

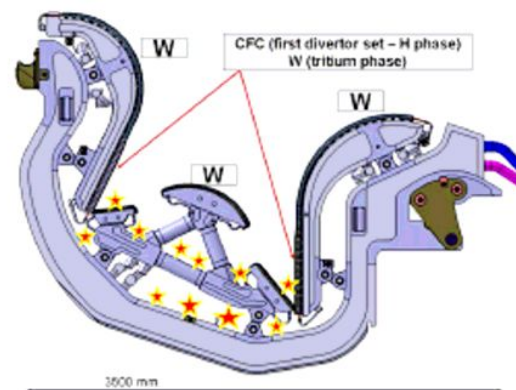
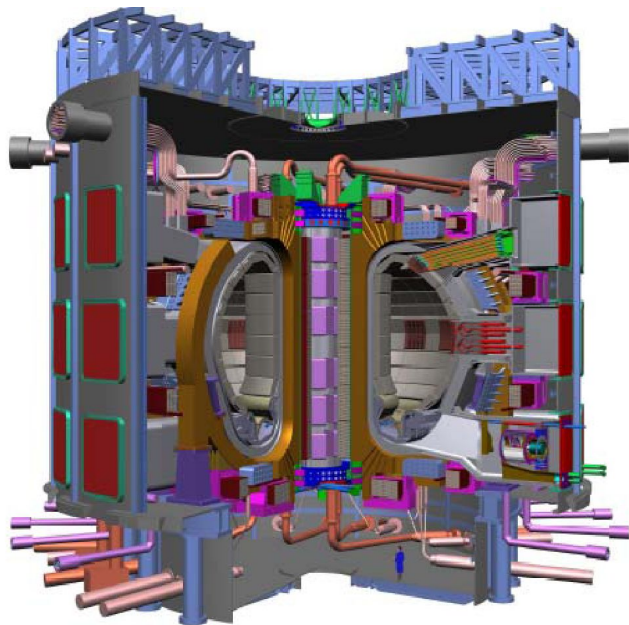
Взаимодействие плазмы с поверхностью.

Проблемы термоядерного реактора.

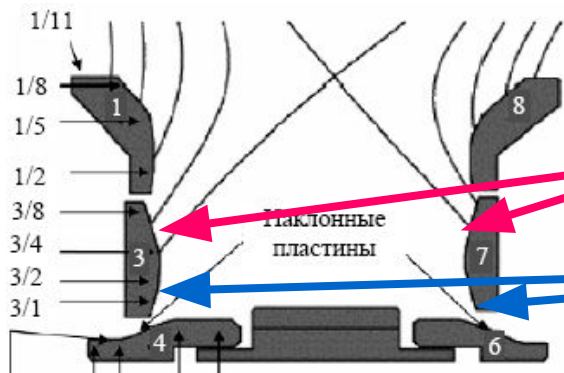
*Ю.В. Мартыненко*

24.11.2011

# Элементы токамака контактирующие с плазмой



*Разрез камеры токамака ИТЭР (а) и дивертор (б), расположенный в нижней части камеры, звездочки - места осаждения продуктов эрозии.*



**Максимальная эрозия**

**Максимальное осаждение**

*Схема дивертора JET*

## 1. Проблема стойкости деталей реактора (первой стенки)

- эрозия элементов камеры при больших удельных нагрузках
- изменение поверхности, перепыление материала, образование сплавов, соединений с новыми свойствами

## 2. Проблема продуктов эрозии: пыль, плёнки

- **накопление трития** в продуктах эрозии,
- химическая активность наноструктур (**разложение воды** → **водород** → взрыв)
- **токсичность Ве** - конъюнктивиты, дерматиты и поражения легких,
- **радиологическая опасность** - радиоактивная пыль
- диагностические стёкла

## 3. Плазма и поверхности обращённые к ней – единая взаимосвязанная система

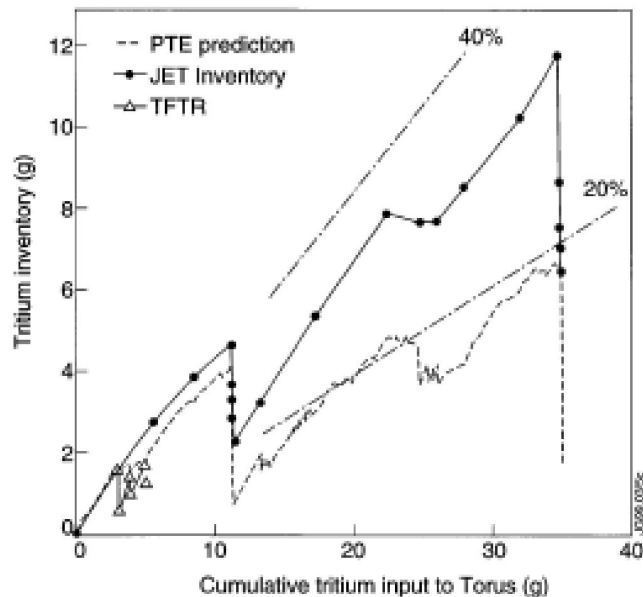
- **Самосогласованное описание** плазмы со стенкой
- Пыль в токамаке →  $\vec{\sigma}$  переизлучение энергии, возмущение периферийной плазмы
- стабилизация инъекцией пыли, mitigation

## 4. Ввод топлива с помощью пылевых и кластерных струй.

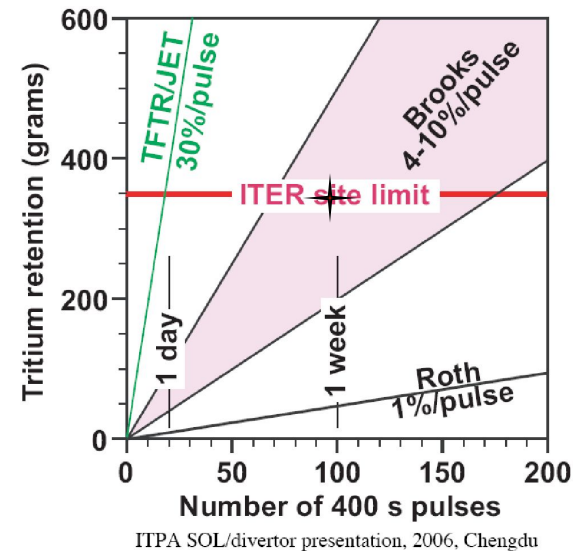
## Тритий в ИТЭРе

Соосаждение с перепыленным материалом

### DT experiments in JET



### Tritium retention in ITER



Retention by implantation  
and co-deposition: **~30% retained**

*T.Loarer. 7<sup>th</sup> EU PWI TF.  
Julich. 14-15 October 2008*

- сгорает 0.5г Т за один разряд ИТЭРа (0.5%)
- до 5г (5% -  $\pm$ ) Т за разряд осаждается в продуктах эрозии внутри вакуумной камеры (1кг Т = \$10 - \$30 М)
- придется извлекать Т 20 – 50 раз в год

Физическое распыление (первой стенки)

**поток атомов (~ 1-10 эВ),**

Блистеринг (первая стенка)

**крышки блистеров, 1-10 мкм**

Химическое распыление (дивертор, CFC)

**летучие углеводороды  $\text{C}_n\text{H}_n$ .**

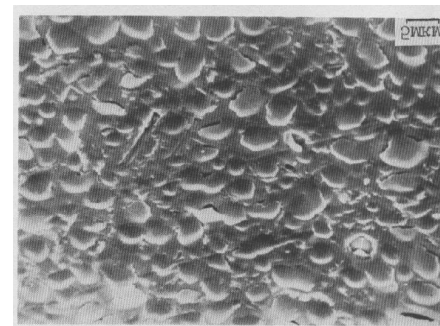
Радиационно-ускоренная сублимация (дивертор, CFC)

