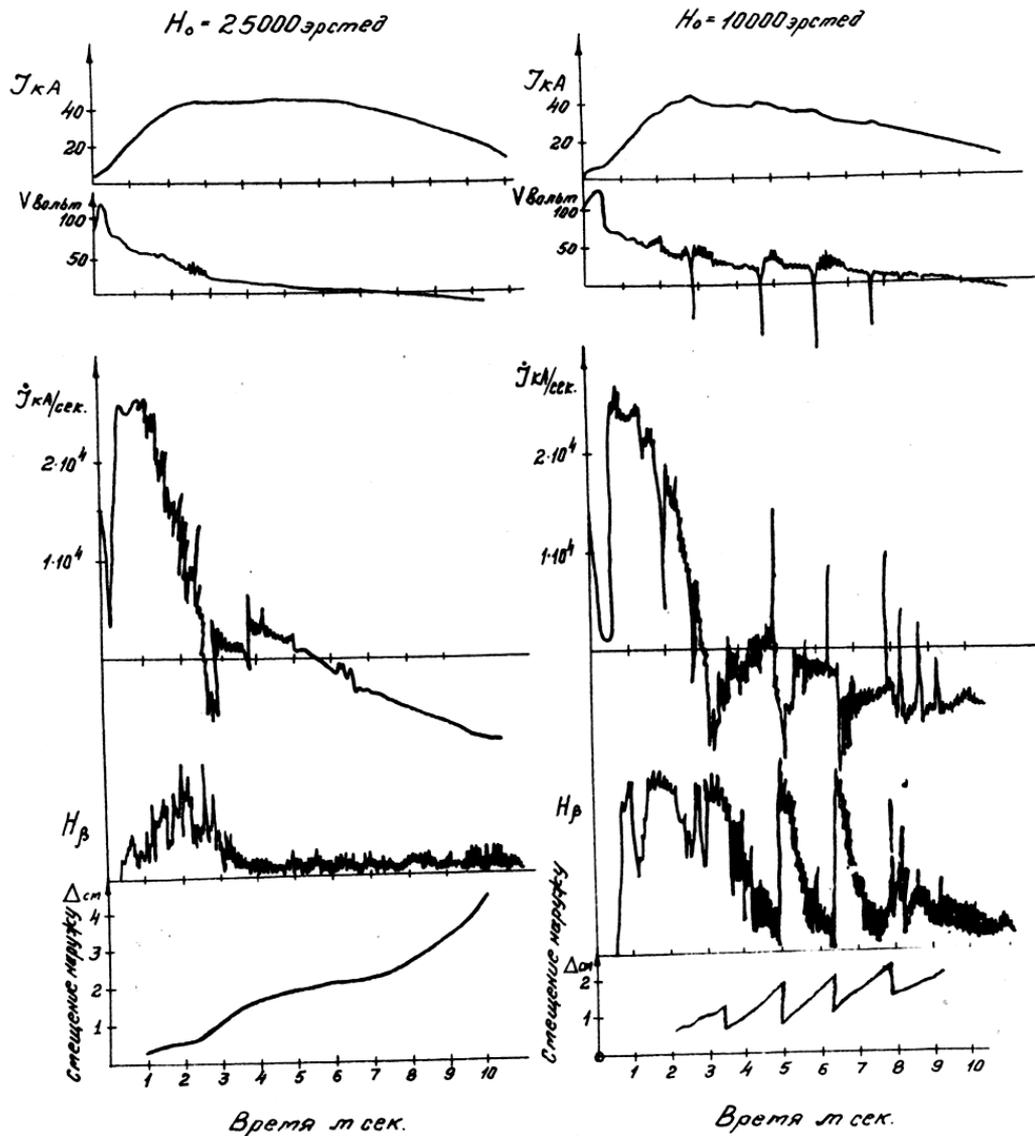
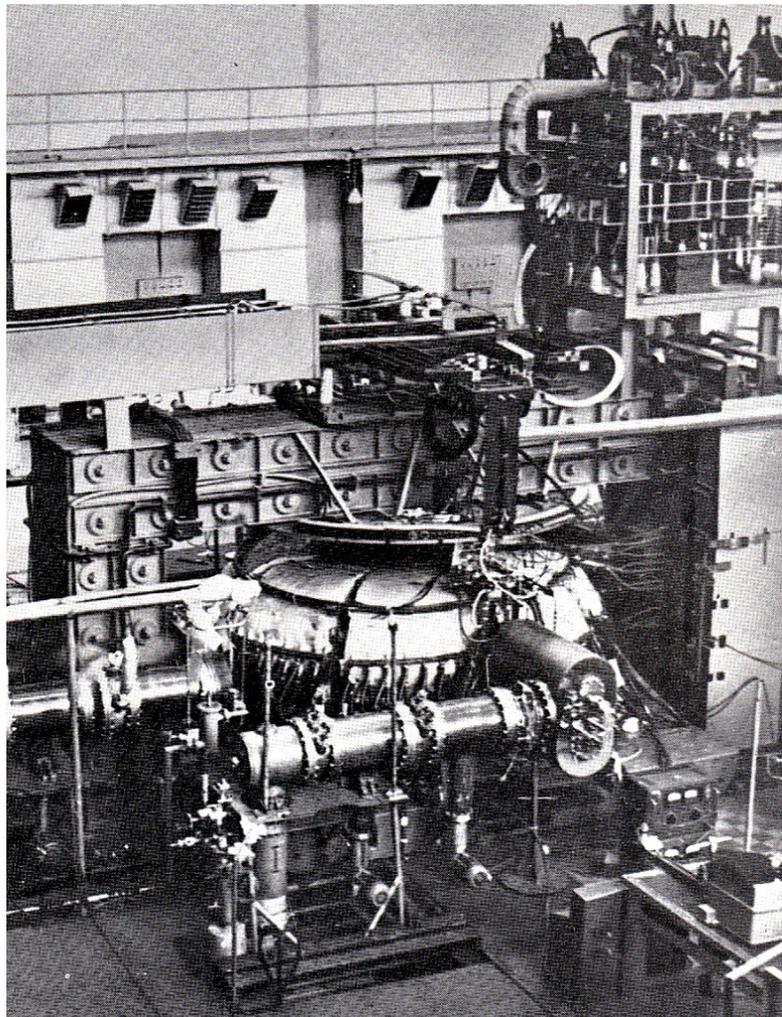
**Влияние сильного магнитного поля на магнитогидродинамическую  
устойчивость плазмы и удержание заряженных частиц  
в установке «Токамак»**

