

Проблемы термоядерного материаловедения

(стойкость первой стенки к плазменным потокам)

Шошин Андрей Алексеевич
к.ф.-м.н., с.н.с. ИЯФ СО РАН и НГУ

Любая созданная человеком плазма имеет границу

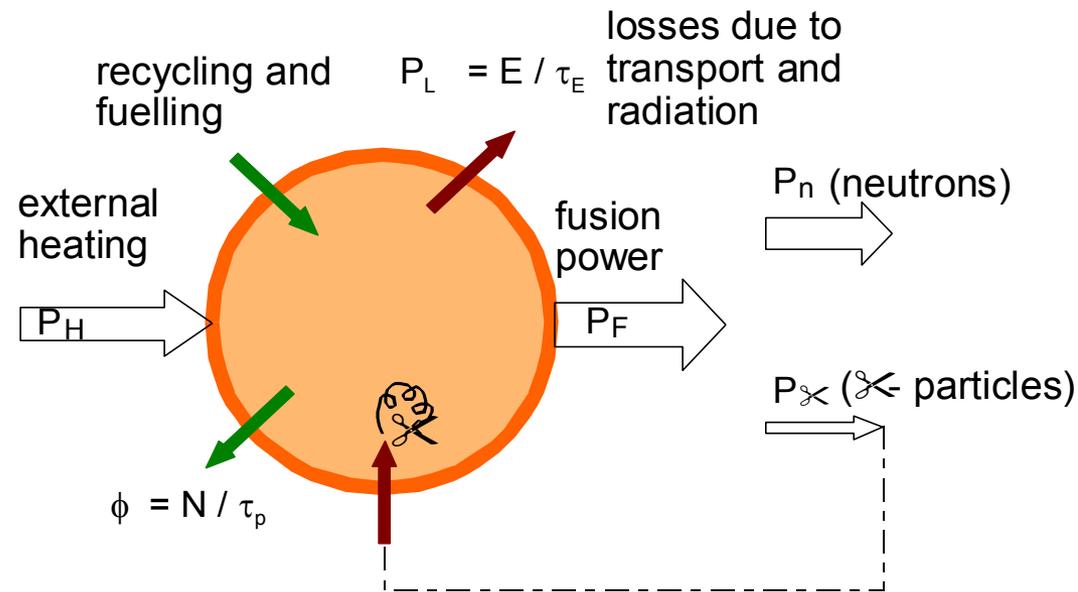
- Тепловая скорость плазмы:

$$v_{\text{th, ions}} \sim 10^4 (T_i / \text{eV} / A)^{1/2} \text{ m/s}$$

- Взаимодействие плазмы со стенкой неизбежно
- Взаимодействие плазмы со стенкой влияет как на плазму, так и на стенку!

Роль границы плазмы для термояда

Через границу плазмы
нужно обеспечить потоки
энергии и частиц как для
нагрева и подпитки
топливом, так и для
**отвода энергии и
продуктов реакции
(гелия)**



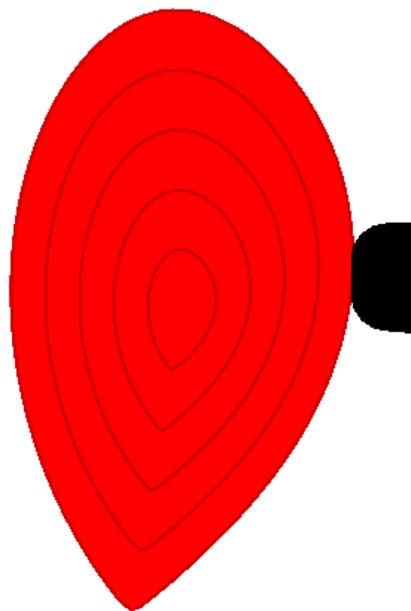
DT топливо в реакторе производит He со скоростью $\sim 10^{18} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$
Концентрация He в центре плазмы должна быть $< 10\%$

Нет естественных механизмов удаления продуктов реакции (гелия)
в замкнутых системах.

Есть две концепции задания границы плазмы и области нейтрализации гелия

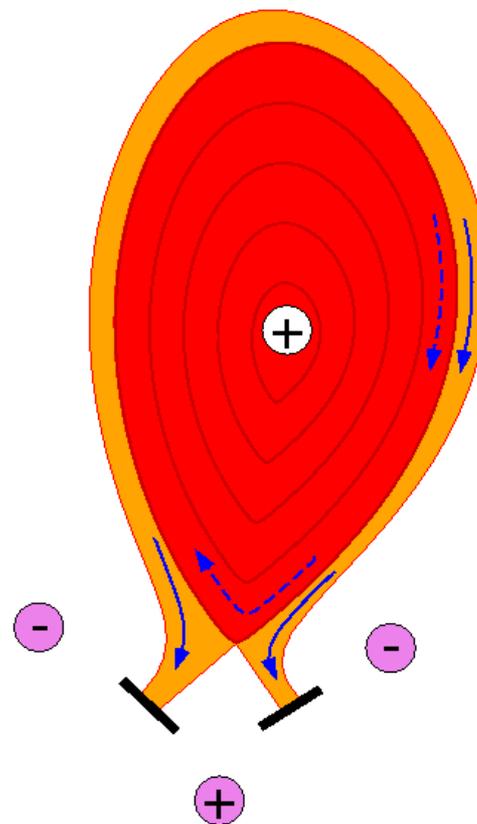
Лимитер

(граница плазмы задана веществом)



Дивертор

(граница задается магнитным полем)



Потоки частиц локализованы: удаление He

Но и потоки тепла локализованы: большие тепловые нагрузки

Processes of Plasma-Wall Interaction

10 keV central plasma

confinement region

B



1 eV – 1 keV edge plasma

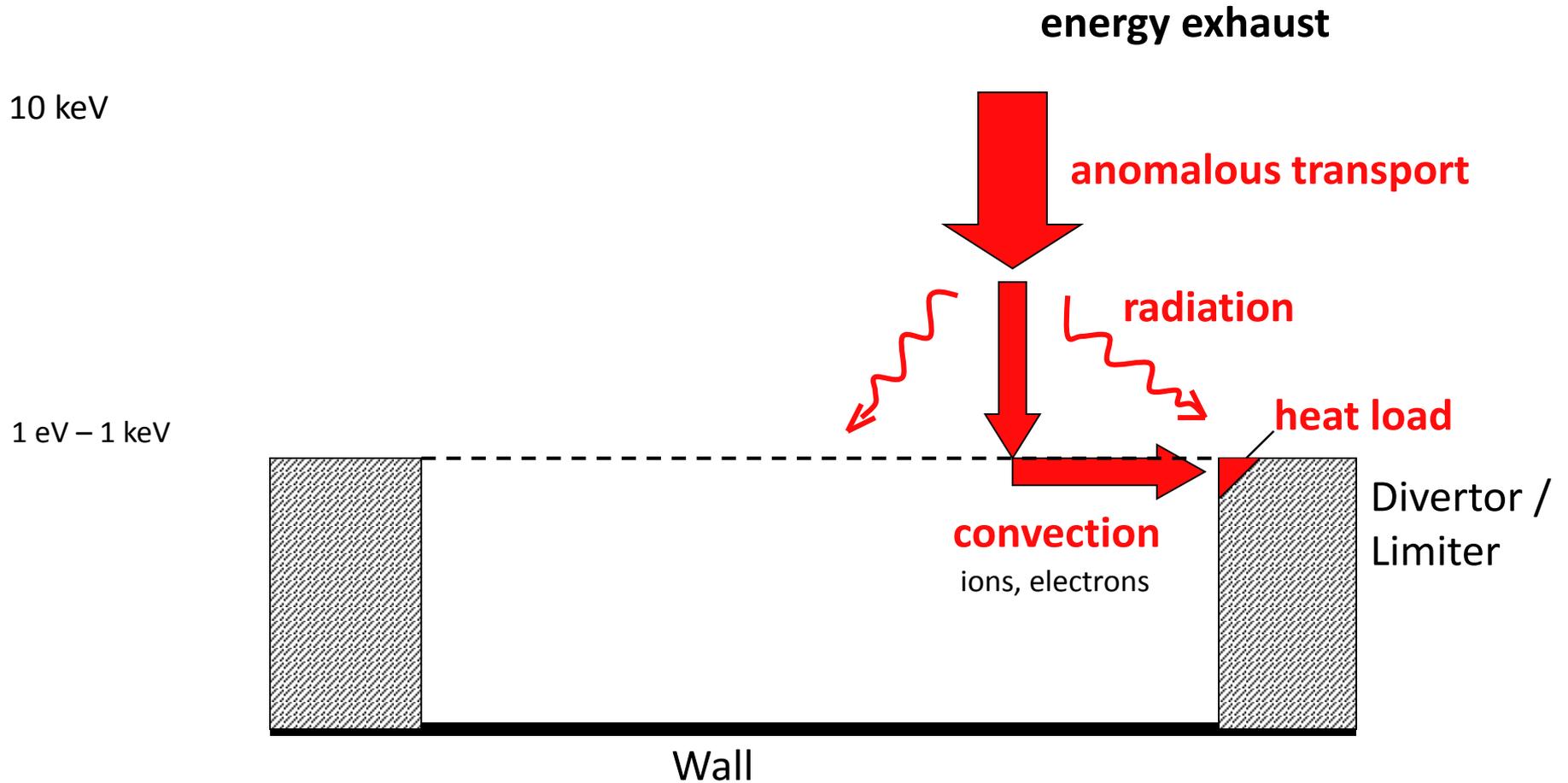
Scrape-off layer



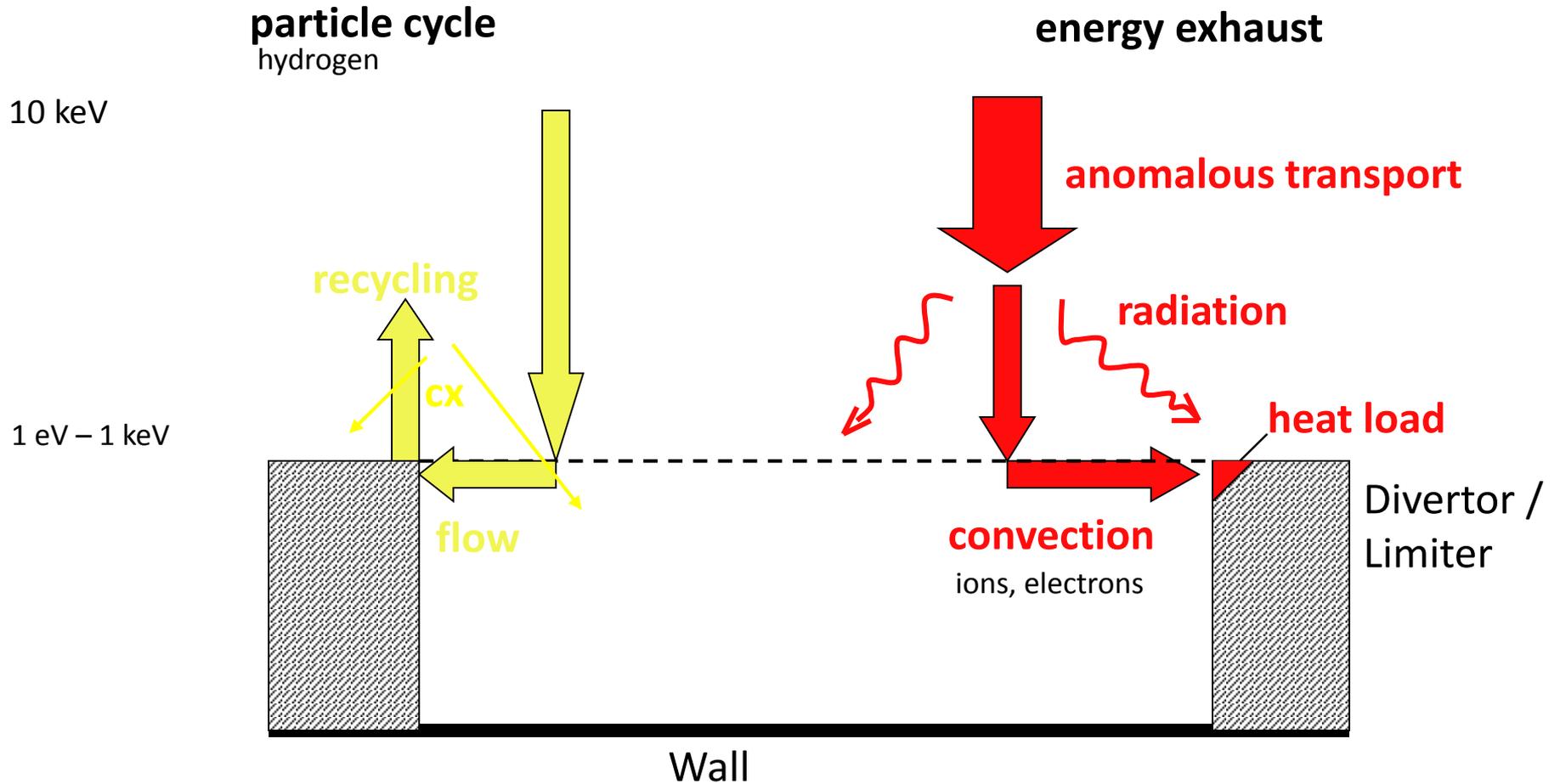
Divertor /
Limiter
(plasma sink)

Wall

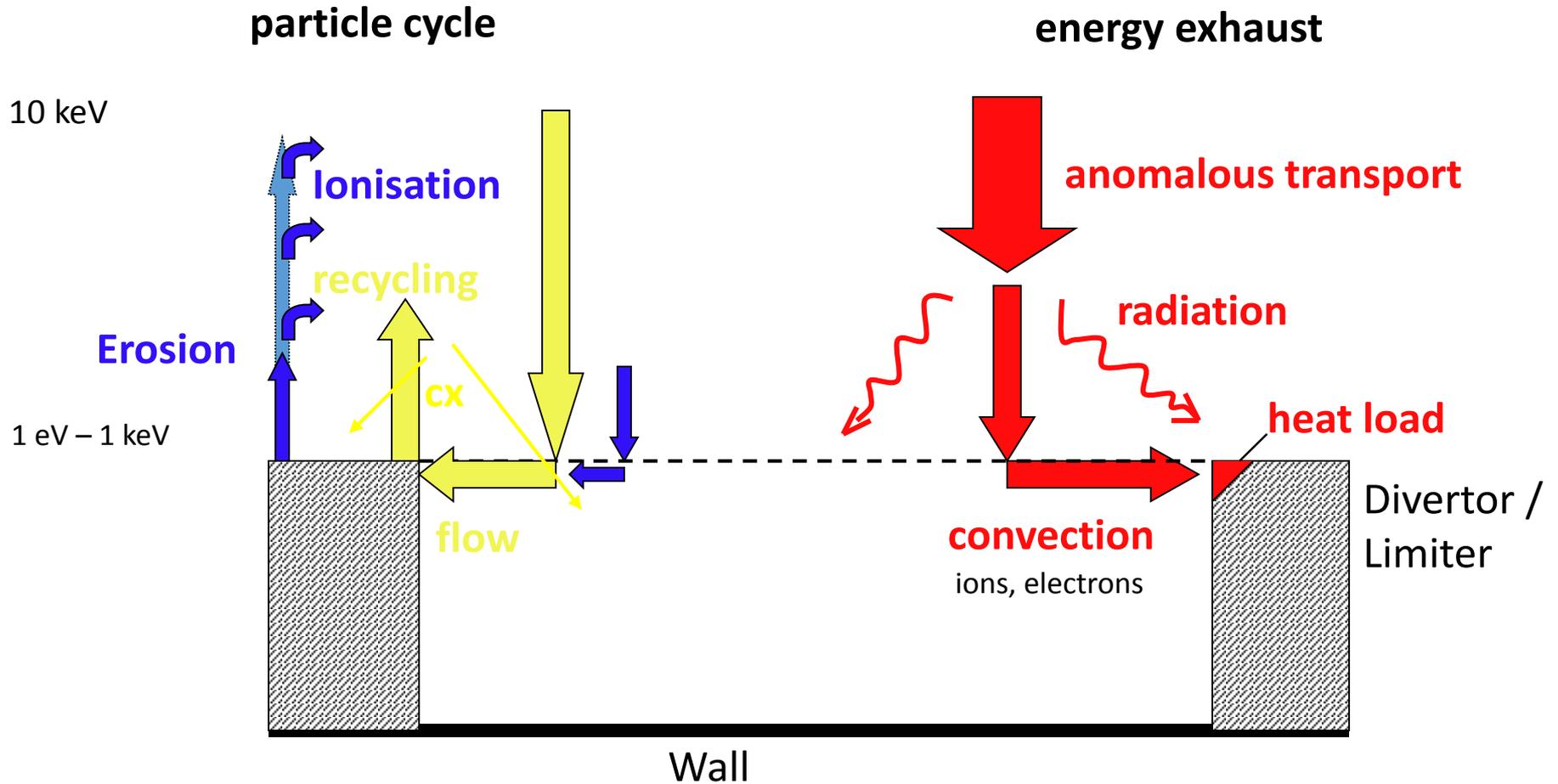
Processes of Plasma-Wall Interaction



Processes of Plasma-Wall Interaction

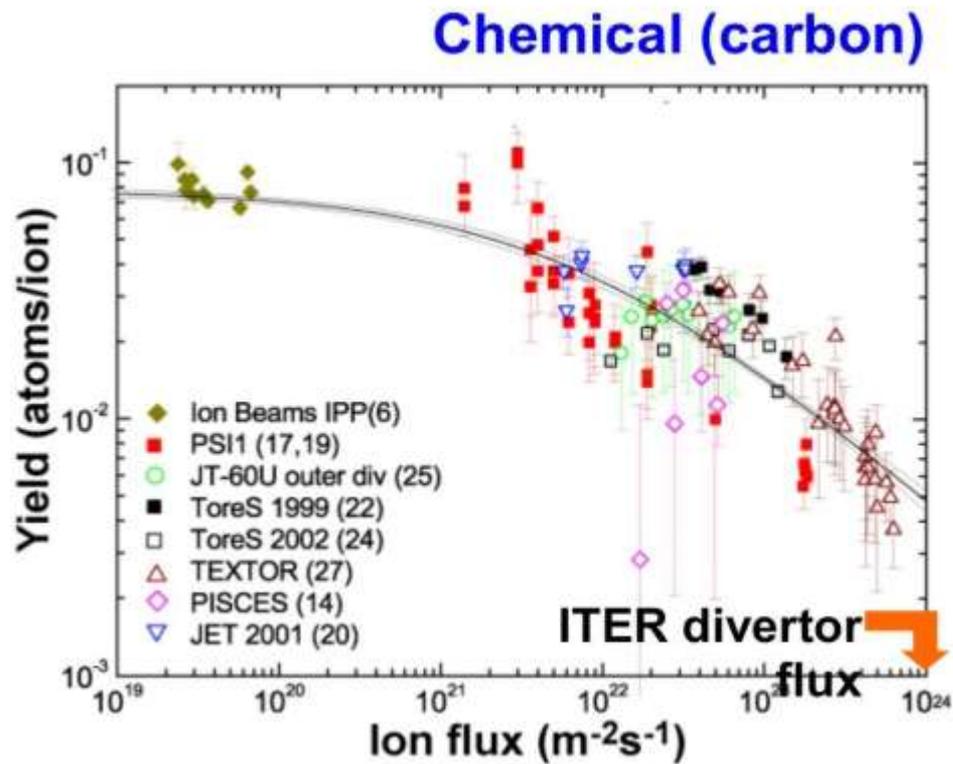
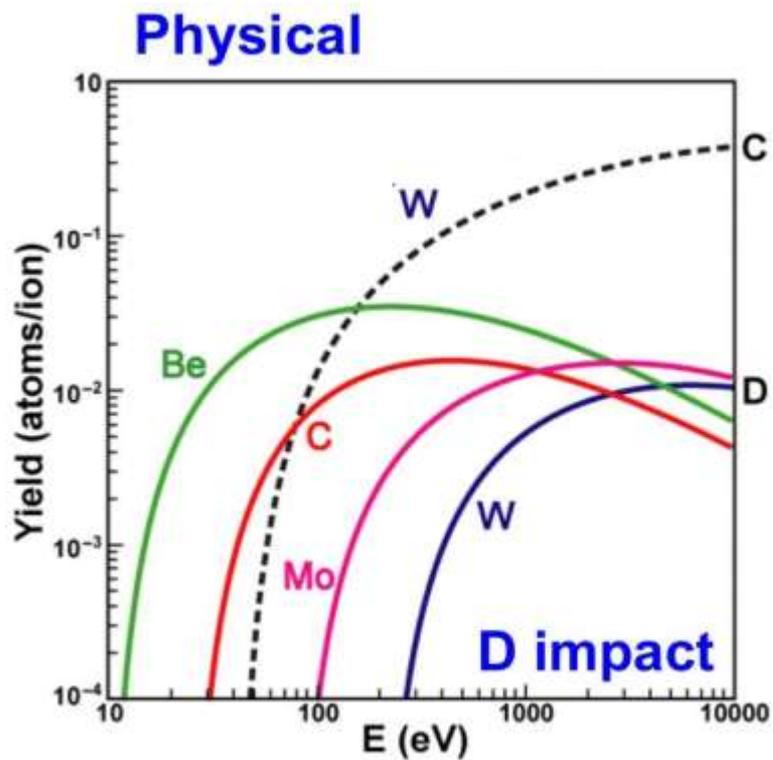


Processes of Plasma-Wall Interaction

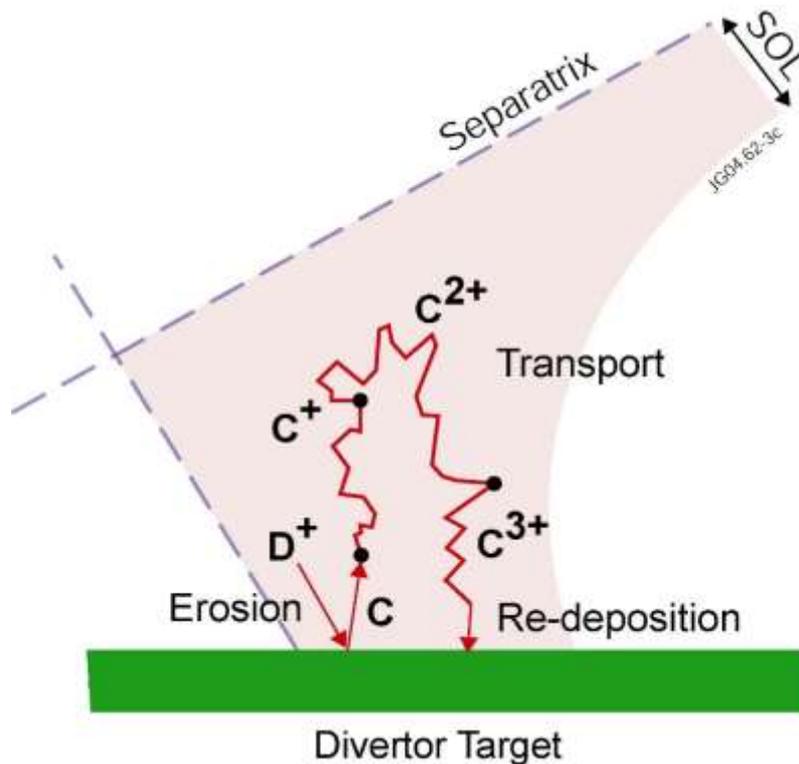


Erosion processes - radiation level - plasma parameters - erosion
a non-linear system

