



Стохастическая
кластеризация
поверхности при
взаимодействии плазмы
с материалами
В.П. Будаев

*НИЦ Курчатовский институт,
НИУ «МЭИ»
ИКИ РАН*

**XXVI Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике
18-19 декабря 2017 г, Москва**

План

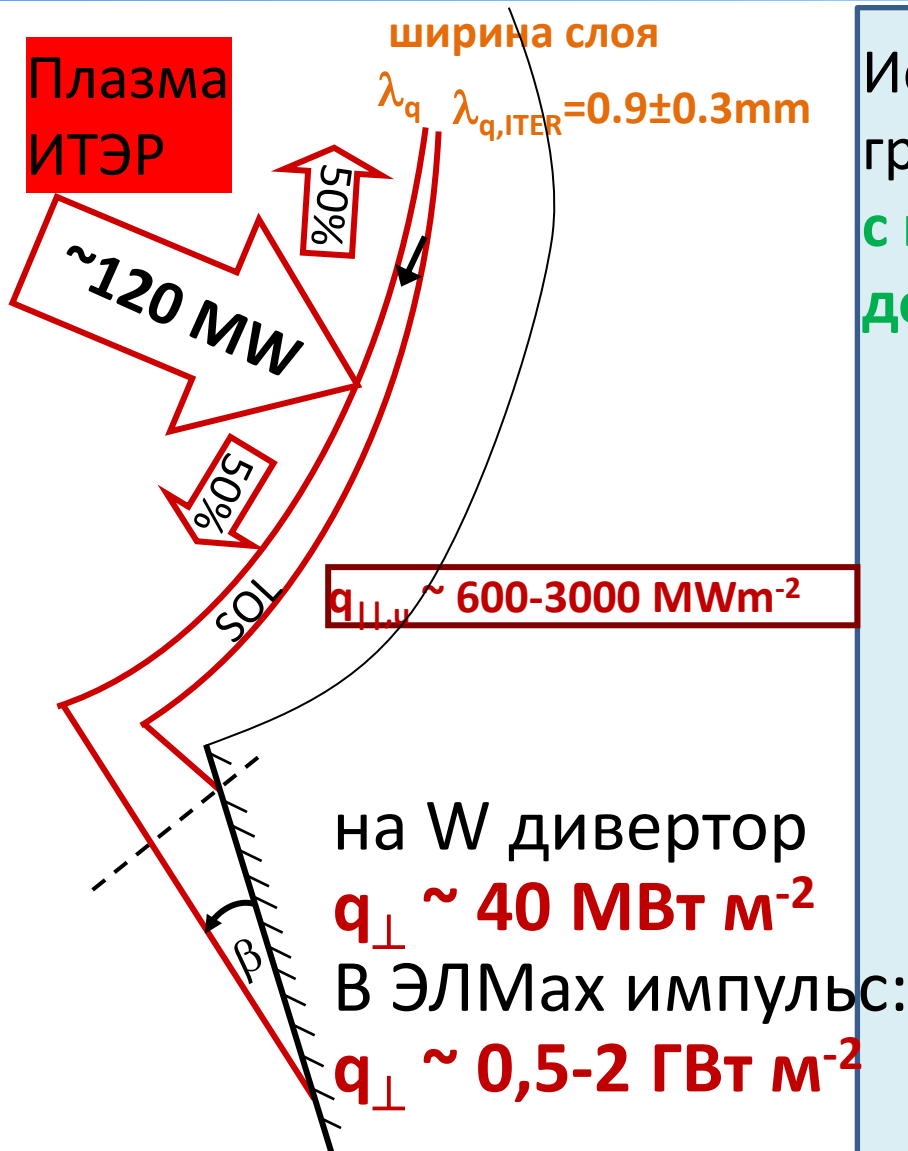
- Высокопористые наноструктурные материалы нового поколения, формируемые при мощном воздействии высокотемпературной плазмы в условиях сильной неравновесности
- Процесс агрегации-фрагментации : концепция каскада, формальная аналогия между (1) уравнением для описания нелинейного процесса агрегации-фрагментации и (2) кинетическим уравнением для изотропной 3-волновой турбулентности
- Стохастическая кластеризация рельефа материалов при плазменном воздействии в термоядерных установках : иерархическая гранулярность, степенные законы спектров, негауссова статистика высот стохастического рельефа
- Плазменная установка в НИУ «МЭИ» для исследования стохастической кластеризации материалов

Работа поддержана грантом РФФ 17-19-01469

Будаев В.П. Письма в ЖЭТФ 2017

Budaev V.P. Physics Letters A . 2017

Актуальность : критические плазменно-тепловые нагрузки на материалы стенки в термоядерном реакторе ИТЭР

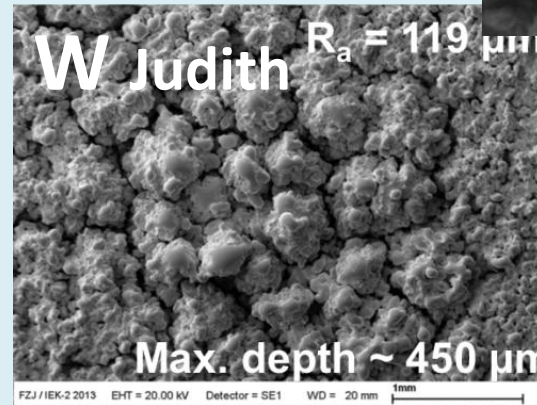


Испытания: эрозия и модификация графита, W и Be с нагрузками до 2 МДж/м^2

Графит

N-II

20KV 5000x 2.00µm 0416



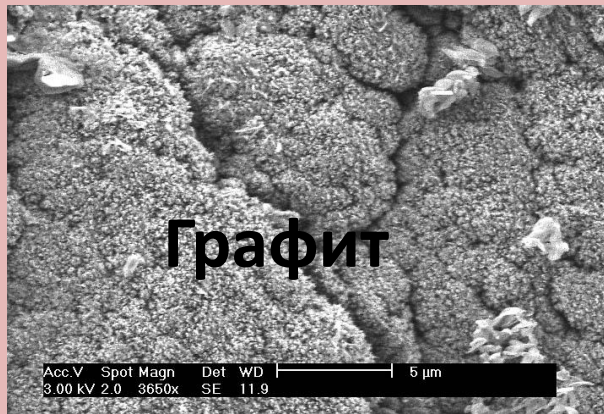
Бериллий
КСПУ 0.5 МДж/м^2



Нагрузки вблизи предела плавления вольфрама W

**Поверхность после мощного плазменного воздействия:
обнаружено явление роста самоподобной стохастической структуры
поверхности – фрактального роста начиная от наномасштабов**