**поток атомов.**

EIM-ы, срывы, дуги - тепловой удар (дивертор, W, CFC)

**испарение, корпускулярная эрозия**

**(хрупкое разрушение, капельная эрозия)**



**В ПЛАЗМЕ –**

**диссоциация молекул, ионизация, испарение пылевых части**

**ПРОДУКТЫ ЭРОЗИИ**

- атомы и ионы

- пылевые частицы



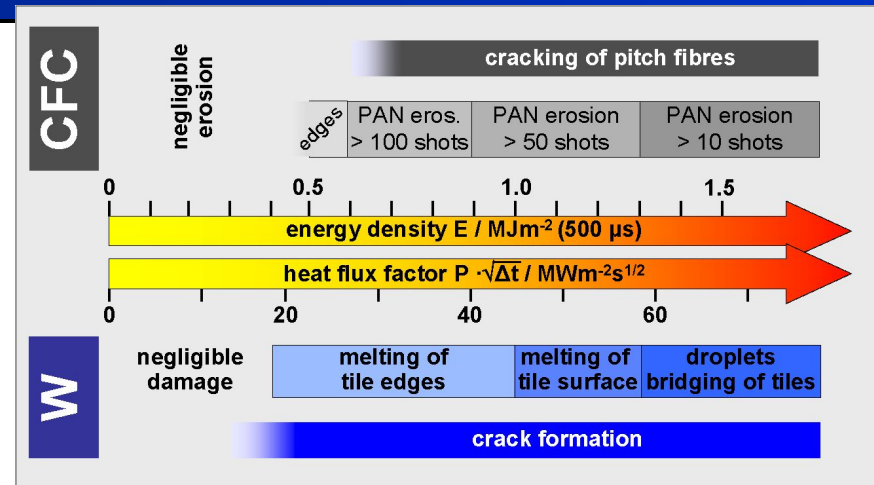
***Строительный материал  
для пыли и плёнок***

# Основной механизм эрозии – ELMы

ITER

ELM ~ 1 – 4 MJ/m<sup>2</sup> in 0.5 ms

Disruption ~ 20 - 40 MJ/m<sup>2</sup> in 1ms



A.Loarte. EU PWI TF. Madrid. October 2007

## Экранирование поверхности плазмой- паром

J/cm <sup>2</sup>	Be	C
Работа пара против давления плазмы	60.7	44.5
Кин. энергия расшир пара	40.7	19.9
Излучение наружу	29.4	104
Внутр. энергия пара	61	32.4
Поглощено мишенью	8.7	0.48
E на испарение	0.24	1.47

Расчёт (КИ + Ч-70 1996) + МК-200 (Троицк)

$W = 10 \text{ MW/cm}^2$   
 $2 \cdot 10^{-5} \text{ c}$   
 $E_e = 1 \text{ keV}$   
 $n_e = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$   
 $P = 10 \text{ атм}$   
 $B = 2 \text{ Т}$

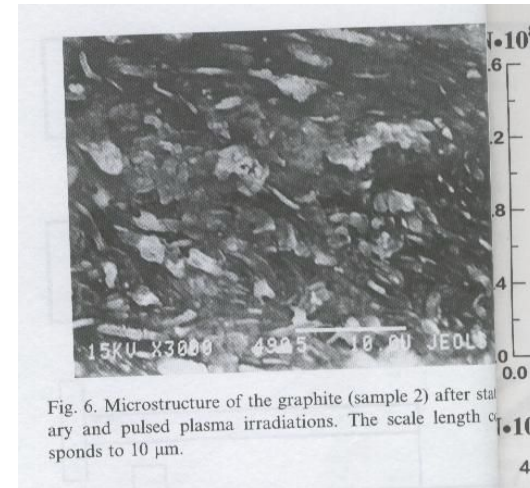
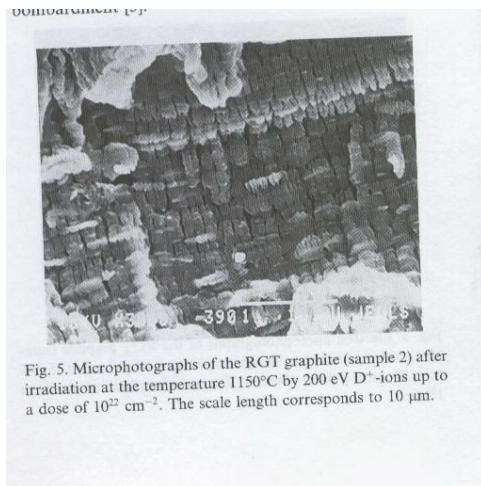
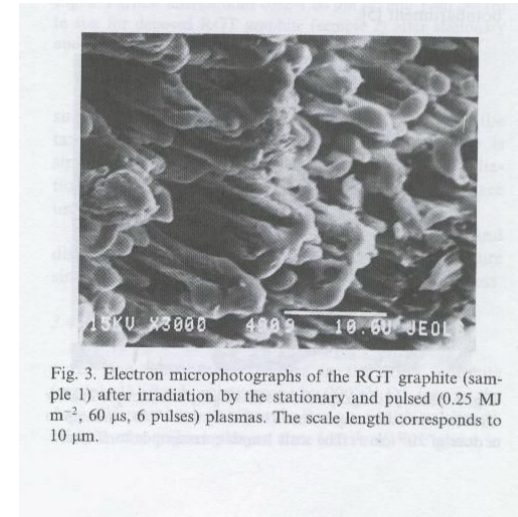
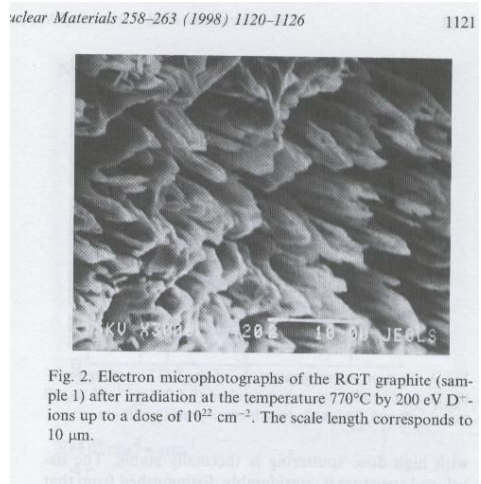
**Известны основные закономерности**

**Конкретные условия взаимодействий –  
НОВЫЕ ВЫЗОВЫ**

- Совместное облучение разных материалов
- Предыстория взаимодействия
- Синергизм разных факторов
- Свойства модифицированных материалов

# Конкретные условия взаимодействий – новые вызовы

Эрозия при ELMax зависит от условий при нормальном режиме  
(Guseva, Khripunov, Martynenko, et al. JNM. 1998)





# Конкретные условия взаимодействий – НОВЫЕ ВЫЗОВЫ



**Combined W+C  
target**

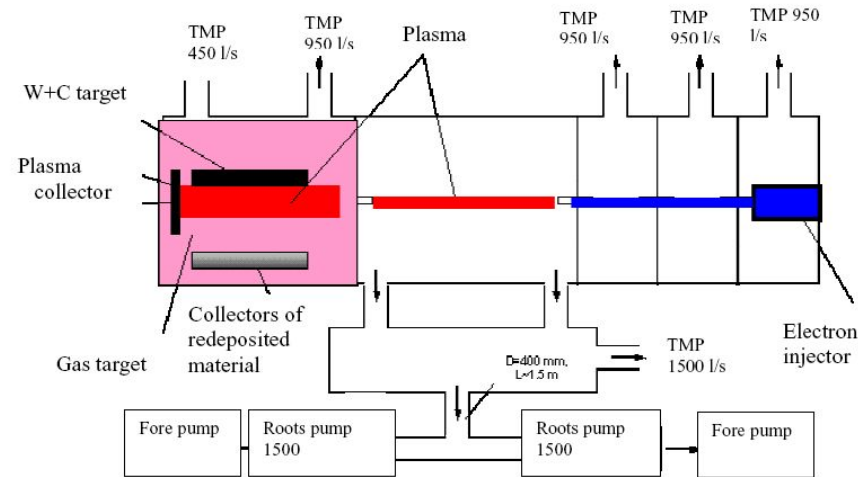
**D plasma**

$(N = \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3},$

$T_e \sim 5 \text{ eV},$

$E_i = 500 \text{ eV},$

$\Phi_i \sim 10^{21} \text{ ion/cm}^2$



- Sputtering yields ( $Y_w = 1.7 \cdot 10^{-2} \text{ at/ion}$ ,  $Y_c = 5 \cdot 10^{-1} \text{ at/ion}$ )