Физическое и химическое распыление



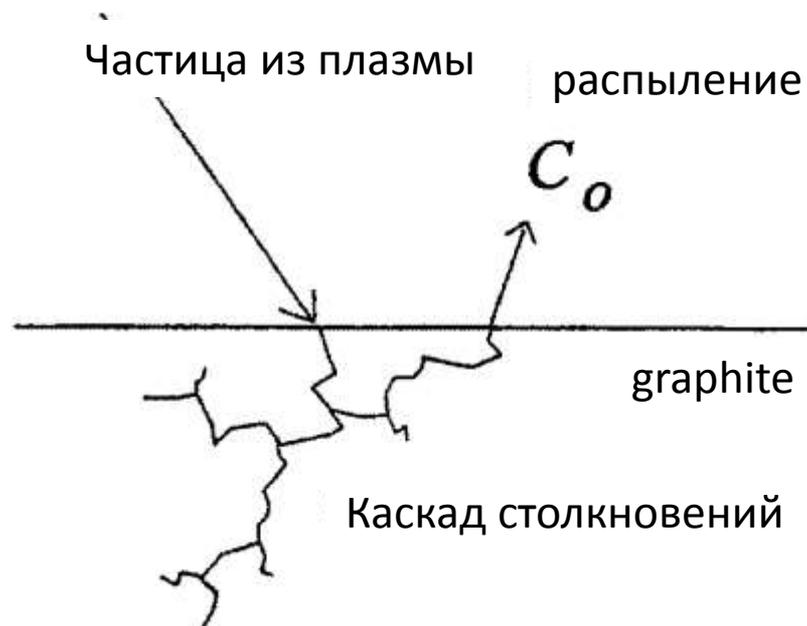
Микро эрозия и переосаждение



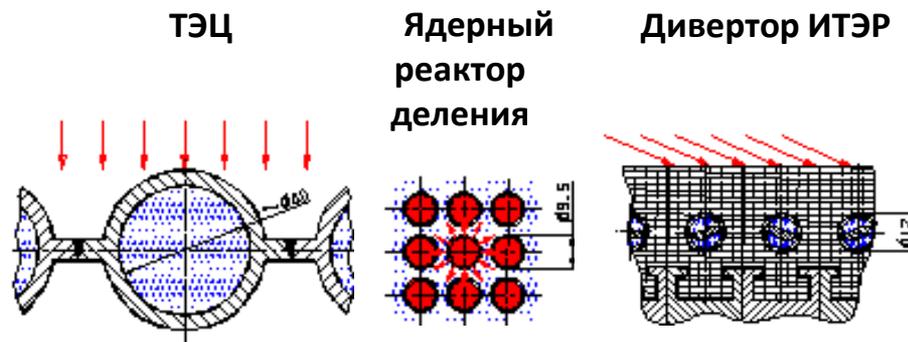
Процессы эрозии:

- физическое распыление
- химическое распыление
- плавление, сублимация, испарение

Осаждение может компенсировать эрозию (само-восстановление)



Нагрузки на материалы в ТЭЦ, АЭС и диверторе ИТЭРа

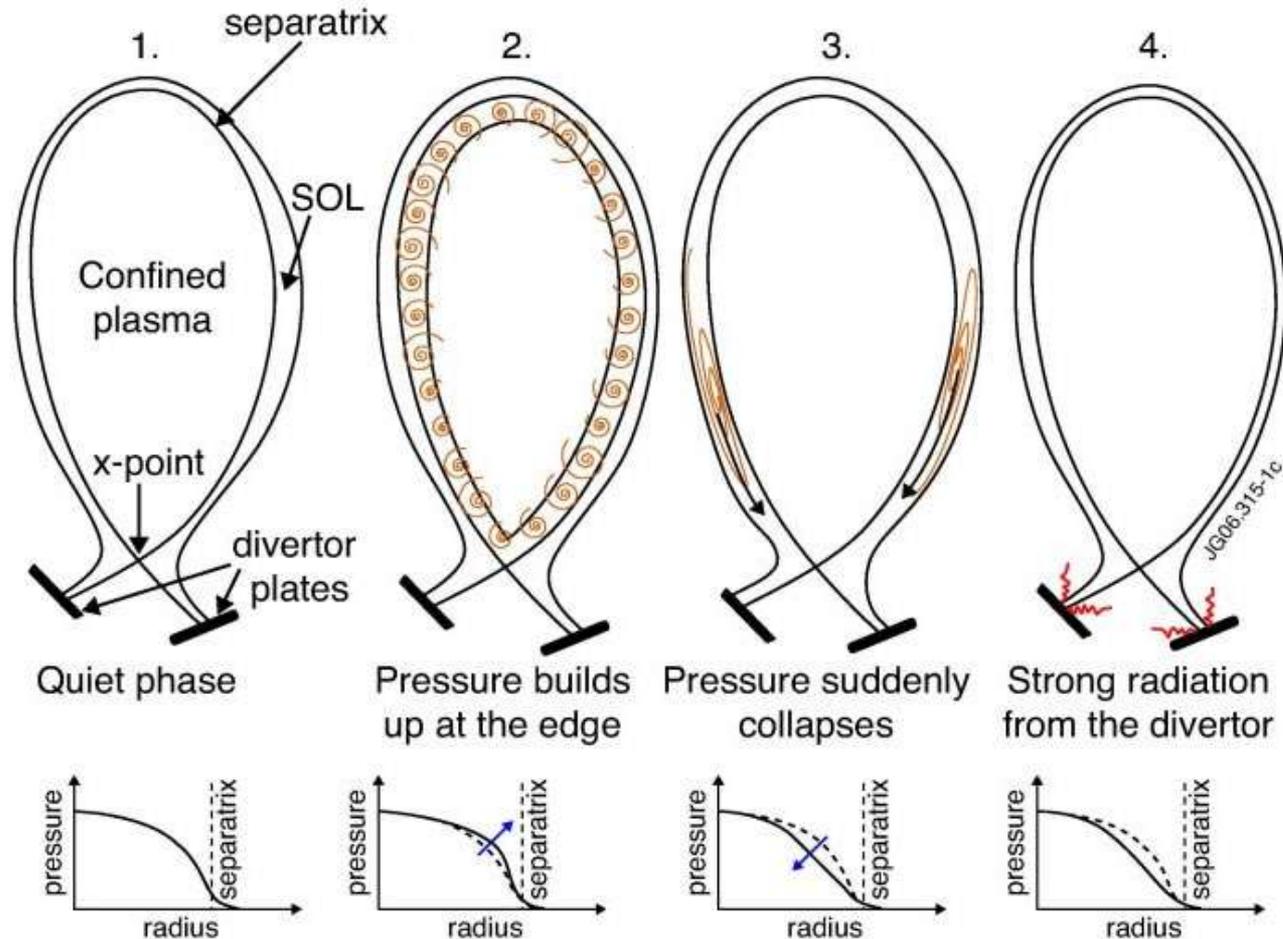


Поток тепла, МВт/м ²	0,2	0,7	5
Тепловые удары, МДж/м ²	–	–	10-100
Нейтронная нагрузка, дпа	–	10	0,2
Материал	Сталь	Zircaloy-4	CuCrZr покрыт W
Теплоноситель	Вода-пар	Вода	Вода
Давление, МПа	28	15	4
Температура	280-600	285-325	100-150
Скорость, м/с	3	5	10
Допустимые утечки, г/с	50	50	10 ⁻⁷

дпа (displacement-per-atom) – среднее количество перемещений атома из узлов кристаллической решетки материала под воздействием нейтронного излучения за период эксплуатации.

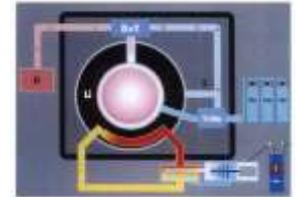
ELM

Edge localized mode



JG06-315-1c

Wall loads in future confinement experiments



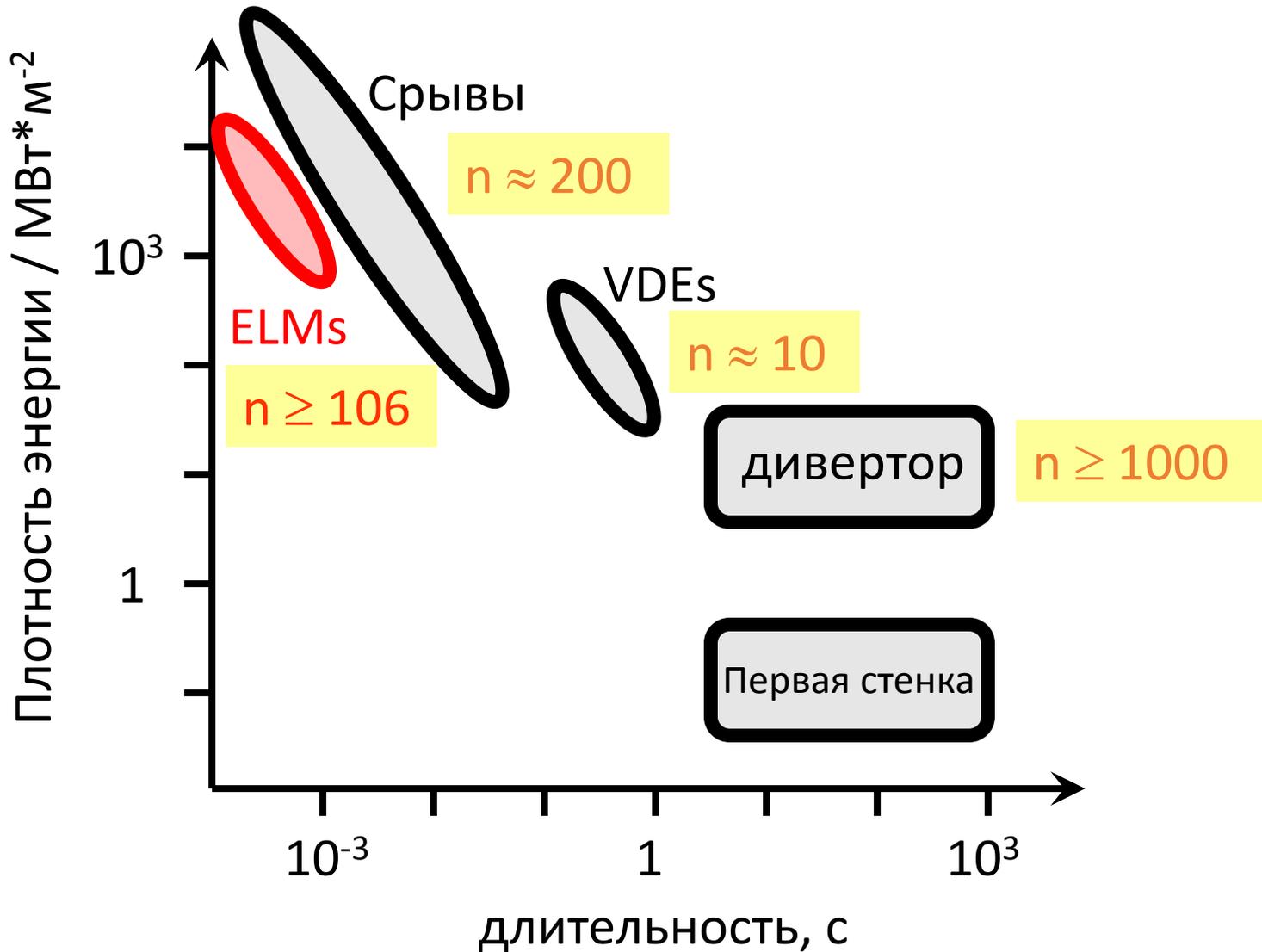
	W7-X	ITER	reactor
heat flux FW / MWm^{-2}	< 0.2	1	< 1
heat flux divertor / MWm^{-2}	< 0.2	20	$\approx 5 - 20$
VDEs / MJm^{-2}	?	60	-
disruptions / MJm^{-2}	?	≈ 10	-
ELMs / MJm^{-2}	?	1	?
neutron fluence / dpa	?	?	?

thermal fatigue

thermal shock

degradation, embrittlement

Частота различных событий в ИТЭРе:



Требования к первой стенке

К свойствам первой стенки предъявляются следующие требования:

- высокая теплопроводность, адекватные механические свойства, низкая активация нейтронами, доступность (в том числе по цене);
- совместимость с высокотемпературной плазмой реактора: стойкость к физическому и химическому распылению, высокая температура плавления (сублимации), стойкость к тепловым ударам, низкий поток вещества со стенки в основную плазму;
- совместимость с теплоносителем, высокая прочность, возможность механического и теплового соединения деталей

Способы отвода тепла в плазменных ловушках

- inertial cooling

small and medium
sized fusion devices

- water cooling

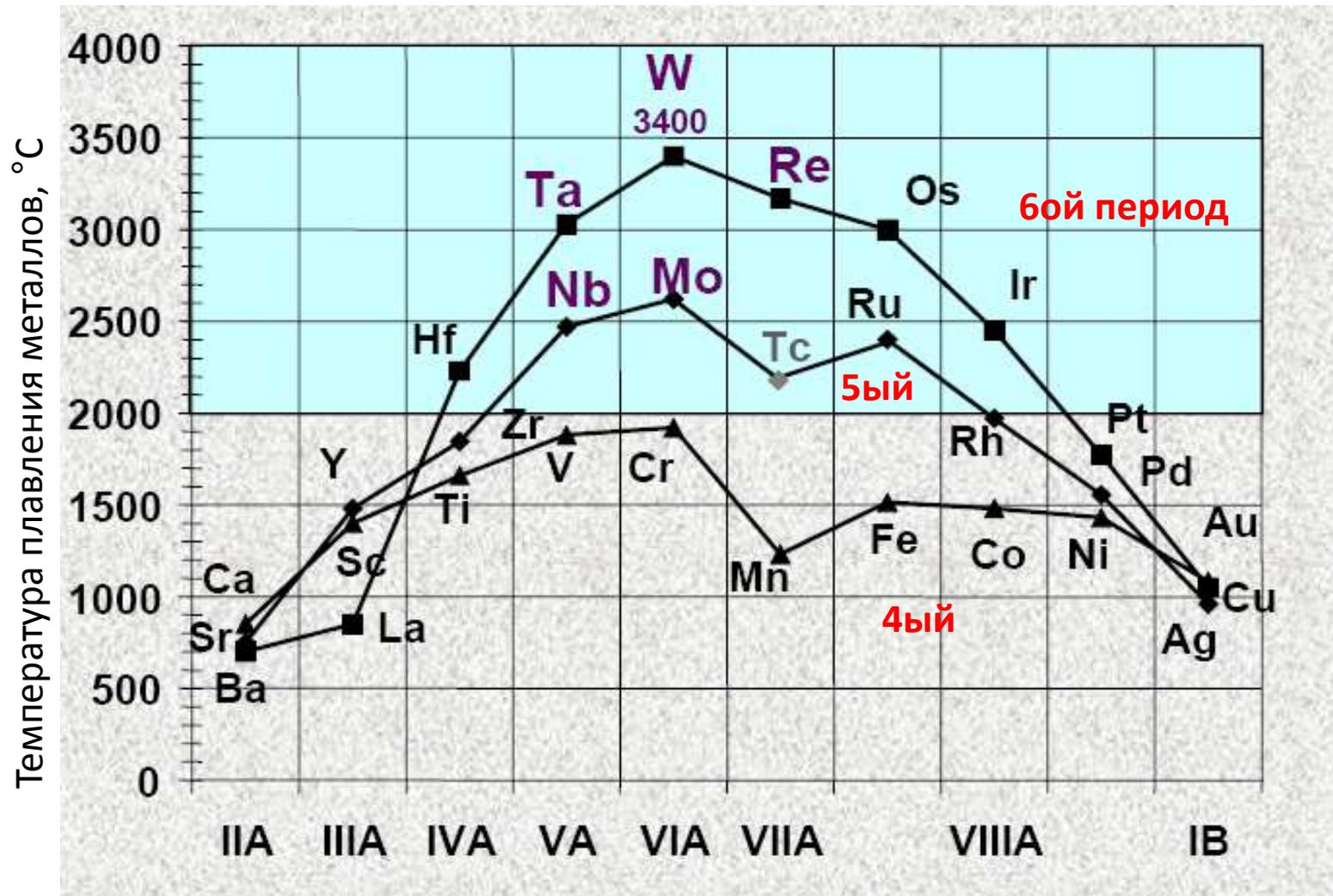
Tore Supra, ITER,
Wendelstein W7-X

- helium cooling

- liquid metals



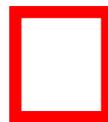
DEMO ?
commercial fusion reactor ?



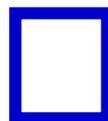
Материалы для первой стенки ИТЭР



Первая стенка



Съем тепла



конструкция



1 H																	2 He						
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Unn														



58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

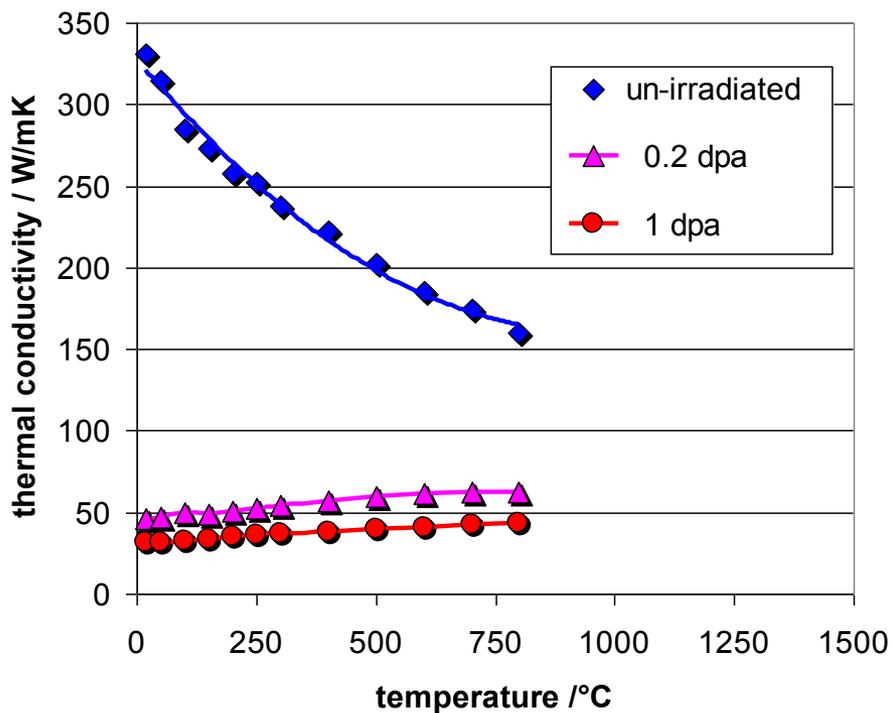
Материалы для первой стенки ИТЭР

	Be	CFC	W
Атомный номер Z	4	6	74
макс. допустимая концентрация в плазме	15 %	12 %	1 ppm
Теплопроводность λ [W/mK]	190	200 ... 500	140
Температура плавления [°C]	1285	3500 (subl.)	3410
Коэф. тепл. расширения [10 ⁻⁶ K ⁻¹]*	11.5	~ 0 В одном направлении	4.5
Поведение под потоком нейтронов	набухает	Уменьшается λ	активируется
Площадь покрытия в ИТЭРе	~680 м ²	0	~150 м ²

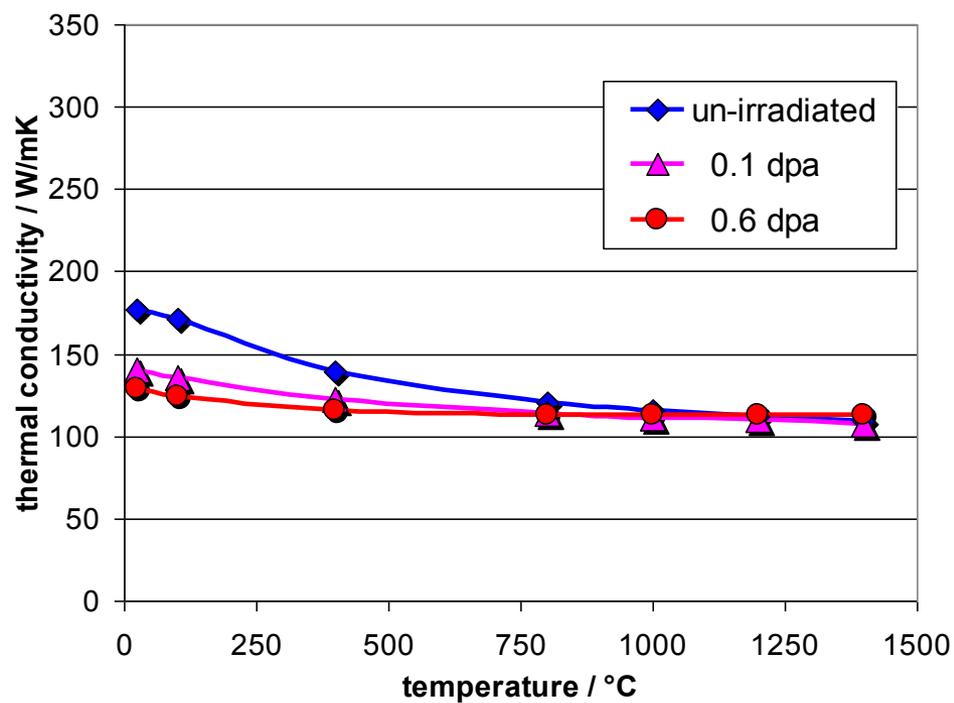
* у меди = 16.10⁻⁶ K⁻¹

Влияние нейтронного облучения на теплопроводность

NB31 (3D-CFC)



