

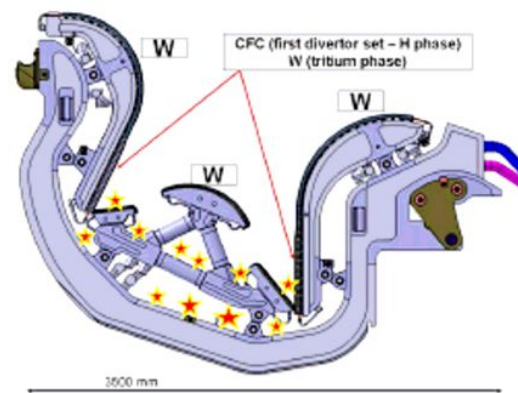
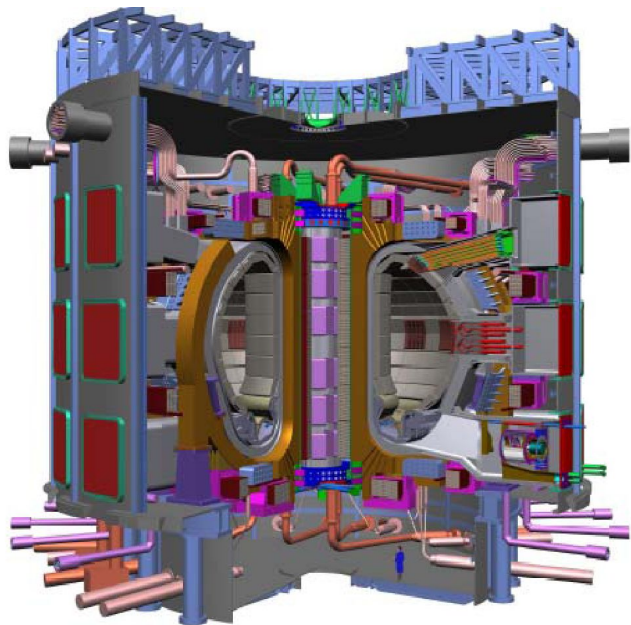
Взаимодействие плазмы с поверхностью.

Проблемы термоядерного реактора.

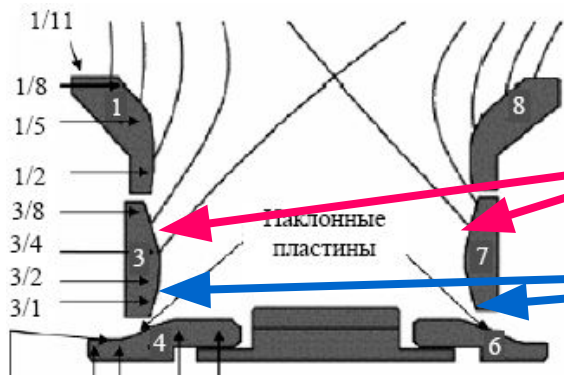
Ю.В. Мартыненко

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 Be** - конъюнктивиты, дерматиты и поражения легких,
- **радиологическая опасность** - радиоактивная пыль
- диагностические стёкла

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

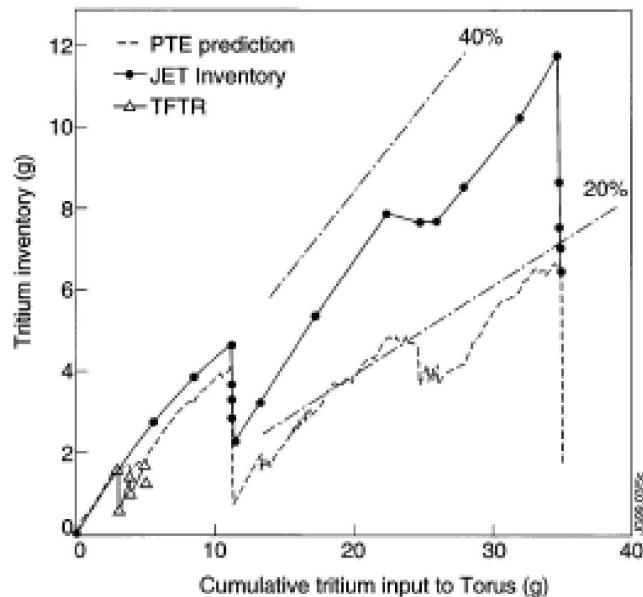
- **Самосогласованное описание** плазмы со стенкой
- Пыль в токамаке → $\vec{\sigma}$ переизлучение энергии, возмущение периферийной плазмы
- стабилизация инъекцией пыли, mitigation

4. Ввод топлива с помощью пылевых и кластерных струй.

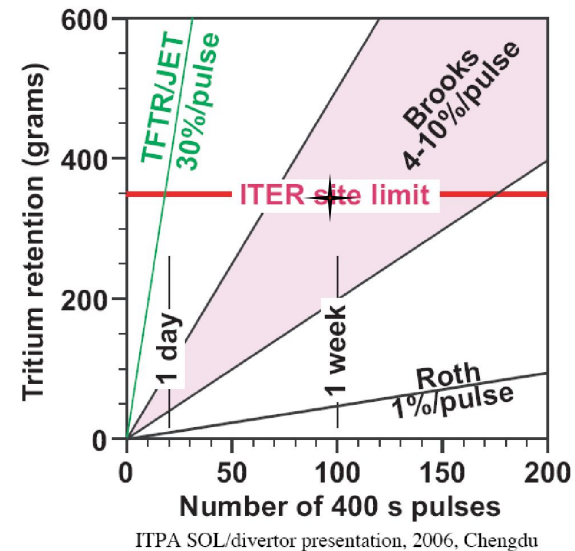
Тритий в ИТЭРе

Соосаждение с перепыленным материалом

DT experiments in JET



Tritium retention in ITER



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

*T.Loarer. 7th 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 CH_n .