$Y_w = 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ at/ion}$ ,  $Y_c < 6 \cdot 10^{-3} \text{ at/ion}$  – single targets

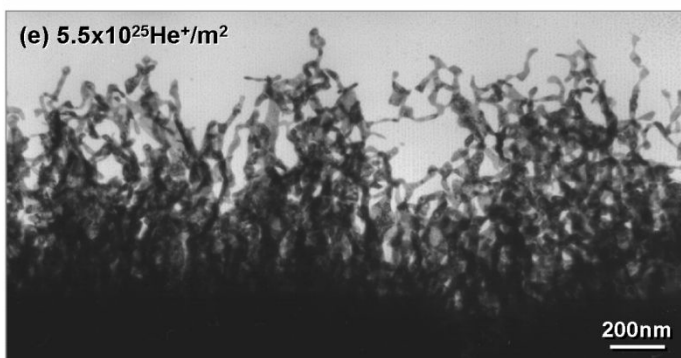
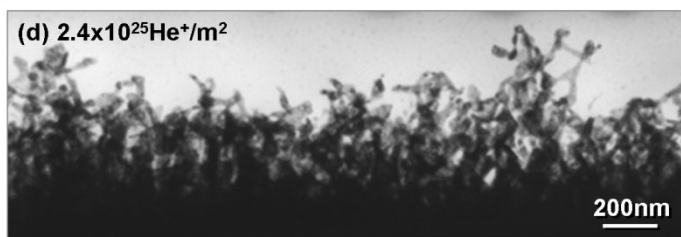
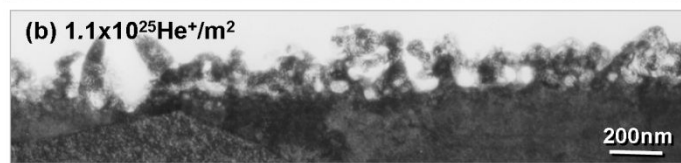
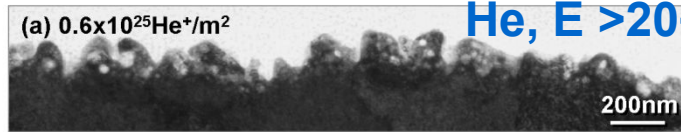
C chemical sputtering  $Y_c < 10^{-1} \text{ at/ion}$

- Redeposition of W on graphite  $\sim 0.17 \text{ at.}\%$  in spots  $\sim 2.5 \text{ at.}\%$ .
- C redeposition on W in neighborhood to graphite  $\sim 60 \text{ at.}\%$   
with tungsten carbides WC and  $W_2C$  phases.

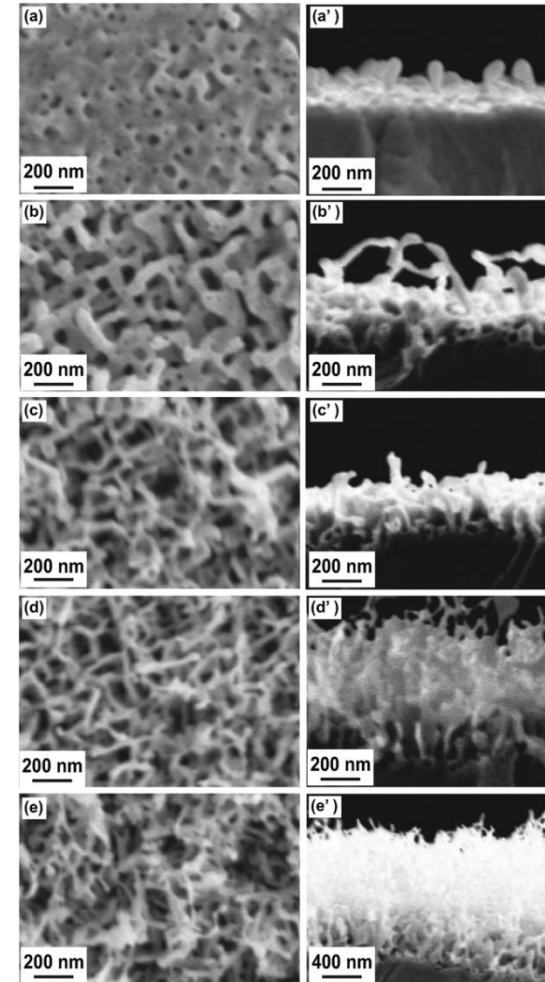
# Конкретные условия взаимодействий – новые вызовы

W пух (fazz).  $1000\text{K} < T < 2000\text{K}$

He,  $E > 20\sim 30\text{ eV}$



Bubble  
Pinhole  
Protrusions  
Swelling  
& Digging  
Nano-  
Structure  
(Fuzz)

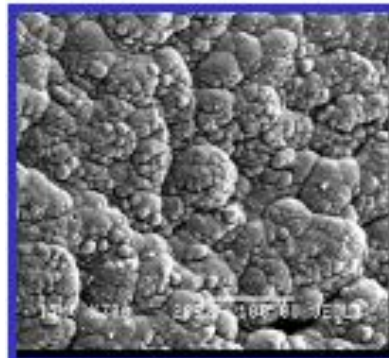


- Малое распыление
- , Излучение, ниже  $T$  – меньше эрозия при ELM  
Дуги, образование пыли

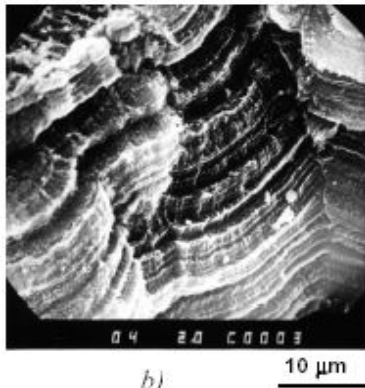
# Продукты эрозии

## Плёнки

«Глобулярная»