tungsten



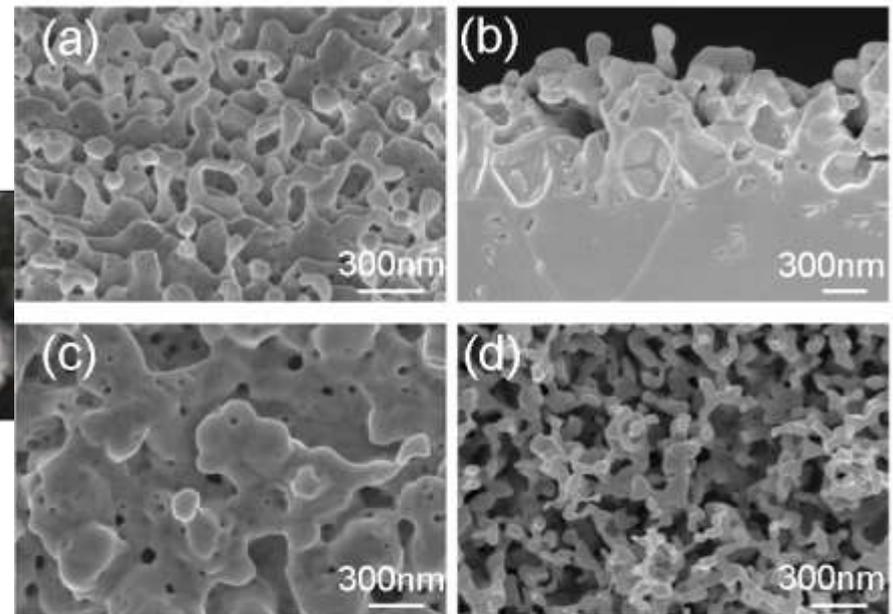
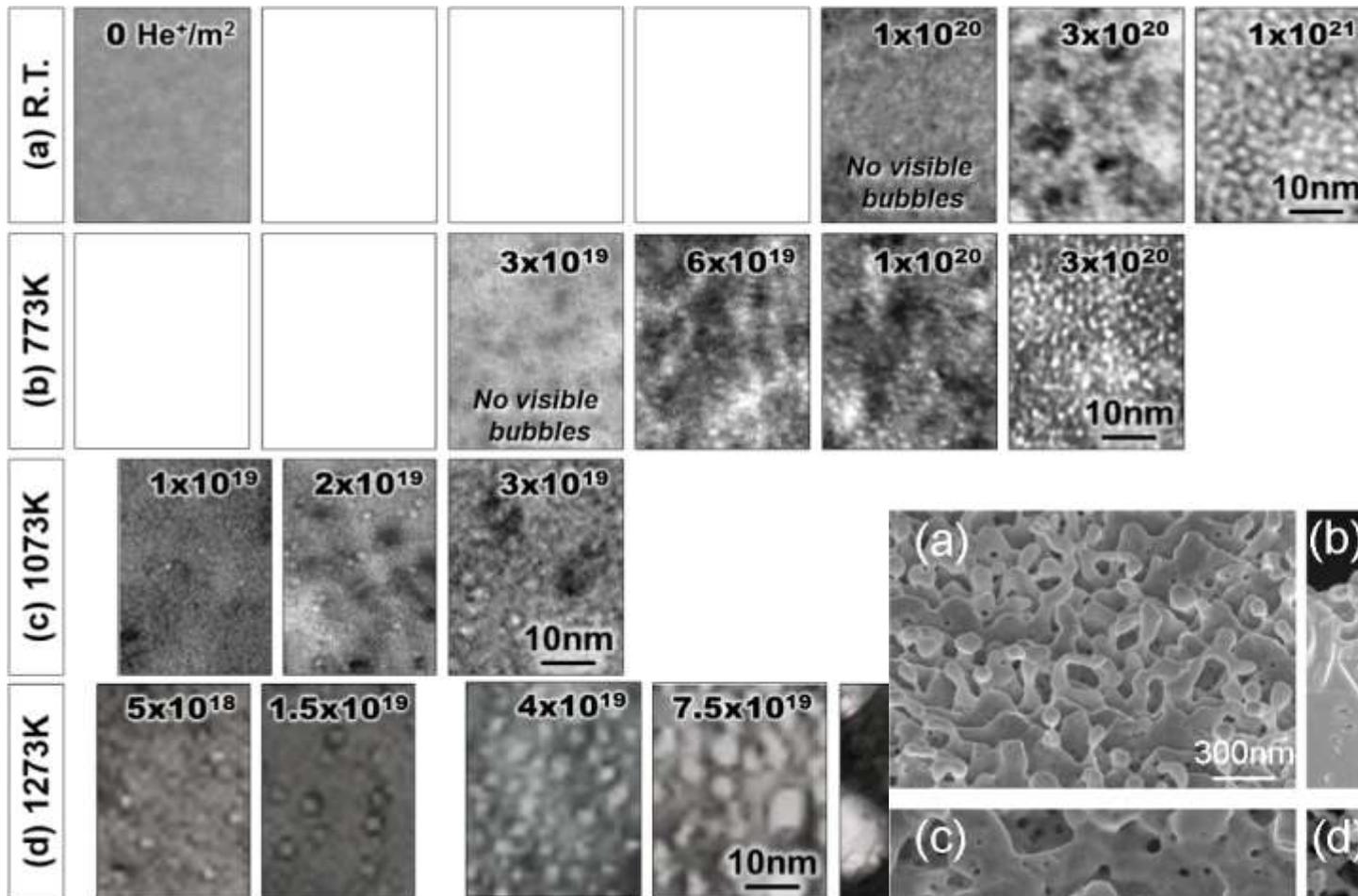
Макроскопические механизмы эрозии

- Блистеринг и подобные процессы
- Трещины
- Хрупкое разрушение
- Пыль
- Движение расплава

Эти макроскопические процессы приводят к существенным (критичным) последствиям:

- Изменение формы поверхности
- Деградация теплопроводности
- Потеря массы
- Загрязнение плазмы (в том числе Пылью)
- Переосаждение

Модификация вольфрама после облучения ионами гелия



doi:10.1088/0031-8949/2014/T159/014028

Экспериментальные исследования стойкости термоядерных материалов к облучению

Виды установок:

Линейные ловушки

Токамаки

Плазменные пушки

Электронные пушки

Лазеры

Разряды

Задачи:

Создать потоки частиц (воздействие ионов (H/He))

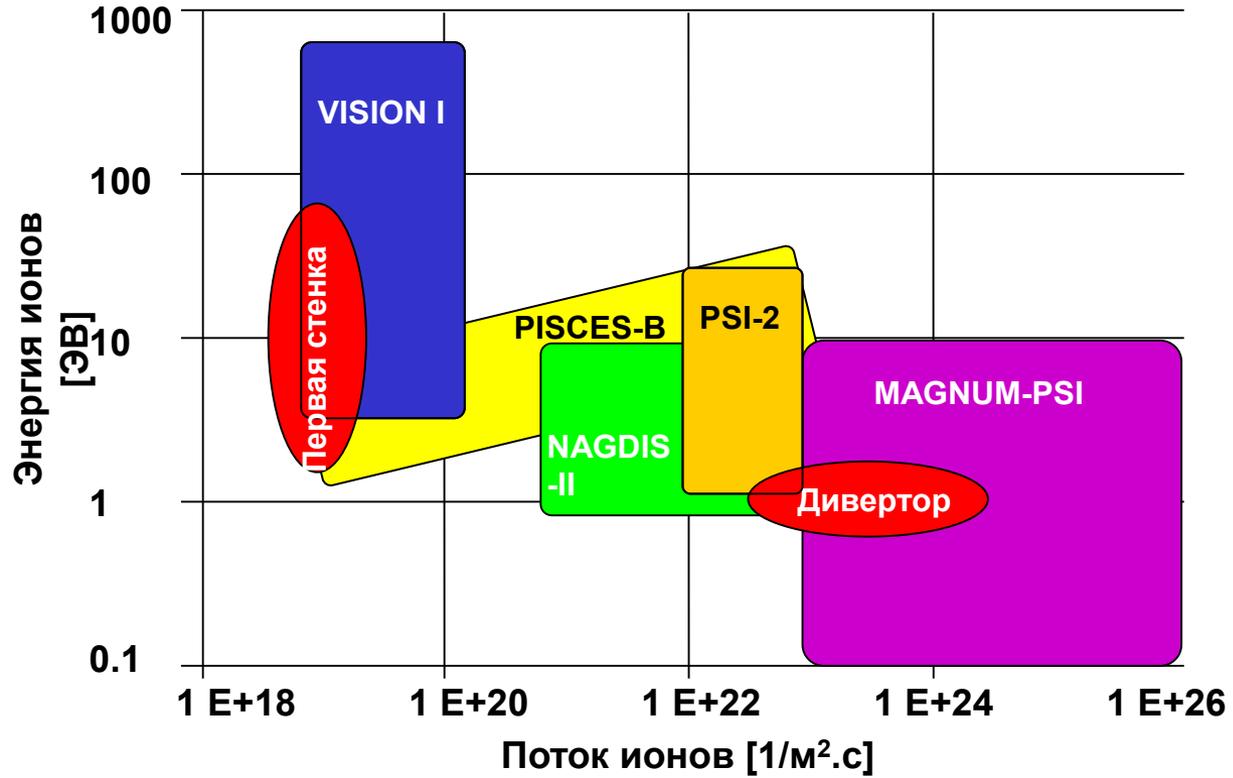
Создать потоки энергии

Исследование поверхностной плазмы (и влияния на основную плазму)

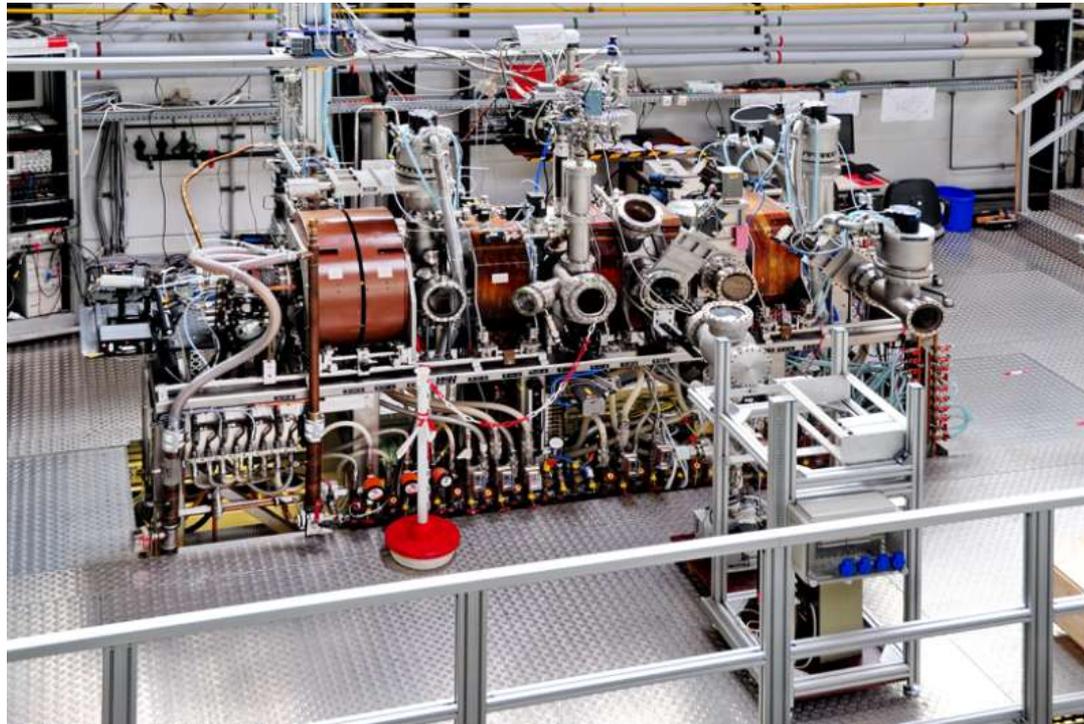
Исследование модификации поверхности

Сравнение с расчетами

Установки для исследования воздействия ионов на поверхность



Установка PSI-2 в Исследовательском центре Юлих (Германия)



Plasma parameters:	
Diameter of plasma column in target chamber	70 mm
Electron density	$10^{17} - 10^{20} \text{ m}^{-3}$
Electron temperature	1 – 20 eV
Particle flux to the target	$10^{21} - 10^{23} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Incident ion energy	10 – 300 eV (target bias)

Существующие системы и параметры для моделирования импульсных тепловых воздействий

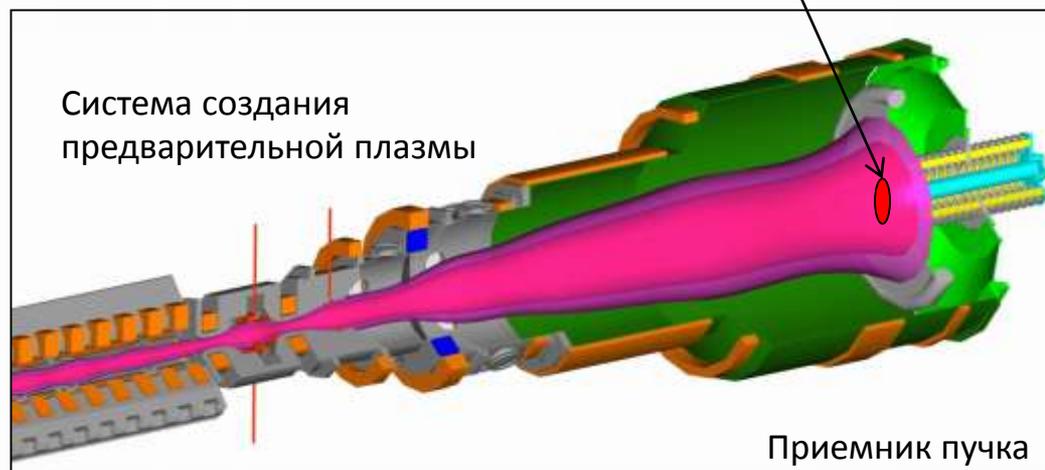
Тип	Установка	Длительность воздействия [мкс]	Плотность энергии [МДж/м ²]	Площадь воздействия [см ²]	Энергия частиц [кэВ]
ЭЛМы типа I	ITER	100 - 1000	1-10	100 000	1-5
Плазменный ускоритель	КСПУ-Х	250	0.2-2.5	250	0.4-0.9
Лазер	FZJ	1000	0.19 - 0.9	7*10 ⁻²	ИК излучение
Электронный пучок	JUDITH II	1000	10	0.2	30-60
Электронный пучок	ГОЛ-3 (длин. импульс)	100-300	1.5 - 2.5	2	55-85

Облучение нагретых мишеней на установке ГОЛ-3

Генератор электронного пучка У-2

Время работы пучка ~ 10 мкс
Энергосодержание пучка ~ 100 кДж
Температура плазмы ~ 1 кэВ
Плотность плазмы $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$
Время удержания ~ 1 мс

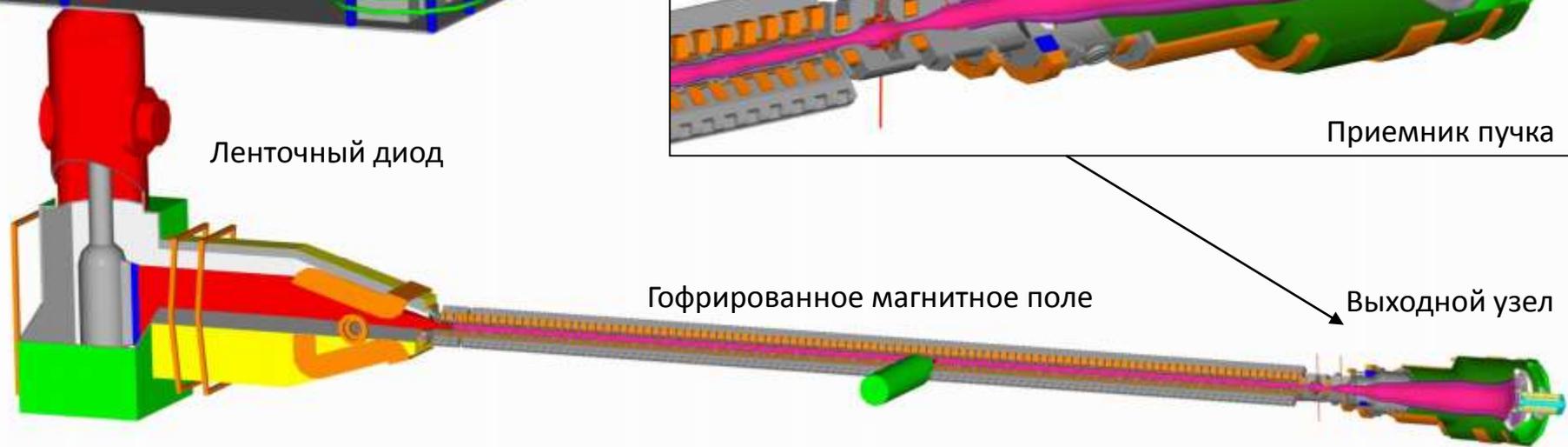
Место установки образцов



Ленточный диод

Гофрированное магнитное поле

Выходной узел

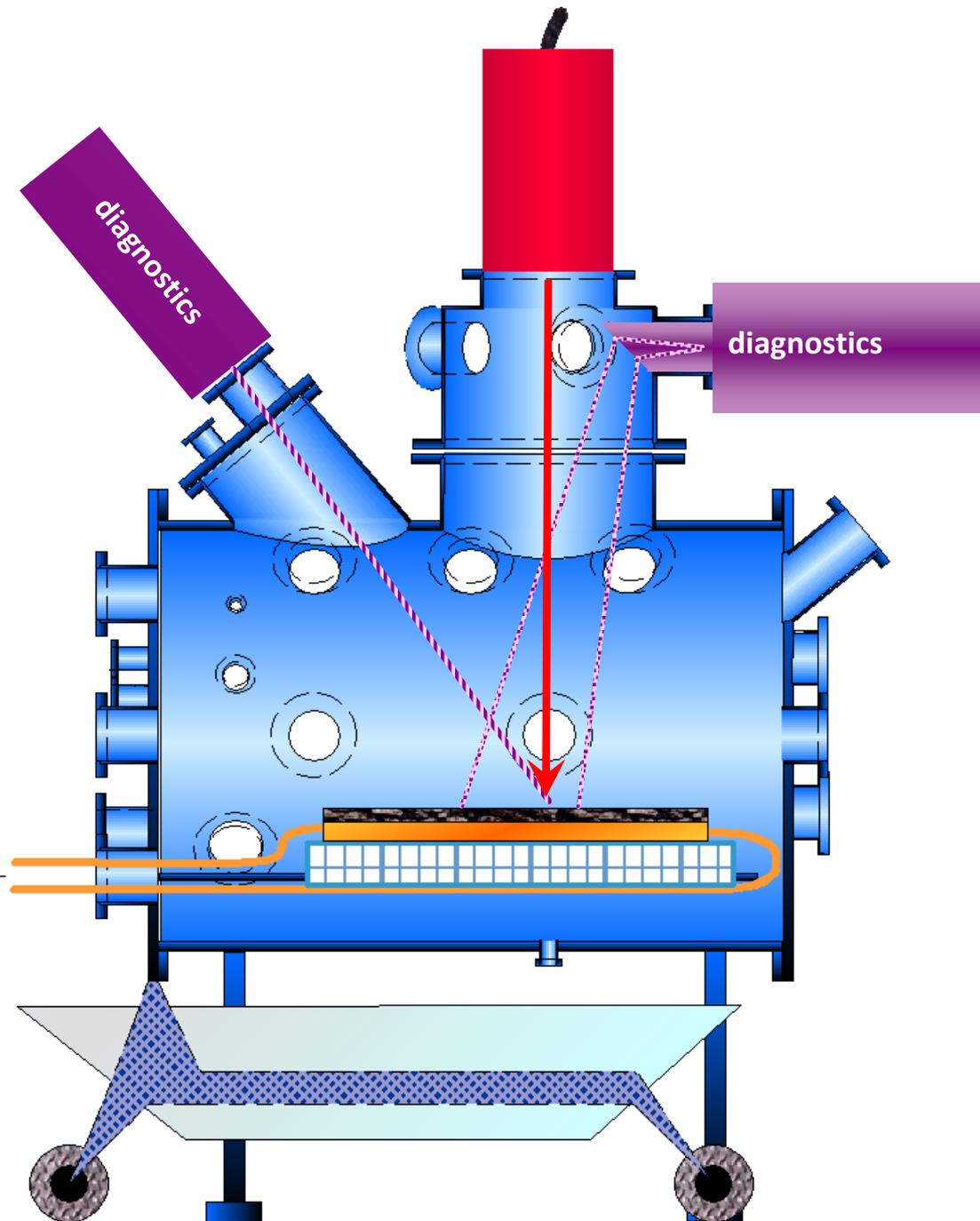


JUDITH II

schematic view into the vacuum chamber

Diagnostics:

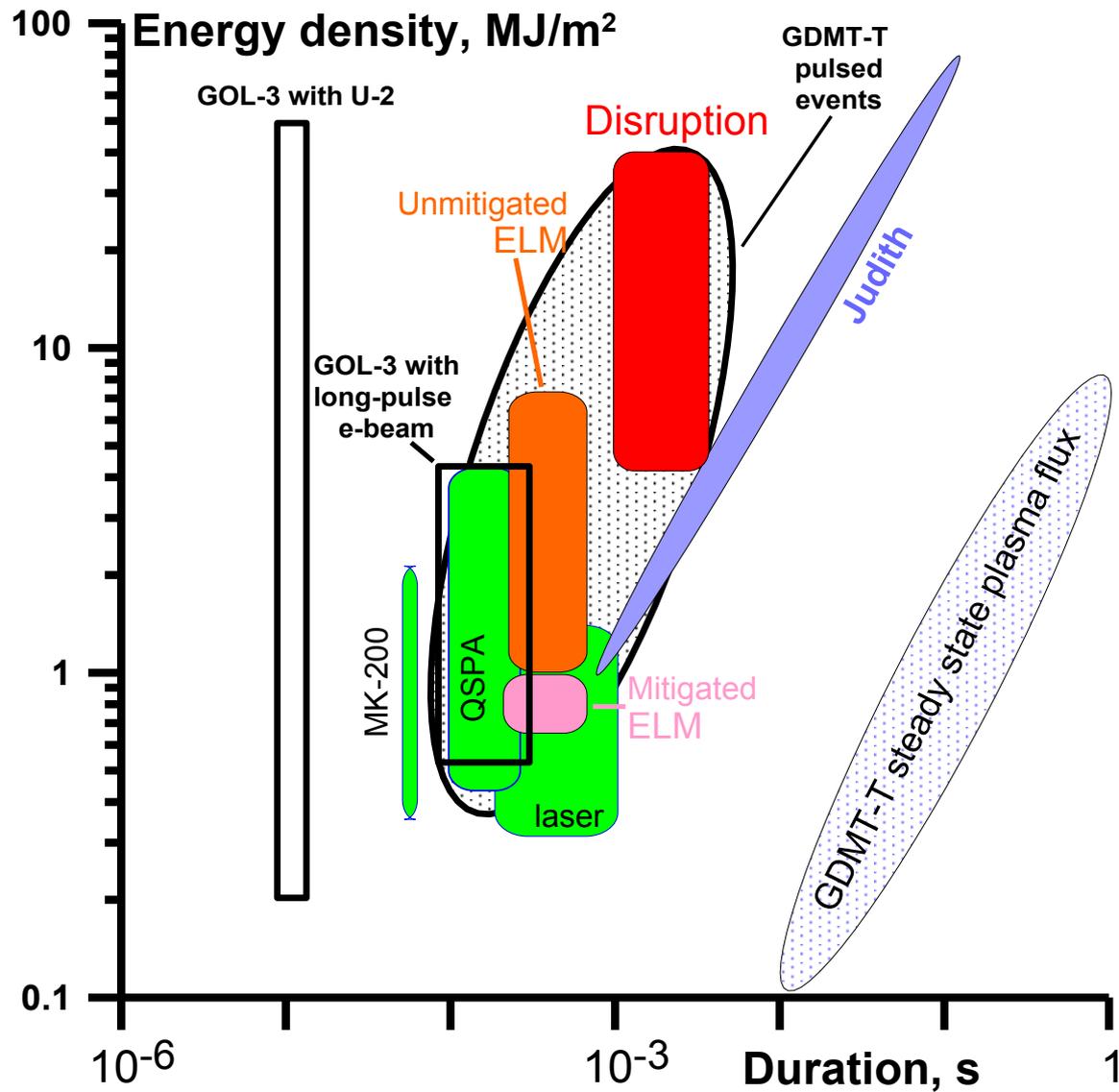
- IR-camera
- Optical camera
- Pyrometers
- Spectroscopy
- Thermocouples
- Photo diodes
- Acoustic emission