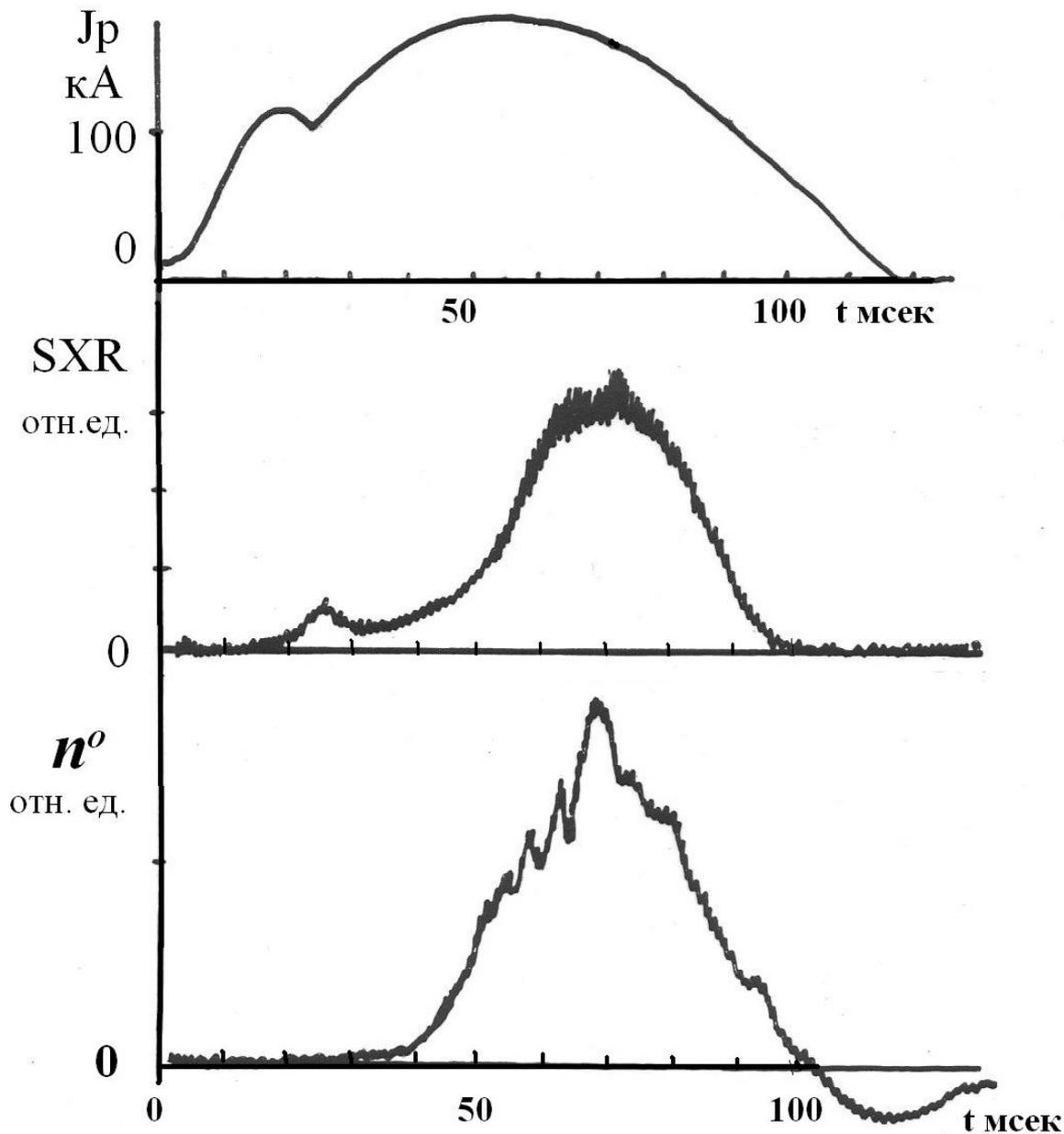
*Е. П. Горбунов, К. А. Разумова*

# TM-2 (1962 CCCP R/a = 0.4/0.08)

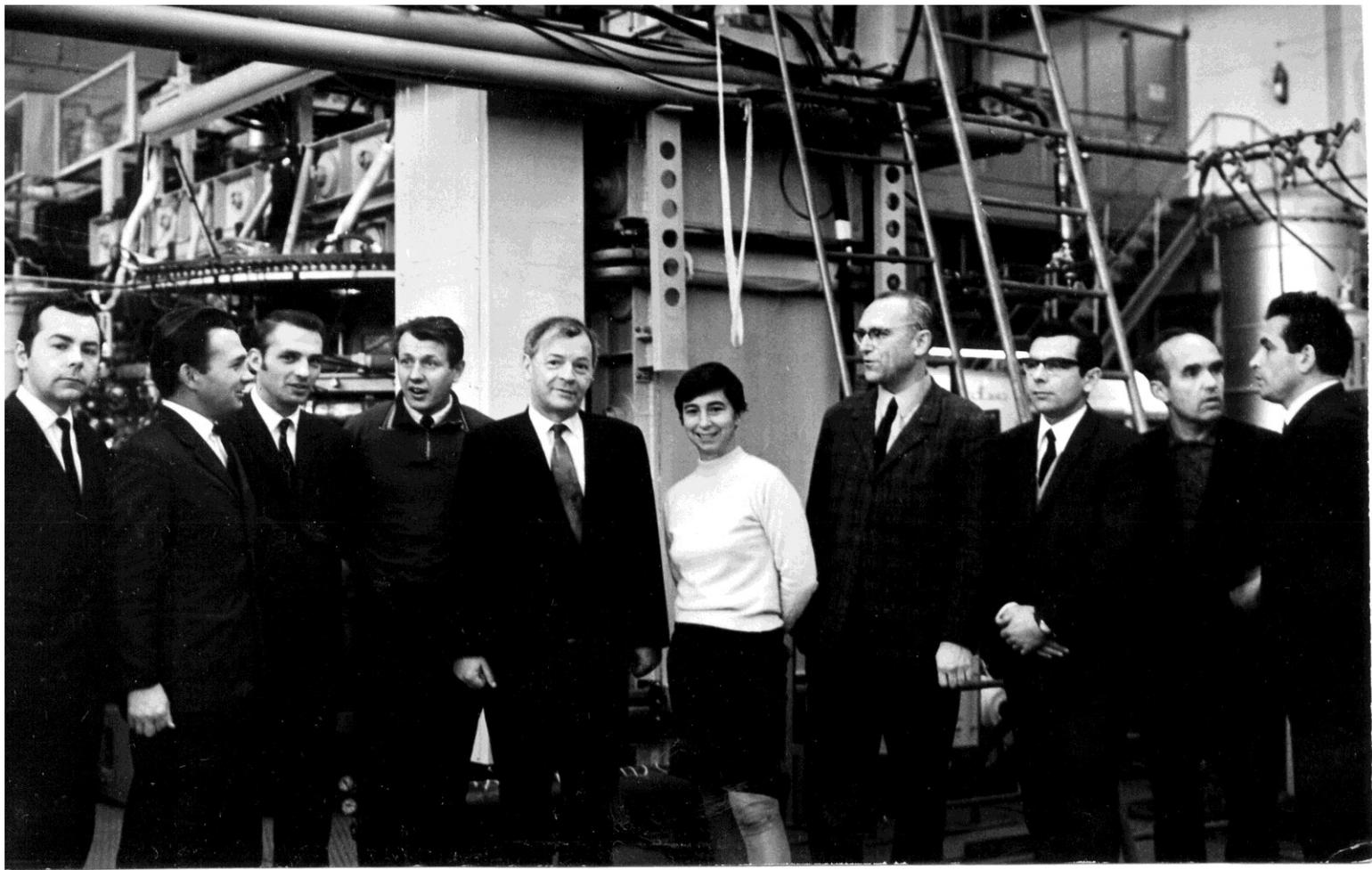


# T-3 (1963 СССР R/a=1/0.15 )





Токамак Т-4  
СССР 1971г



Слева-направо: С.В.Мирнов, Е.П.Горбунов, А.М.Ус, В.С.Стрелков, Л.А.Арцимович, К.А.Разумова, А.К.Спиридонов, В.С.Муховатов, В.Д.Шафранов Д.П.Иванов – Лауреаты Госпремии СССР 1971г.  
**Получение и исследование высокотемпературной термоядерной плазмы на установках «Токамак»**

# Эволюция «пределов токамака» (границ существования устойчивых режимов)

в пространстве параметров:  
ток разряда  $J$ , плотность плазмы  $n_e$

при заданных:  
тороидальное поле  $B$ ,  
геометрия  $R, a$

Поиск законов подобия и инвариантов

# Достижения:

Запас устойчивости  $q(a)$   
удалось снизить с 6 - 7 до 2.5

$$q(a) = V_T a / V_J R$$

"PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED  
NUCLEAR FUSION RESEARCH"

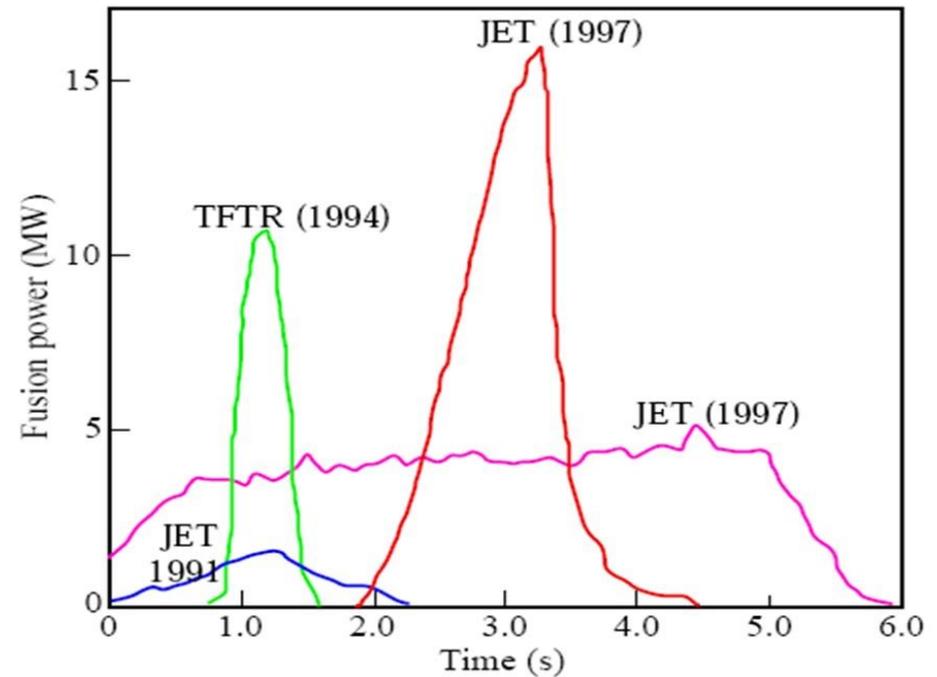
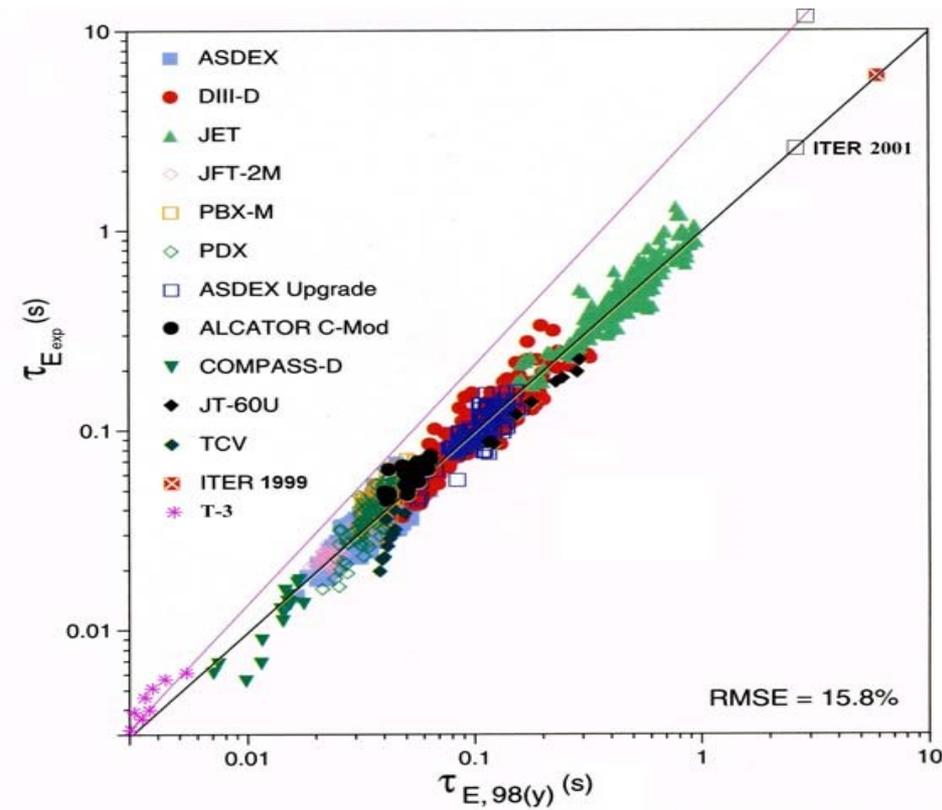
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY  
VIENNA, 1969

Энергетическое время (1968г.)

$$\tau_E \sim \alpha^2 V_J n_e^\alpha \quad \text{где } \alpha \sim 1/3$$

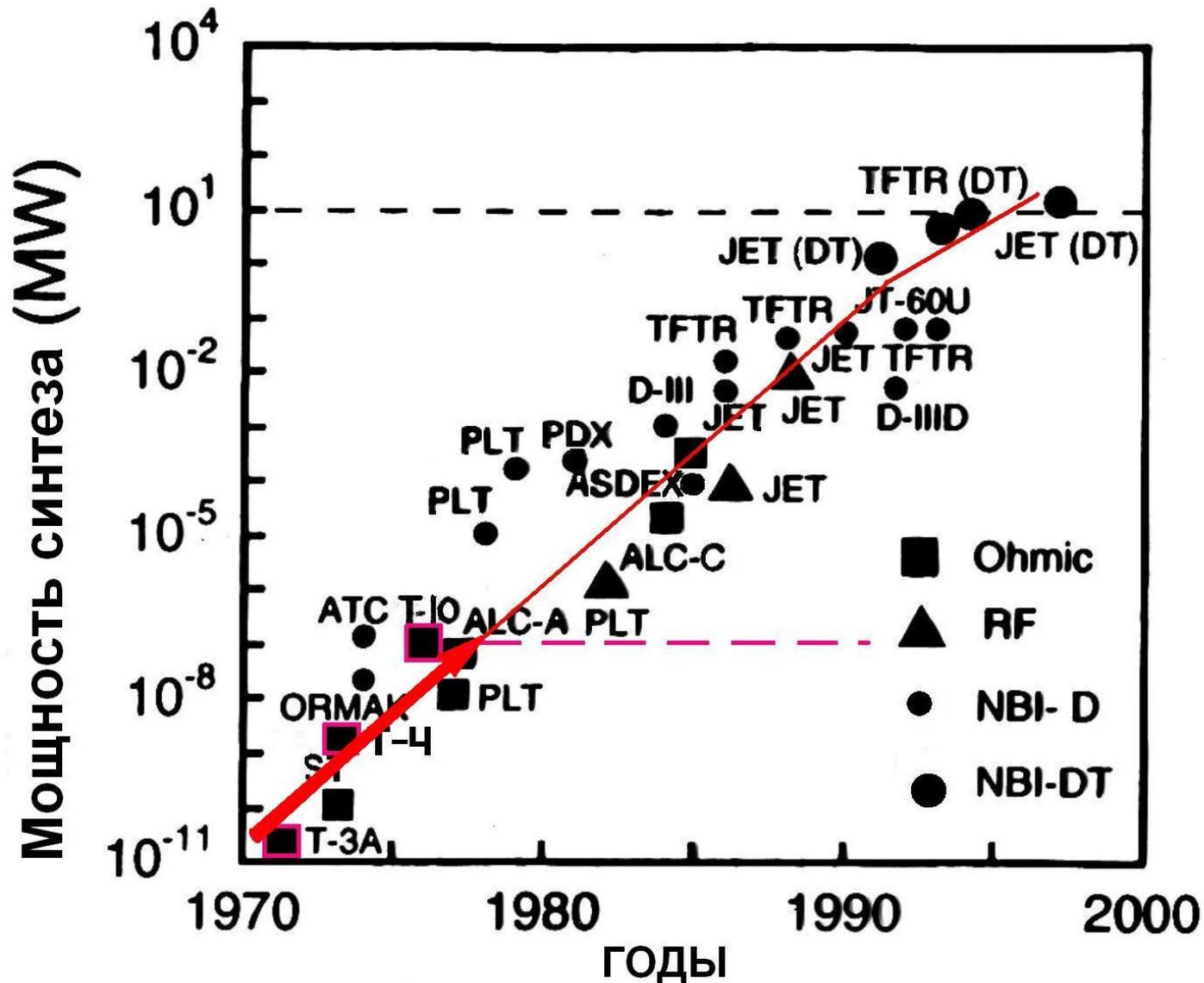
# ITER Physics basis. Nuclear Fusion v39 N12 1999

## Progress in ITER Physics basis. Nuclear Fusion v47 N6 2007



$$\tau_{E,98} = 0,0365 \cdot I_p^{0,97} \cdot B_T^{0,08} \cdot P_H^{-0,63} \cdot n^{0,41} \cdot M^{0,20} \cdot R^{1,93} \cdot (a/R)^{0,23} \cdot k^{0,67} \text{ sec}$$