токамак Т-10

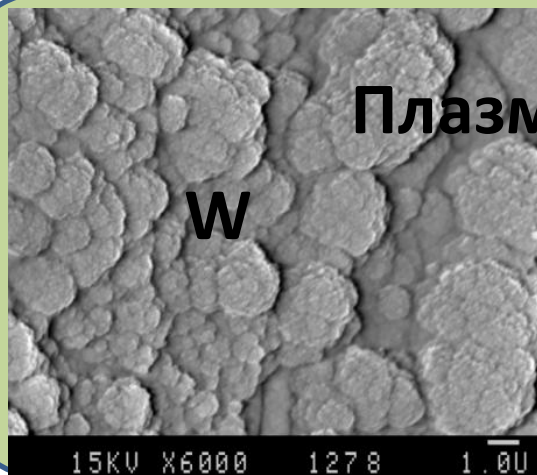


**Твердые материалы
с новой нано- и
микроструктурой:
обладают
уникальной
автомодельной
симметрией**

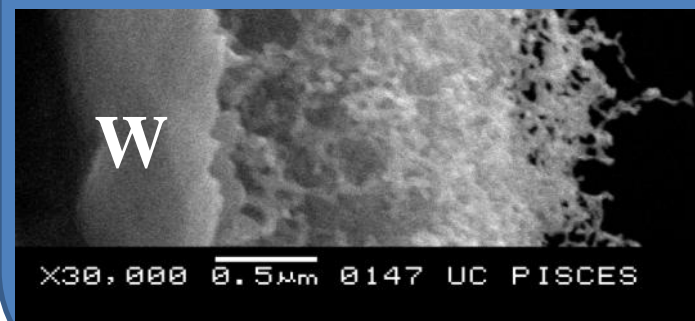
Плазма Nagdis-II



Плазма КСПУ-Т



Сталь нерж.



Применение для атомных и термоядерных реакторов, гиперзвуковых ЛА, биотехнологий и др.

Будаев В.П. Письма в ЖЭТФ 2017

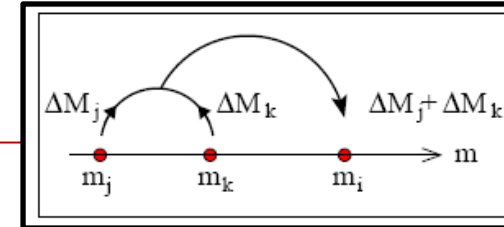
Budaev V.P. Physics Letters A . 2017

Процесс агрегации-фрагментации : концепция каскада

Перераспределение массы между кластерами в процессе агломерации (слипание/распад кластеров разного размера) аналогичен каскадному процессу передачи энергии в турбулентности

Подход к описанию распределения кластеров по массам (поверхности): формальная аналогия между (1) уравнением для описания нелинейного процесса агрегации-фрагментации и (2) кинетическим уравнением для изотропной 3-волновой турбулентности - уравнение Смолуховского (описание процессов коагуляции).

Распределение кластеров по размерам в статистически однородной системе описывается уравнением Смолуховского для коагуляции :



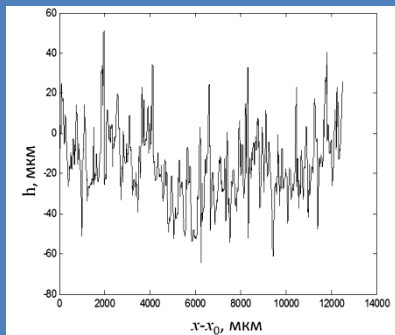
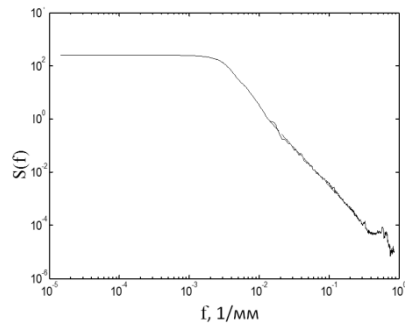
$$\frac{\partial N(m, t)}{\partial t} = \frac{\Lambda}{2} \int_0^\infty dm_1 dm_2 K(m_1, m_2) N(m_1, t) N(m_2, t) [\delta(m - m_1 - m_2) - \delta(m - m_1) - \delta(m - m_2)] \\ + \frac{J_0}{m_0} \delta(m - m_0) - \frac{J}{M} \delta(m - M)$$

- Ядро автомодельное:
- $K(hm_1, hm_2, hm) = h^\eta K(m_1, m_2, m)$, $K(m_1, m_2) \sim m_1^\mu m_2^\nu$, $\mu + \nu = \eta$.
- Автомодельные решения: спектр Колмогорова-Захарова
 $N(m) = Cm^{-(3+\eta)/2}$

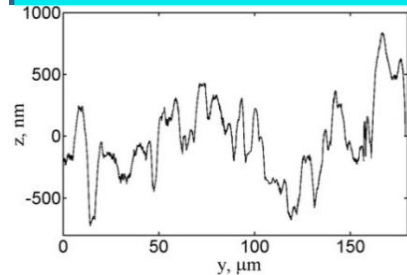
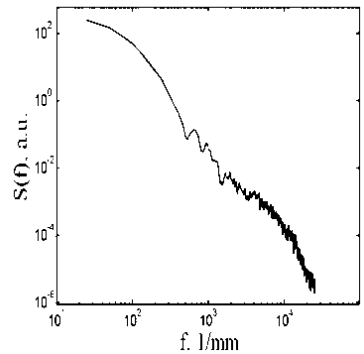
Степенные спектры высот стохастической поверхности после мощного действия плазмы