КСПУ X-50

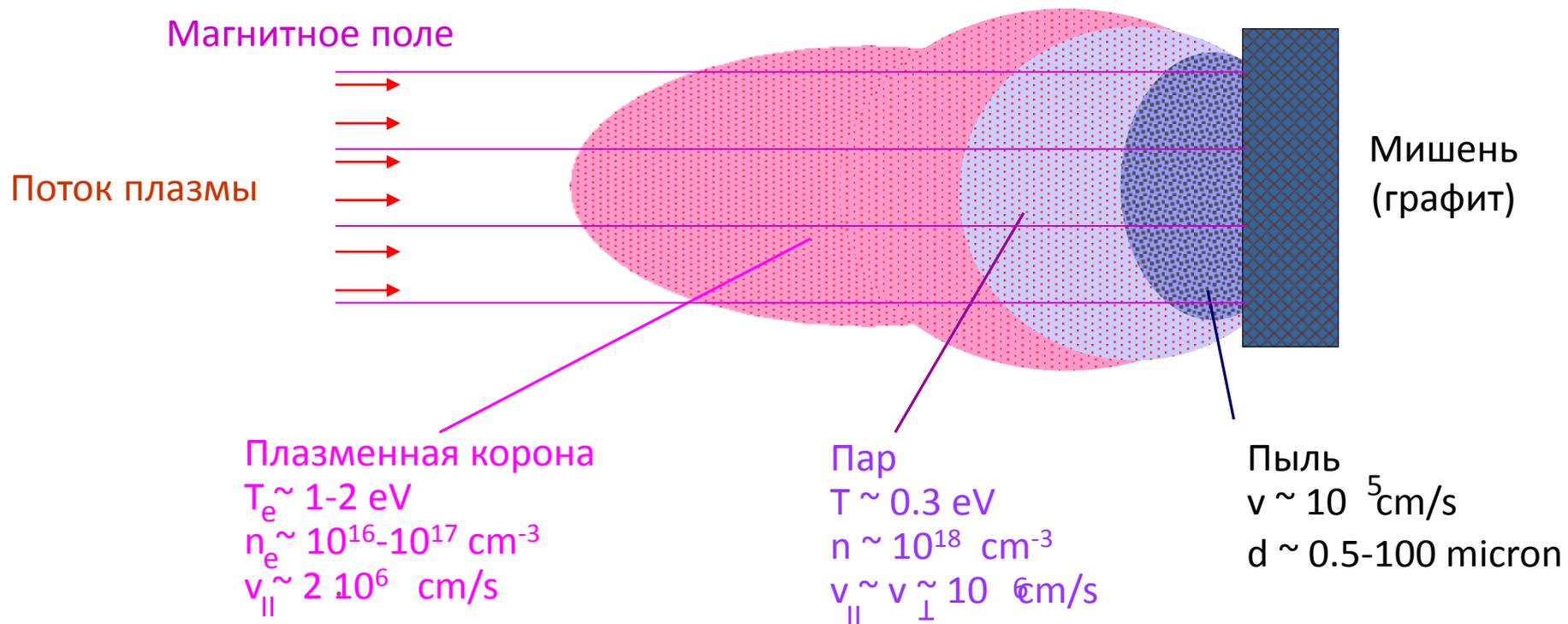


Длительность импульса τ , μs	150-300
Напряжение на батарее U_c , kV	10-12
Разр. ток I , kA	600
Плотность плазмы n , cm^{-3}	(2-7) $\cdot 10^{16}$
Энергосодержание потока E_0 , кДж	50-100
Плотность энергии E , Дж/ cm^2	60-100



Плотность энергии в плазменном потоке в различных плазменных машинах в зависимости от времени.

Компоненты мишенной плазмы

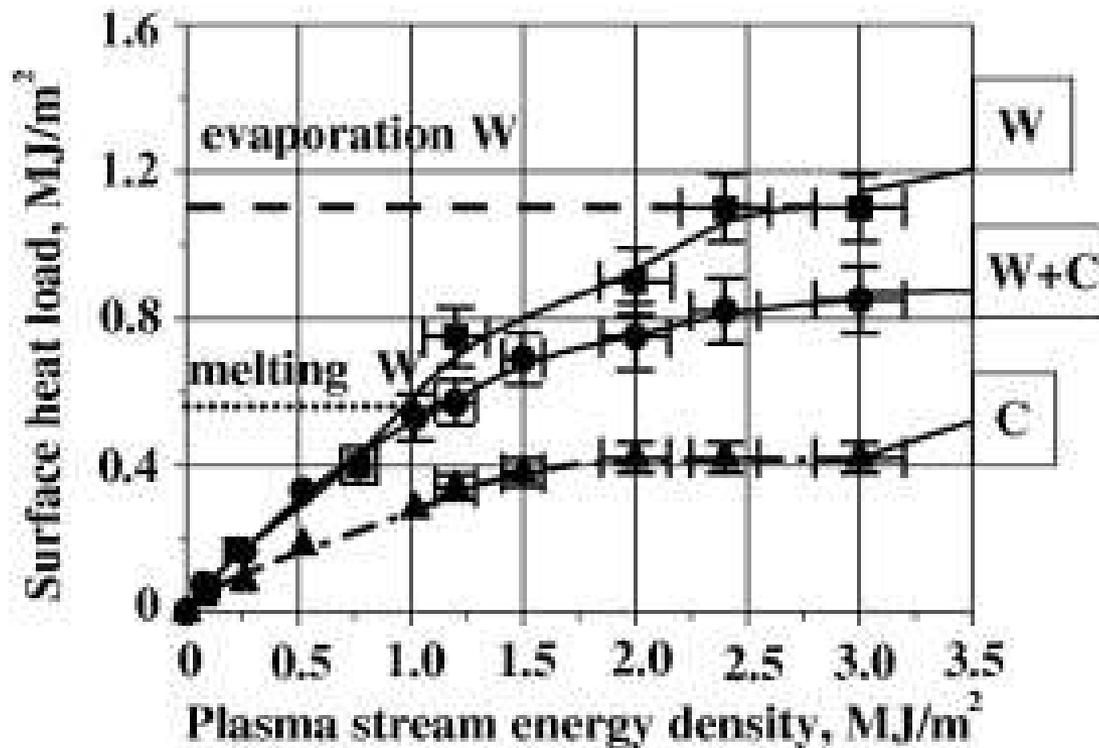


Паровой экран

Под воздействием импульсного плазменного потока с большой плотностью энергии поверхностный слой материала разогревается, испаряется и уже через несколько микросекунд образуется достаточно плотное облако поверхностной плазмы. Это облако экранирует поверхность от налетающего потока плазмы и поток тепла, достигающий до поверхности, определяется квазистационарным теплопереносом в поверхностной плазме. В результате большая часть (вплоть до 99%) налетающей энергии переизлучается поверхностной плазмой, тепловая нагрузка на мишень снижается и эрозия поверхности мала.

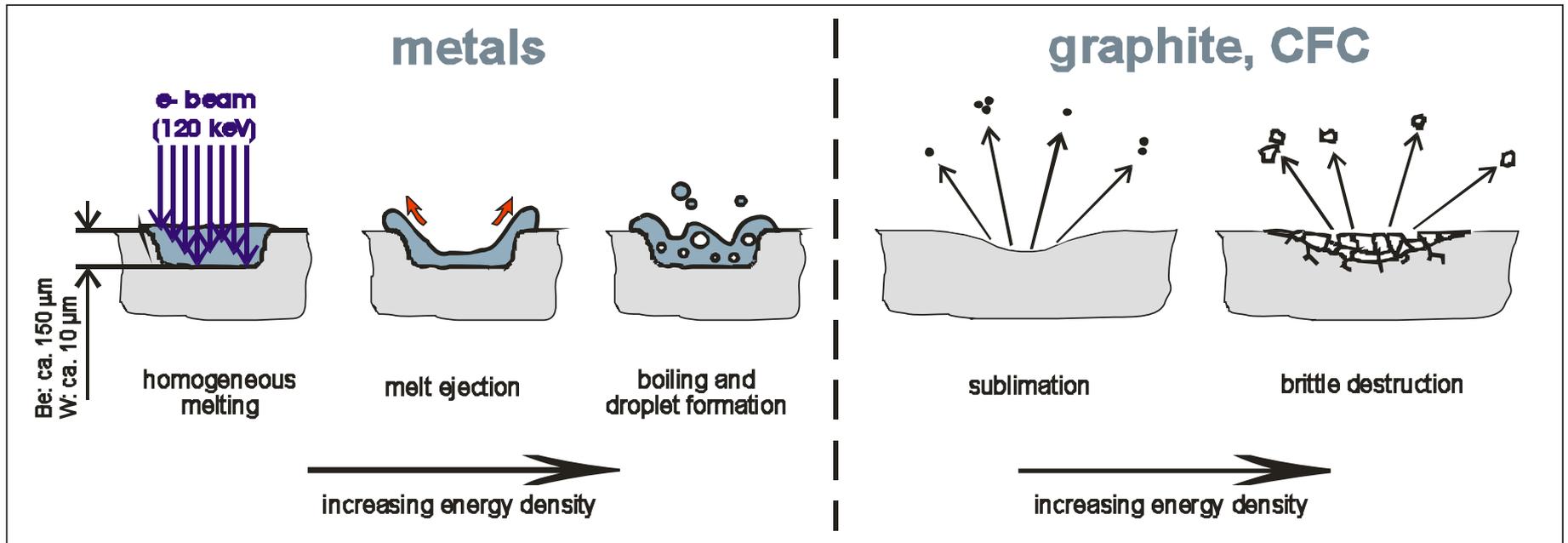
At QSPA the vapor shield effect limits the power that is delivered to the surface at the level of 4.5 GW/m^2 . This effect is determined by relative low energy of ions, which is about one order of magnitude lower than ion energy expected in ITER ($1\div 2.5 \text{ keV}$ during ELM).

Plasma pressure in QSPA experiments ($2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) is at least one order of magnitude stronger than that expected in ITER (10^4 Pa) and can result in different mechanism of droplet ejection in simulations. Pressure of plasma near surface affect to droplet formation and eroded melt thickness, the bigger pressure the less droplets and erosion.

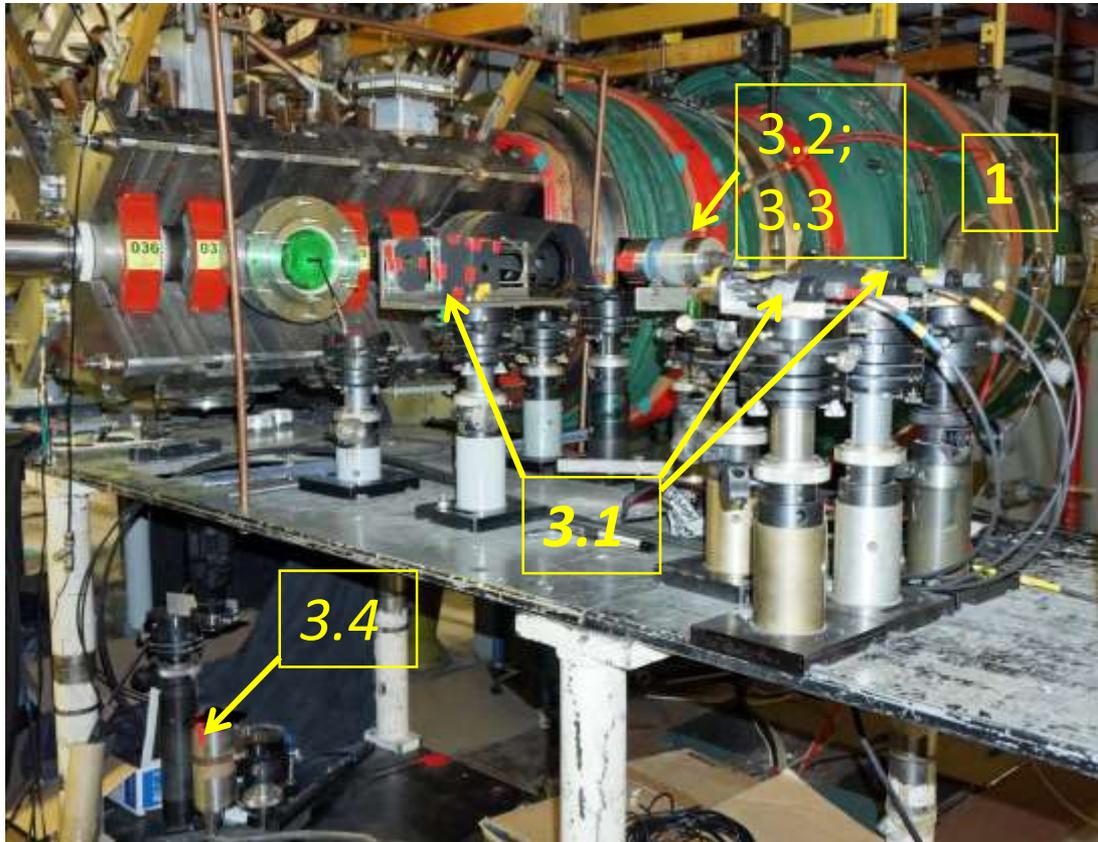


Поток тепла достигший поверхности мишени в зависимости от плотности энергии в плазменном потоке на плазменной пушке КСПУ

Металлы и углерод под импульсным воздействием быстрых электронов



Стенд по изучению эрозии поверхности вольфрама



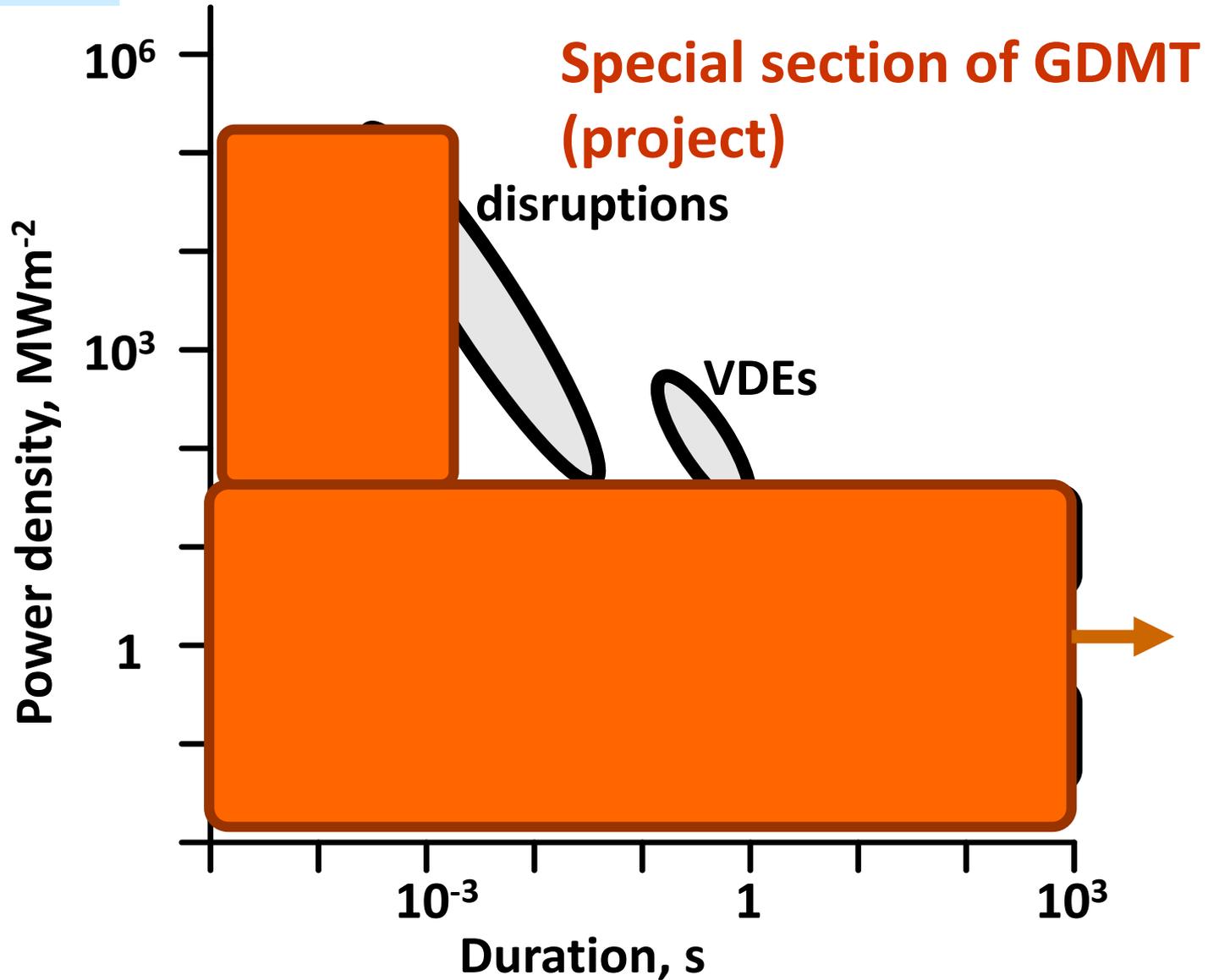
1. Электронный пучок

- 1.1. Мощность 4 МВт
- 1.2. Длительность до 0.3 мс
- 1.3. Нагрузка 2,5 МДж/м²

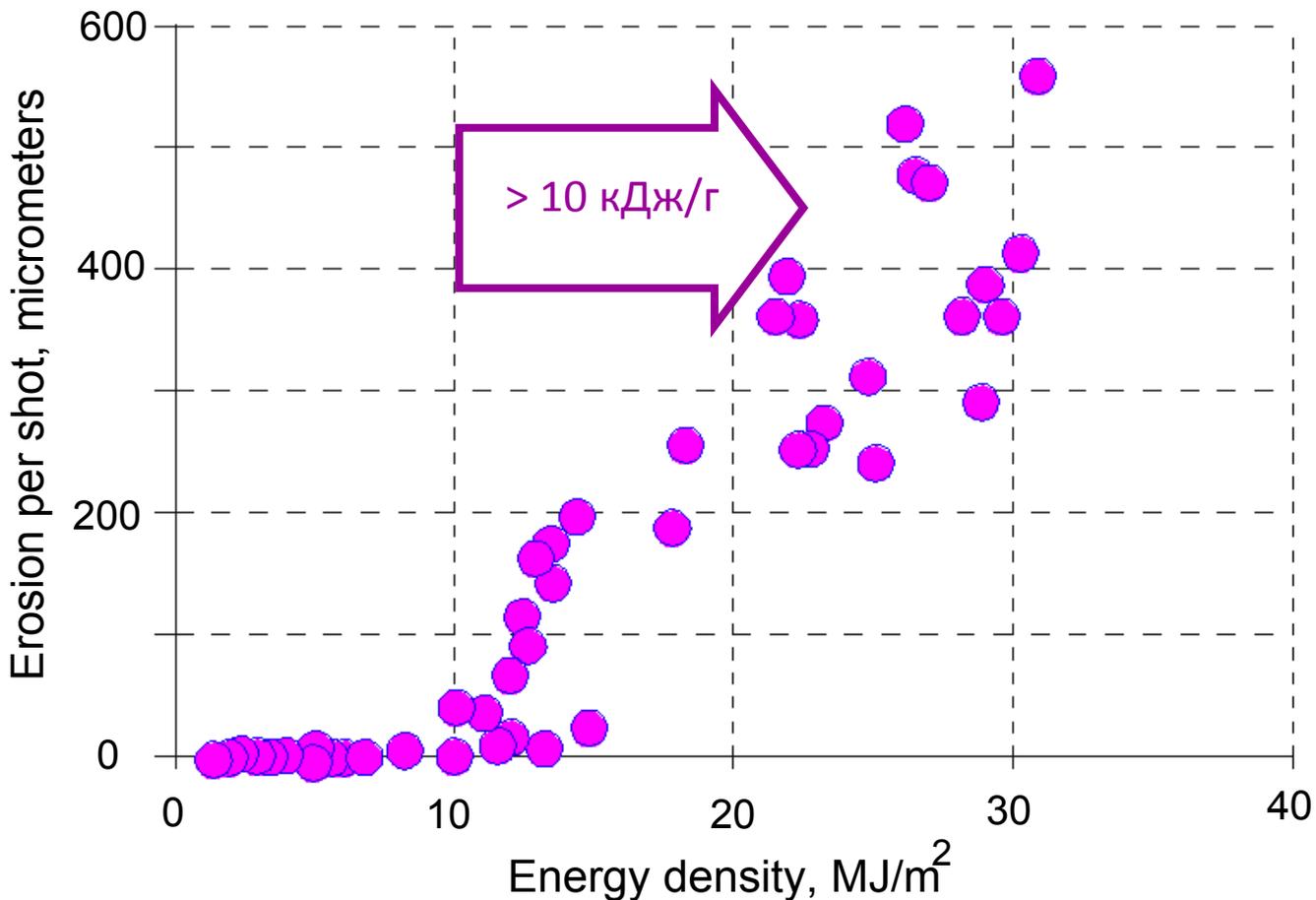
2. Магнитное поле 0.22 Тл

3. Диагностики

- 3.1. 3 канала рассеяния на микрочастицах непрерывного лазера
- 3.2. CCD-камера для съёмки картины температуры поверхности
- 3.3. CCD-камера для снимка рассеяния лазера на поверхности мишени
- 3.4. CCD-камера для снимка разлета капель вольфрама



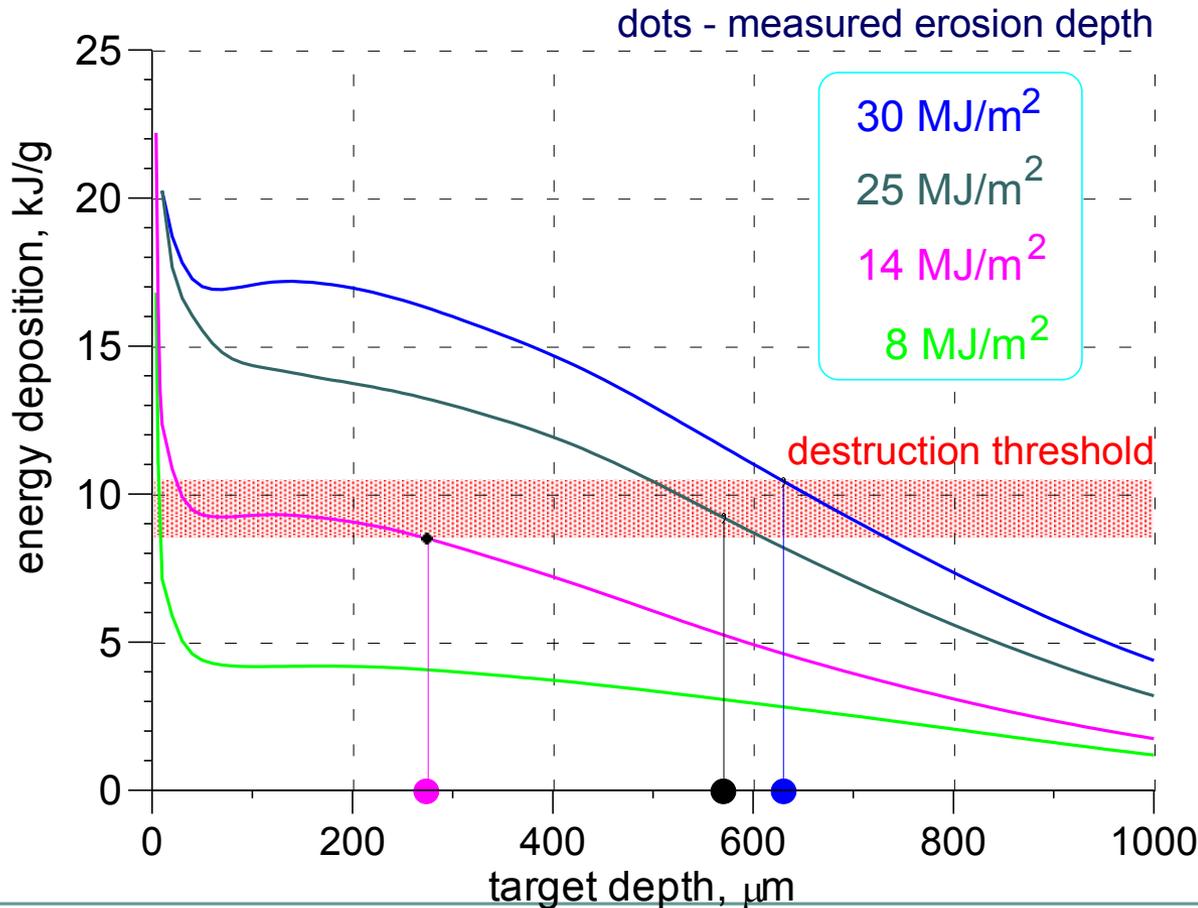
Эрозия мелкозернистого плотного графита (МПГ-6)



Облучение графитовой мишени потоком электронно-горячей плазмы совместно с релятивистским электронным пучком приводит к взрывной (объемной) эрозии графита. Глубина эрозии зависит от плотности энергии и достигает 0.5-1 мм при 30-60 МДж/м².