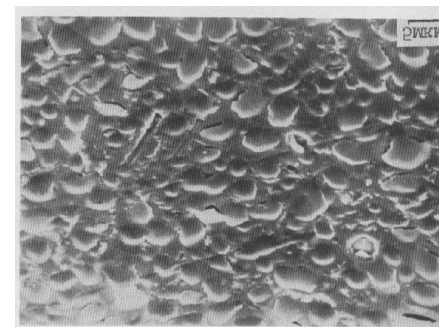
Радиационно-ускоренная сублимация (дивертор, CFC)

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



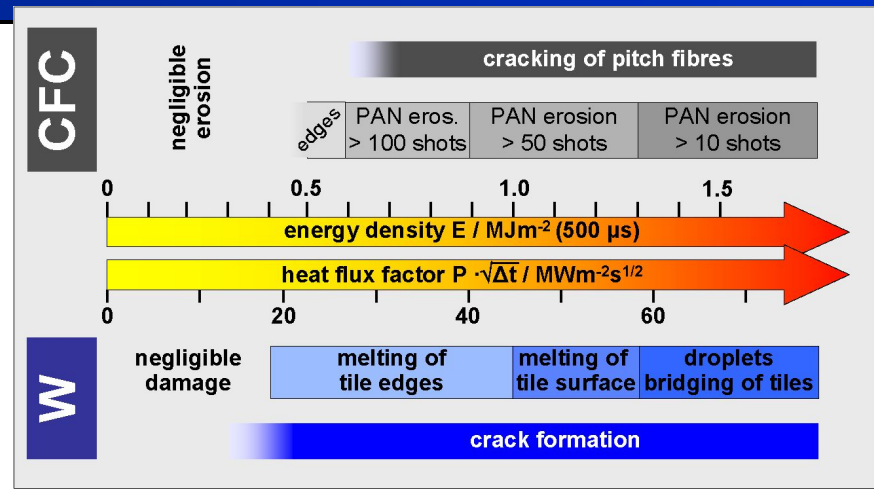
***Строительный материал
для пыли и плёнок***

Основной механизм эрозии – ELMы

ITER

ELM ~ 1 – 4 MJ/m² in 0.5 ms

Disruption ~ 20 - 40 MJ/m² in 1ms



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

Экранирование поверхности плазмой- паром

J/cm ²	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 MW/cm²
 2*10⁻⁵ с
 E_e = 1 keV
 n_e = 4*10¹⁵ cm⁻³
 P = 10 атм
 B= 2Т

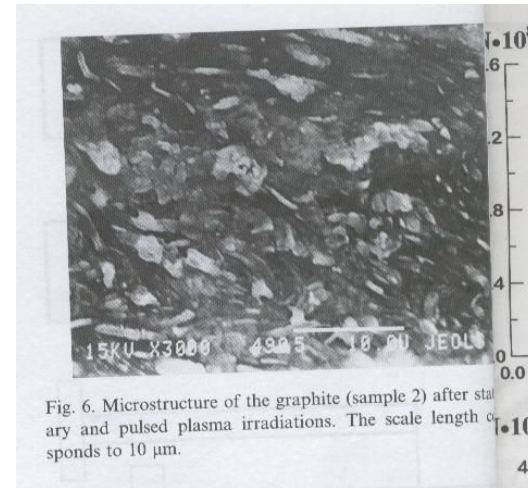
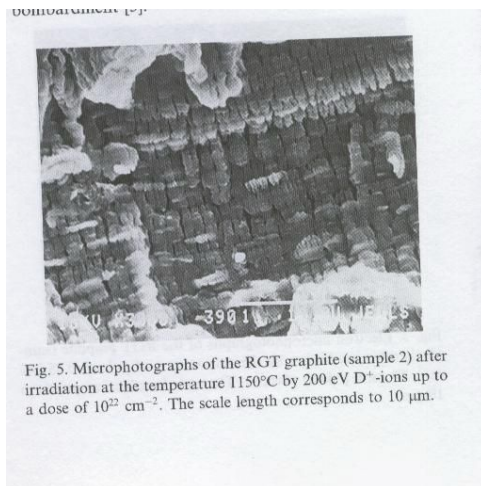
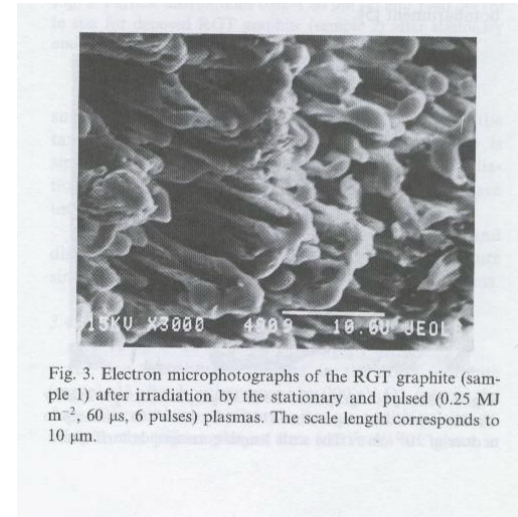
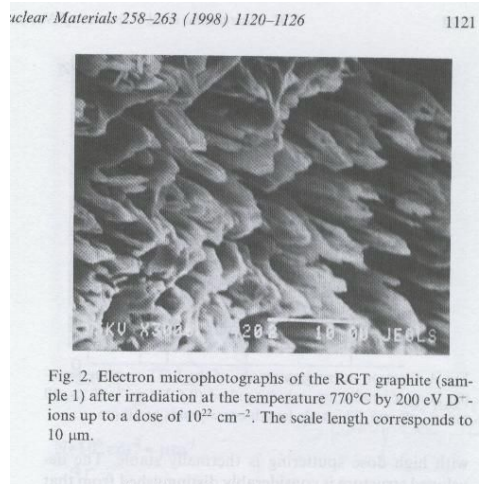
Известны основные закономерности