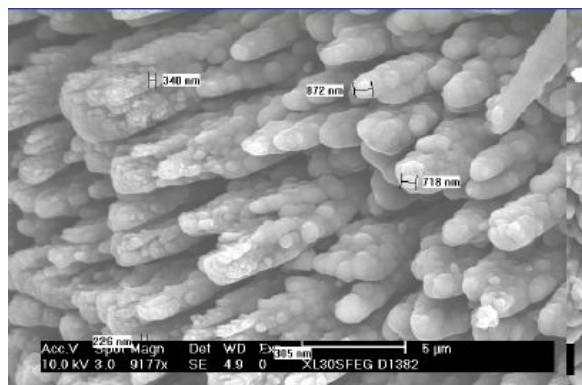


Слоистая



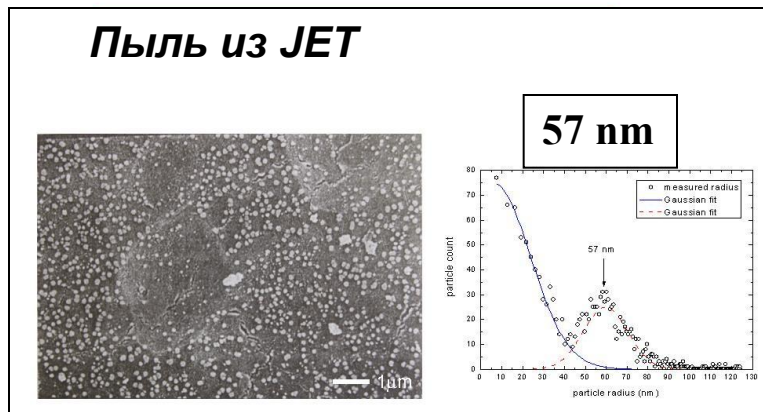
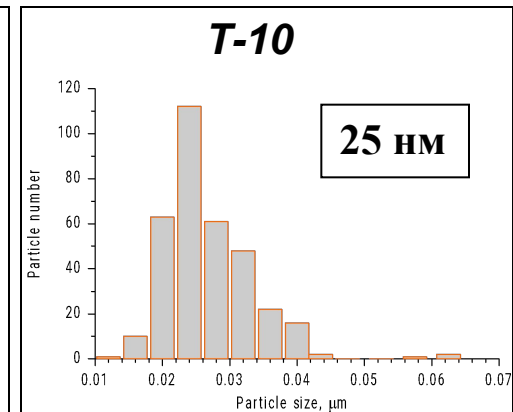
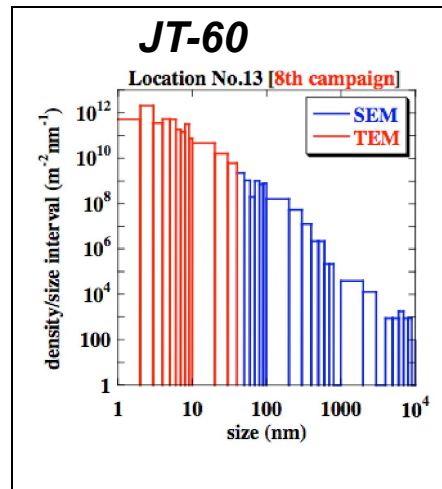
Пленки вблизи лимитера T-10

«Столбчатая»

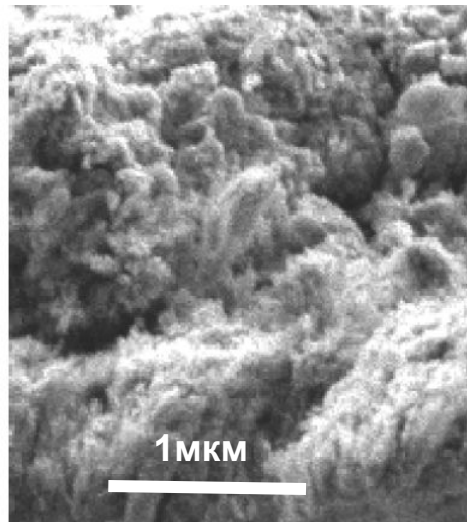
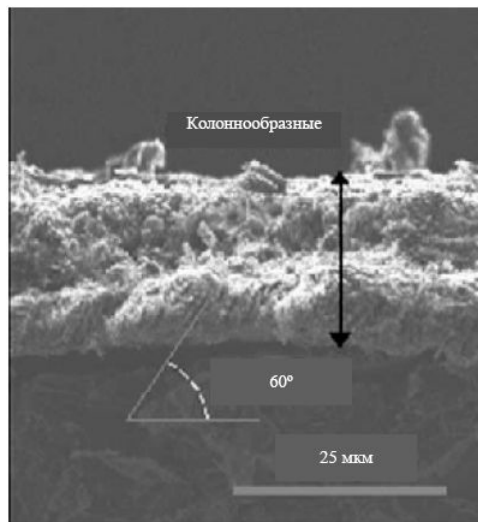


Пленка из Tore Supra 5 мкм

## Пыль

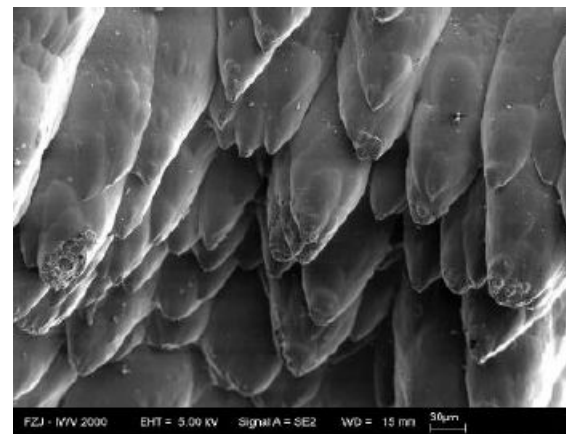


# Глобулярные плёнки из разных установок



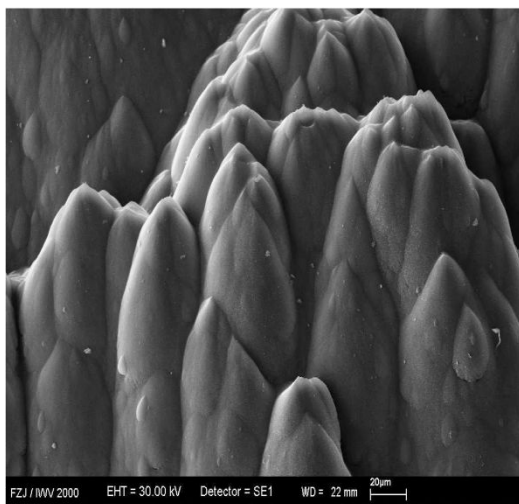
*Углеродородная пленка с колоннообразной формой, токамак JT-60U*

*Tore Supra*



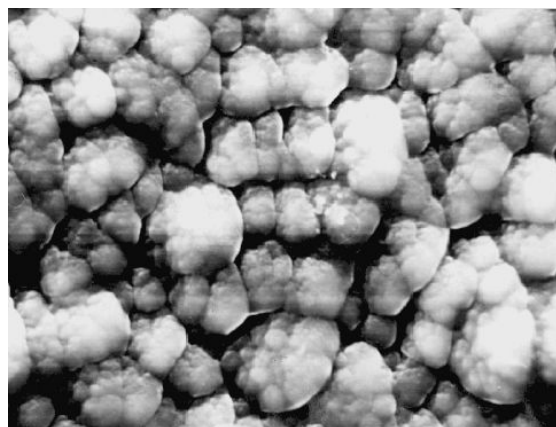
**50 мкм**

*TEXTOR*



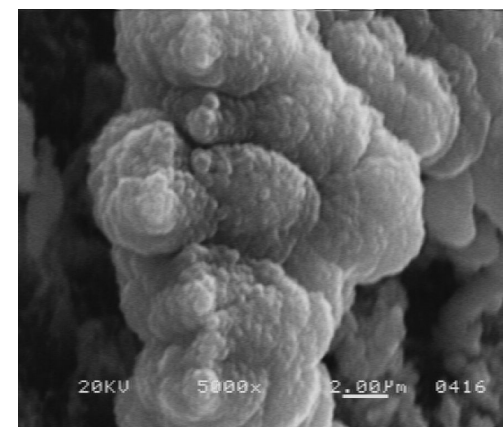
**20 мкм**

*DIII-D*



**5 мкм**

*NAGDIS-II*



**2 мкм**

# Определение фрактальной размерности глобулярных плёнок

**Цель – определить удельную сорбционную поверхность**

"box counting method":