# Мировая динамика развития управляемого синтеза в токамаках (high performance shots)



# «Пределы токамака». Диаграмма Хюгелла (Textor)

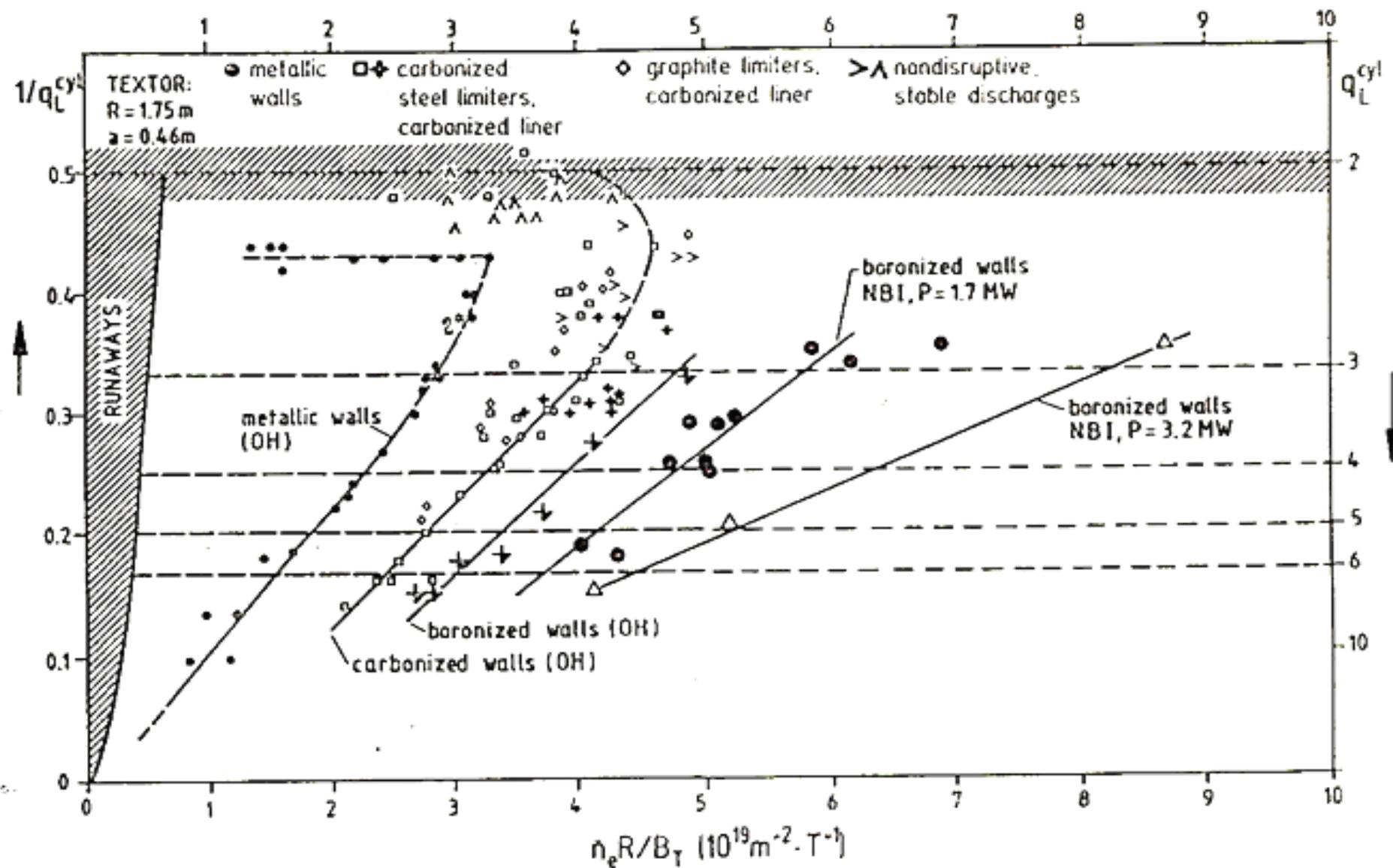
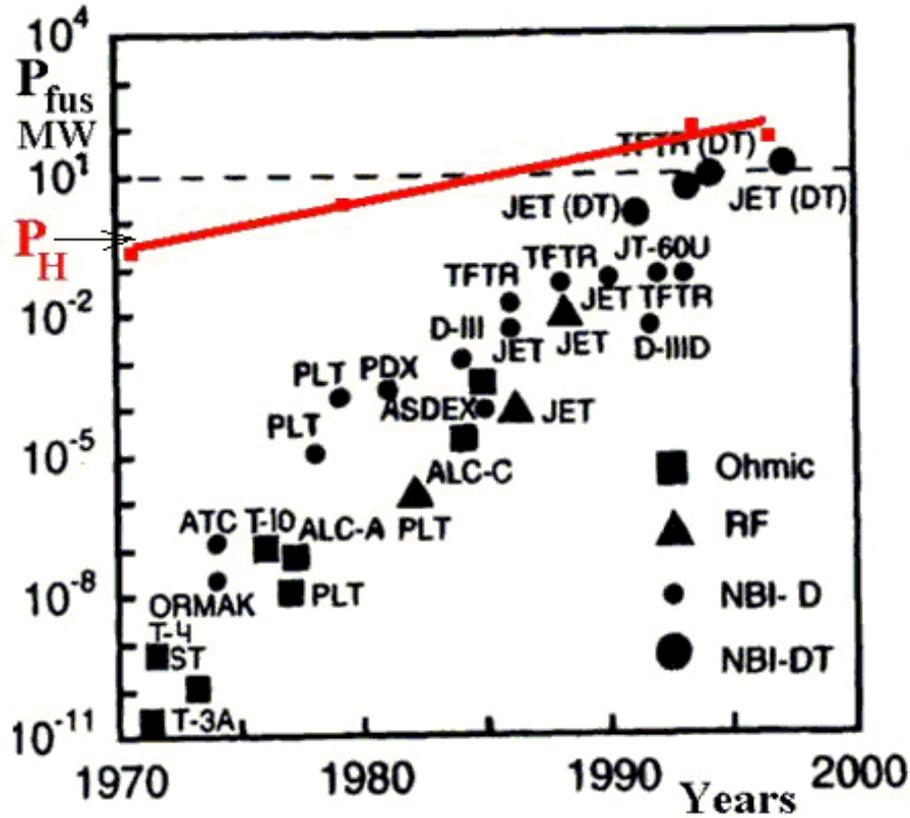


FIG. 2. Operational regime of TEXTOR for different wall conditions. The curves labelled OH represent Ohmic discharges; NBI indicates neutral beam heated plasmas.