**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

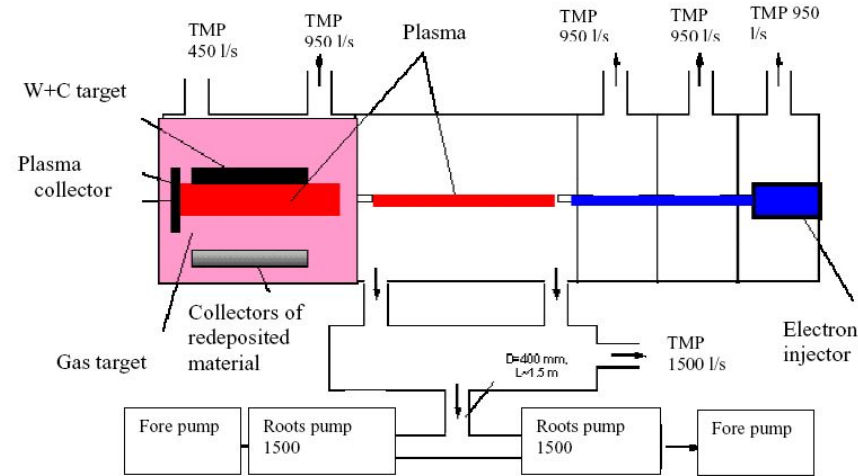
D plasma

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

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

$E_i = 500 \text{ eV}$,

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



- 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

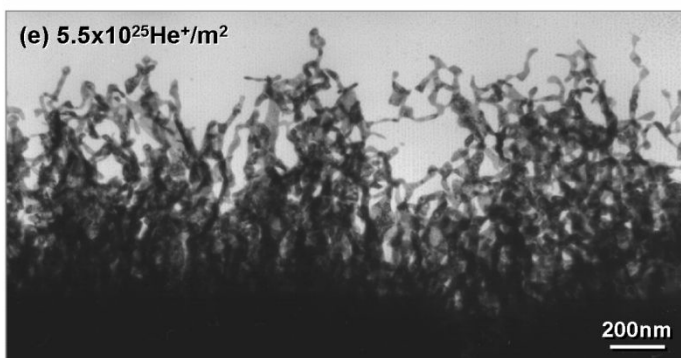
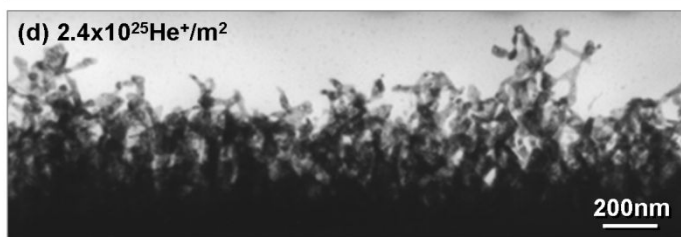
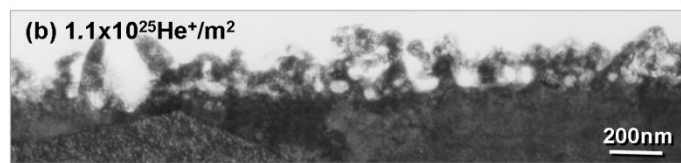
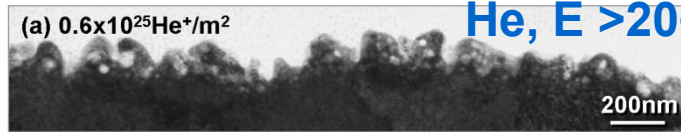
C chemical sputtering $Y_c < 10^{-1} \text{ at/ion}$

- 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.

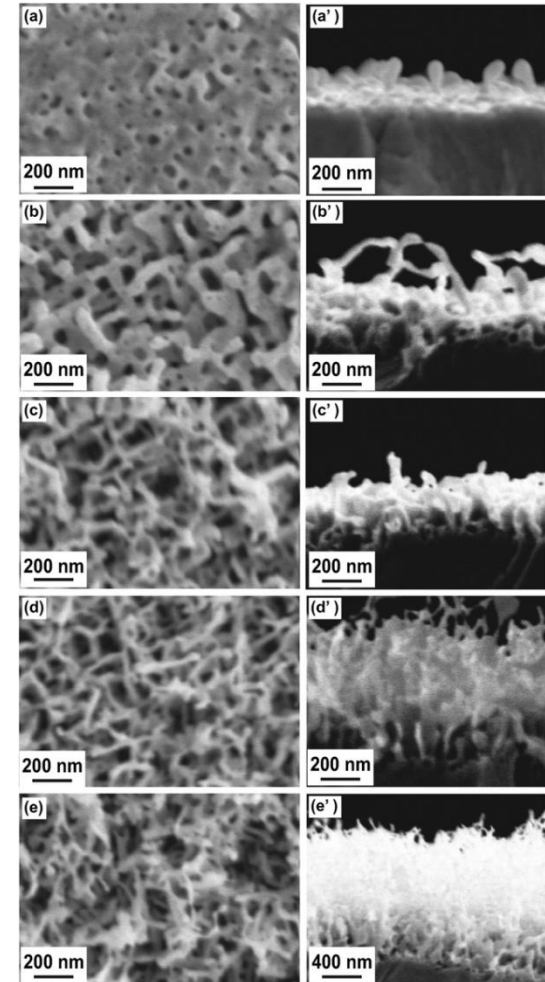
Конкретные условия взаимодействий – новые вызовы

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)



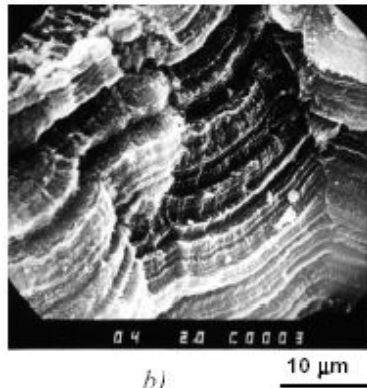
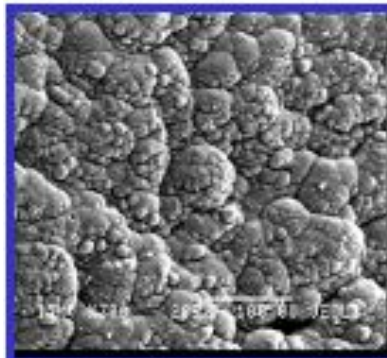
- Малое распыление
- , Излучение, ниже T – меньше эрозия при ELM
Дуги, образование пыли

Продукты эрозии

Плёнки

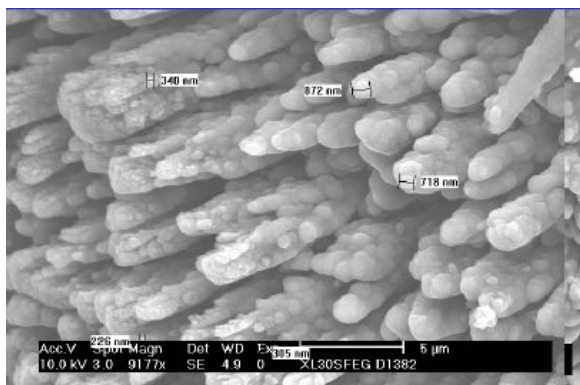
«Глобулярная»

Слоистая



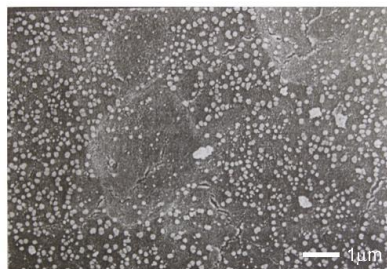
Пленки вблизи лимитера T-10

«Столбчатая»



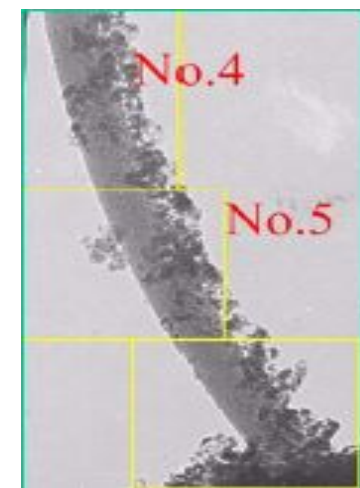
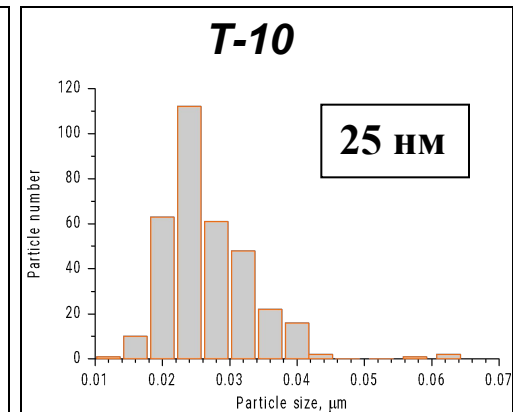
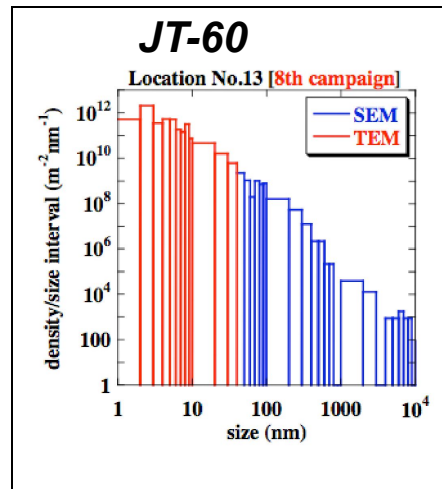
Пленка из Tore Supra 5 мкм