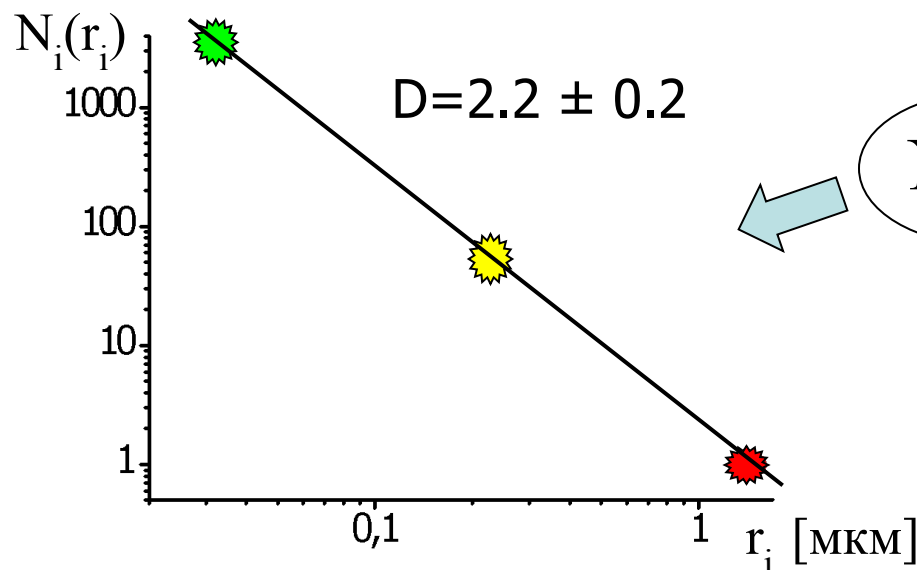
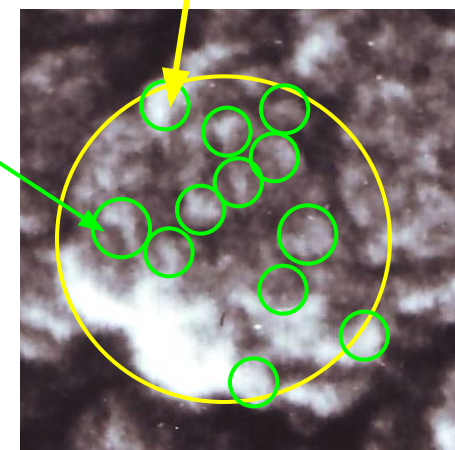
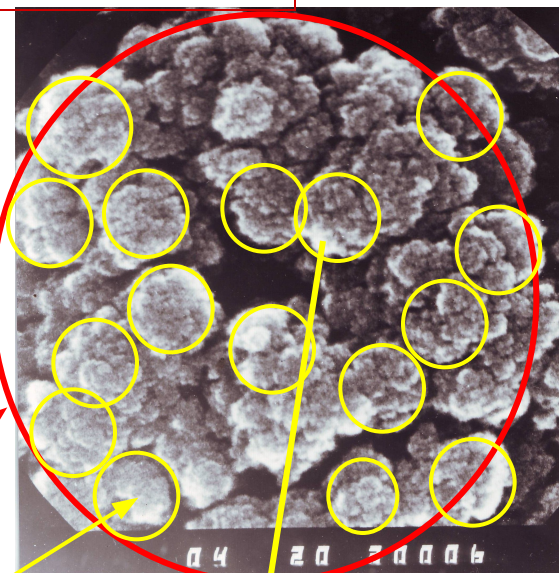
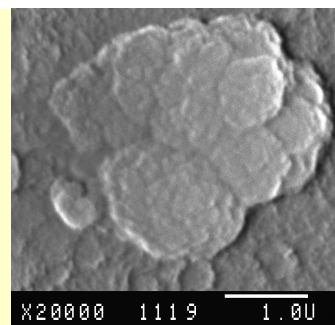
число глобул -  $N_i$

кластера с радиусом  $r_i$

$$N_i(r) \sim r_i^{-D}$$

фрактальная размерность

$$-D = \partial \log N_i / \partial \log r_i$$

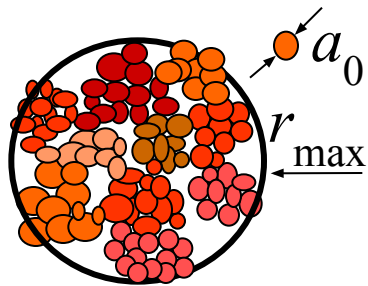


$N_i(r_i)$

1.5 μm

Фрактальная размерность  
глобулярных плёнок  $\approx 2.2$

## Оценка величины сорбционной поверхности фрактальных кластеров



Фрактальная структура состоит из элементарных частиц – кластеров размером  $a_0$ . Количество кластеров  $N_B = r^D$ , где  $D = 2.2 \div 2.3$ . Удельная поверхность SSA

$$SSA = S_0/\rho V = \int_{a_0}^{r_{\max}} Ar^{-\alpha} 4\pi a_0^2 \left(\frac{r}{a_0}\right)^D dr / \rho \int_{a_0}^{r_{\max}} Ar^{-\alpha} \frac{4}{3} \pi a_0^3 \left(\frac{r}{a_0}\right)^D dr = \frac{3}{\rho a_0}$$

Если  $a_0 \sim 15$  нм, **SSA  $\approx 170$  м<sup>2</sup>/г для углерода и  $\sim 16$  м<sup>2</sup>/г для вольфрама**

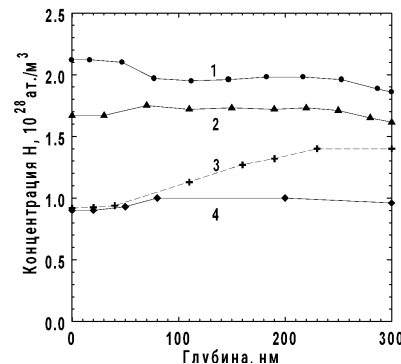
Плѐнки из токамака  
**Tore-Supra**

ВЕТ метод (адсорбция метана при 77 °С)

**SSA = 180 м<sup>2</sup>/г** для углеводородной пленки

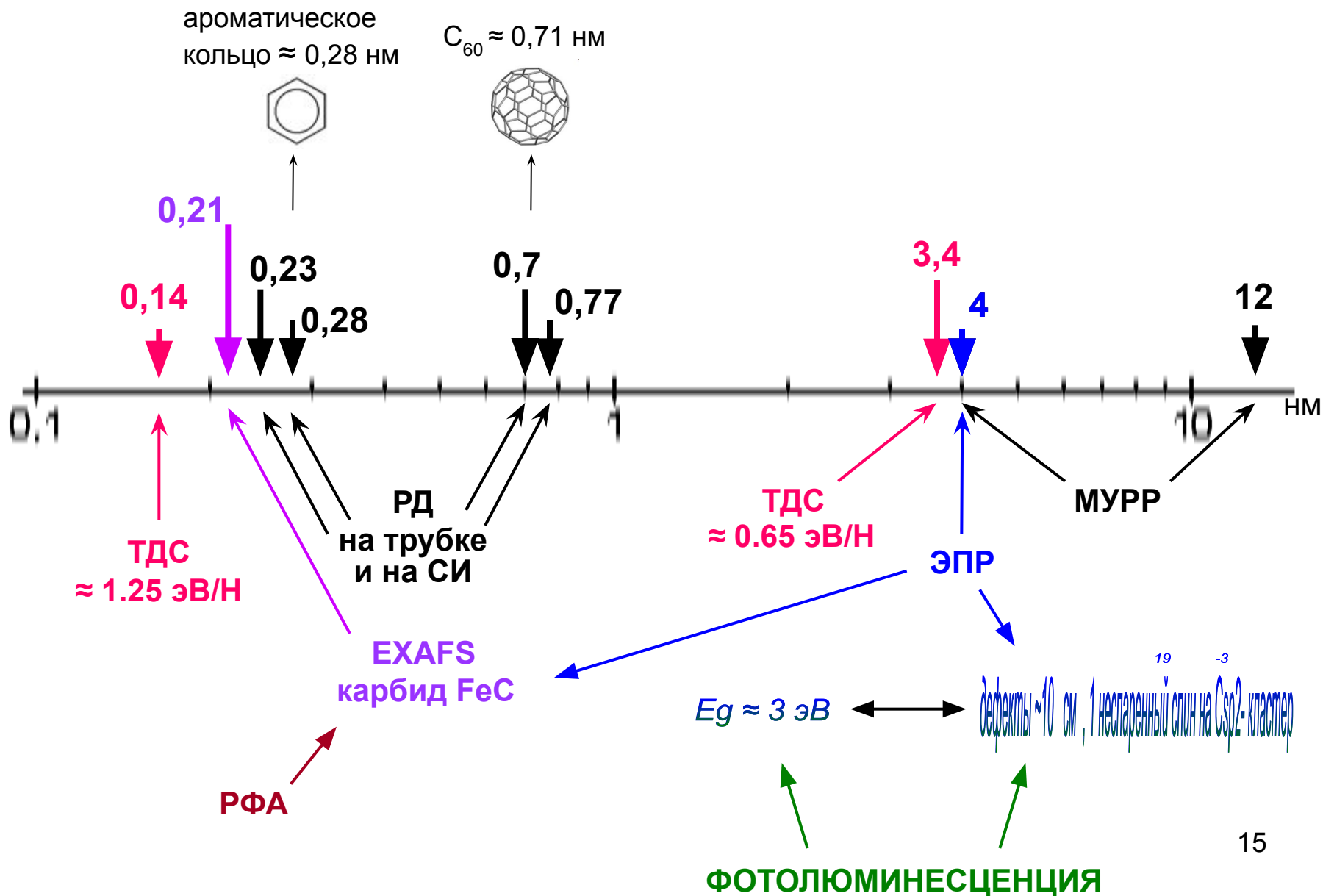
Водород хуже удерживается во фрактальных, чем в гладких пленках.