Стохастическая кластеризация поверхности: степенные законы спектров высот профиля

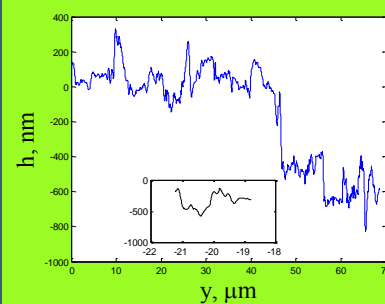
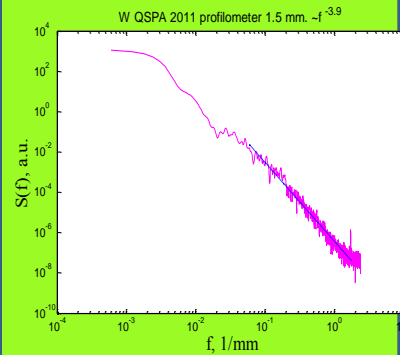
Промышленный абразив



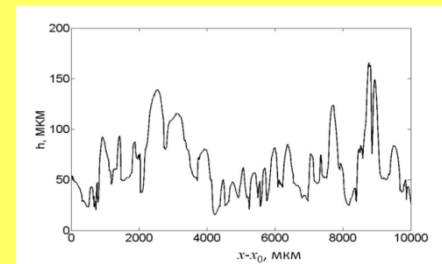
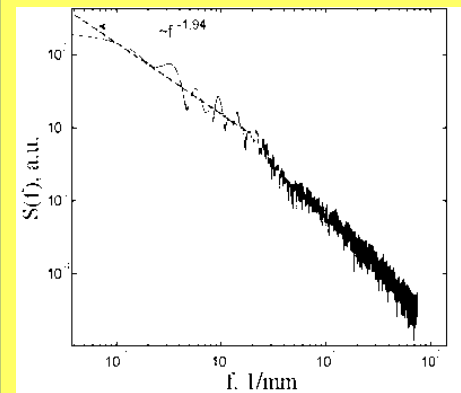
C, токамак Т-10



W, плазма КСПУ-Т



Сталь нерж. плазма КСПУ -Т



**Шероховатость материалов после плазменных испытаний
отличается от «простейшей» (броуновской) шероховатости**

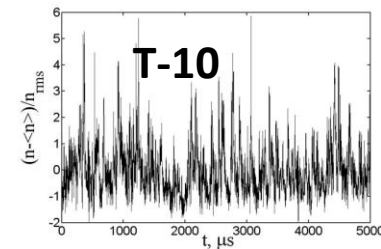
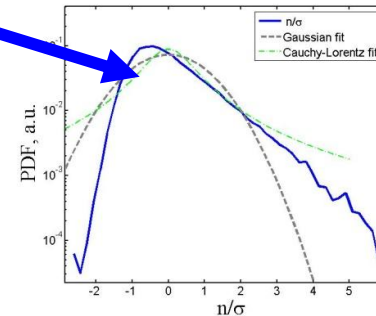
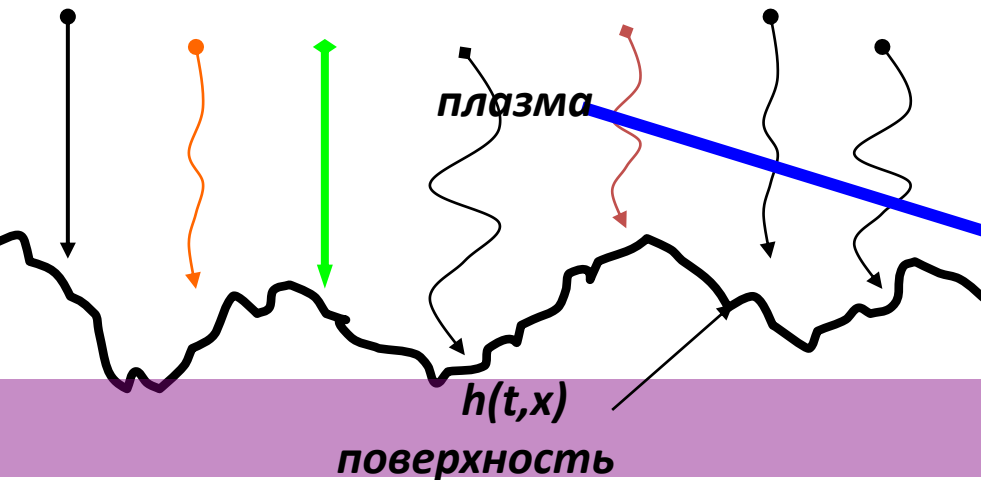
*Будаев и др, Письма в ЖЭТФ, 2012
Будаев, Письма в ЖЭТФ, 2017
Budaev, PLA, 2017*

Фрактальный рост поверхности при воздействии высокотемпературной плазмы

Рост поверхности чувствителен к флуктуациям в осаждаемом потоке – стохастический рельеф. **2 эффекта – рост «пиков» и их «размывание» диффузией по поверхности. Описывает уравнением Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) – автомодельное решение, самоподобная (фрактальная) поверхность $h(x, t)$**

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \eta(\vec{x}, t) + \nu \nabla^2 h + \frac{\lambda}{2} (\nabla h)^2$$