Пыль из JET

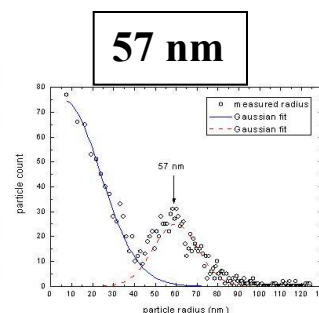


1 мкм

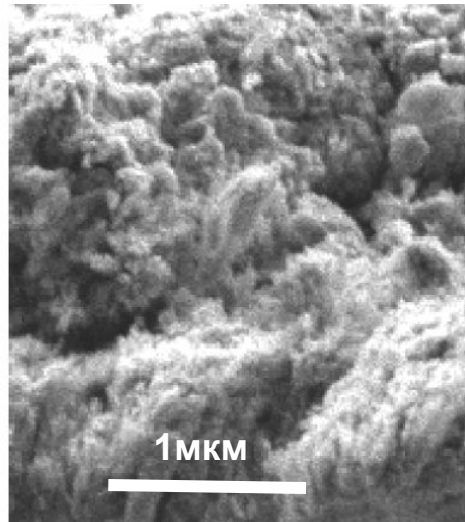
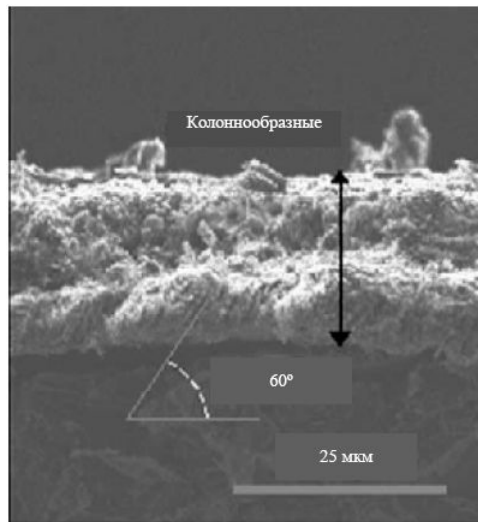
Пыль



0.1 мкм

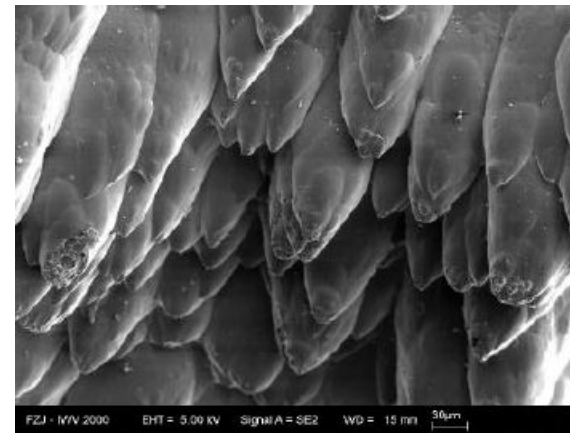


Глобулярные плёнки из разных установок



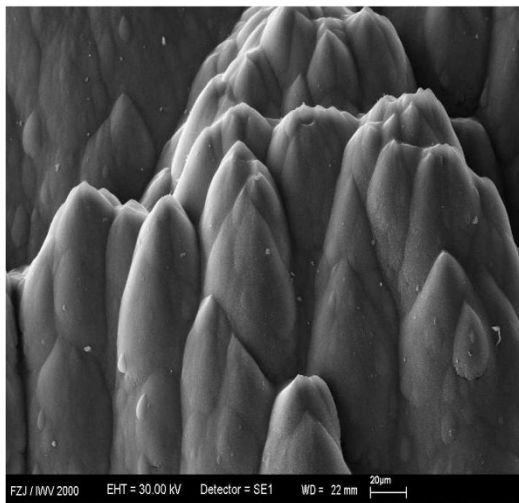
Углеродородная пленка с колоннообразной формой, токамак JT-60U

Tore Supra



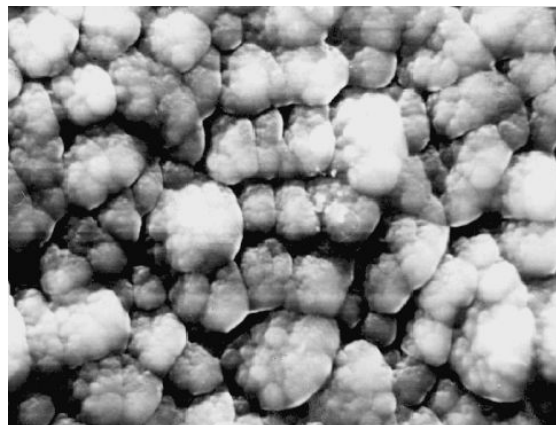
50 мкм

TEXTOR



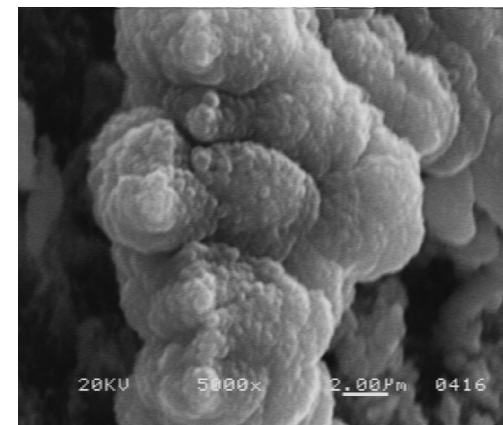
20 мкм

DIII-D



5 мкм

NAGDIS-II



2 мкм

Определение фрактальной размерности глобулярных плёнок

Цель – определить удельную сорбционную поверхность

"box counting method":