Determination of destruction threshold



The comparison of the depth dependence of the energy deposition with the graphite erosion observed in similar shots gives the graphite destruction threshold of 8-10 kJ/g.

This value is much less than the vaporisation enthalpy.

The high erosion observed at the interaction of powerful hot electron stream with targets cannot be explained by evaporation of target material.

The phenomenon of the explosive erosion can be explained by volumetric heating and phase transitions inside the material.

Обзорный спектр вблизи поверхности мишени

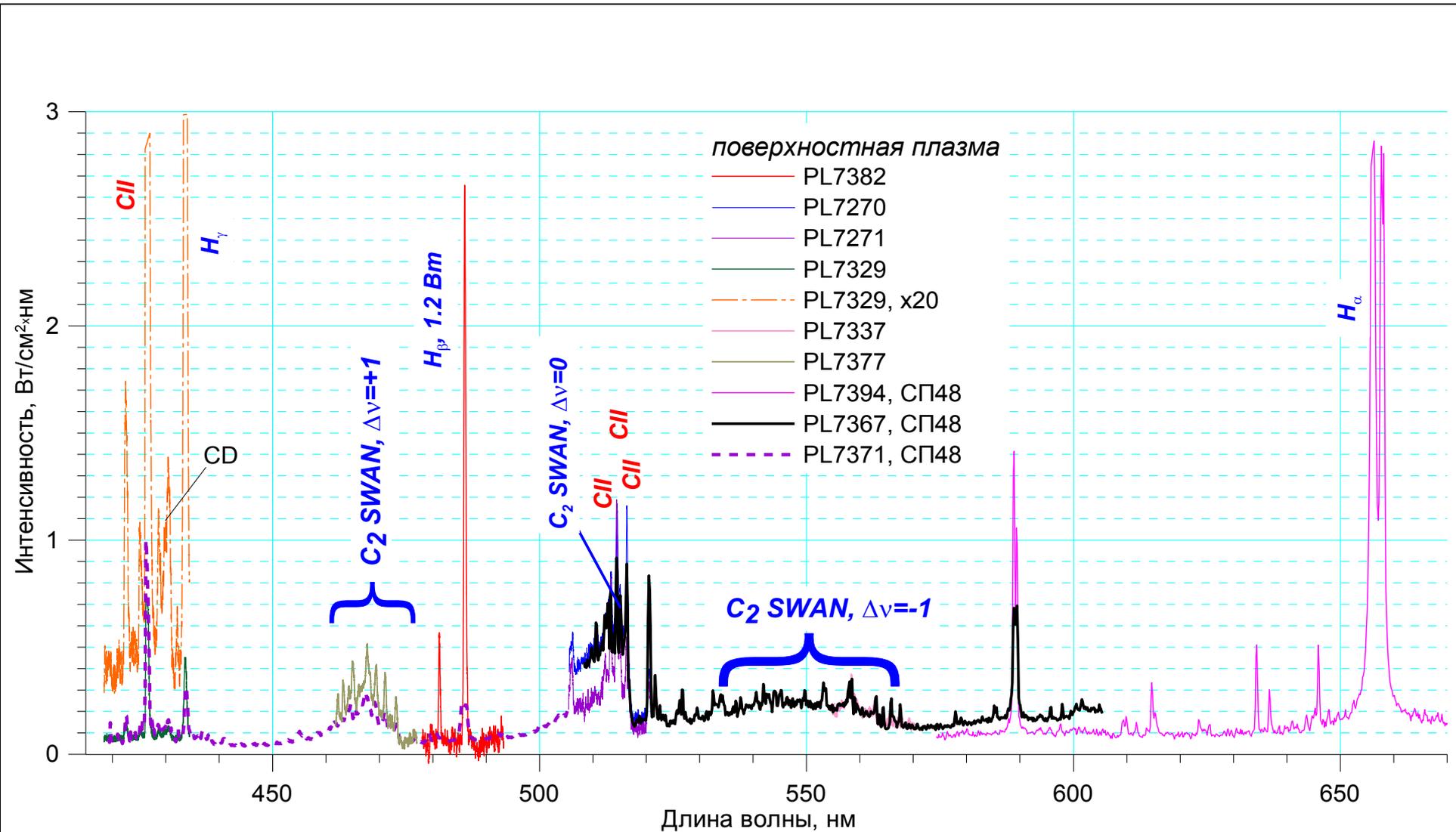


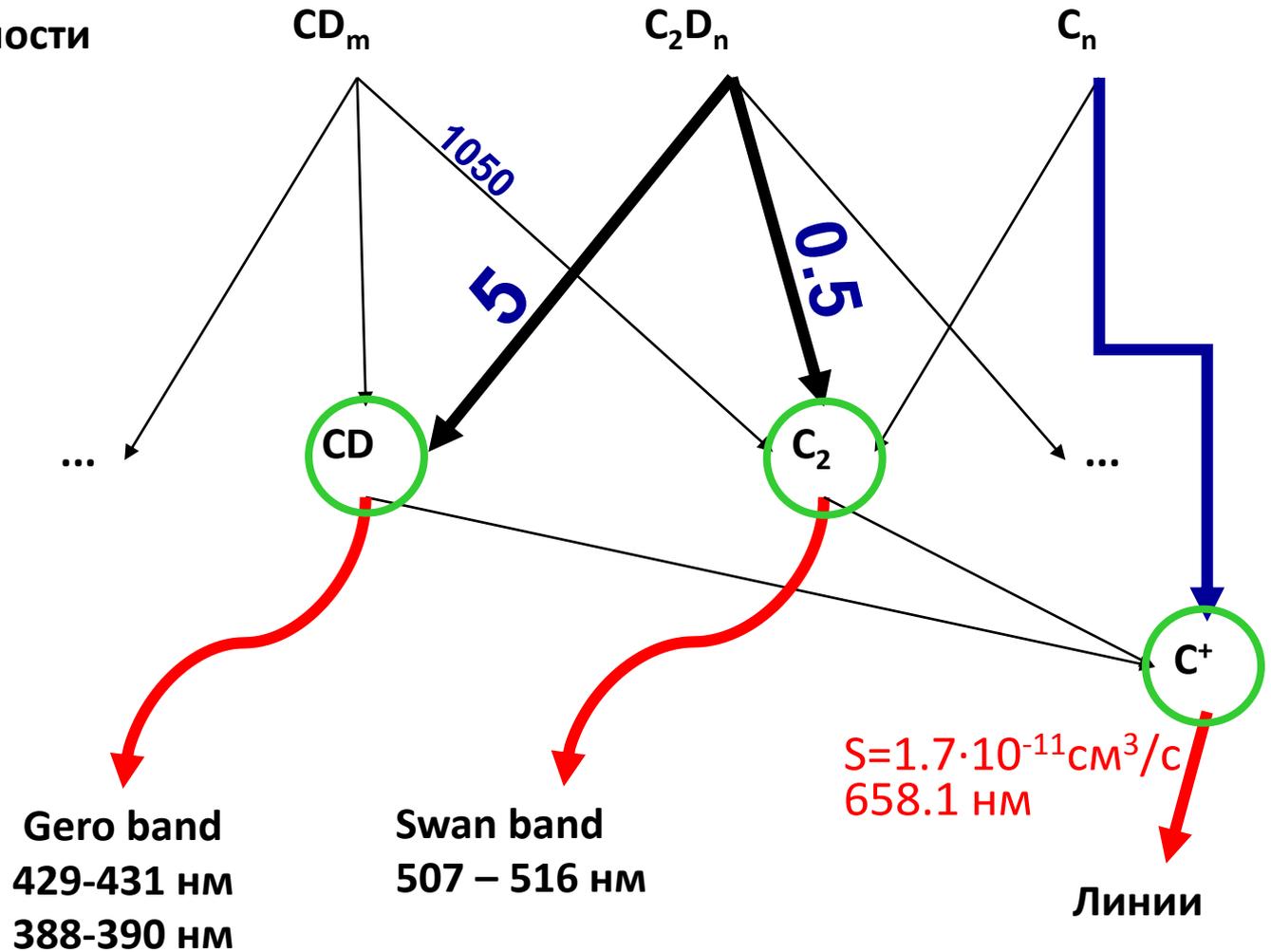
Схема диссоциации легких углеводов вблизи приемника пучка в ГОЛ-3

Образуются на поверхности

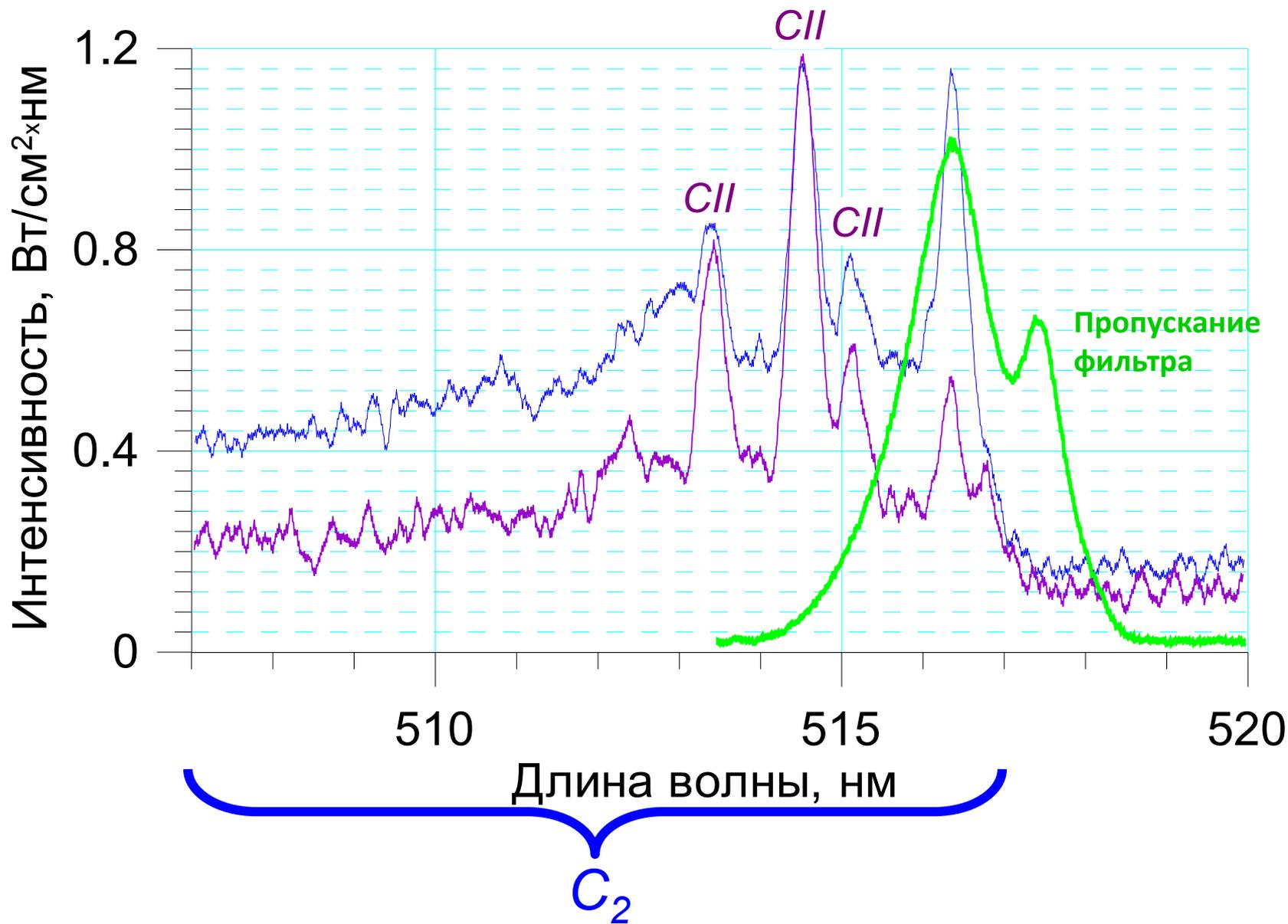
$$\frac{D}{XB}$$

Фракции

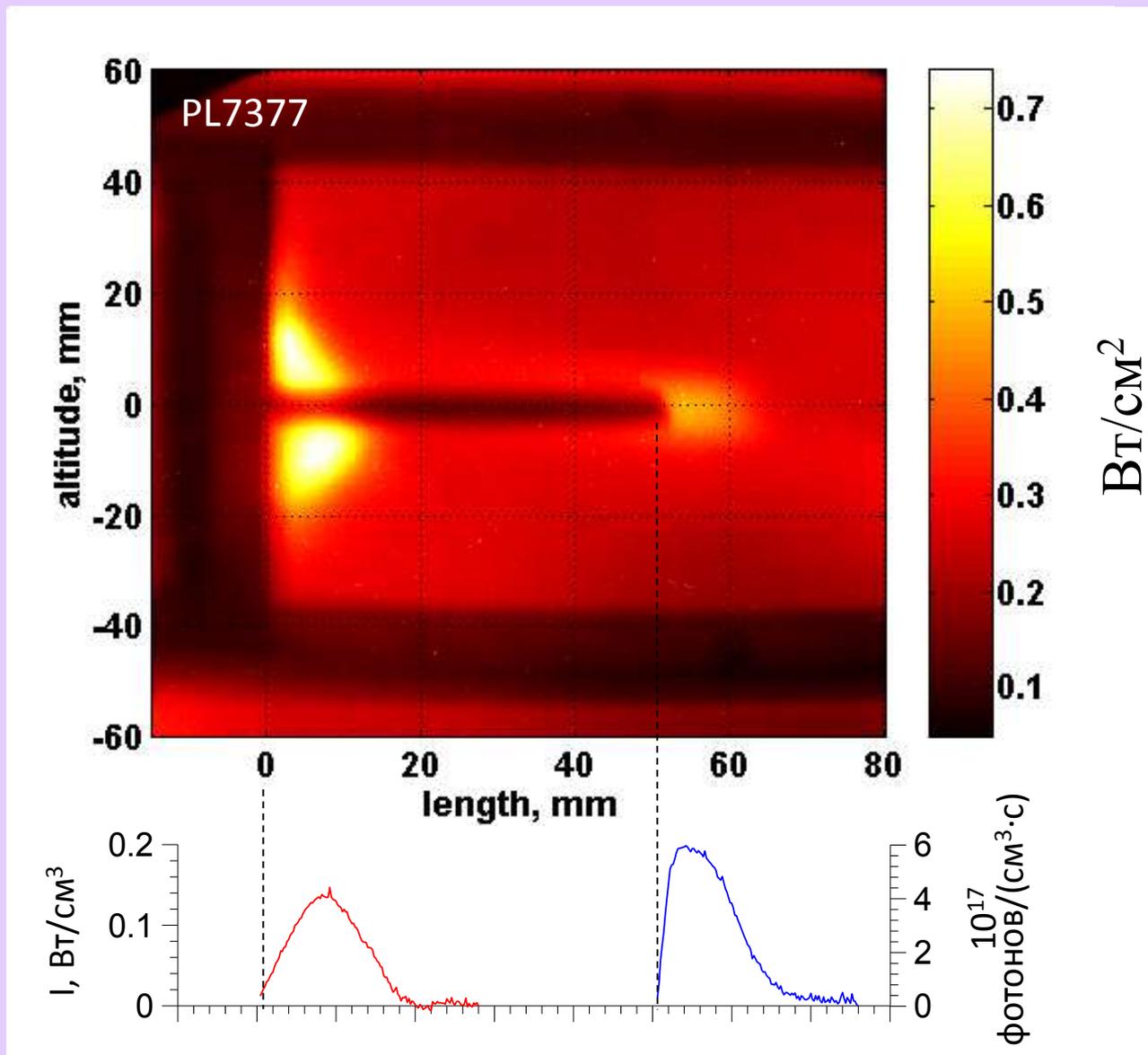
Регистрируемое излучение



Swan $\Delta\nu = 0$ молекулы C_2 и спектральный интервал, выделяемый фильтром для 2D-imaging



Излучение линии C_2 на длине волны 516,5 нм



Эксперименты по изучению воздействия потоков плазмы на поверхность

поток углерода с поверхности мишени, связанный с химической эрозией, считая источником C_2 и $CН$ являются молекулы этановой группы -

$$CD (428-432 \text{ нм}) : \quad \Phi_C = \frac{D}{XB} \frac{1}{h\nu} \int Idl = 4 \cdot 10^{18} \text{ шт}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$$

$$C_2 (507-516 \text{ нм}) : \quad \Phi_C = 3 \cdot 10^{18} \text{ шт}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$$

D – скорость диссоциации молекулы,
 X – скорость возбуждения оптического перехода,
 B – коэффициент ветвления,
 $h\nu$ – энергия перехода.

При этом полный поток эмитируемого с поверхности углерода -

$$CII (658.1 \text{ нм}) : \quad \Phi_C = N_C \cdot V_T \sim \frac{I_{CII}}{S_{CII} \cdot n_e} \cdot V_T \sim 4 \cdot 10^{20} \text{ шт}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$$

N_C – концентрация атомов углерода,
 S_{CII} – излучательная способность оптического перехода,
 V_T – тепловая скорость углерода.

Эта величина соответствует глубине эрозии 0.01 мкм за выстрел.

Полная величина химической эрозии графита соответствует 1% глубины разрушения графитового плазмоприемника.

Зависимость эрозии вольфрама от
потока энергии на поверхность

Particle formation during e-beam loading of tungsten

A

80 mA



20 mm

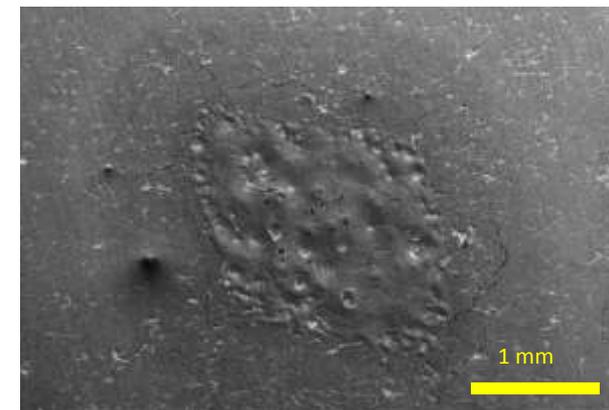
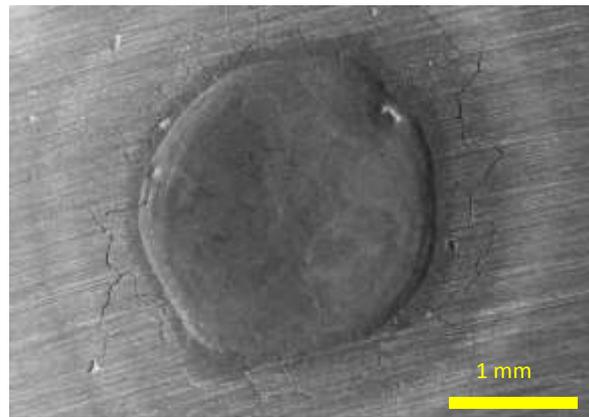
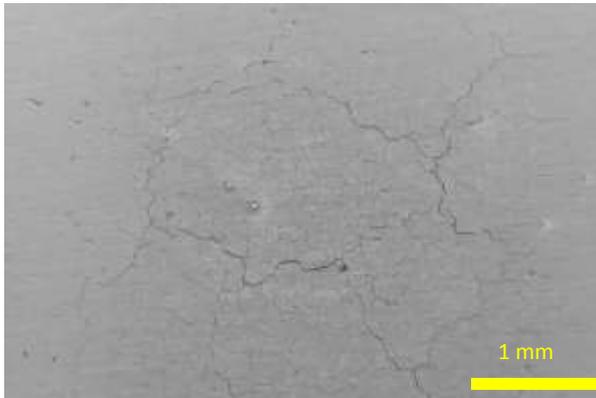
B

160 mA



C

280 mA



A: $I_{\text{inc}} = 80 \text{ mA}$, $E_{\text{abs}} = 3.2 \text{ MJm}^{-2}$, $\Delta t = 4.1 \text{ ms}$

B: $I_{\text{inc}} = 160 \text{ mA}$, $E_{\text{abs}} = 6.2 \text{ MJm}^{-2}$, $\Delta t = 4.4 \text{ ms}$

C: $I_{\text{inc}} = 280 \text{ mA}$, $E_{\text{abs}} = 10.4 \text{ MJm}^{-2}$, $\Delta t = 4.4 \text{ ms}$