Шероховатость $\sigma \sim x^\alpha \Phi(t/x^{\alpha/\beta})$

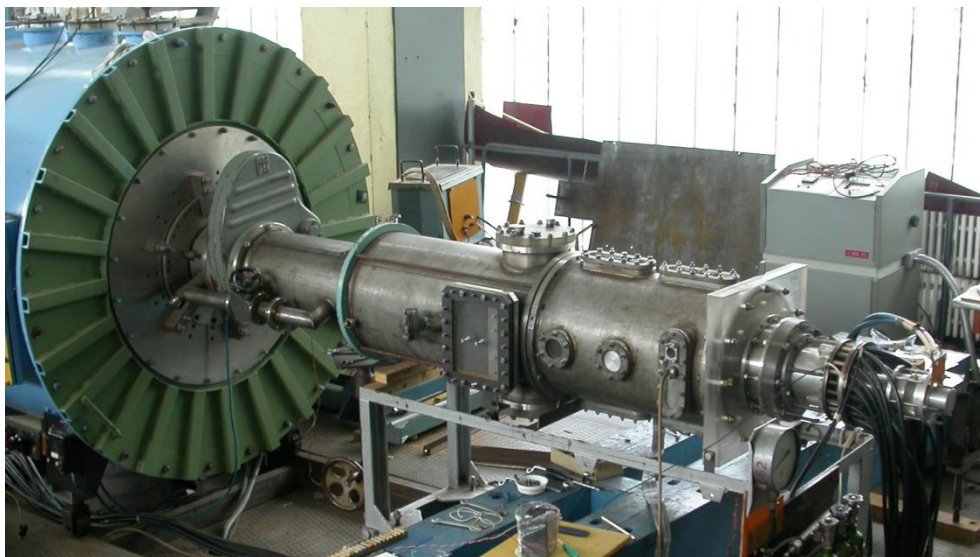


В термоядерных установках: при агломерации на поверхности стохастическое движение кластеров в турбулентных электрических полях пристеночной плазмы

Функция распределения флуктуаций осаждаемого потока – негауссова : рост стохастической поверхности с особой масштабной инвариантностью

Будаев В.П., Химченко Л.Н. О ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ОСАЖДЕННЫХ ПЛЕНОК В ТОКАМАКЕ, Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2007. 131. № 4. 711.

Будаев В.П., Грашин С.А., Карпов А.В., Краевский С.В., Химченко Л.Н. ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ В СТРУКТУРЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ПЛЕНОК, Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2012. Т. 95. № 1-2. С. 84-90.



Параметры плазмы КСПУ:

Длительность импульса $\Delta t = 0.1 \div 0.6$ мс

Скорость потока плазмы $v = (1 \div 3)10^5$ м/с

Плотность плазмы $n = 10^{22} \div 10^{23}$ м⁻³

Диаметр потока $d = 5$ см

Энергия ионов $E_i = 0.1 \div 0.5$ кэВ

Тепловые нагрузки $Q = 0.2 \div 2.5$ МДж/м²

Испытания материалов

Плавление:

- динамика расплава
- капельная эрозия
- сплавы/эвтектики

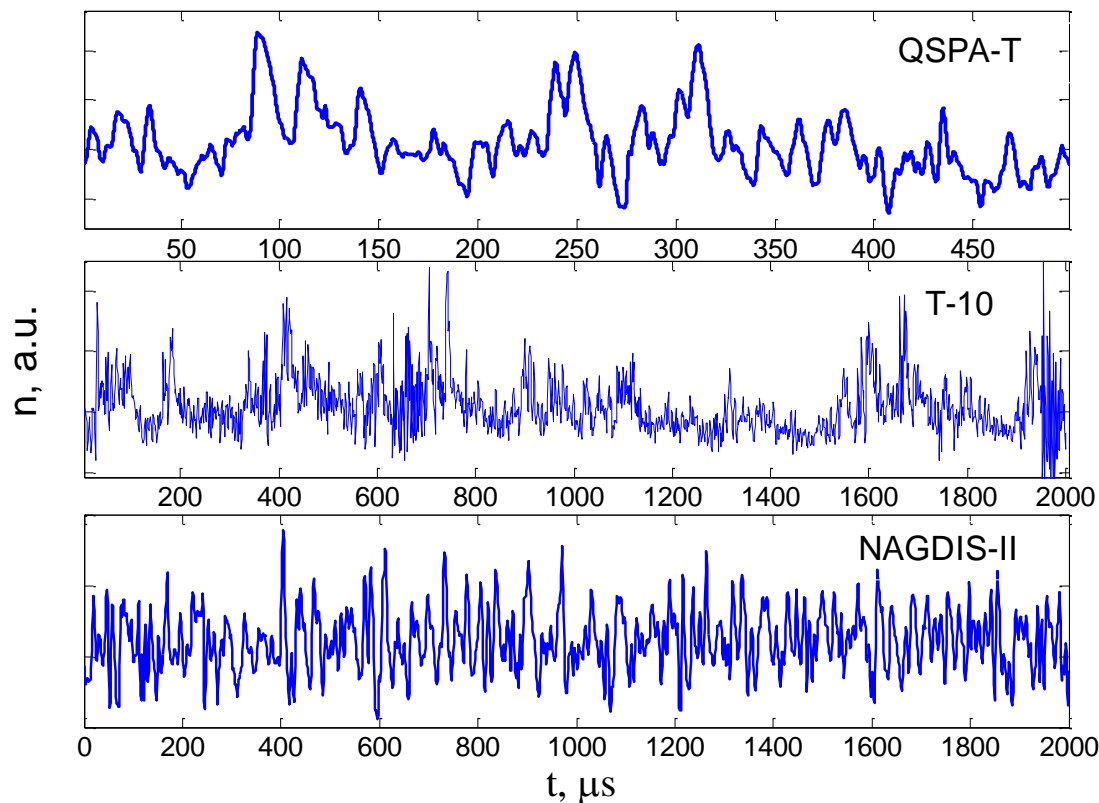
Рекристаллизация:

- охрупчивание (пыль)
- эрозия
- изменение структуры

Испарение/пересадение:

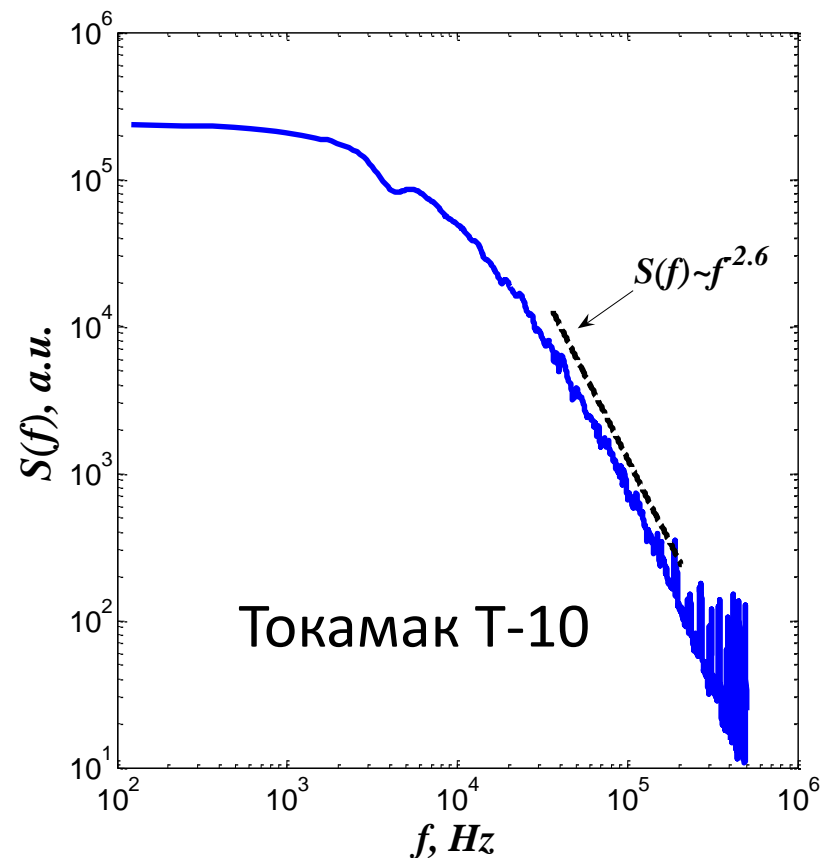
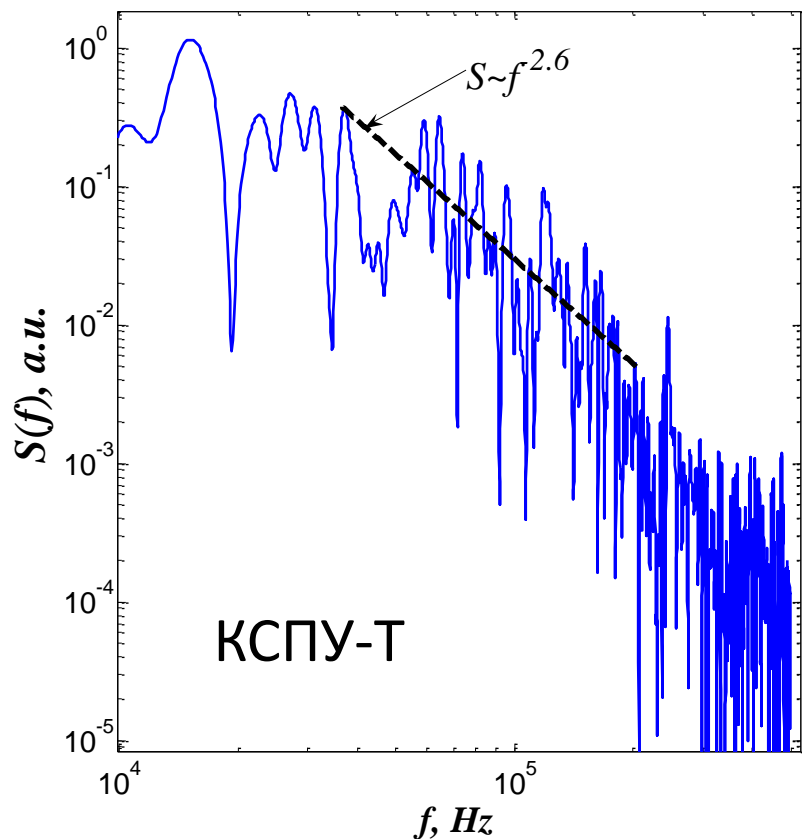
- пленки
- сорбция изотопов водорода