# «Поститэровский мир»

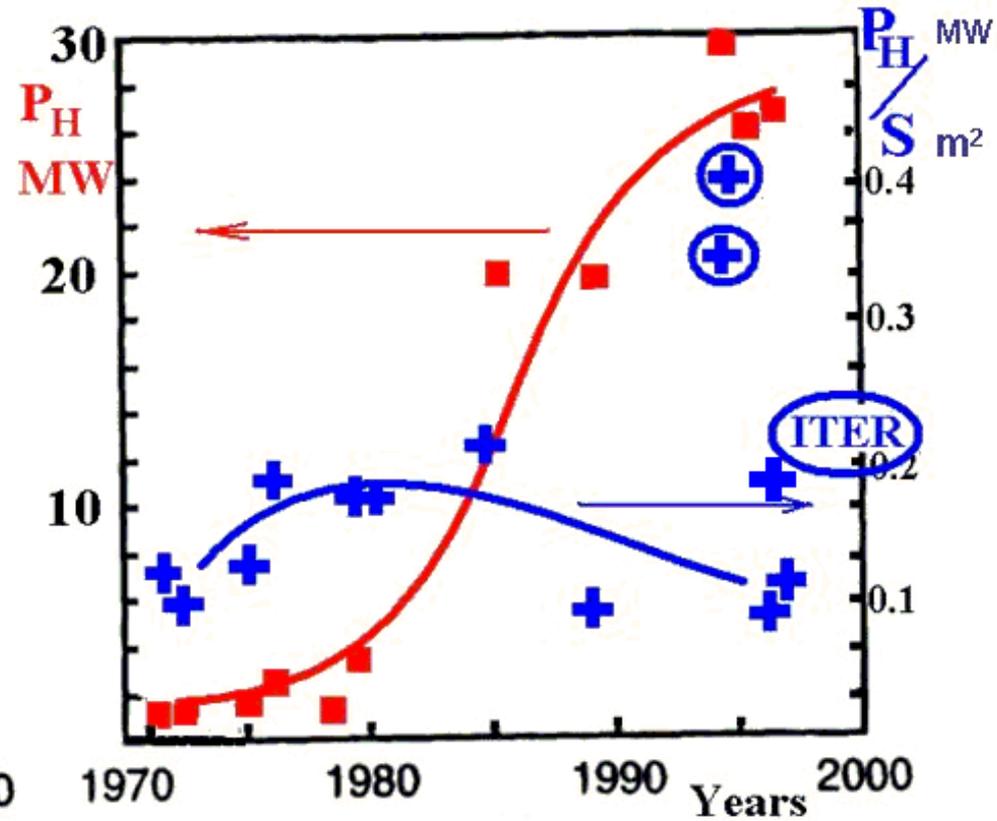
Энергетический «предел»  $P_n / S$

A



A-dynamics of neutron production-  $P_{fus}$  and  $P_H$ ,

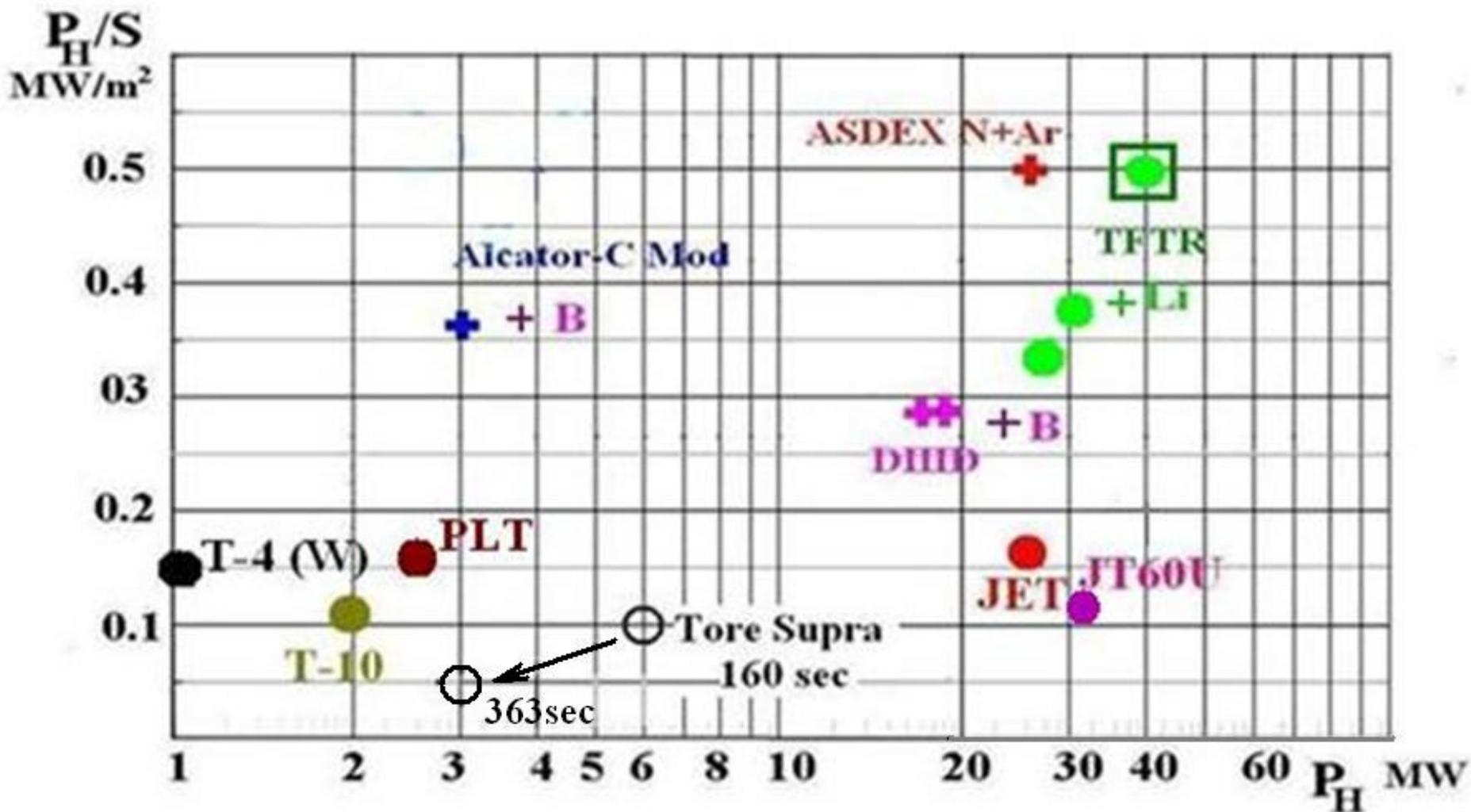
B



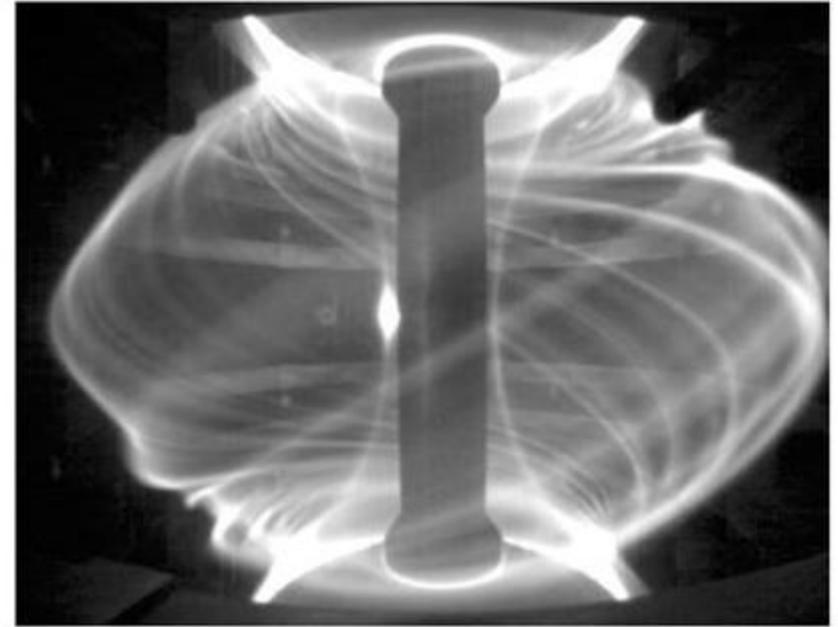
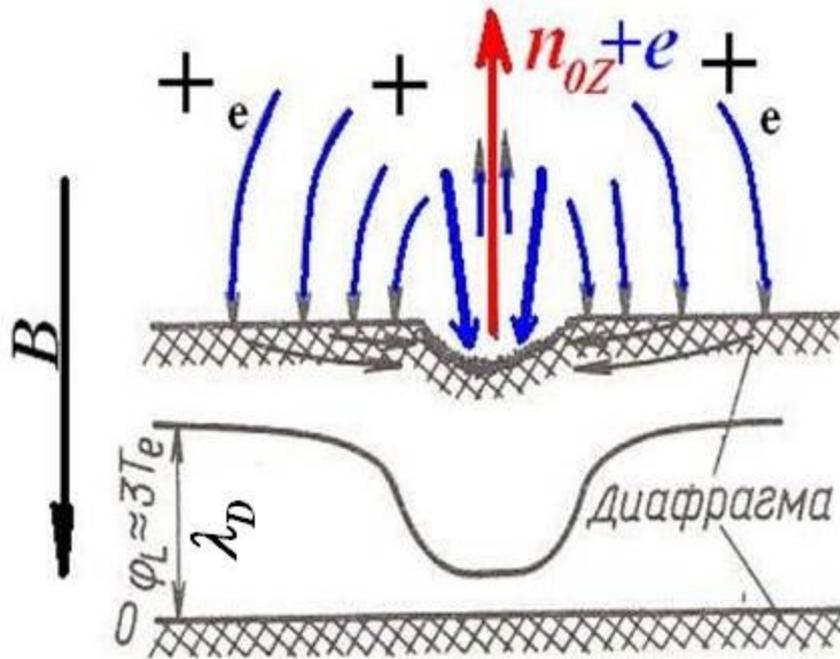
B -  $P_H$  in linear scale, crosses  $q_T = P_H/S$ .

# Универсальный предел по средней тепловой нагрузке на первую стенку токамака

( P-Мощность нагрева/площадь первой стенки S )

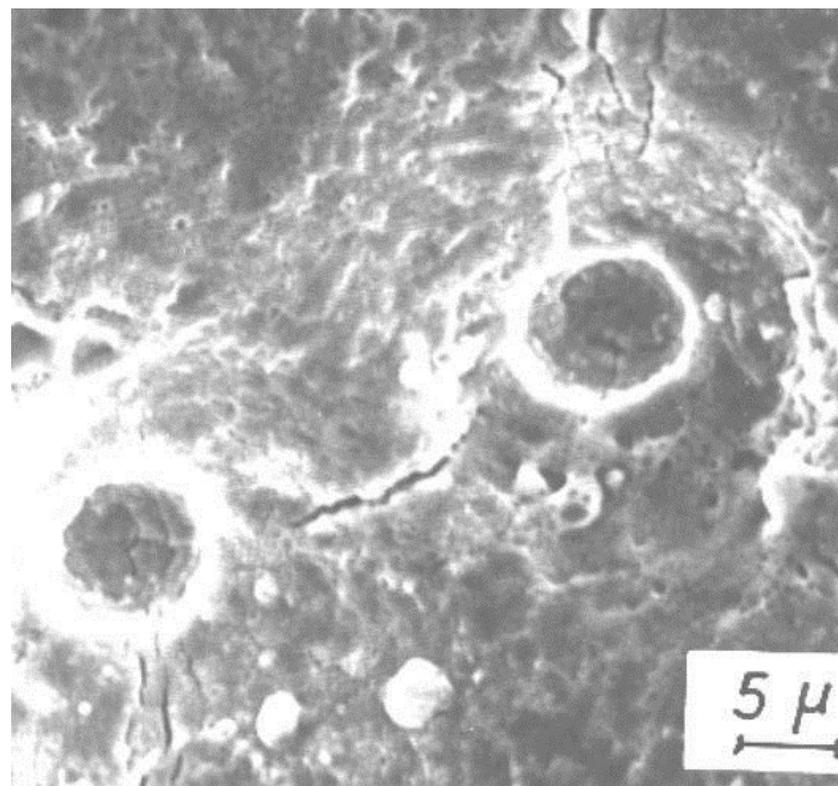
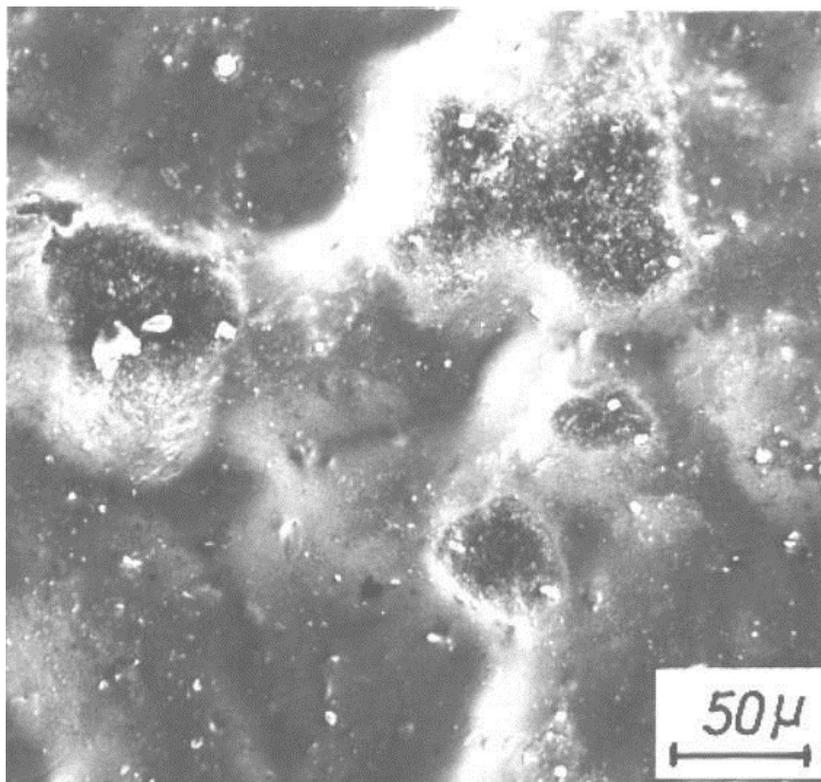


# Схема униполярной дуги



$$\varphi_L \approx 3T_e \text{ при } T_e \approx 30 \text{ эВ}, n_e = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} \quad E_d = \varphi_L / \lambda_D \approx 10^5 \text{ В/см} \sim \sqrt{T_e n_e}$$

**Поверхность лимитера Т-10 (SS) после экспозиции в плазме: слева ионная сторона, справа – электронная.  
(SEM D.Hildebrant et al. 1980 ZIE Preprint 80-4)**



NUCLEAR FUSION: 1962 SUPPLEMENT, PART 1

**ПОЛУЧЕНИЕ ЧИСТОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В  
КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ. ПРОЦЕССЫ, ПРИВОДЯЩИЕ  
К ПОСТУПЛЕНИЮ ПРИМЕСЕЙ В ПЛАЗМУ\***