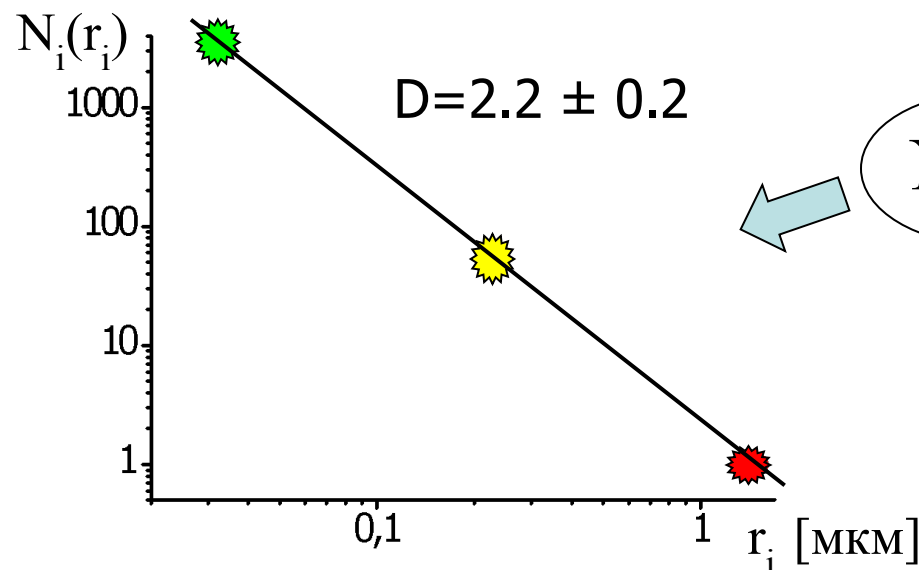
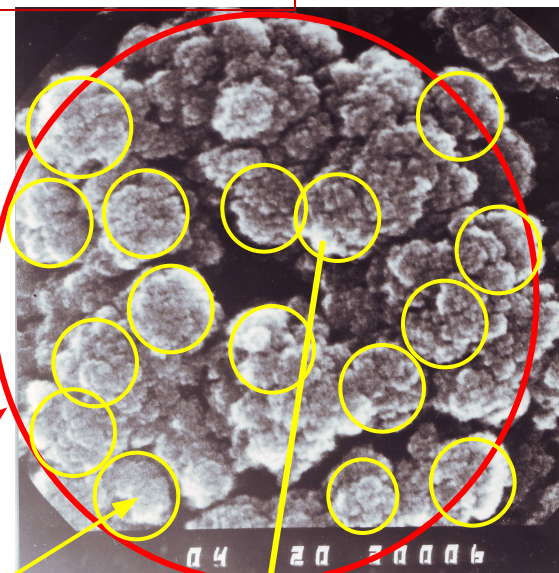
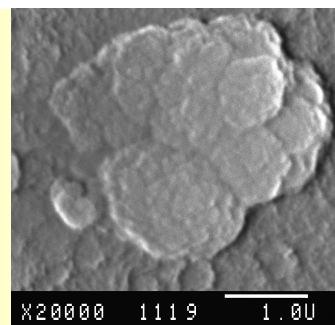
число глобул - N_i

кластера с радиусом r_i

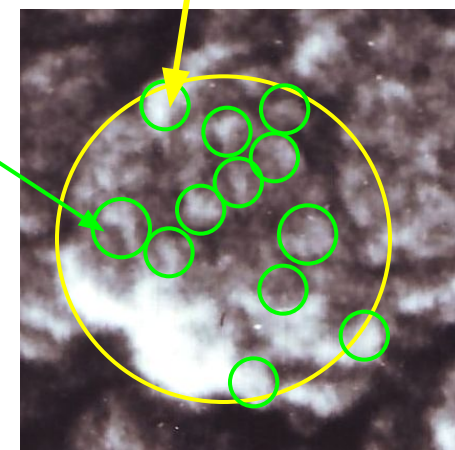
$$N_i(r) \sim r_i^{-D}$$

фрактальная размерность

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



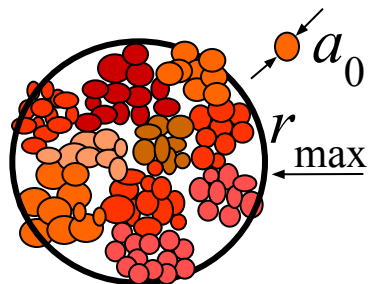
$N_i(r_i)$



Фрактальная размерность
глобулярных плёнок ≈ 2.2

Плёнки с развитой поверхностью

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 ≈ 170 м²/г для углерода и ~ 16 м²/г для вольфрама**

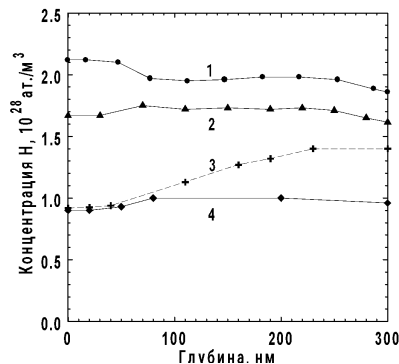
Плёнки из токамака
Tore-Supra

ВЕТ метод (адсорбция метана при 77 °С)