В твердых СНх пленках  $D/C = 0.2 - 0.4$ ,  
в мягких СНх пленках  $D/C = 0.5 - 0.9$ .



Соосаждение – водород равномерно распределен по глубине

# Размеры и свойства кластеров в гладкой плёнке из Т-10



# Модель образования фрактальной структуры

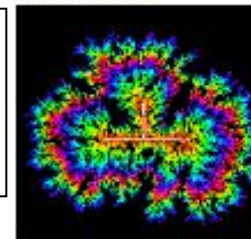
- Начальный этап - рост дендритов из одиночных подвижных атомов.
- Образование на поверхности критических зародышей – центров роста дендритов – флуктуационно и/или около примесей →

**зависимость структуры от потока атомов и примесей, T.**

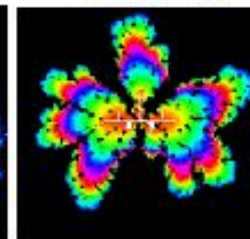
**Диффузия примесей к более горячим местам в результате уменьшения энергии активации при термическом расширении решетки → рост развитых структур.**

Когда поверхность заполнена – рост фрактальной структуры за счет осаждения атомов.  
**(Диффузионно ограниченная агрегация – DLA)**

“Ballistic”



Random



## **РАЗМЕР МИНИМАЛЬНОГО КЛАСТЕРА:**

Диффузионное «разравнивание» слишком мелких объектов:

$$a_0 = 2\sigma \Omega / T \sim 15 \text{ нм},$$

$$SSA(C) \approx 170 \text{ м}^2/\text{г}. SSA(W) \approx 16 \text{ м}^2/\text{г}$$

( $\sigma$  - поверхностное натяжение, T – температура поверхности,  $\Omega$  – атомный объем).



# Продукты эрозии: плёнки

1. Известны разные типы плёнок  $CH_x$  и  $W$  и общие их образования: гладкие пленки - малые потоки оседающих частиц и низкие  $T$  подножки, плёнки с развитой поверхностью, фрактальные, – высокоэнергичные режимы (потоки, температура).  
Требуются количественные данные условий образования типов пленок и возможного рециклинга.
2. Исследована структура гладких пленок  $CH_x$ .  
Необходимы такие же исследования и для других видов плёнок
3. Определена удельная поверхность некоторых фрактальных пленок .  
Нужны более широкие исследования.
4. Измерены содержания водорода и ТДС некоторых видах.  
Нужны более широкие исследования.
5. Теоретические оценки отрыва и фрагментации плёнок на куски  $l \sim 10^{-2}$ –1 см.  
Нужны экспериментальные работы

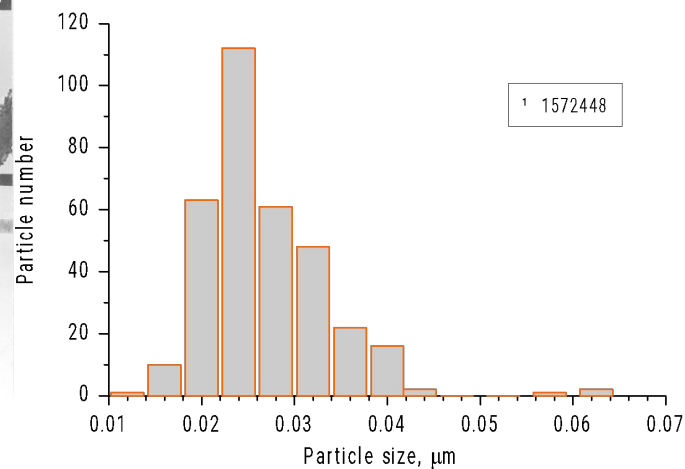
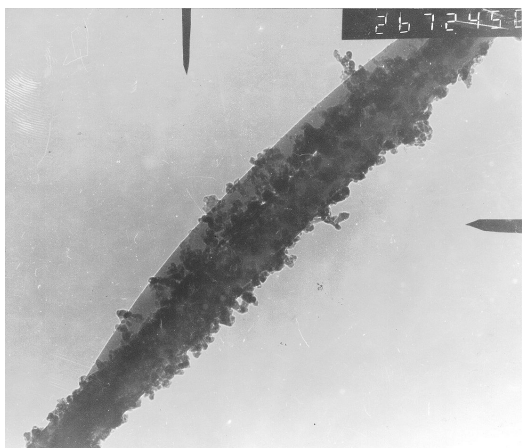
**Пыль - мобилизуемая часть продуктов эрозии.**

**Пыль влияет на работу токамака:**

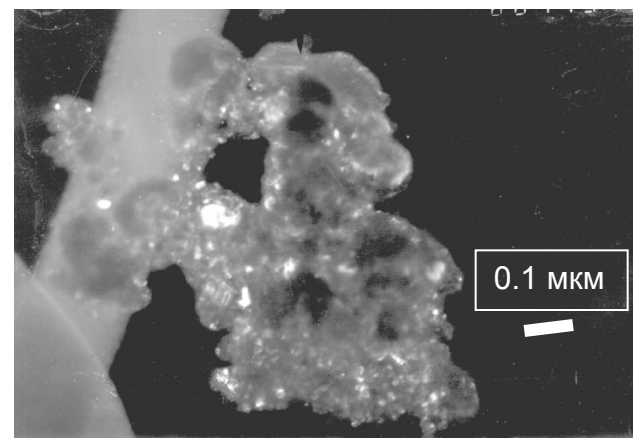
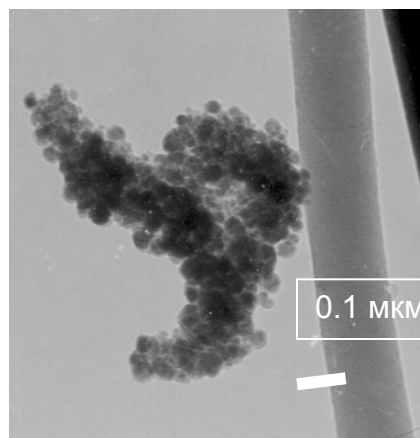
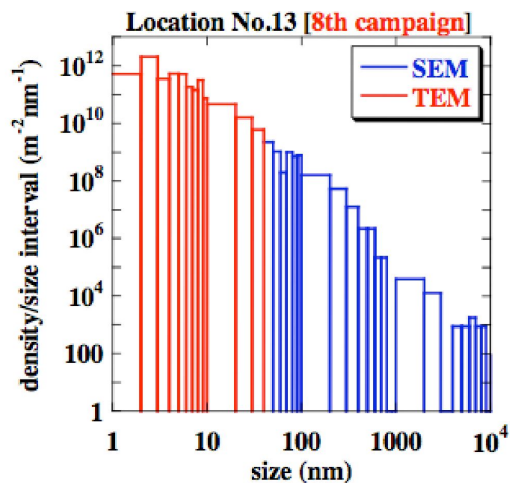
- 1) охлаждает плазму, попадая в центральную часть;**
- 2) инициирует малые вихри (blobs) в периферийной плазме;**
- 3) возможна стабилизация разряда инжекцией пыли.**