В. А. СИМОНОВ, Б. Н. ШВИЛКИН, Г. П. КУТУКОВ

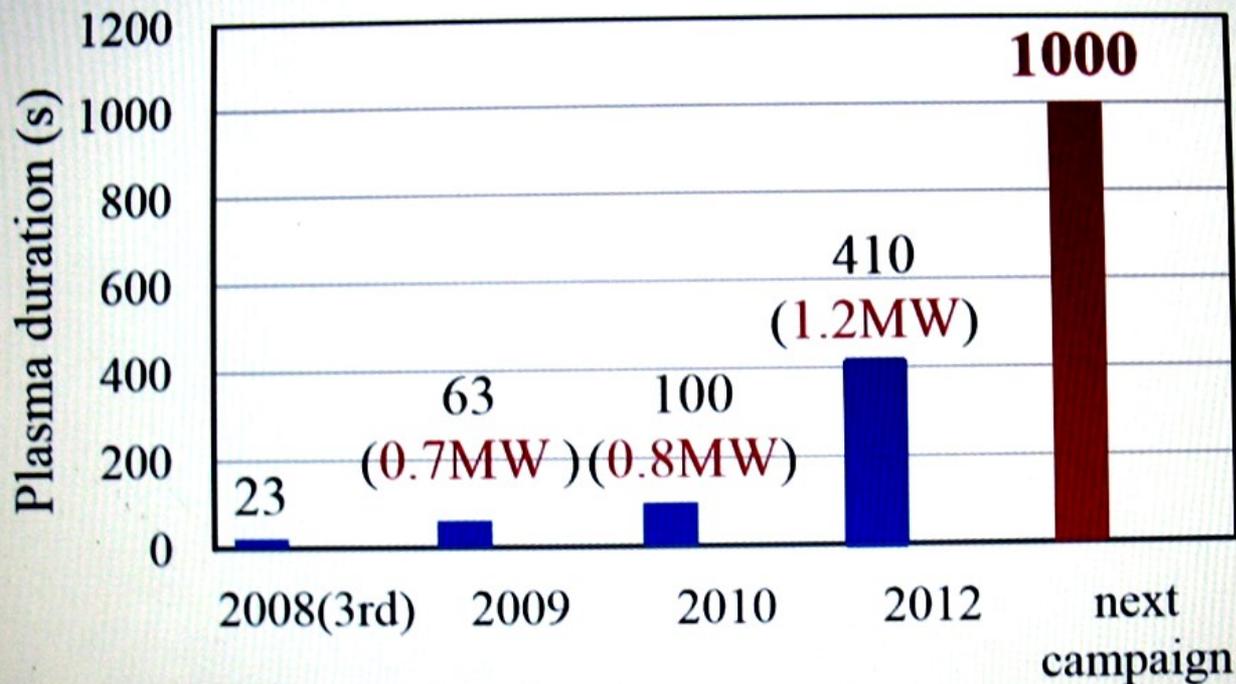
АКАДЕМИЯ НАУК СССР, МОСКВА,

СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

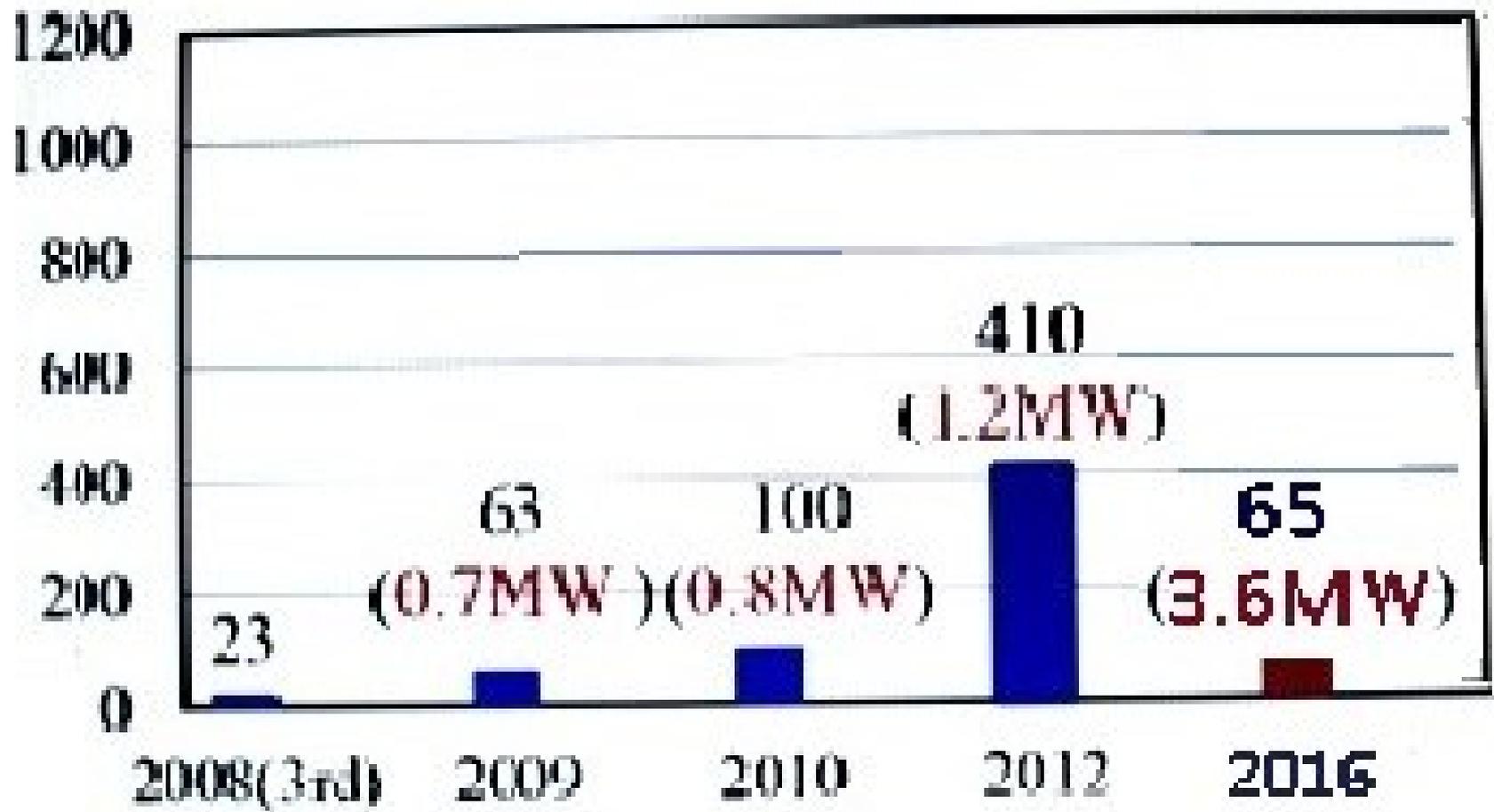
**Сверхпроводящие токамаки**

**Литиевые токамаки**

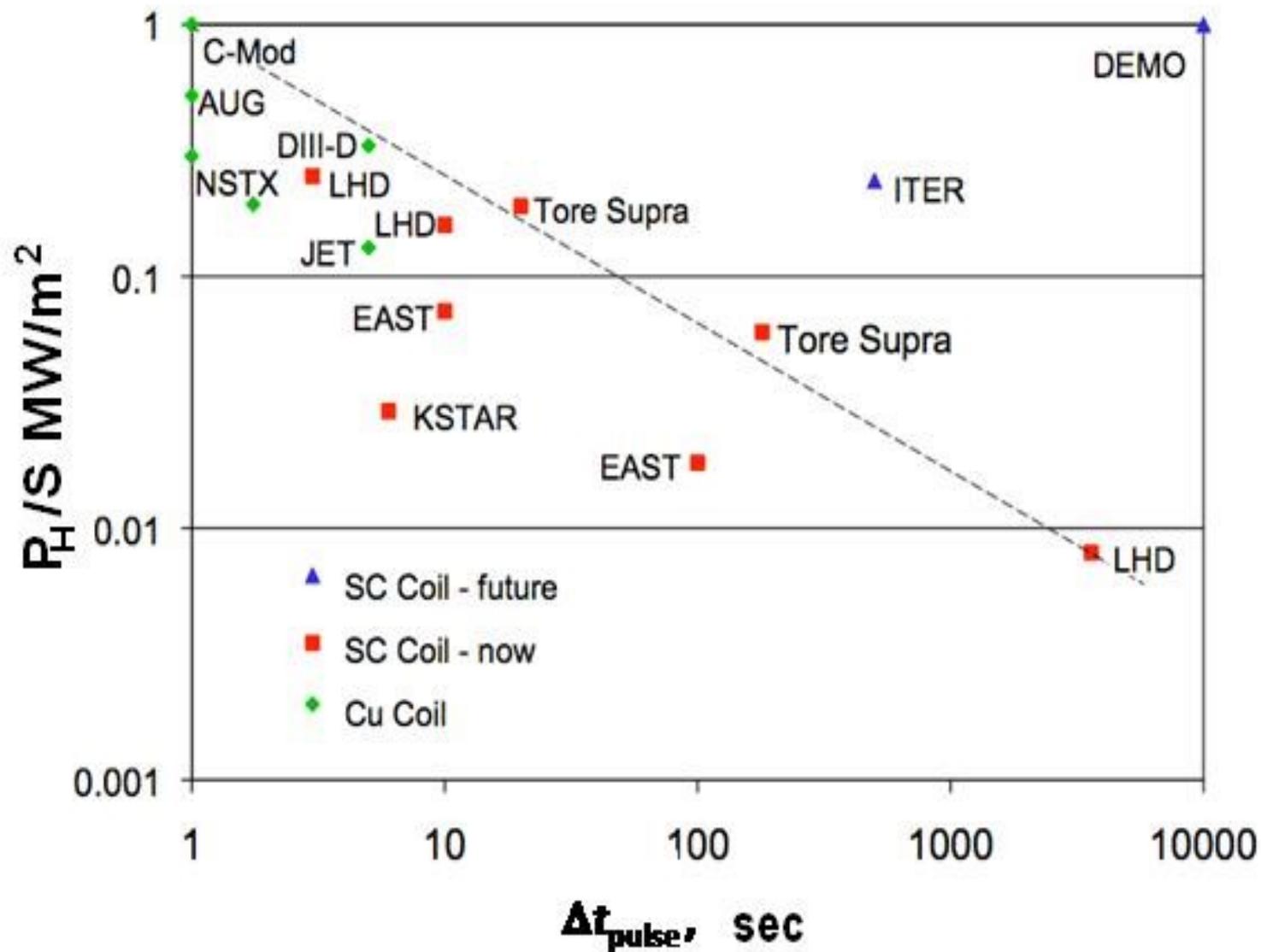