Пристеночная турбулентность плазмы в термоядерных установках



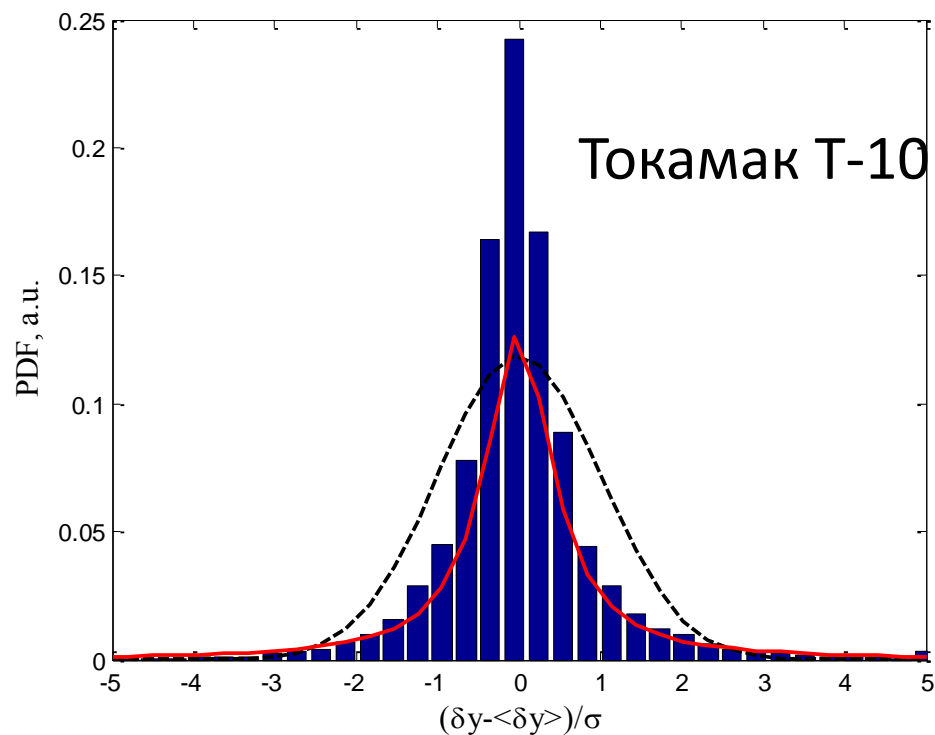
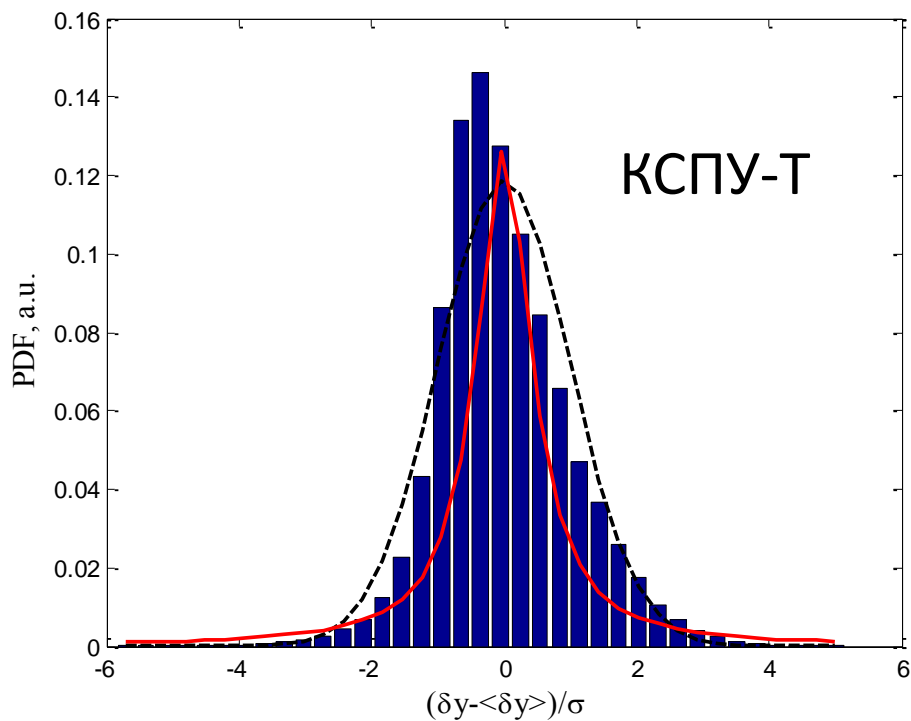
**Переменяемость, дальние корреляции, негауссова статистика,
степенные спектры, мультифрактальность**
Будаев, Савин, Зеленый, УФН 2011

Степенные спектры пристеночной турбулентности плазмы

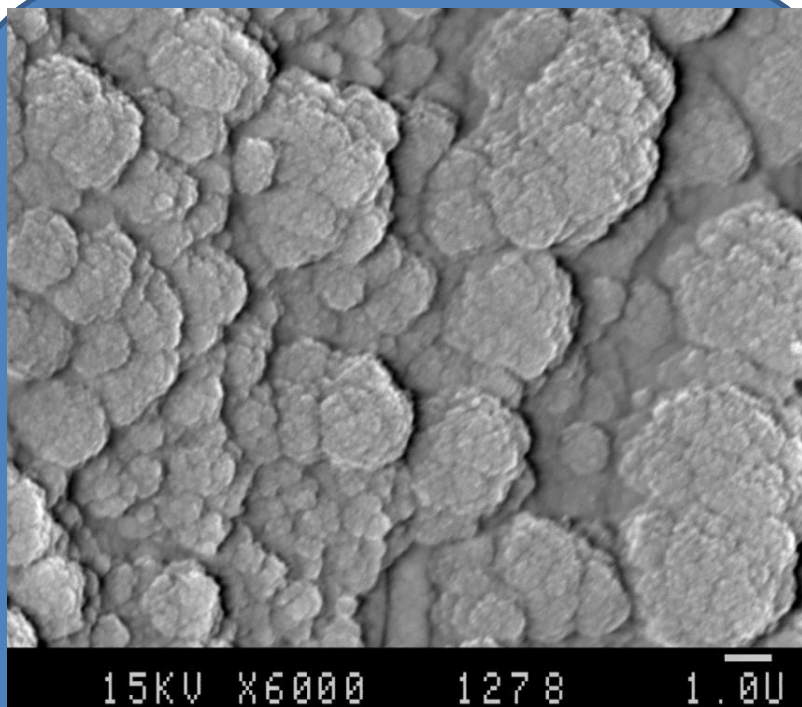


Универсальность свойств пристеночной турбулентности в установках с высокотемпературной плазмой

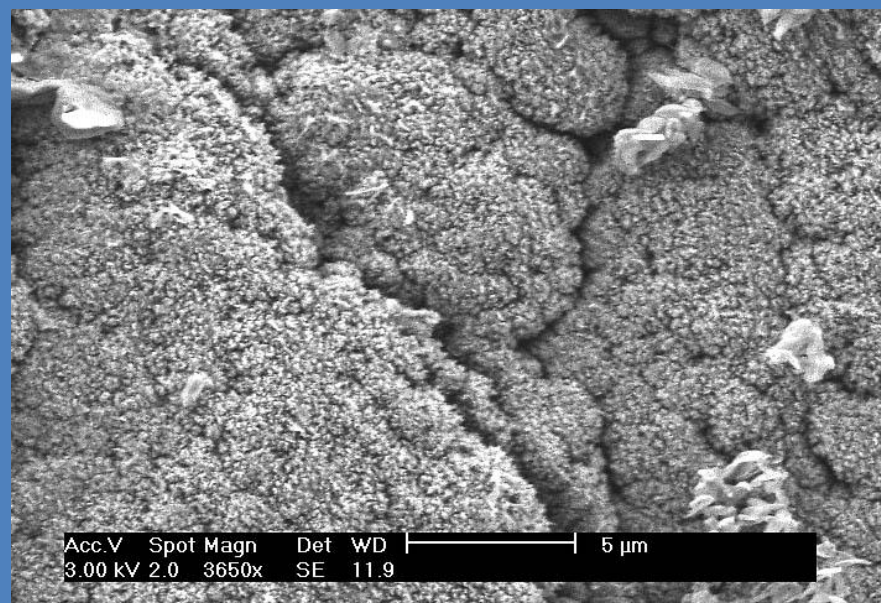
Негауссова статистика пристеночной турбулентности плазмы