SSA = 180 м²/г для углеводородной пленки

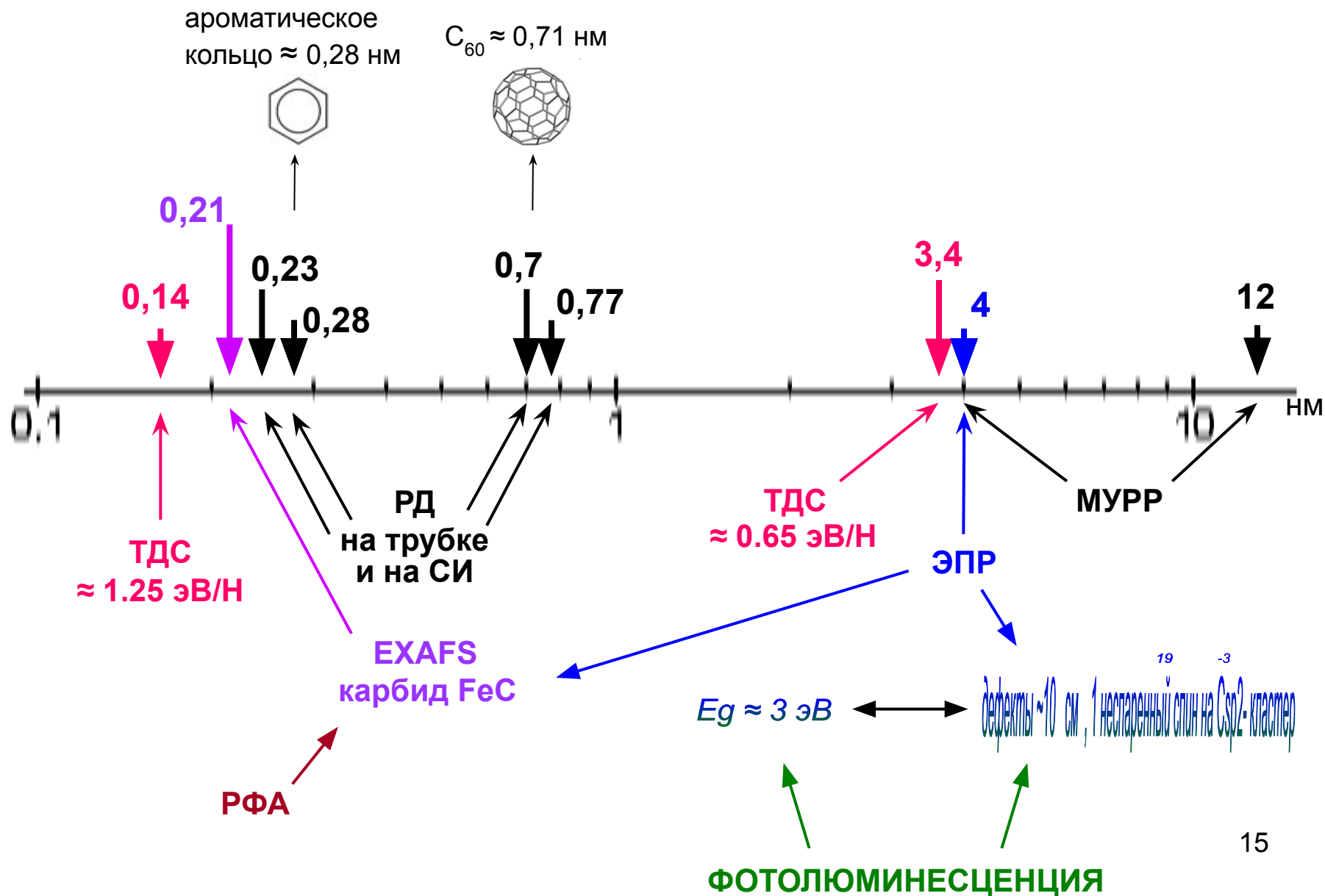
Водород хуже удерживается во фрактальных, чем в гладких пленках.

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

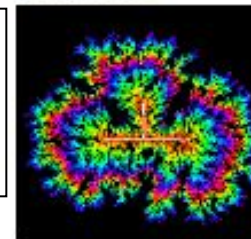
- Начальный этап - рост дендритов из одиночных подвижных атомов.
- Образование на поверхности критических зародышей – центров роста дендритов – флуктуационно и/или около примесей →

зависимость структуры от потока атомов и примесей, T.

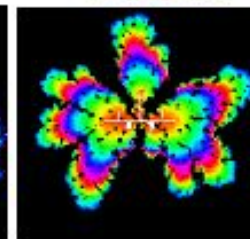
Диффузия примесей к более горячим местам в результате уменьшения энергии активации при термическом расширении решетки → рост развитых структур.

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

“Ballistic”



Random



РАЗМЕР МИНИМАЛЬНОГО КЛАСТЕРА:

Диффузионное «разравнивание» слишком мелких объектов:

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

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

(σ - поверхностное натяжение, T – температура поверхности, Ω – 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 $\ell \sim 10^{-2}$ –1 см.
Нужны экспериментальные работы

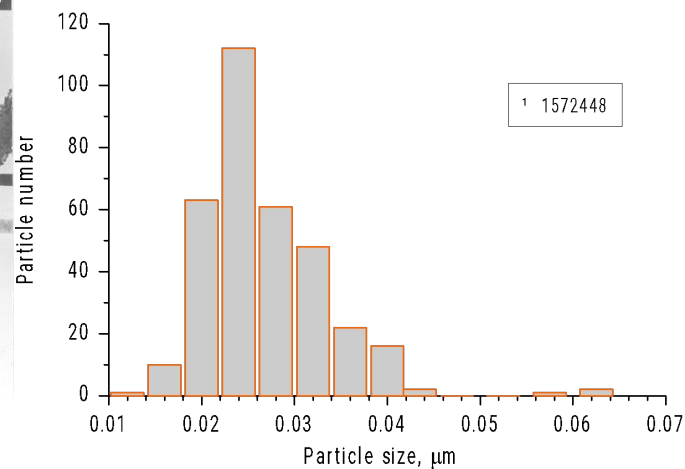
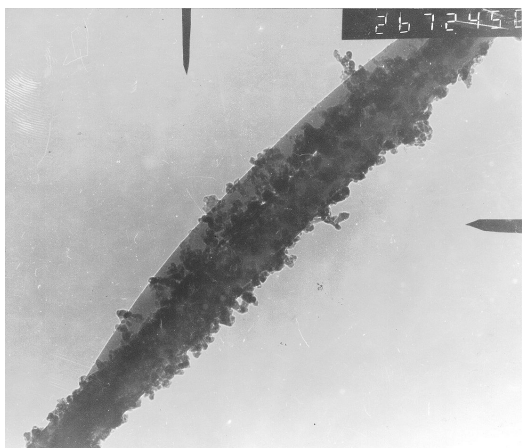
Пыль - мобилизуемая часть продуктов эрозии.

Пыль влияет на работу токамака:

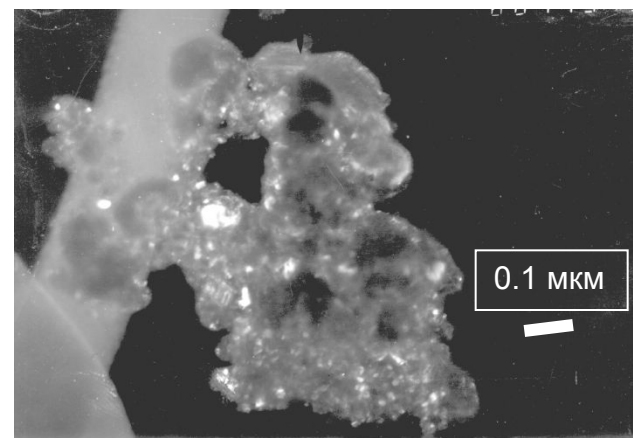
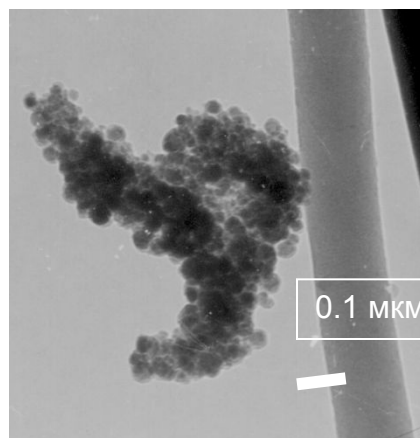
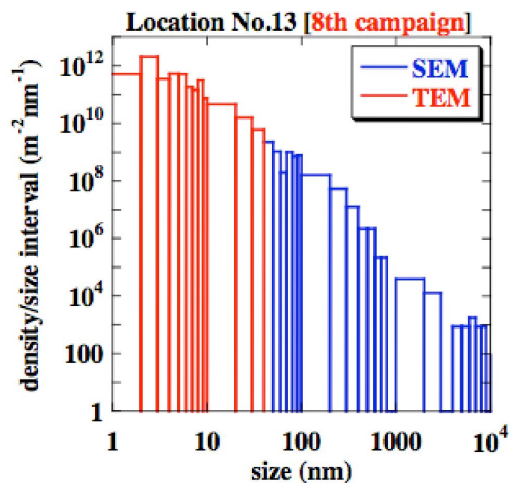
- 1) охлаждает плазму, попадая в центральную часть;**
- 2) инициирует малые вихри (blobs) в периферийной плазме;**
- 3) возможна стабилизация разряда инъекцией пыли.**