# EAST Long Pulse Discharge History



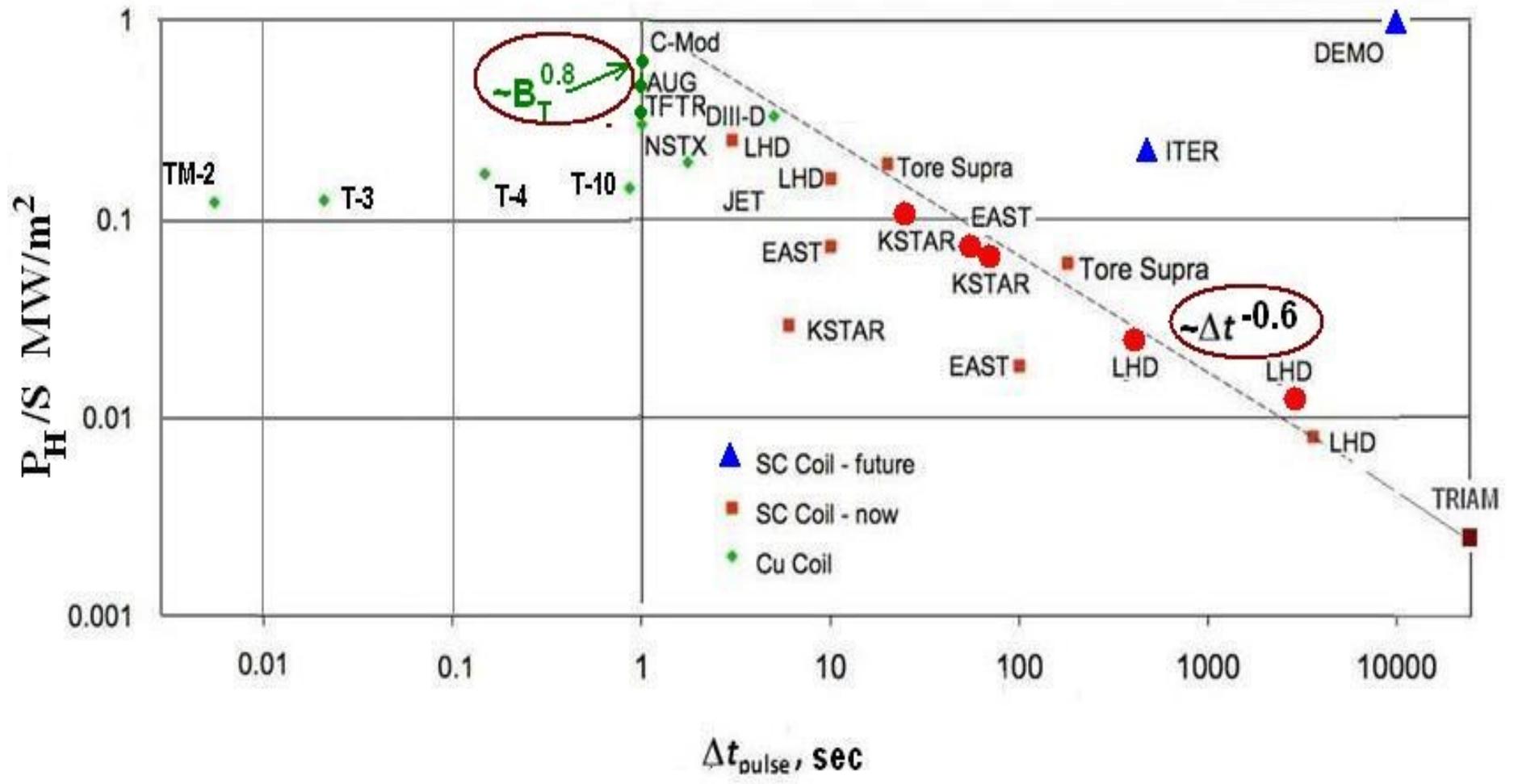
Current Driven by LHW alone

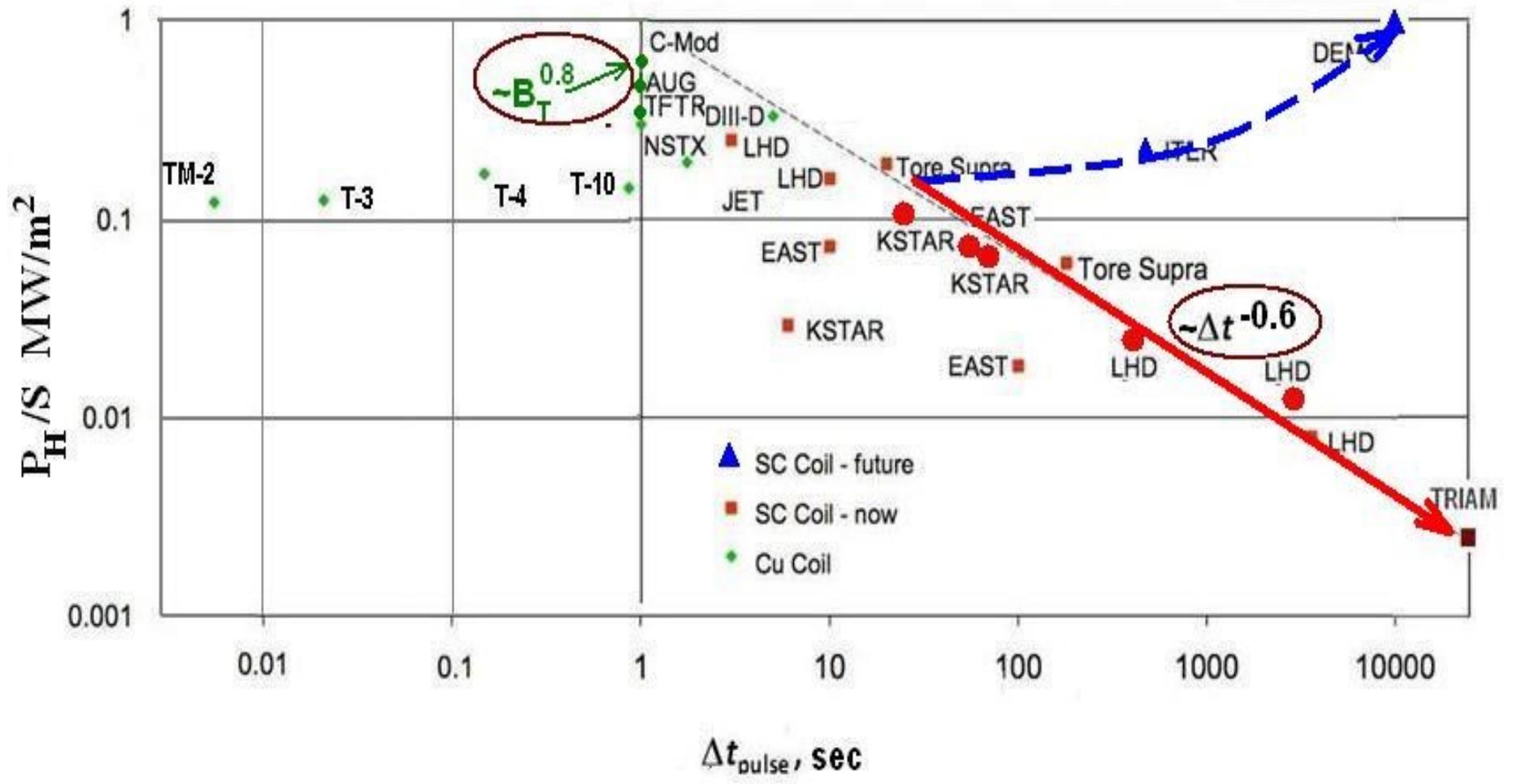


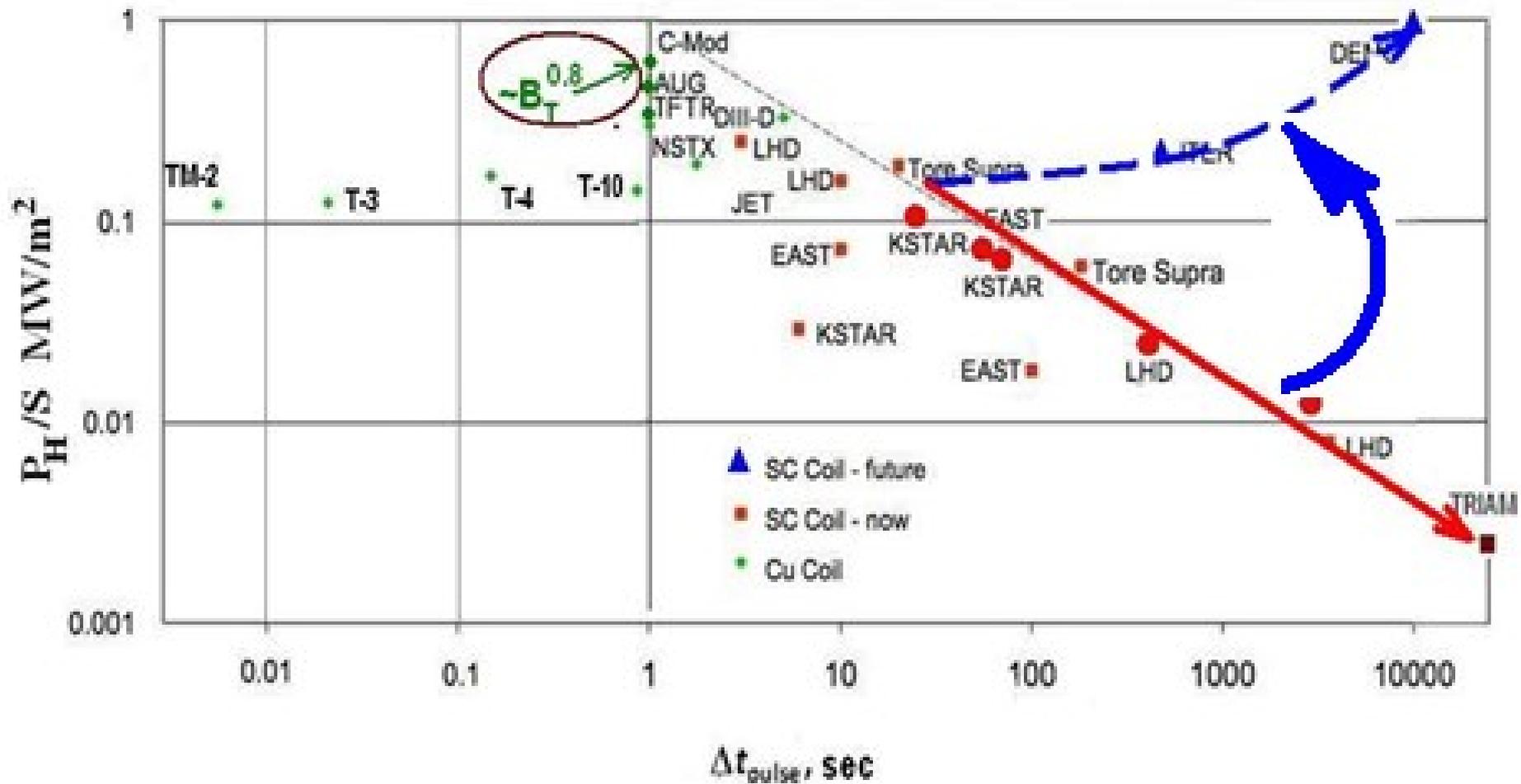




DOE. Fusion Energy Sci. Adv. Com., Rep. Feb. 2012, DOE/SC-0150 Fig. 4.02.