Стохастический рельеф вольфрама и графита после действия высокотемпературной плазмы



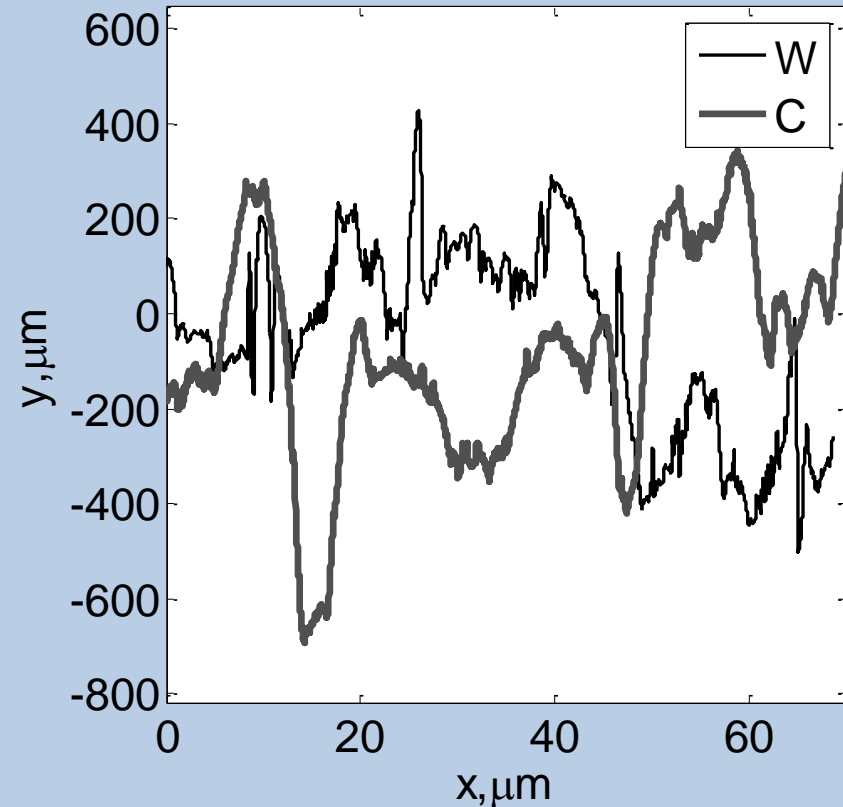
Вольфрам облучен мощными плазменными потоками в КСПУ-Т