**Опасна при вскрытии камеры реактора –  
летучесть, тритий, радиоактивность, токсичность (Be).**

# Нанопыль в токамаке T-10



*Пыль собранная на кварцевом фильтре в T-10 и ее распределение по размерам*



*Пыль собранная в JT-60*

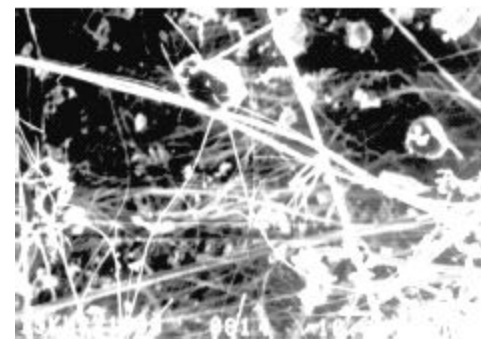
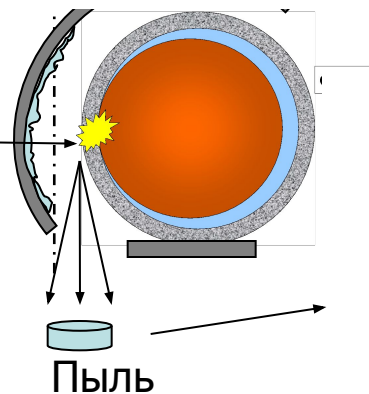
*Агломерация пыли. Стеклоанный фильтр T-10*

**2008 г. Программа - «Образование пыли в токамаке T-10 и ее влияние на безопасность термоядерного реактора»**

# Нанопыль в токамаке Т-10

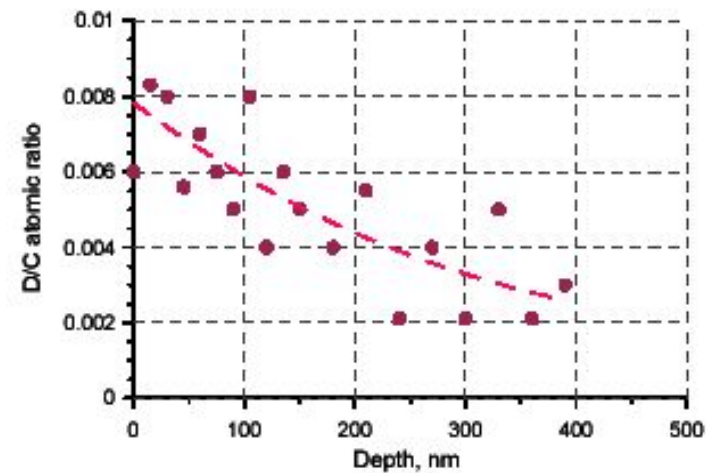
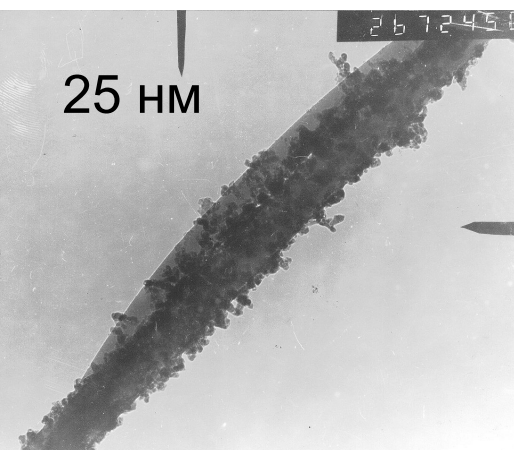
600 кВт × 0.5сек = 2000 °С  
(50 МВт/м<sup>2</sup>)

ИТЭР – подобные условия.



a) 10 μm

Фильтр для сбора пыли, Т-10



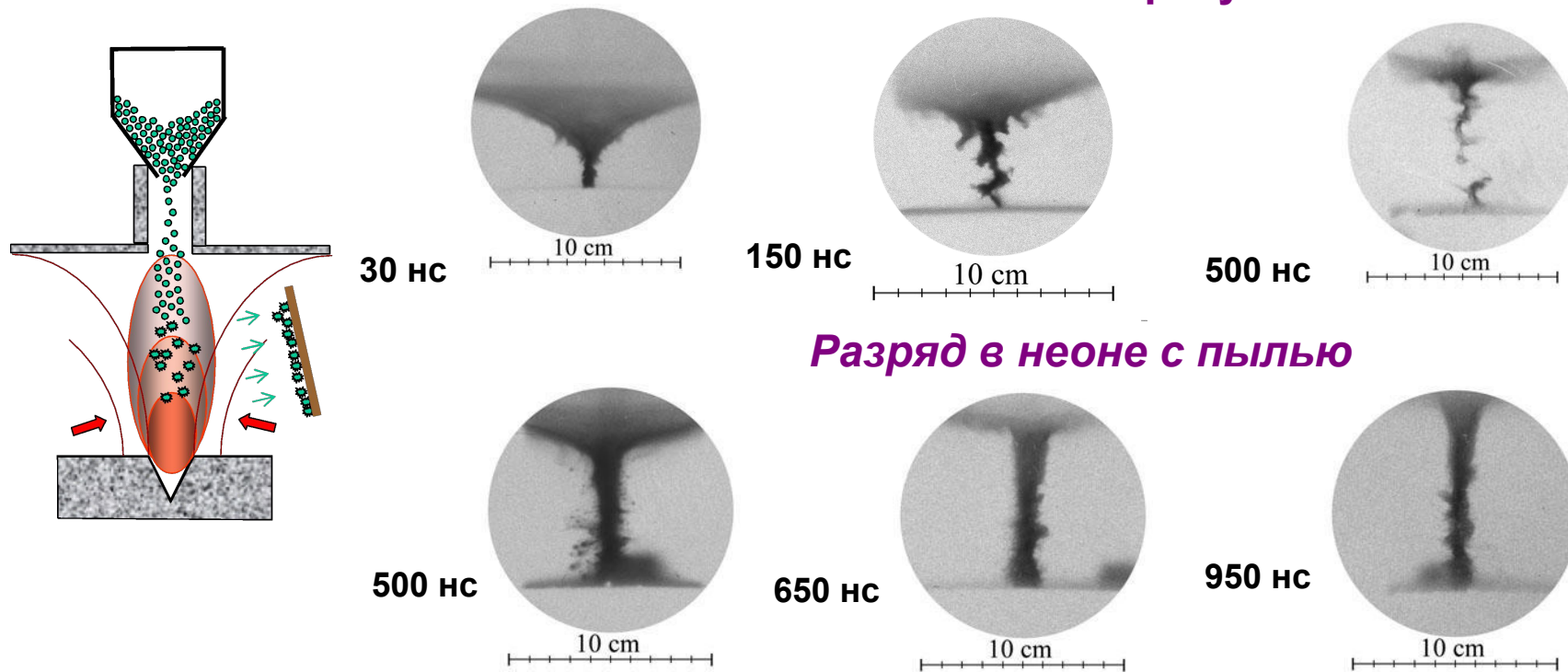
Водорода в пыли мало

Пыль собранная на кварцевом фильтре Т-10

## Новый подход к стабилизации плазмы при инъекции пылевых частиц

Введение в плазму мелко-дисперсного ( $1 \div 100$  мкм) порошка  $Al_2O_3$  привело к увеличению времени жизни пинча Z-пинча более чем на порядок.