**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

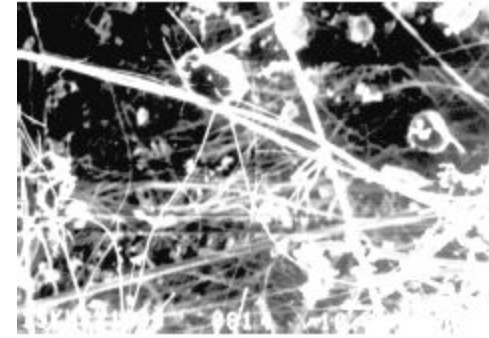
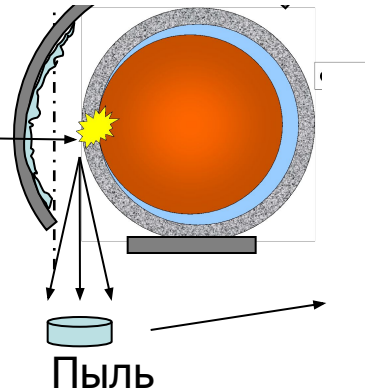
Агломерация пыли. Стекланный фильтр T-10

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

Нанопыль в токамаке Т-10

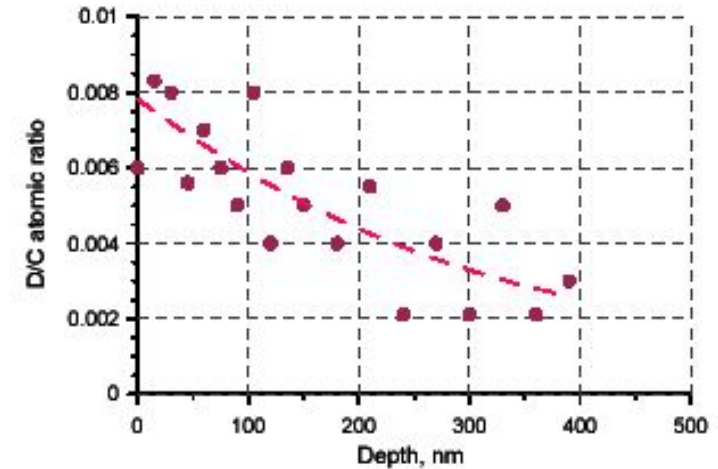
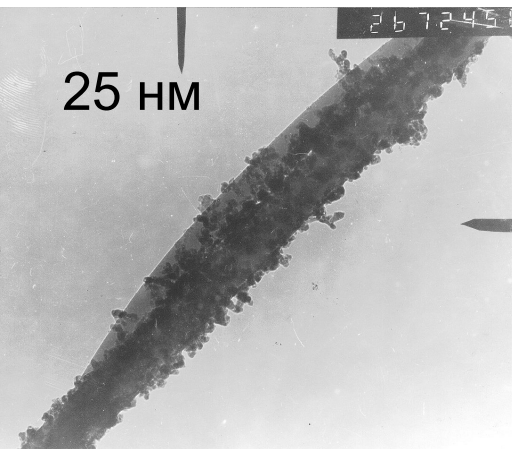
$600 \text{ кВт} \times 0.5 \text{ сек} = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$
(50 МВт/м²)

ИТЭР – подобные условия.



a) 10 μm

Фильтр для сбора пыли, Т-10



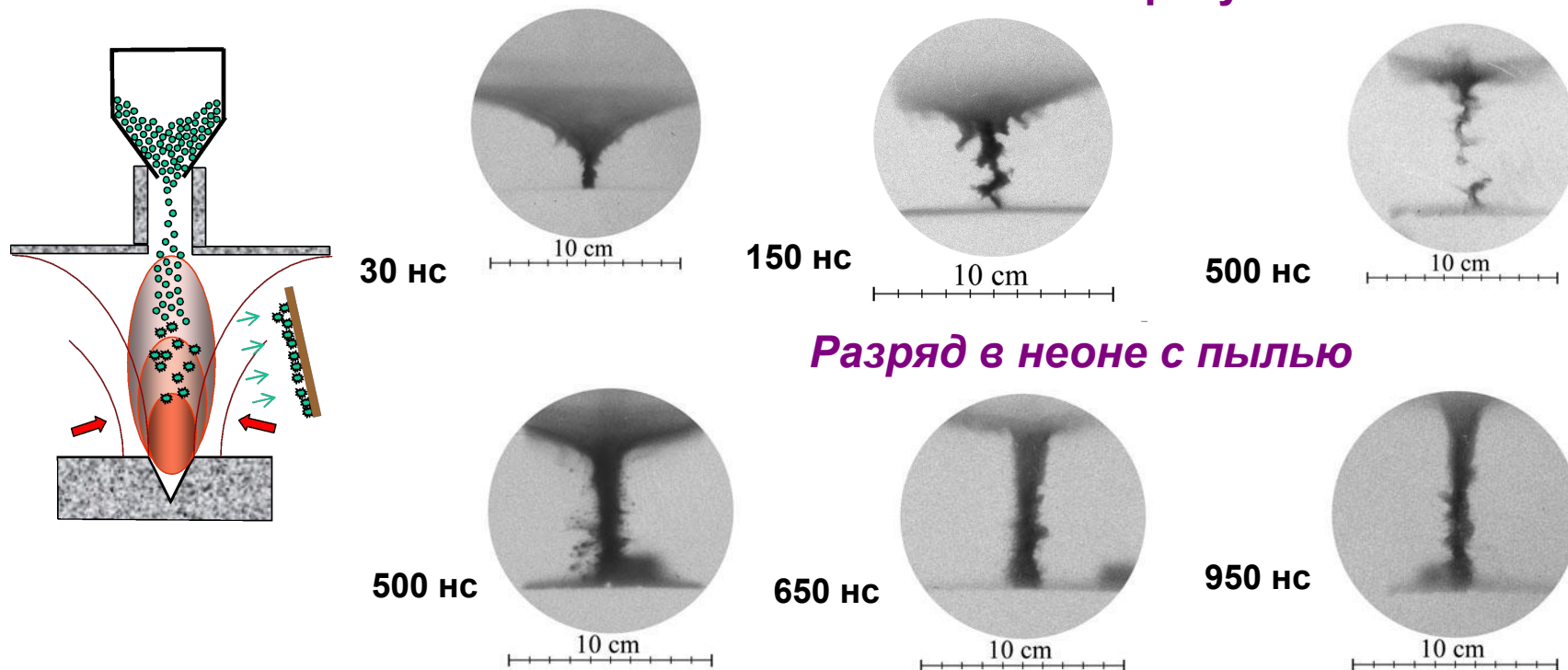
Водорода в пыли мало

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, 5th Int. Conf, on Z-pinches, Albuquerque, 2002)