ГОЛ-3

5x2.1 МДж/м²

В таких же условиях

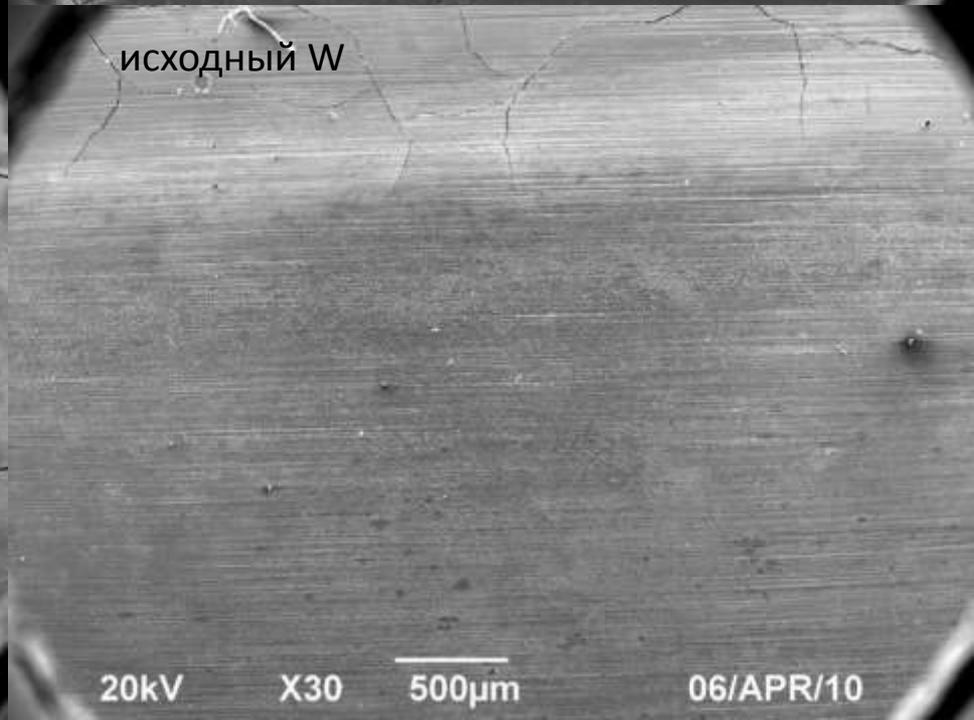
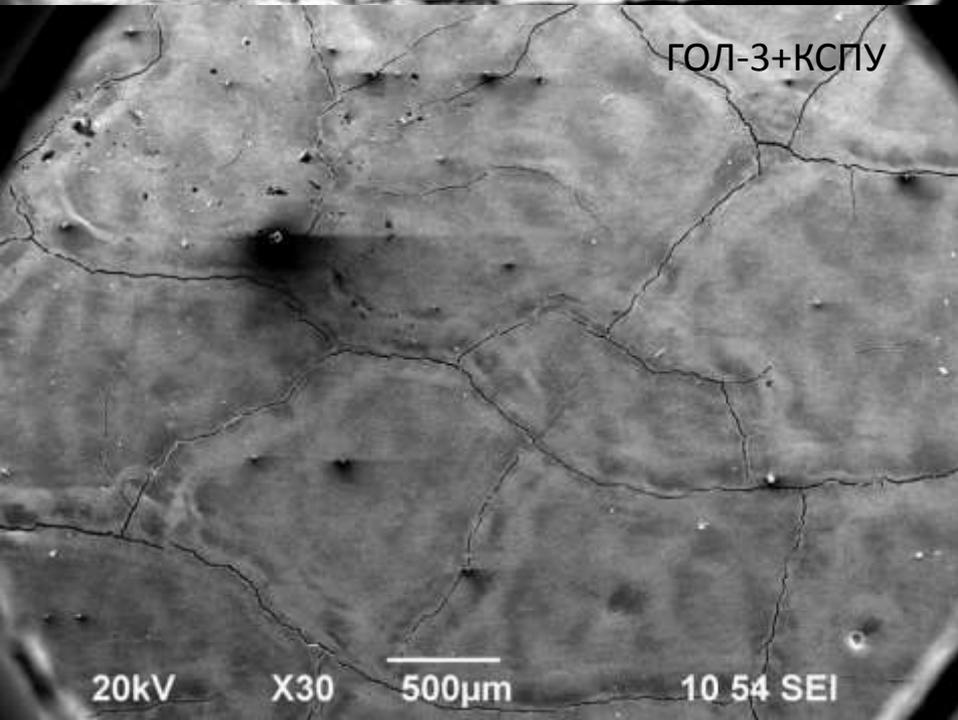
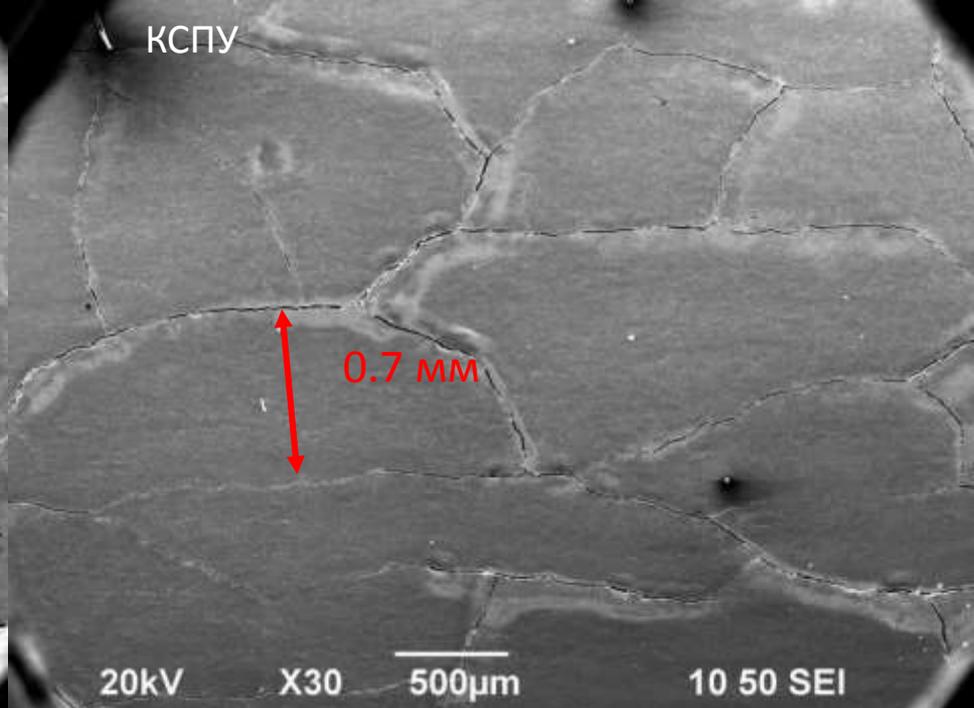
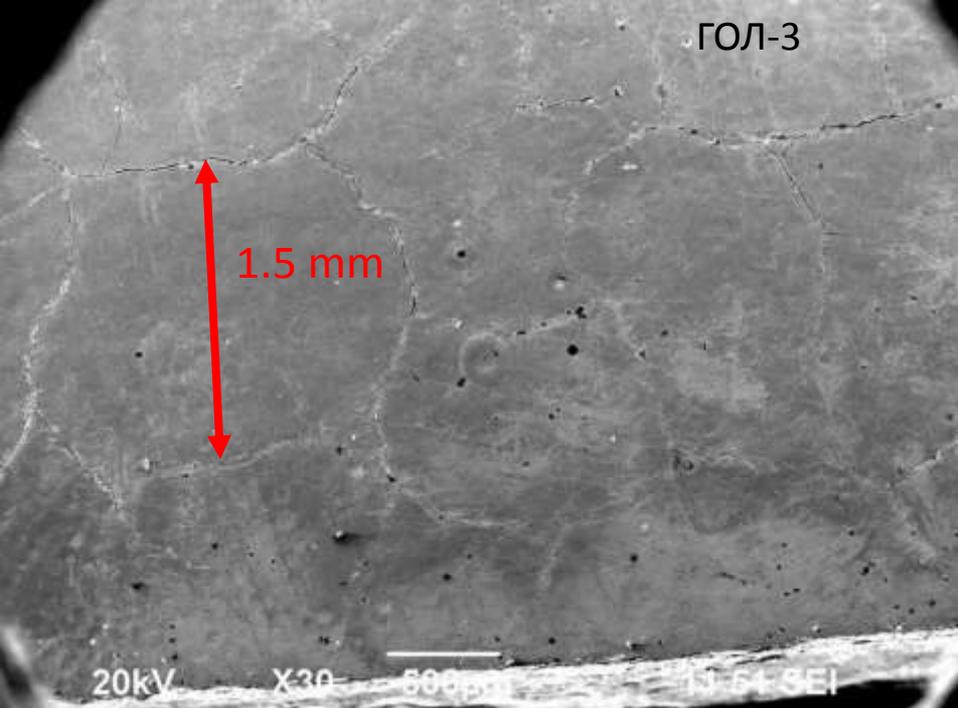
КСПУ

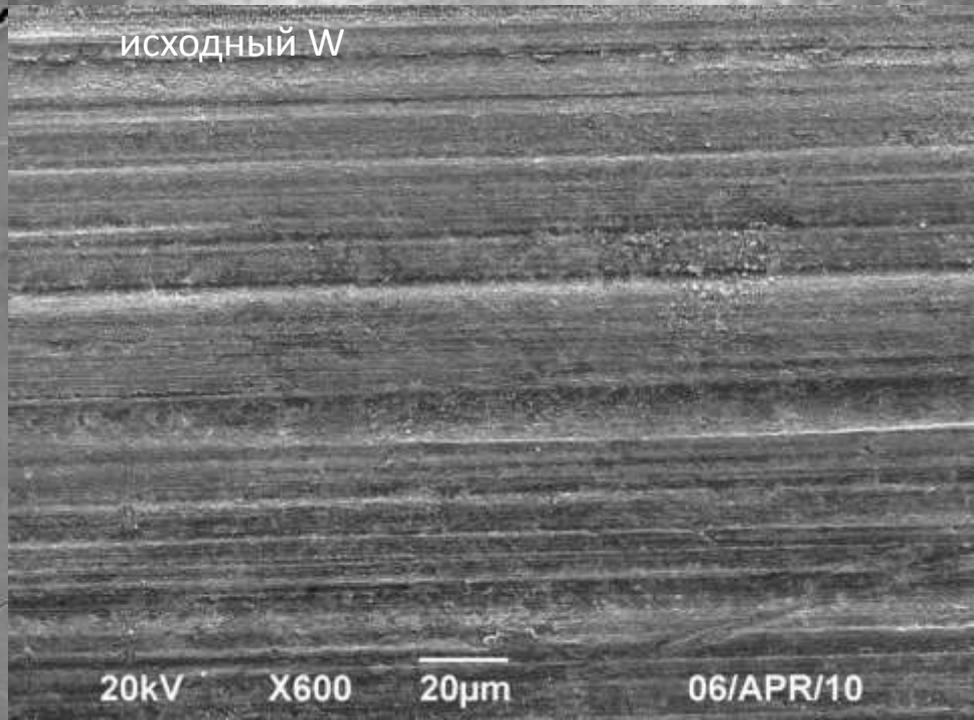
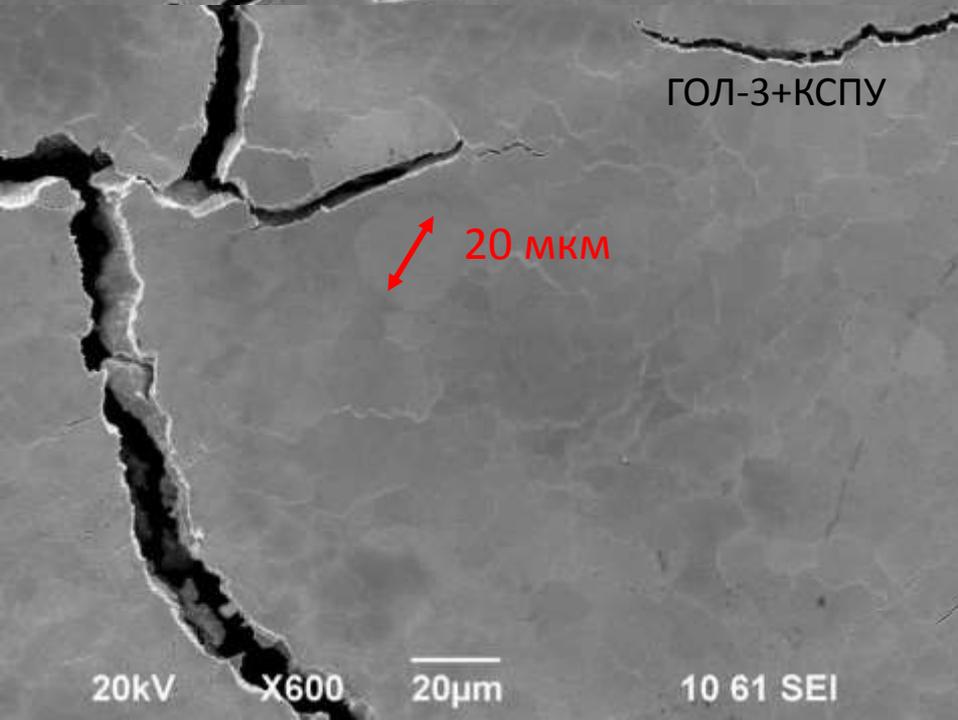
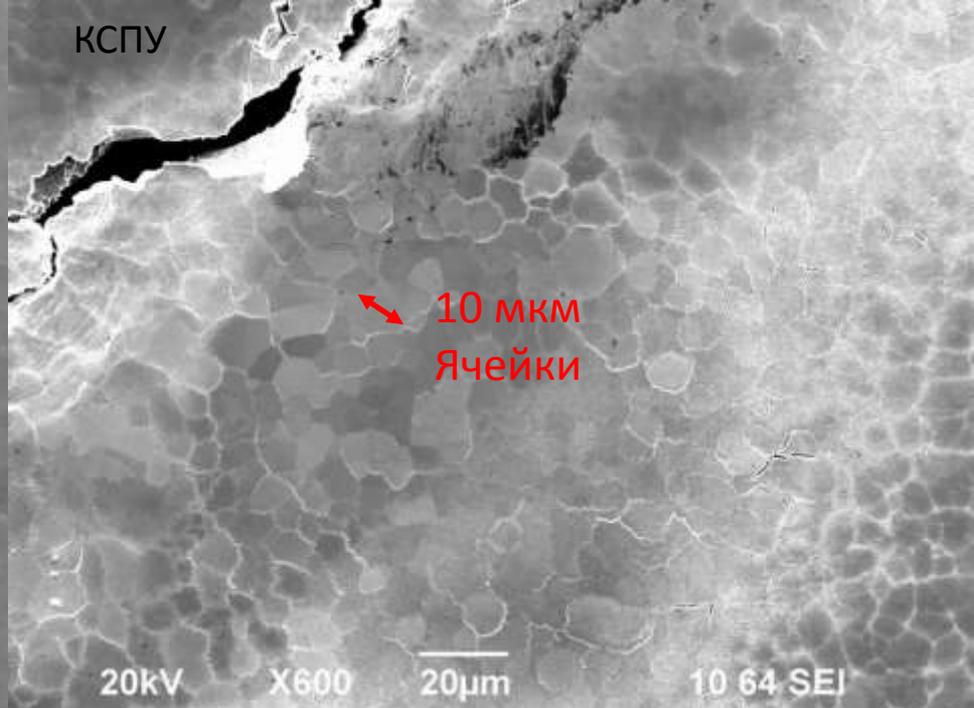
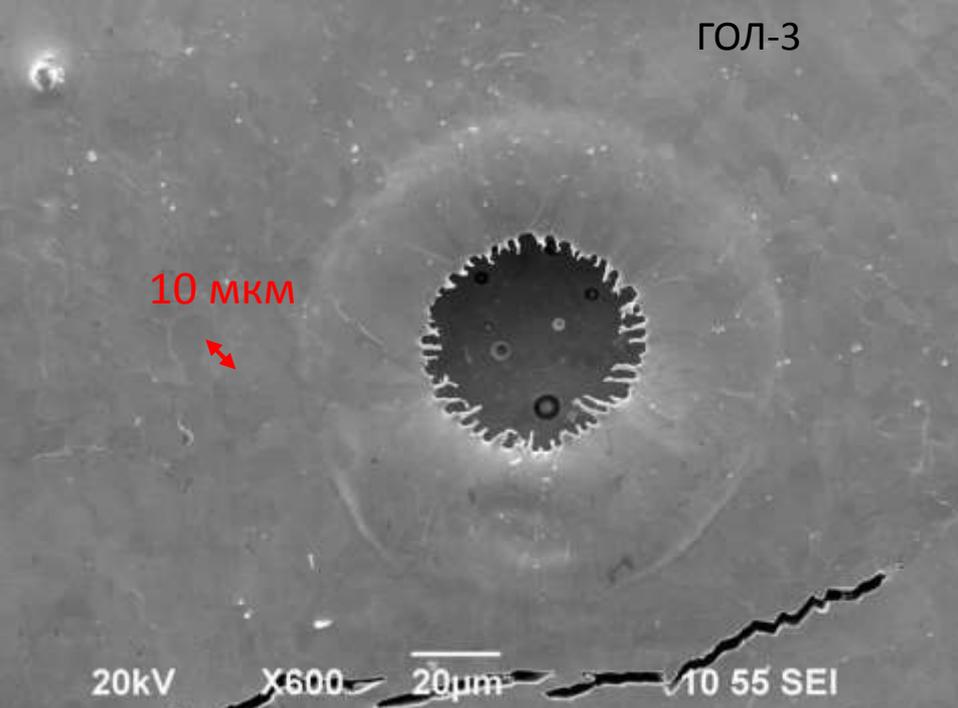
10x1.1 МДж/м²