*Разряд в чистом неоне в установке «Плазменный фокус ПФ-3»*



*Разряд в неоне с пылью*

(V.E. Fortov, V.I. Kraus, V.P. Smirnov et al, 5<sup>th</sup> Int. Conf, on Z-pinches, Albuquerque, 2002)

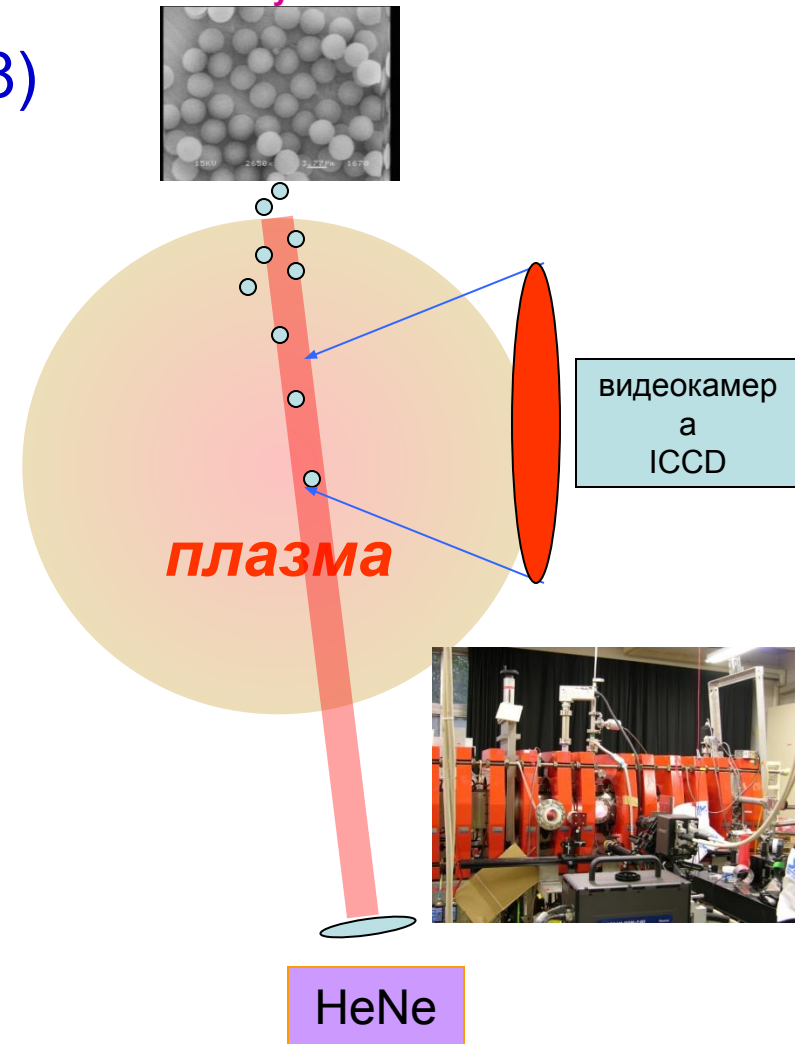
## Эксперимент в Нагдис-II

Пыль  $C_xH_y$ ,  $d < 5$  мкм

При напуске пыли в Нагдис II (2008) потоки плазмы из разряда в среднем уменьшились на 20%, но частота флуктуаций возросла.

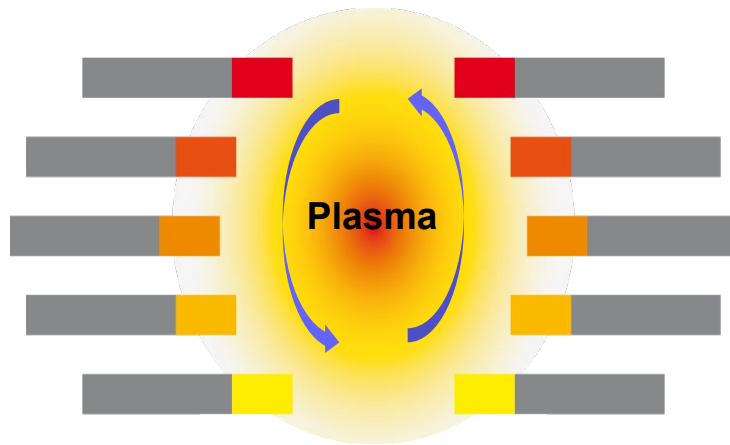
Напуск  $N_2$  в ASDEX(2008) →

- уменьшение амплитуды и увеличение частоты ELM-ов.
- излучение возросло только в дивертере.



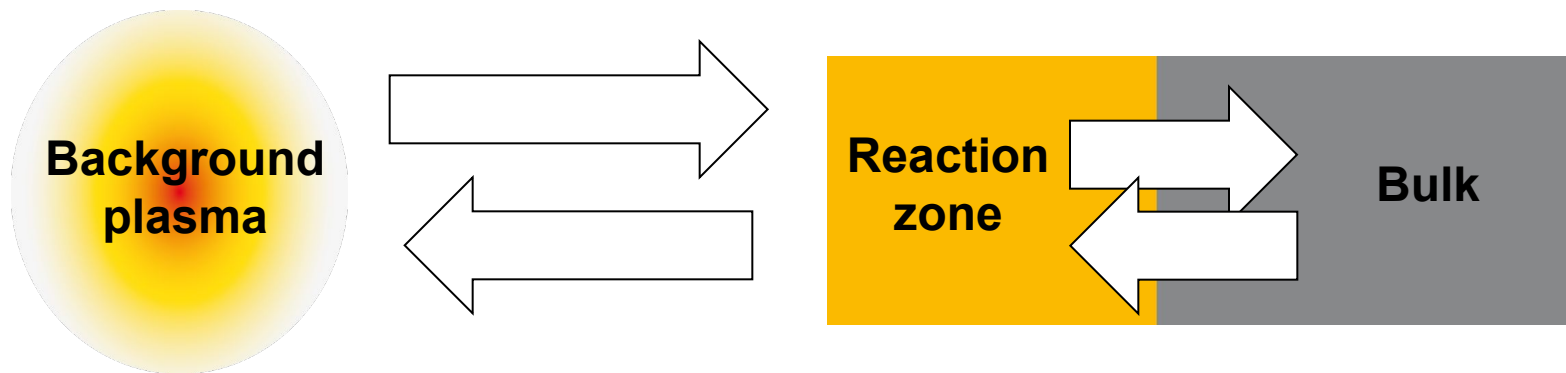
# Inclusion of surface reactions in self-consistent global model of impurity migration *K. Krieger, Ch. Linsmeier, K. Schmid*

Treat complex **plasma-wall interactions** and **material evolution** in a simplified way



## Analytical model:

- first wall:  $n$  tiles, different loads
- background plasma (**B2 + EIRENE ...**)
- redistribution matrix (DIVIMP)
- SDTrim sputter yields
- parametrized surface materials evolution



1. **Ответы на новые вызовы по поведению материалов контактирующих с плазмой. Поиски решений.**
2. **Пути управления наноструктурными продуктами эрозии :**
  - режимы работы с подавлением срывов, ЭЛМов,
  - mitigation (Ar, Ne),
  - модификация пыли и пленок *in situ*,
  - жидкая или «капельная» литиевая стенка.
3. **Нано частицы для управления плазмой:**
  - «пылевой» дивертор,
  - стабилизация плазмы инъекцией пылевых частиц.

**Спасибо за внимание**