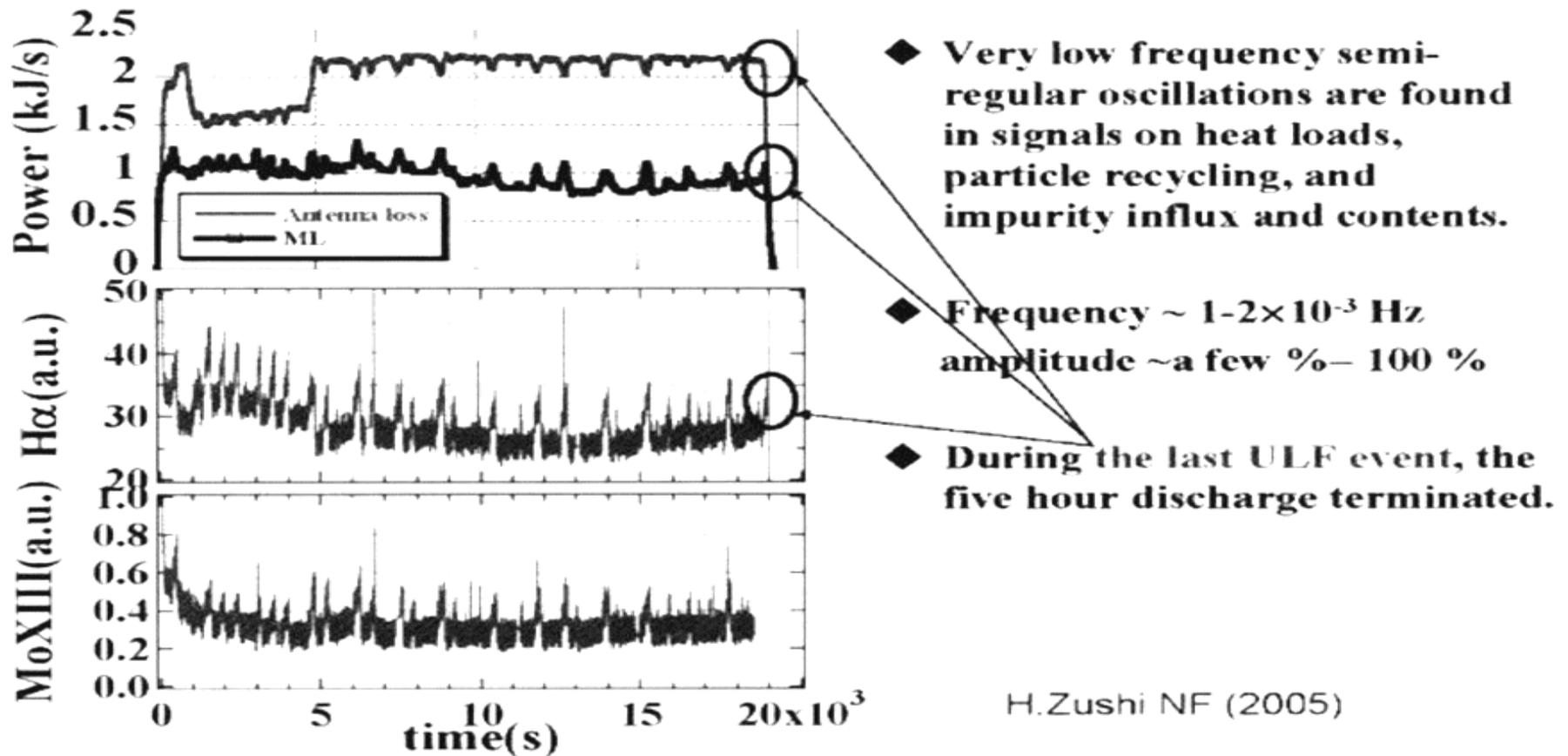




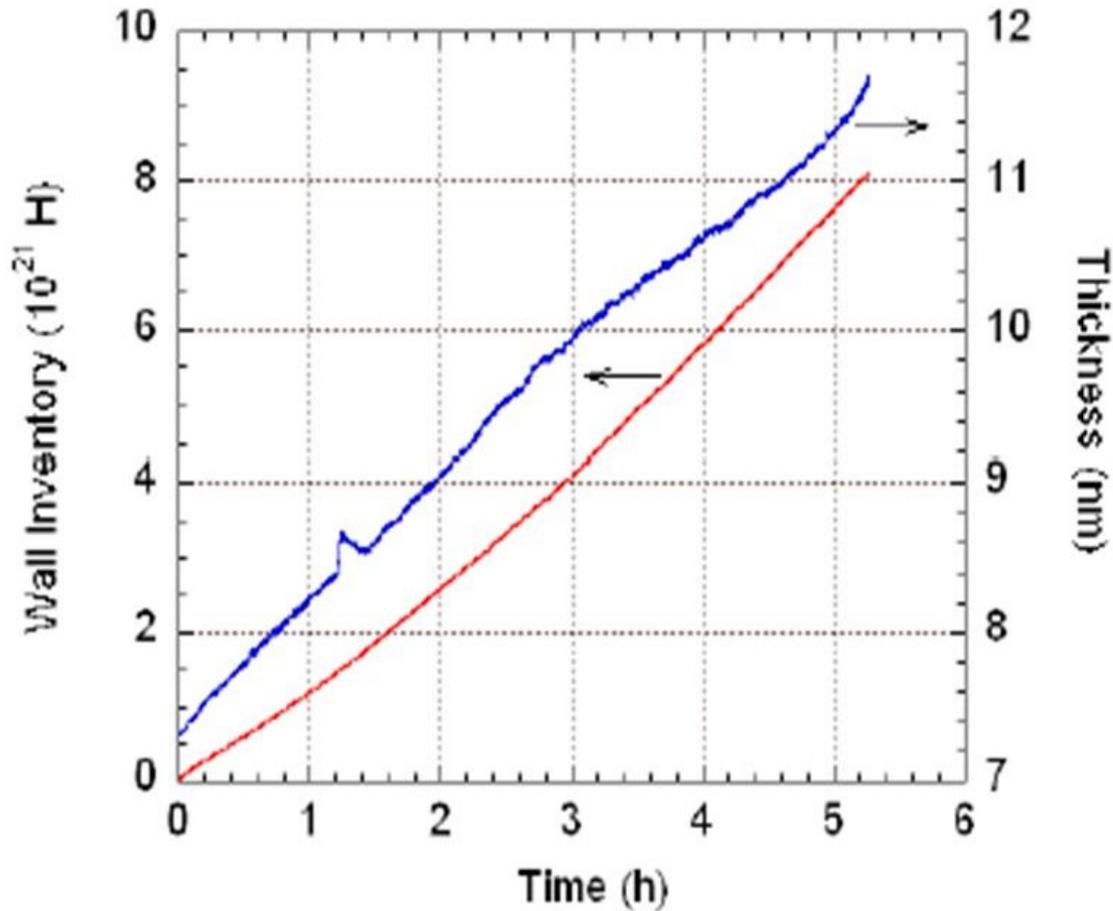
**Что вызывает коллапс  
плазменного шнура?**

Токамак TRIAM-1M, зависимости от времени: Р-мощность энерговклада (ток 16кА поддерживается нижегибридной волной), H $\alpha$ - интенсивность водородного потока из плазмы, Mo- индикатор поступления молибдена с Mo-лимитера в разряд.

## Ultra Low Frequency Events



Соответствующая временная зависимость: толщины молибденовой пленки на диверторной пластине и водородного потока, захваченного стенкой камеры.



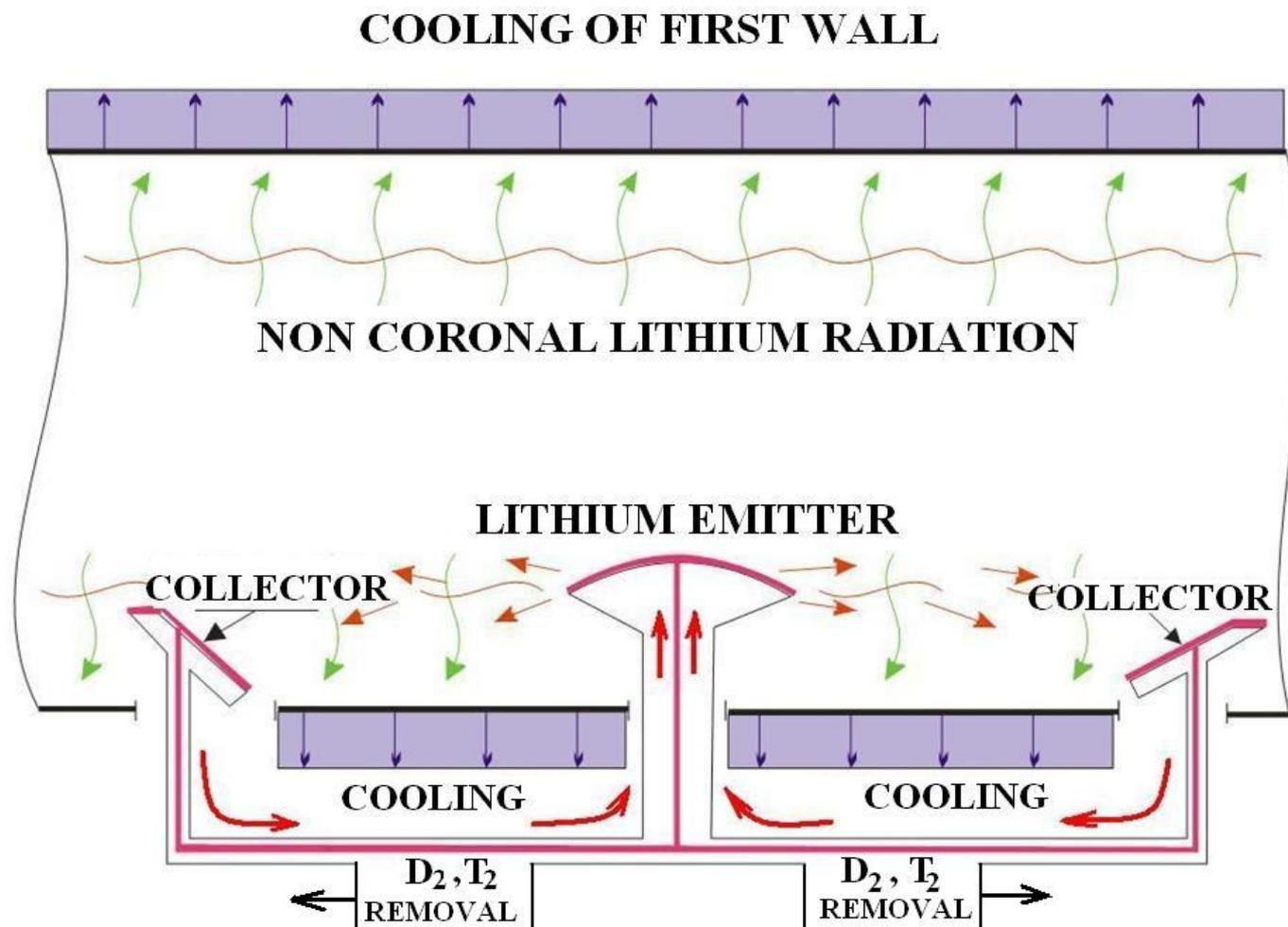
**Приходится предполагать, что рост толщины пленки снижает электрическую «прочность» слоя плазма-стенка !**

## Что делать?

Необходимо научиться выводить «горючее» и продукты эрозии из камеры токамака без нарушения технологического цикла (как минимум вакуума)

**Литий как возможное решение  
проблемы вывода продуктов  
эрозии в процессе  
стационарной работы  
токамака - реактора**

# Схема замкнутого контура циркуляции продуктов эрозии (лития) и «горючего (ДТ)



# Новое в проблеме удаления водорода и лития из камеры литиевого токамака

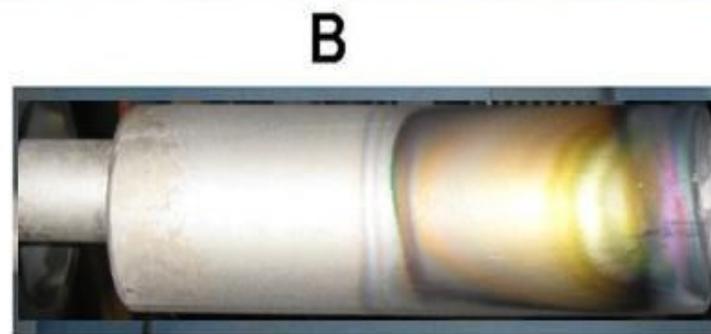
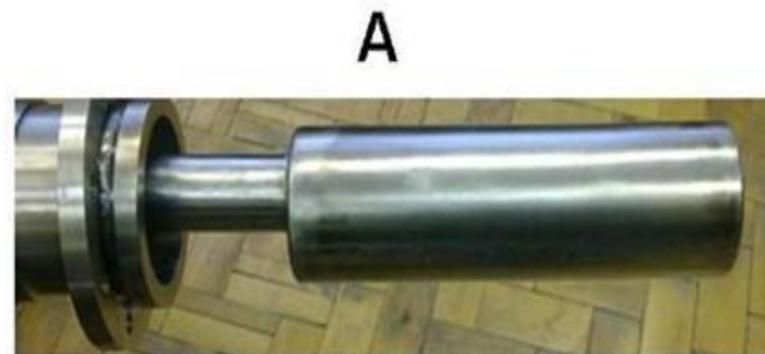
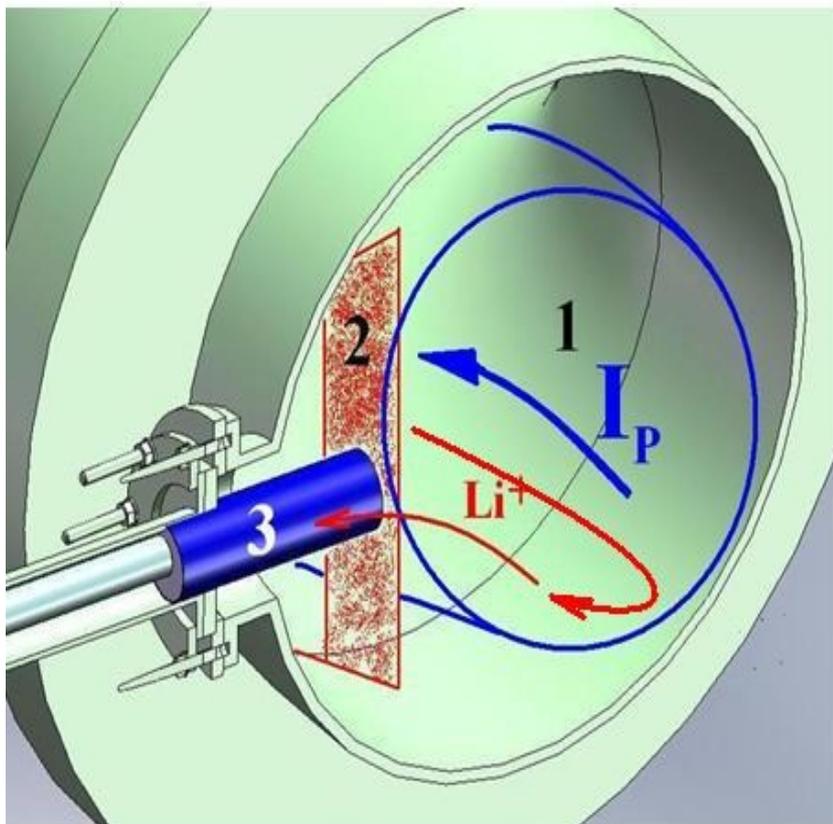
Джурик А.С., <sup>1</sup>Вертков А.В., <sup>1</sup>Жарков М.Ю., Лазарев В.Б., <sup>1</sup>Люблинский И.Е.,  
Мирнов С.В., Отрощенко В.Г., Щербак А.Н. (*Троицкий Институт  
Инновационных и Термоядерных Исследований, Административный округ  
Троицк, Москва, Россия, <sup>1</sup>АО "Красная Звезда", Москва, Россия*)