ГОЛ-3 5x2.1 МДж/м²+

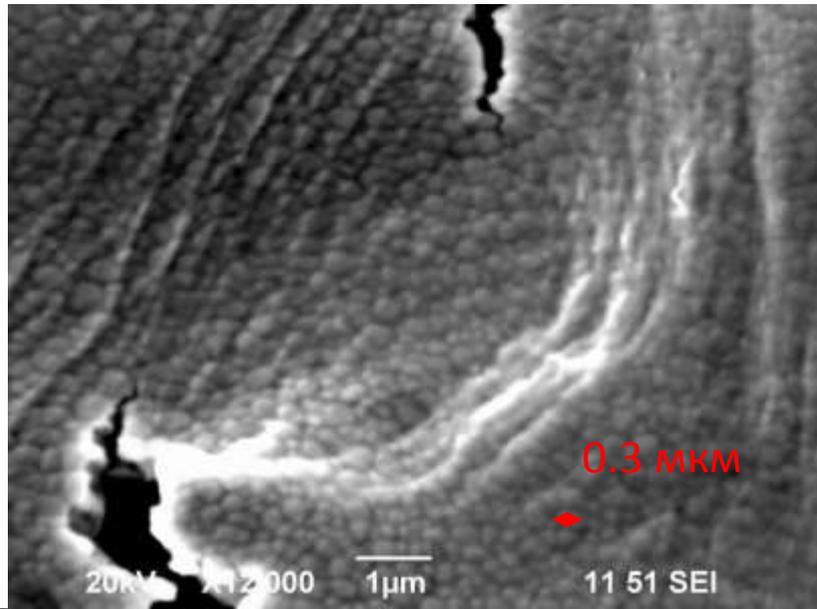
КСПУ 10x1.1 МДж/м²

Необлученная область

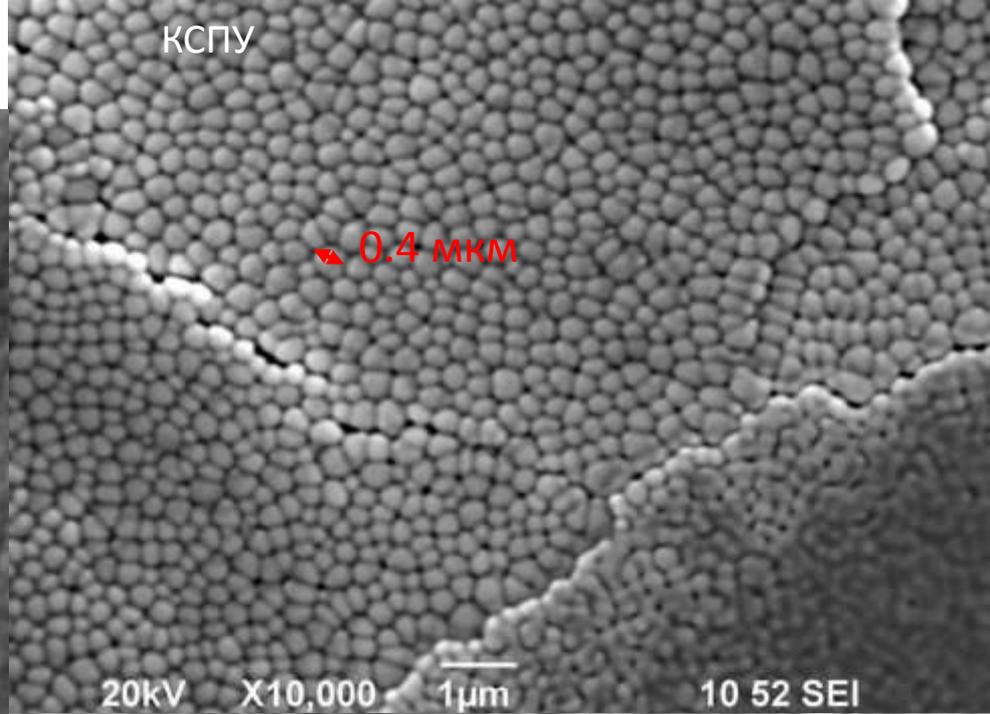




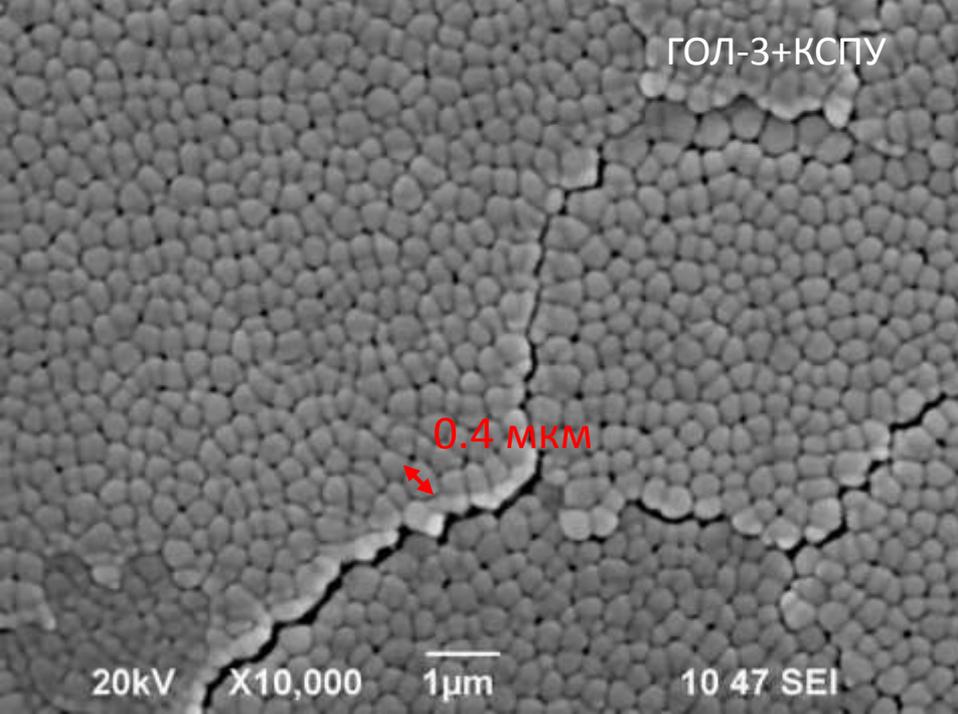
ГОЛ-3



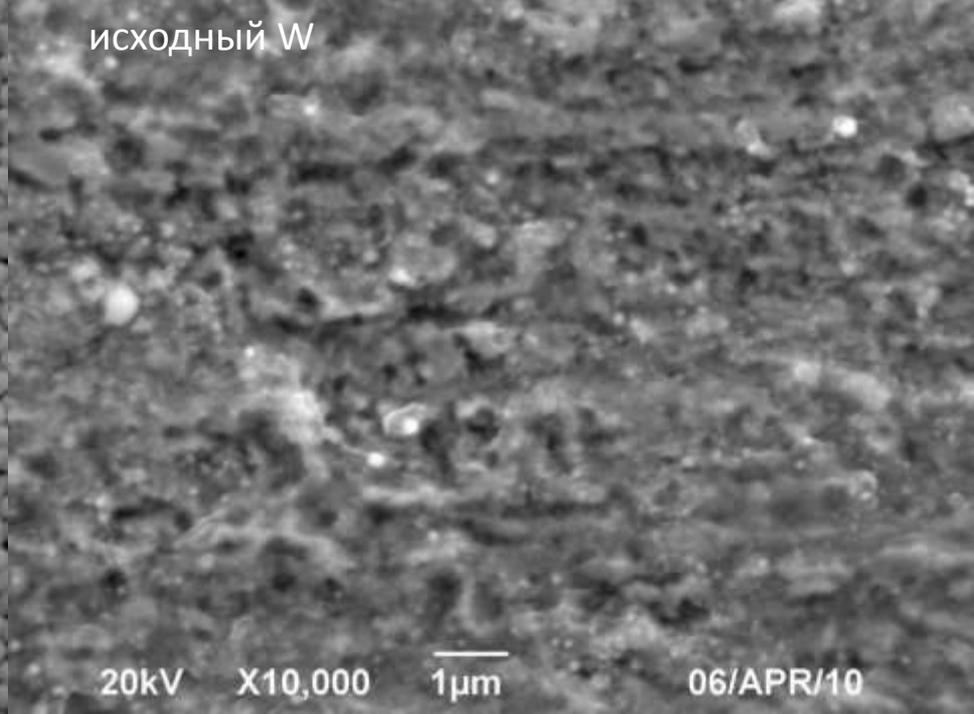
КСПУ



ГОЛ-3+КСПУ

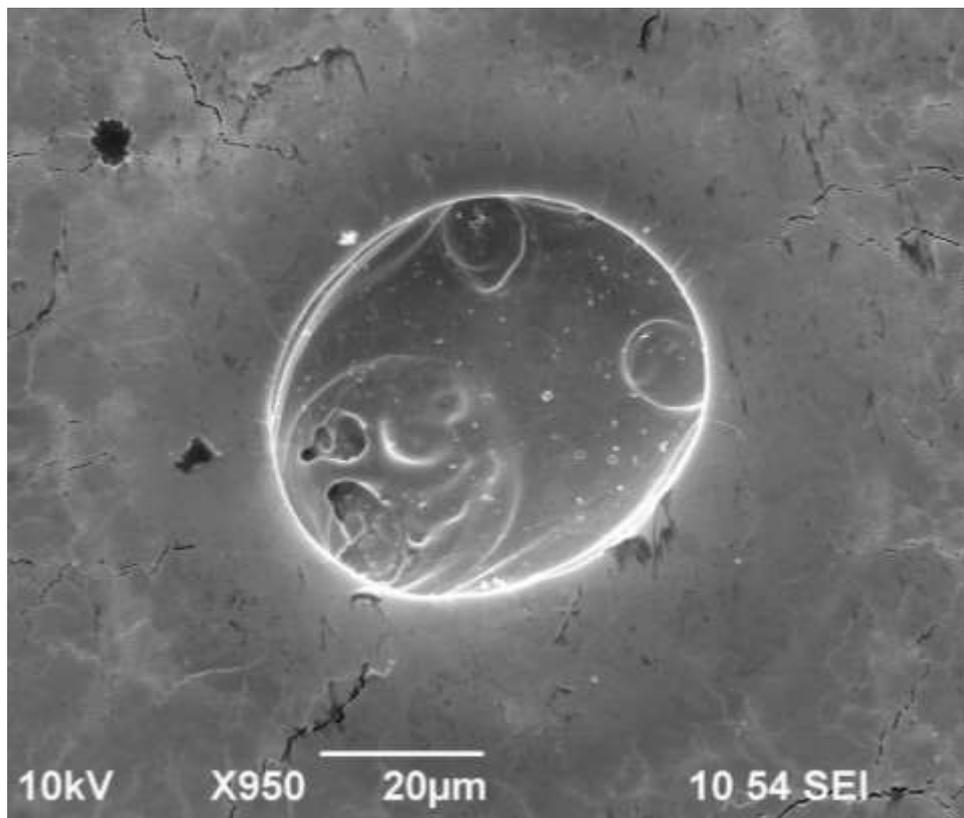


исходный W

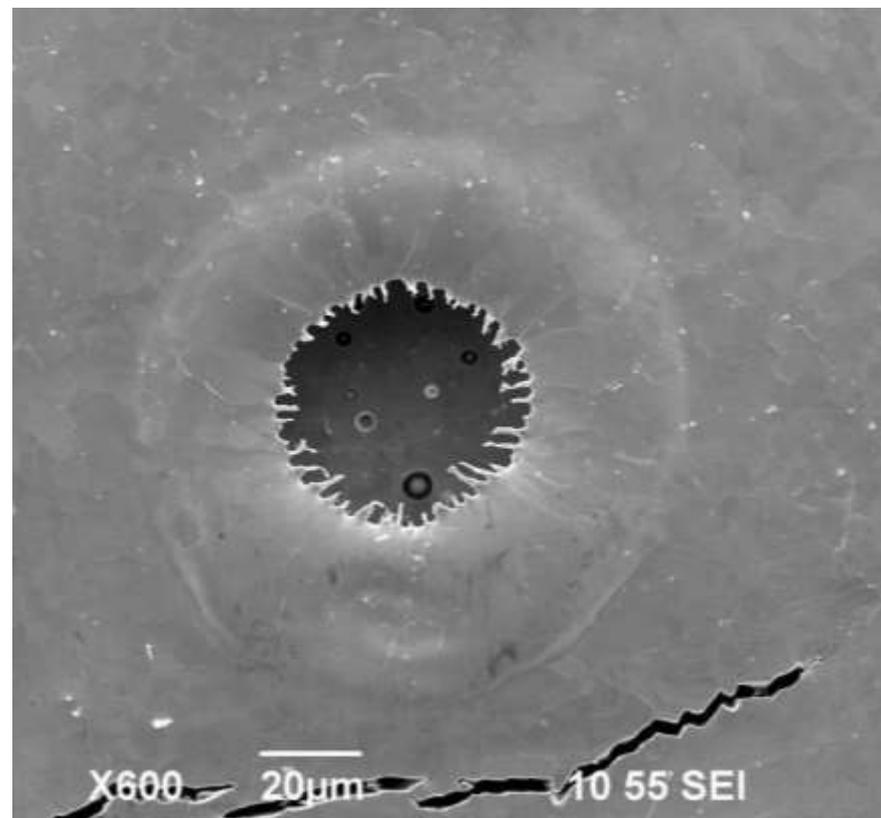


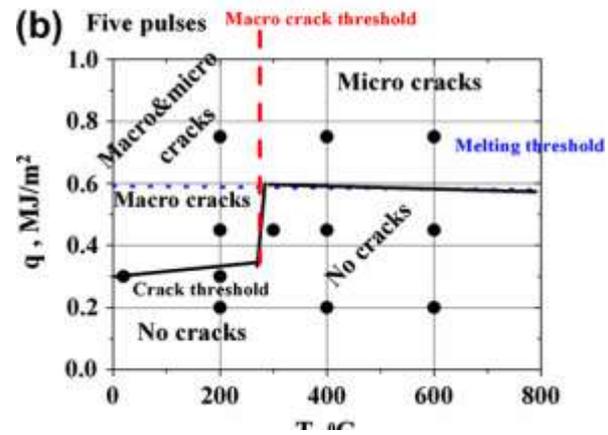
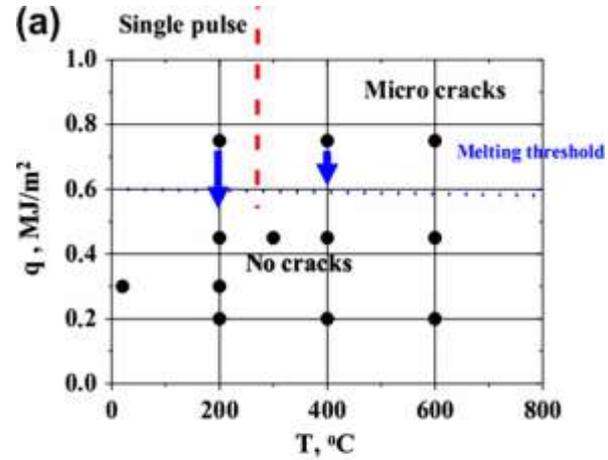
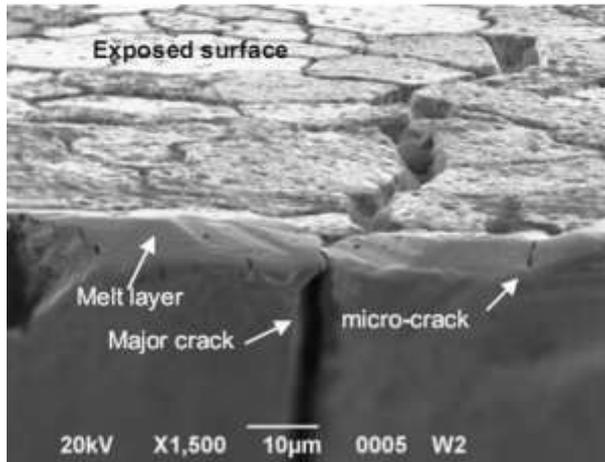
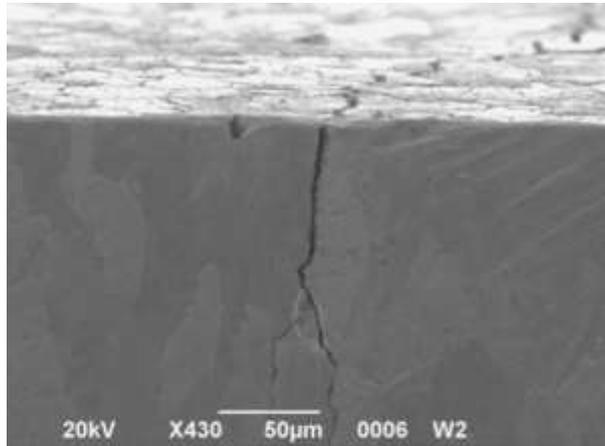
Механизмы возникновения кратеров до конца не ясны

(униполярные дуги?)



(перегретый пузырь)

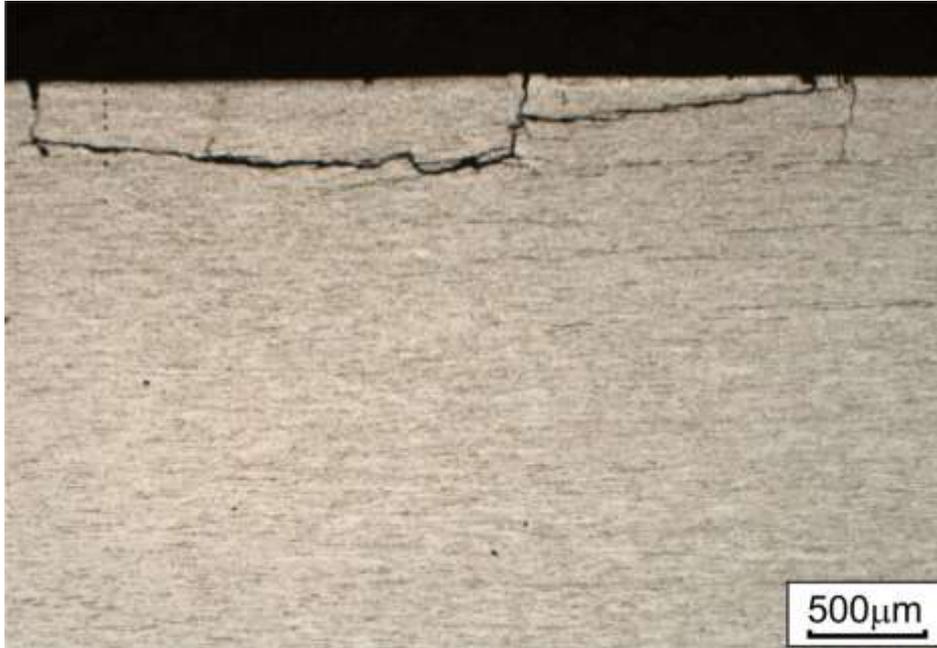




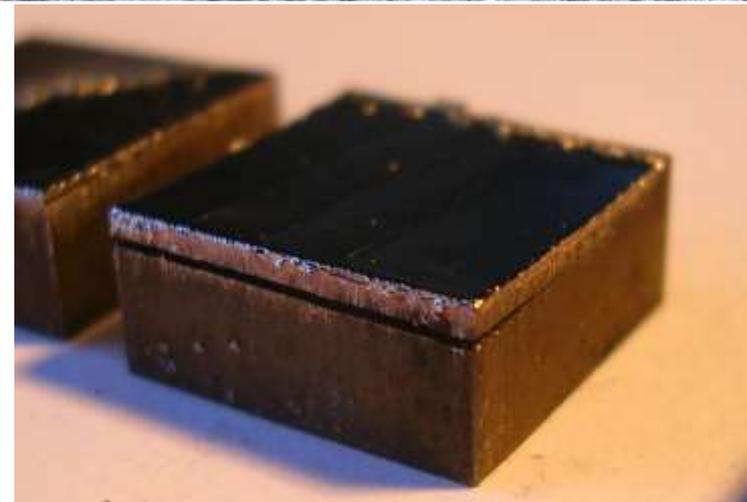
Example of cracking thresholds diagram for ITER reference W grade: after single (a) and five (b) QSPA Kh-50 plasma pulses.

Performance of deformed tungsten under ELM-like plasma exposures in QSPA Kh-50

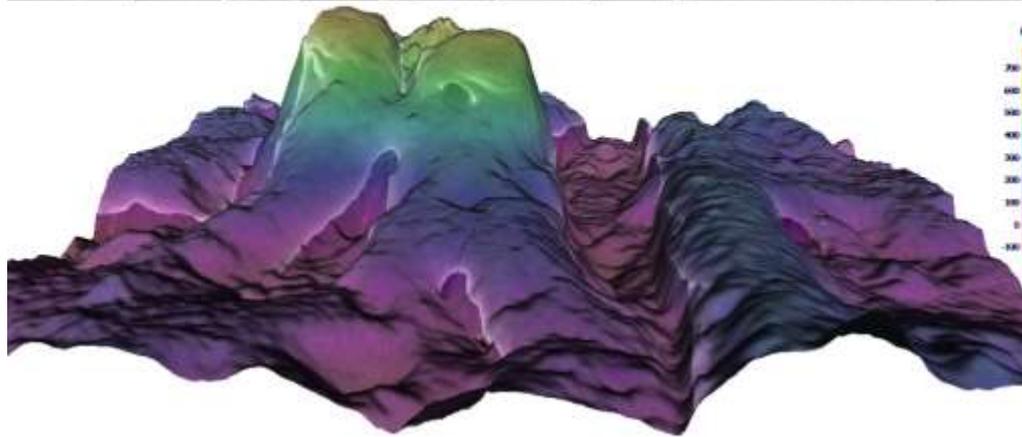
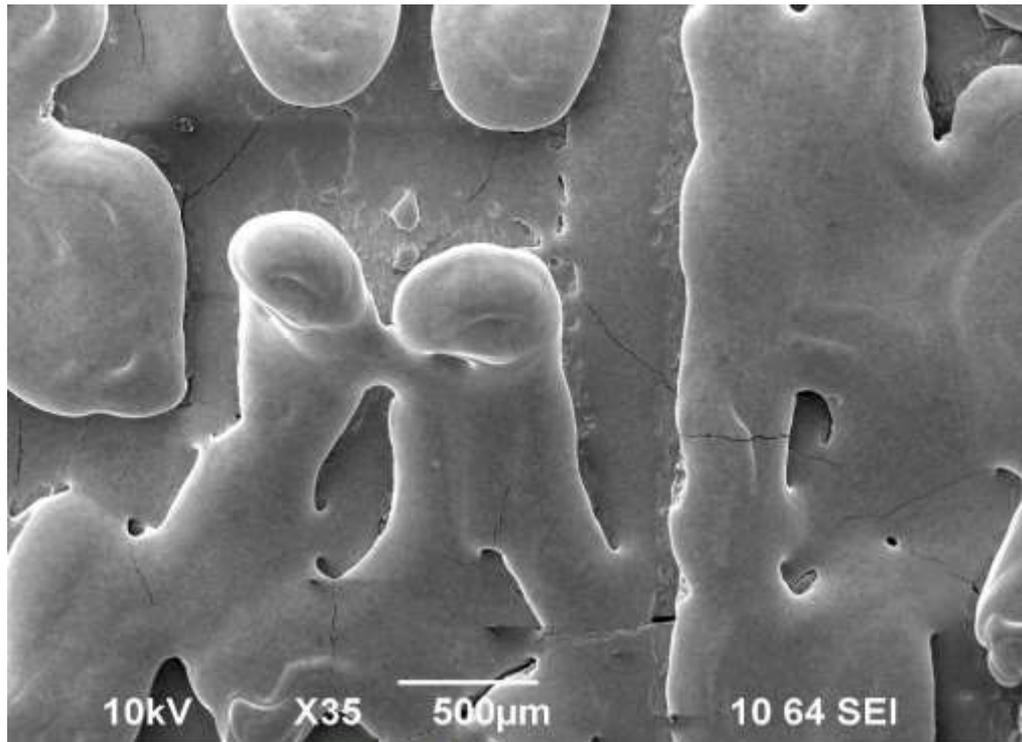
Трещины могут быть очень глубокими,
В том числе горизонтальными



Поперечный разрез мишени

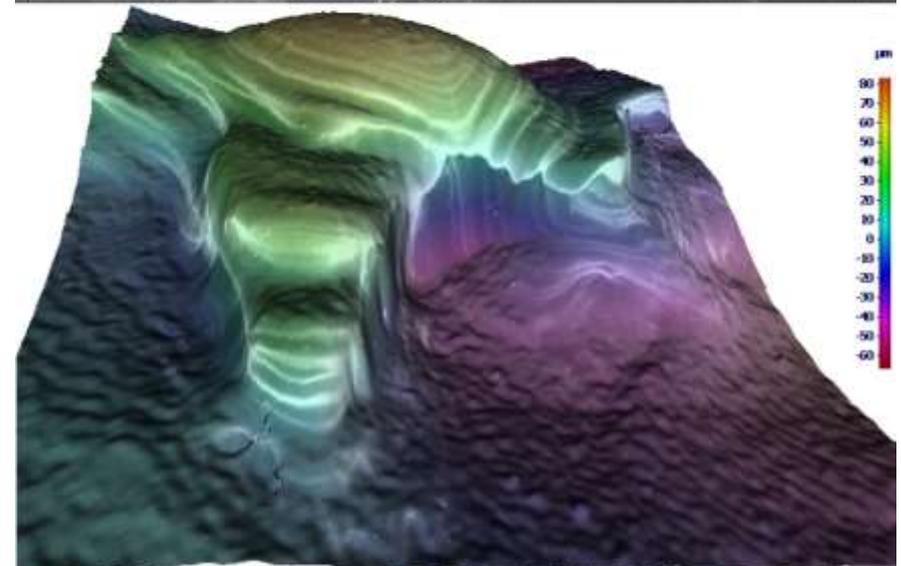
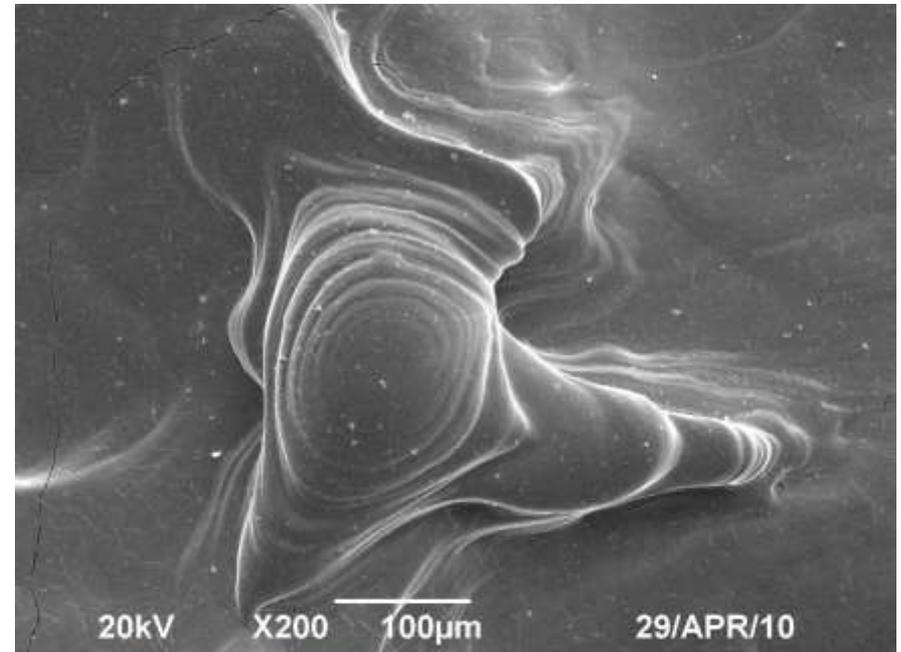
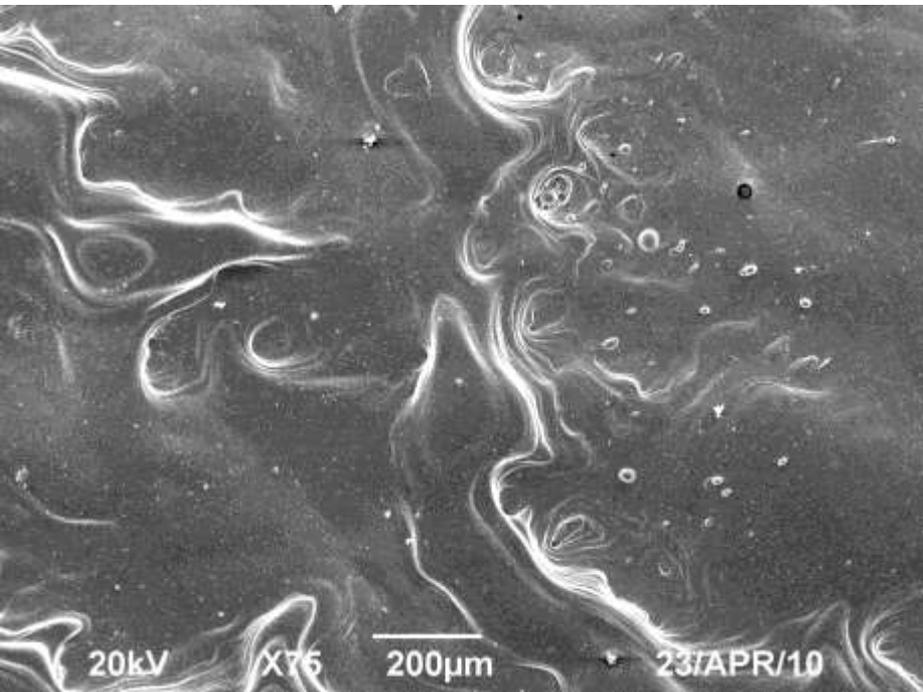


Мишень высотой 5 мм треснула после облучения



SEM image (top) and 3D model (bottom) of big cracking of 3mm-width tungsten piece after 100 shots of the GOL-3 with loads $\sim 1 \text{ MJ/m}^2$ per shot. Surface height difference is 900 microns.