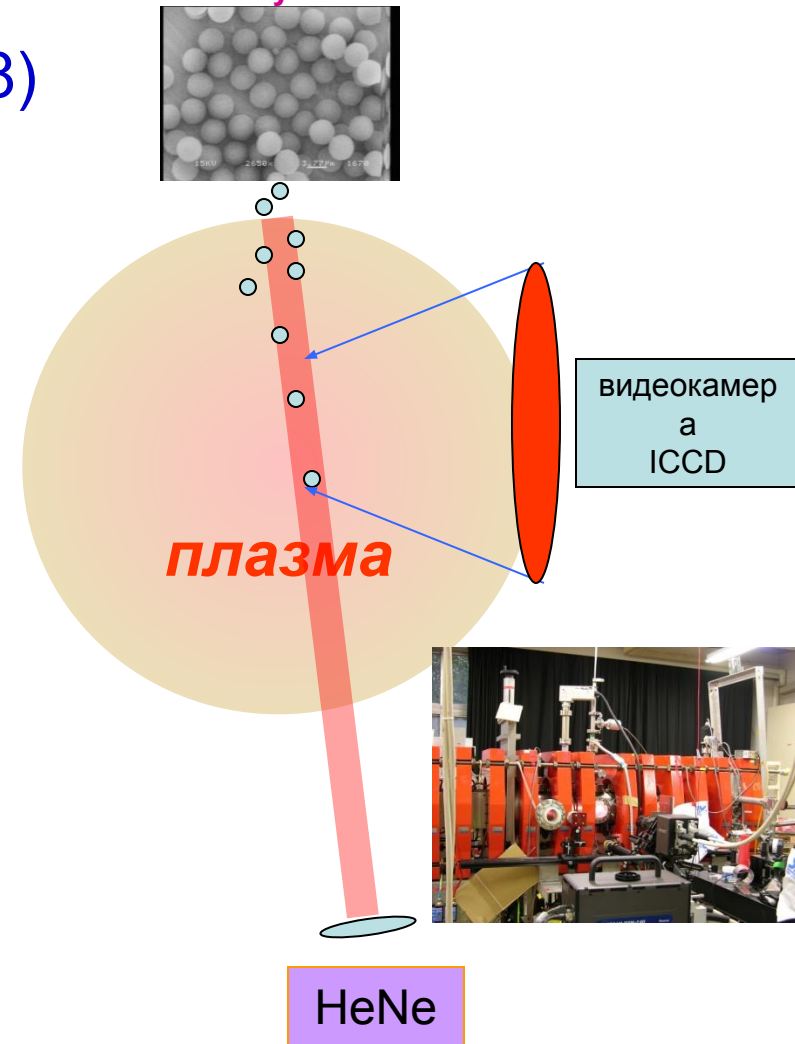
Эксперимент в Нагдис-II

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.

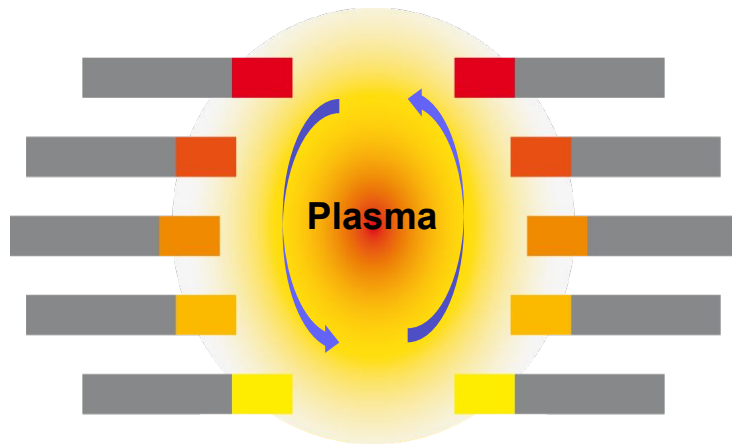
Напуск N_2 в ASDEX(2008) →

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



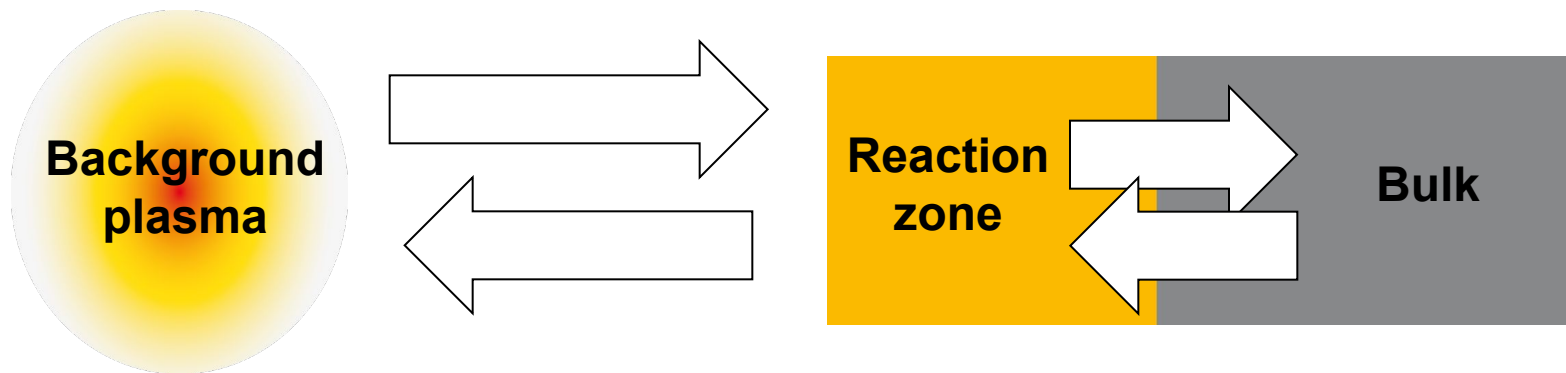
Inclusion of surface reactions in self-consistent global model of impurity migration *K. Krieger, Ch. Linsmeier, K. Schmid*

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