**17.02.16 МУ-3**

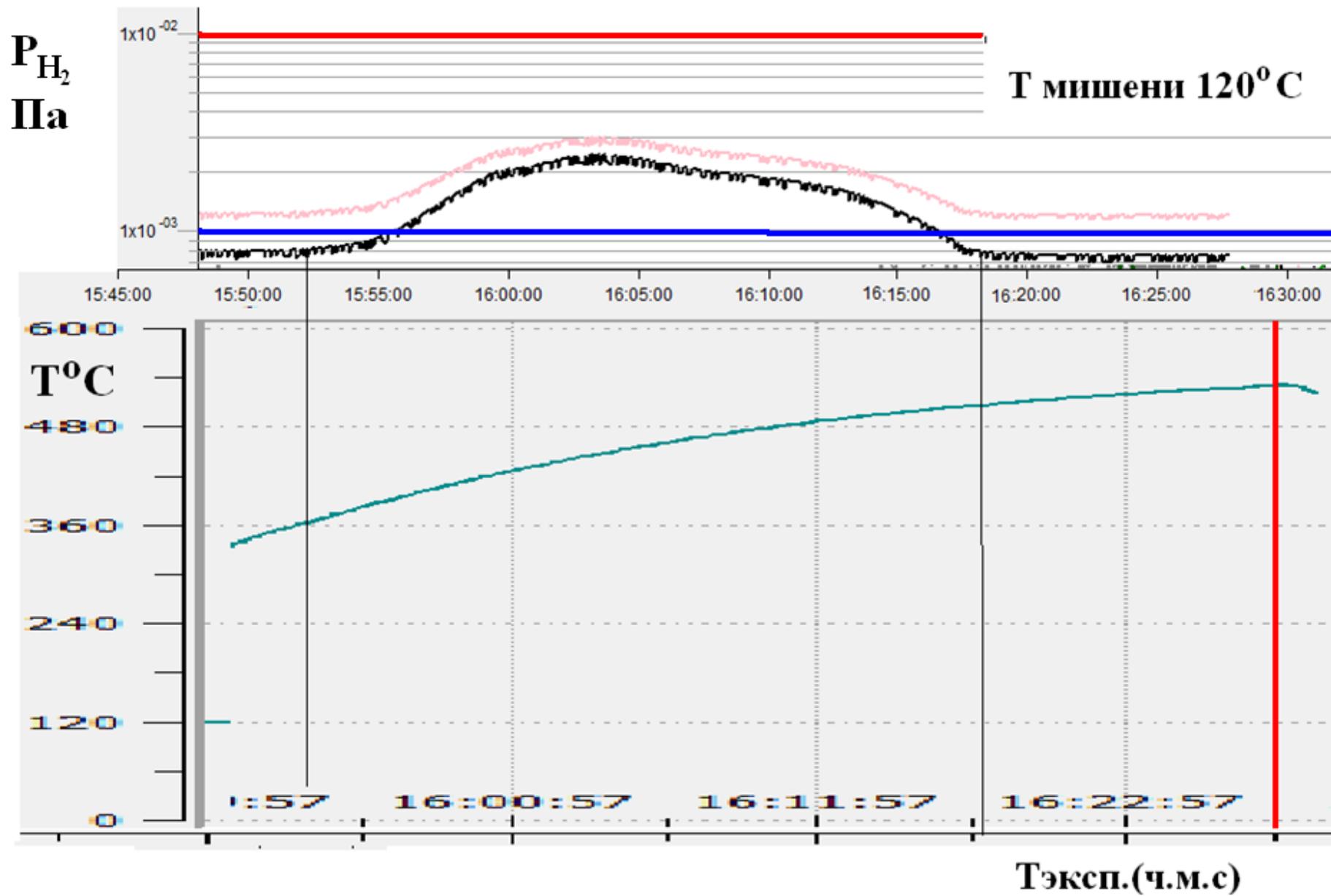
Исследование зависимости сбора лития коллекторной мишенью от  
температуры поверхности мишени в системе эмиттер-коллектор на  
токамаке Т-11М.



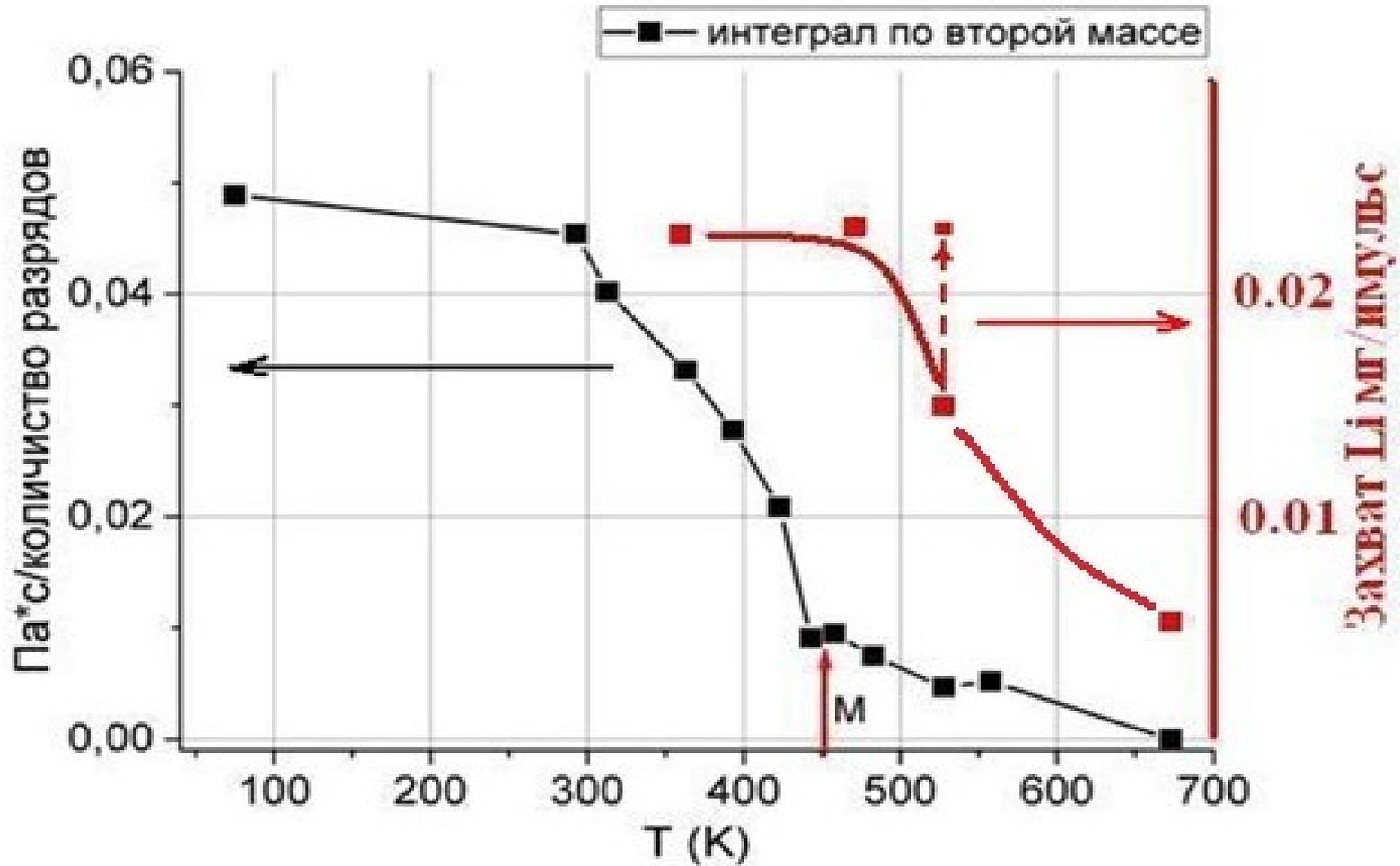
# Сбор лития в Т-11М



# ТДС спектр выхода водорода из литиизованной мишени



# Захват **лития** и **водорода** из плазменного потока в Т-11М (ТРИНИТИ)



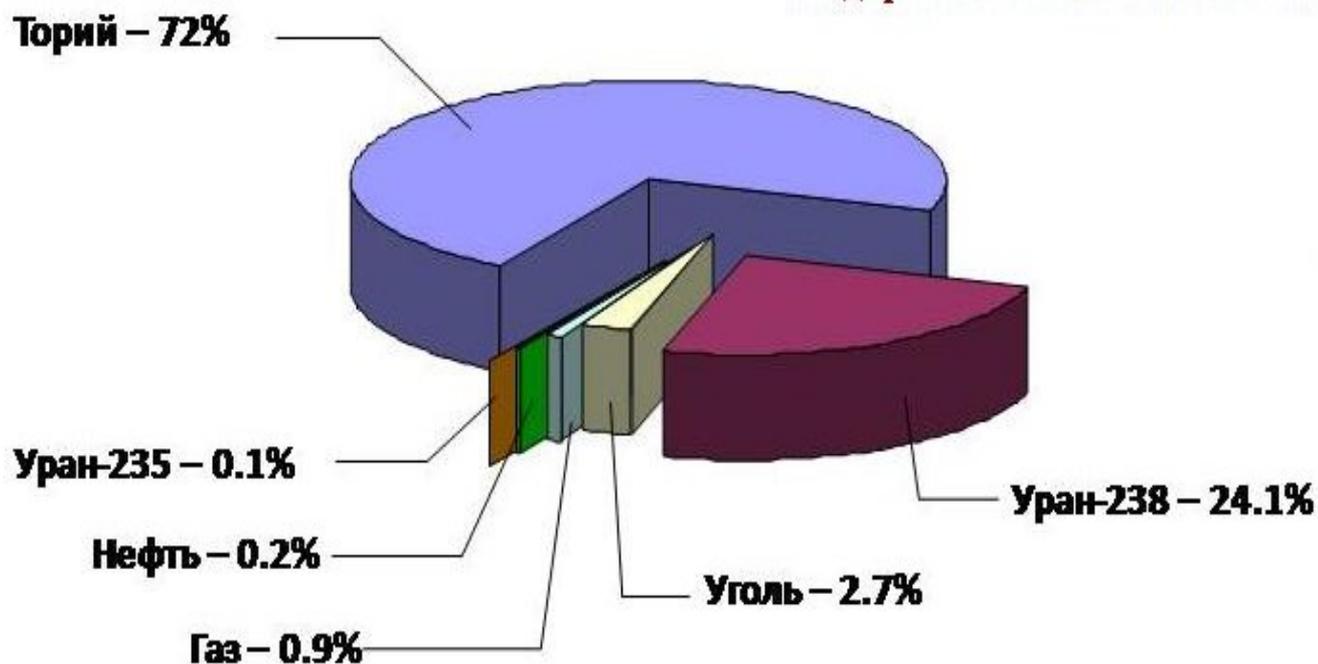
# Что мы узнали о токамаках в ходе 55-летнего общения

Таким образом, практика зарубежных сверхпроводящих токамаков отчетливо демонстрирует, что, оставаясь в рамках существующих технологических решений, длительность плазменного процесса в токамаках и, повидимому, в стеллараторах можно будет увеличивать лишь уменьшая энергетическую нагрузку на единицу площади стенки примерно как  $(P_H/S)^{-1.7}$ , где под  $P_H$  правильней понимать часть энергетического потока, которая связана с прямым взаимодействием плазма-стенка. Можно пытаться переизлучать значительную часть энергетического потока за счет некоронального излучения примесей (это делается), но и это не решит проблему стационара. Необходимо научиться выводить из камеры продукты ее эрозии в ходе технологического цикла работы реактора (80% рабочего времени). Это было бы достойной задачей для коллектива Т-15МД.

**Стоит ли «ломать копья»?**

# Относительный энергетический потенциал природных ресурсов России

(Источник: по доказанным ресурсам органического топлива - Бритиш Петролиум "Статистический обзор мировой энергетики 2005", по доказанным ресурсам природного урана 615 тыс. тонн - данные Федерального Агенства РФ по недропользованию)



**Спасибо за внимание**

# Может быть $P_H/R$ ?