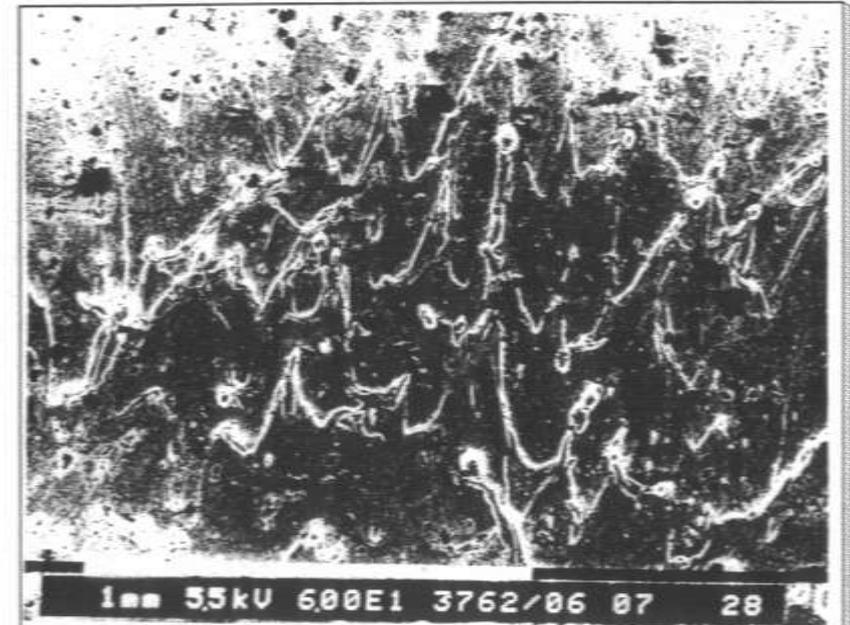
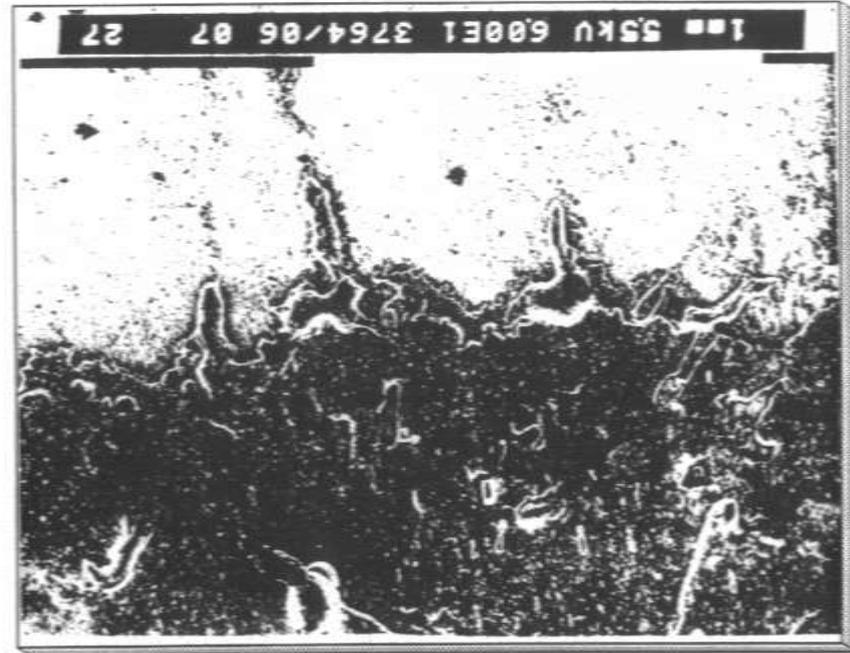
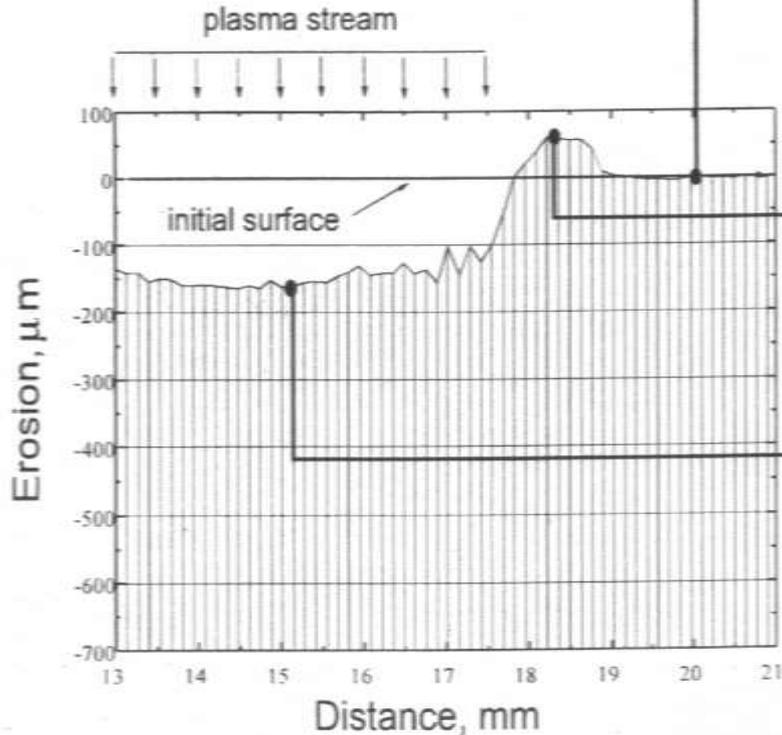
Вольфрам после 9 выстрелов ГОЛ-3 по 4 МДж/м²



Перепад высот может превышать 200 микрон.

Experiments with W targets

The SEM micrographs of the tungsten sample after GOL-3 plasma stream irradiation (12 MJ/m^2 , $4 \mu\text{s}$)



Эрозия вольфрама в зависимости от плотности потока энергии на мишень

При малых нагрузках (менее 0.2 МДж/м^2) основным механизмом физическое распыление, эрозия очень мала.

При нагрузках выше 0.5 МДж/м^2 поверхность вольфрама еще не плавится но после повторяющихся воздействий трескается.

Порог плавления зависит от условий облучения. Для КСПУ 0.75 МДж/м^2 превышает порог плавления, для электронного пучка – нет.

При нагрузках $1 \div 2 \text{ МДж/м}^2$ (соответствуют mitigated ITER ELM type I) поверхность плавится, нагрузка превышает порог испарения.

Модификация поверхности: переплавление слоя, сеть трещин размерами 1000, 10, 0.3 микрон, образуются кратеры диаметром 300-50 микрон, глубиной 20 микрон.

Больше средней плотности потока энергии ($9 \times 4 \text{ МДж/м}^2$): вместо сети трещин 1000 мкм образуются волнообразная поверхность, сеть ячеек 10 мкм остается, сеть ячеек 0.3 микрон исчезает. Перепад высот может превышать 200 микрон.

Большая плотность потока (12 МДж/м^2): эрозия свыше 150 мкм за выстрел.

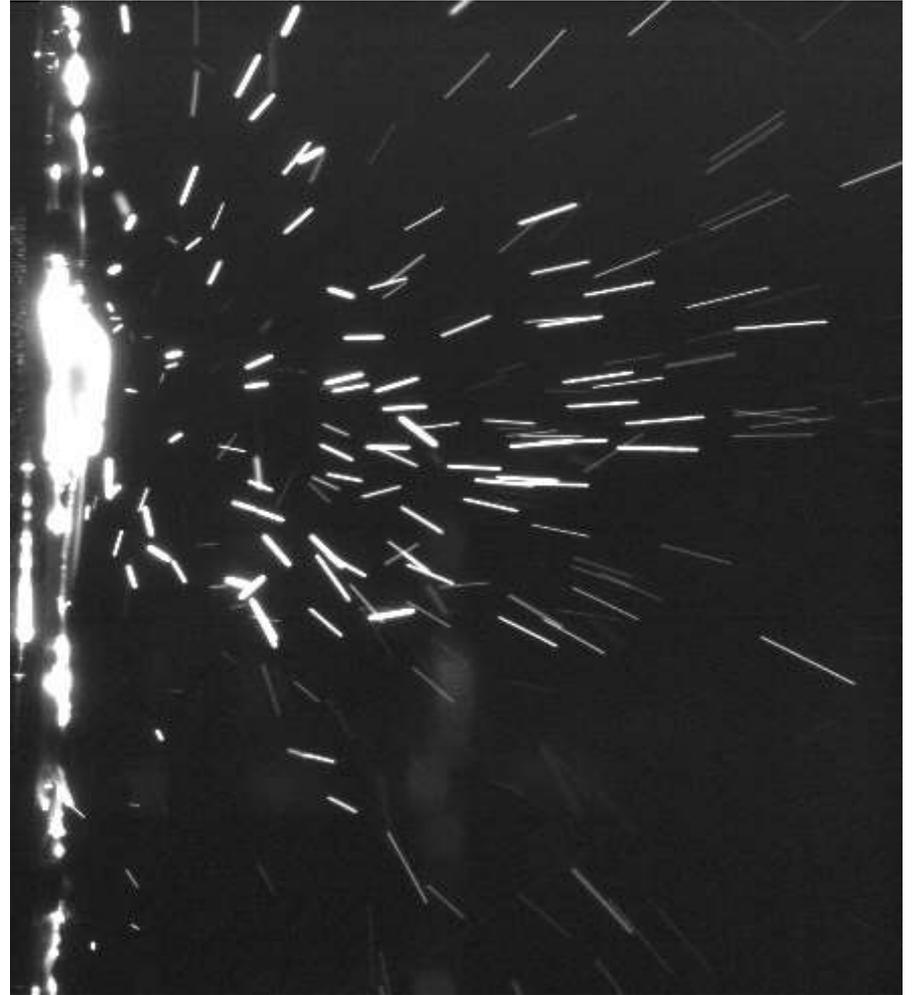
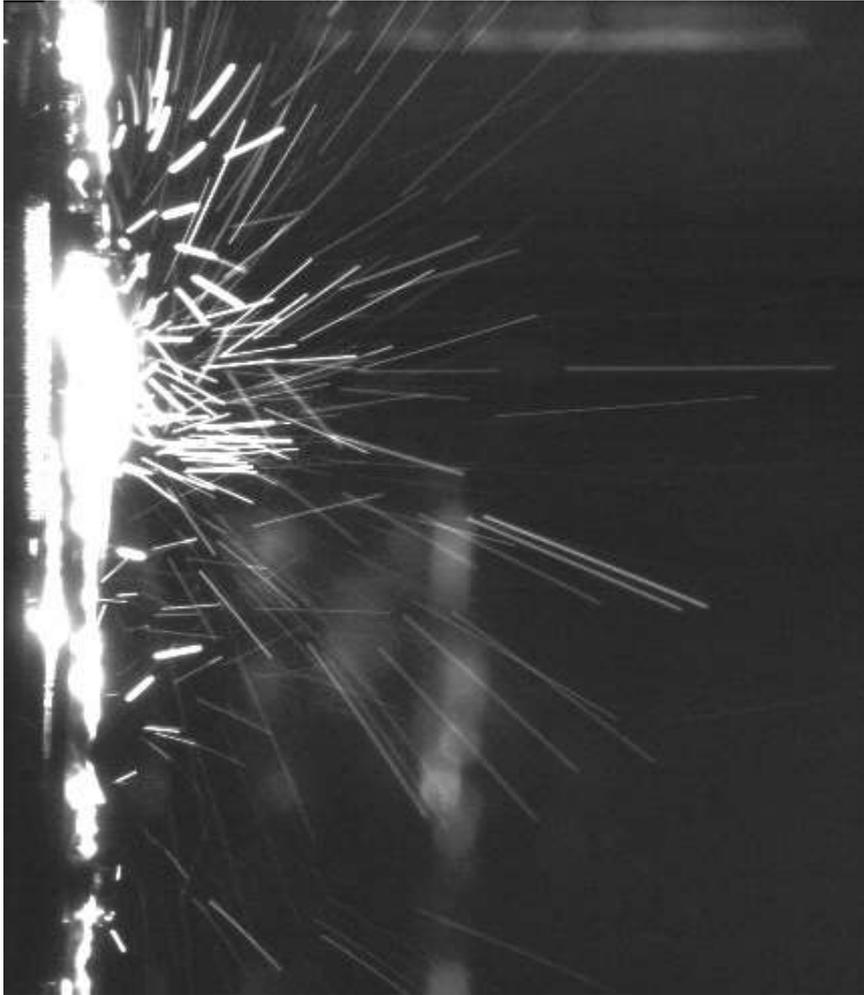
Вылет капель на ГОЛ-3

Разлет частиц – 20 мкс после окончания пучка



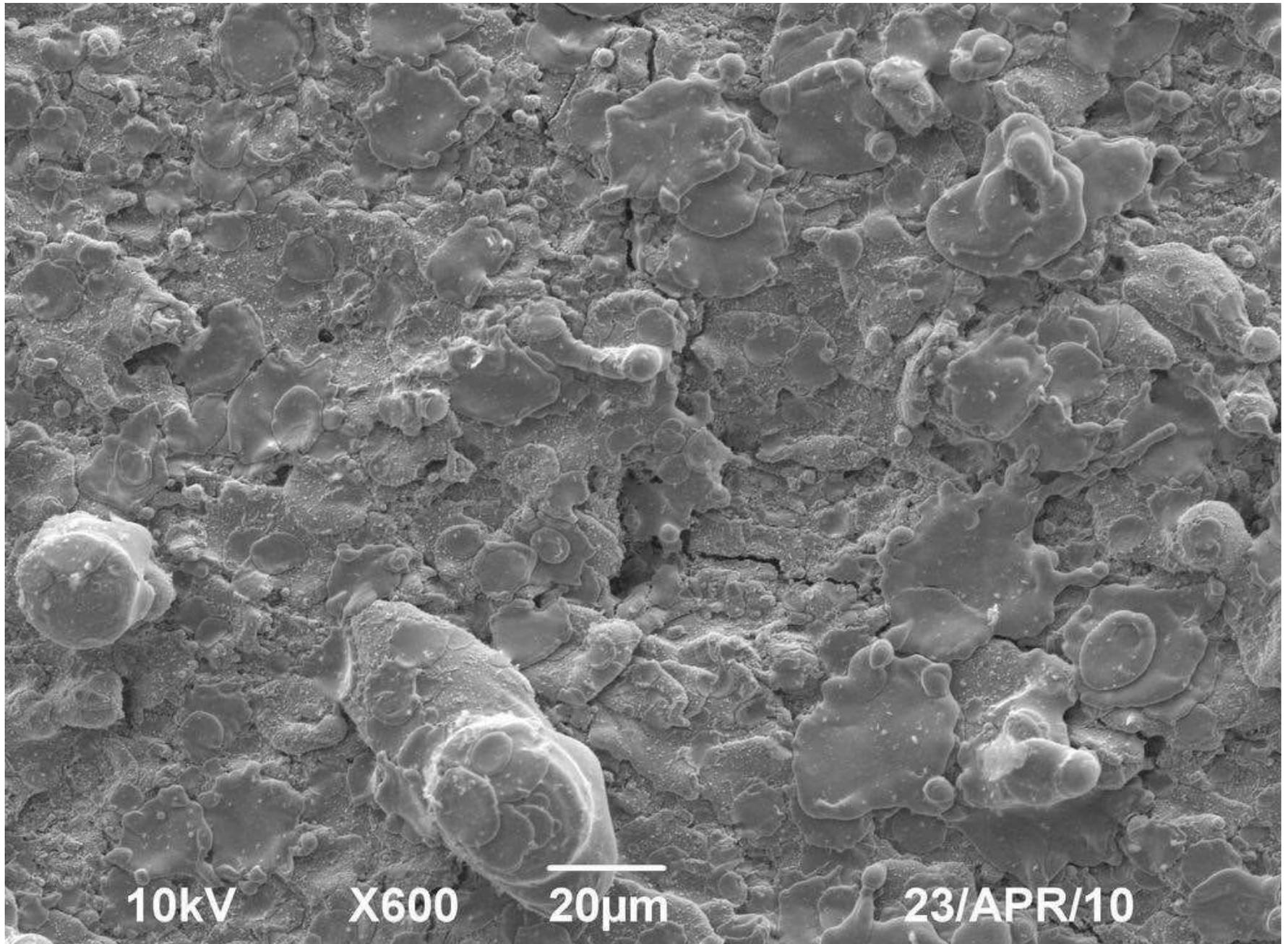
Изображение пылевых частиц (вольфрамовая мишень находится справа)
 $dT=7\mu\text{s}$, 20 μs после окончания пучка, $W_{\text{max}}=2.1\text{MJ/m}^2$
(#14124, $U = 72\text{ kV}$, $I = 27\text{ A}$, $t = 150\ \mu\text{s}$)
 $V \approx 150 - 170\text{ m/s}$

Вылет капель на КСПУ Х-50



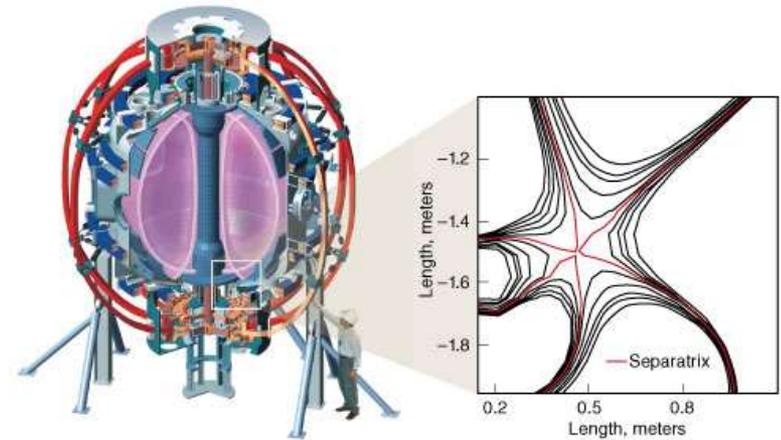
At QSPA Kh-50 droplets velocities may achieve several tens m/s, but published detected droplets with velocities only below 20 m/s. At QSPA-T droplet velocities are below 20 m/s.

Капли вольфрама на поверхности графита



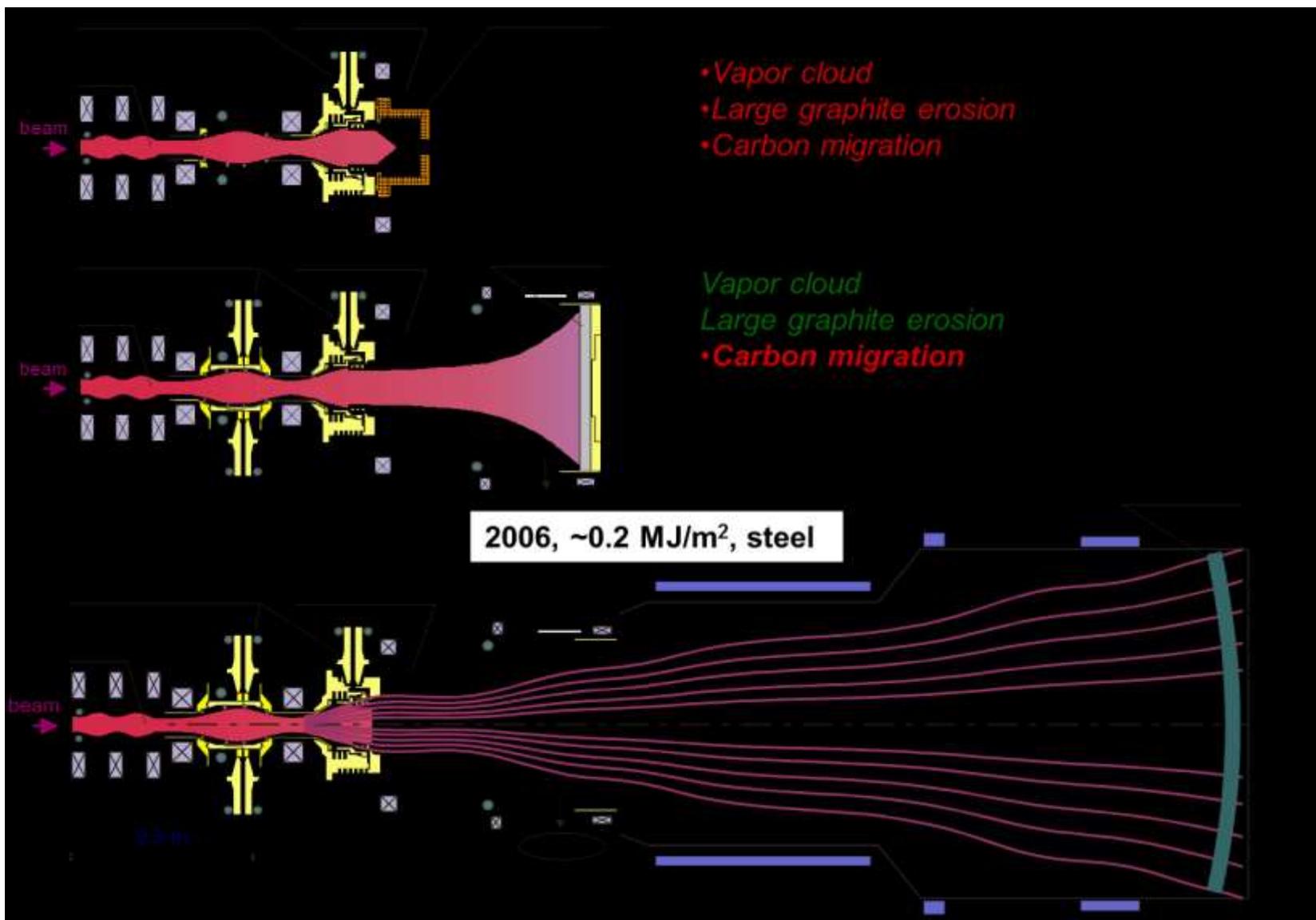
Как снизить поток тепла на стенку?

- 1) Увеличить площадь поверхности:
 - А) Snowflake дивертор для токамаков
 - Б) Открытая ловушка с расширителем



- 2) Снизить вероятность срывов, VDE и ЭЛМов, а также снизить их пиковую мощность
 - А) Быстрые диагностики управляют системами смягчения (инжекция газа или пеллет)
 - Б) Заранее возмущать магнитное поле для подавления переходных процессов (динамический-эргодический дивертор и т.д.)

Увеличение площади приемника пучка для снижения потока энергии в расширителе ГОЛ-3



Спасибо за внимание!