Углеродные переосажденные слои, ТокамакТ-10

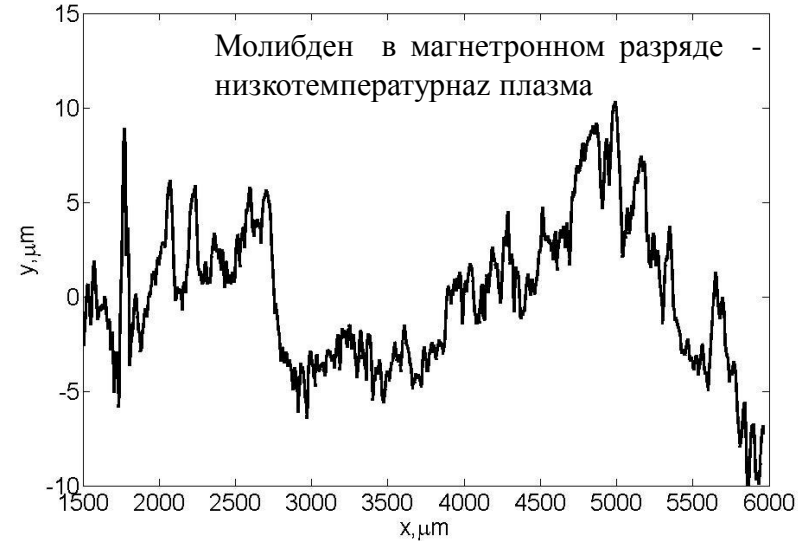
Стохастические рельефы

Воздействие высокотемпературной плазмы

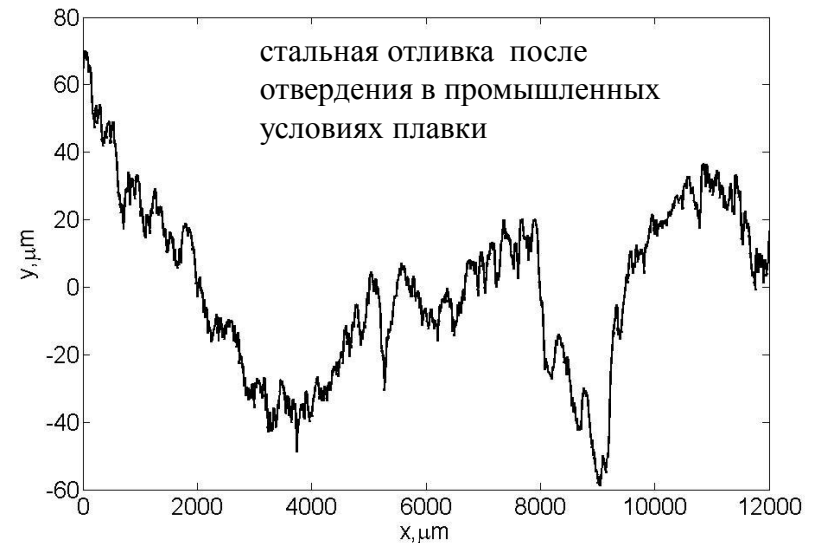


**Вольфрам в КСПУ-Т, 2 МДжм^{-2}
Углеродные пленки в токамаке Т-10,**

**Молибден в магнетронном разряде -
низкотемпературная плазма**

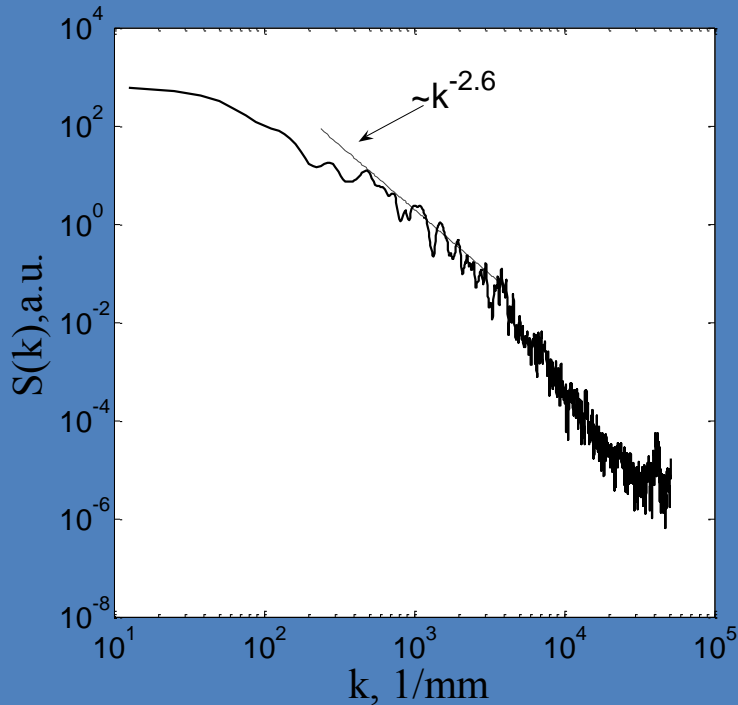


**стальная отливка после
отверждения в промышленных
условиях плавки**

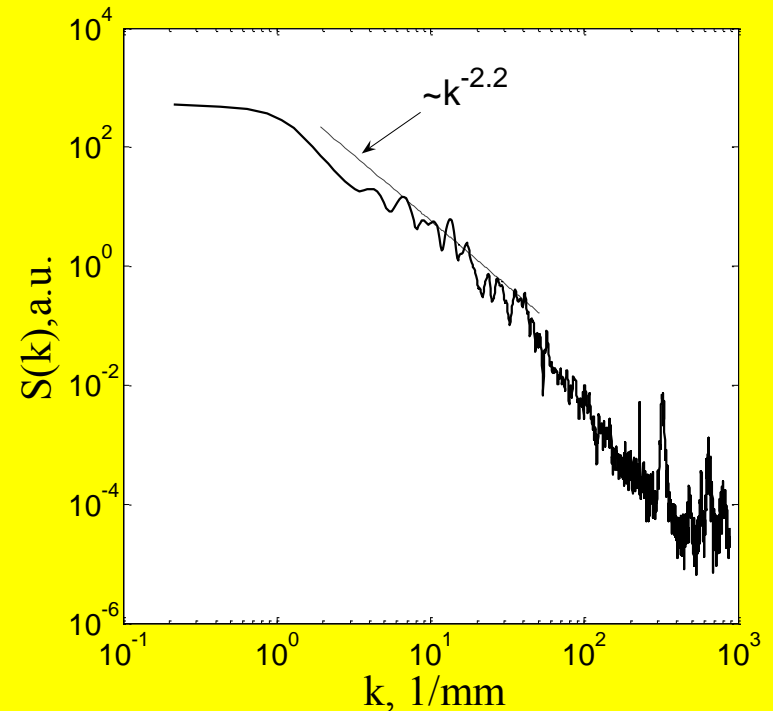


Степенные спектры стохастического рельефа

Вольфрам
Высокотемпературная плазма
в КСПУ-Т, 2 МДжм^{-2}



Молибден в магнетронном
разряде - низкотемпературная
плазма

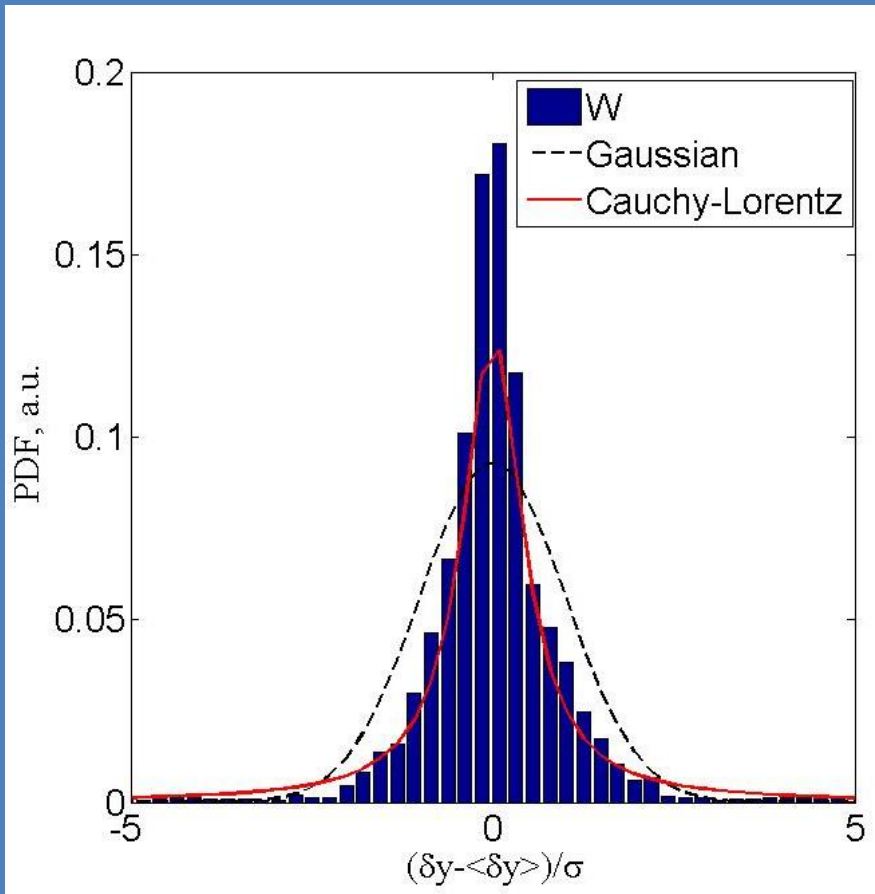


Фурье-спектр высот рельефа $S(k) \sim k^p$

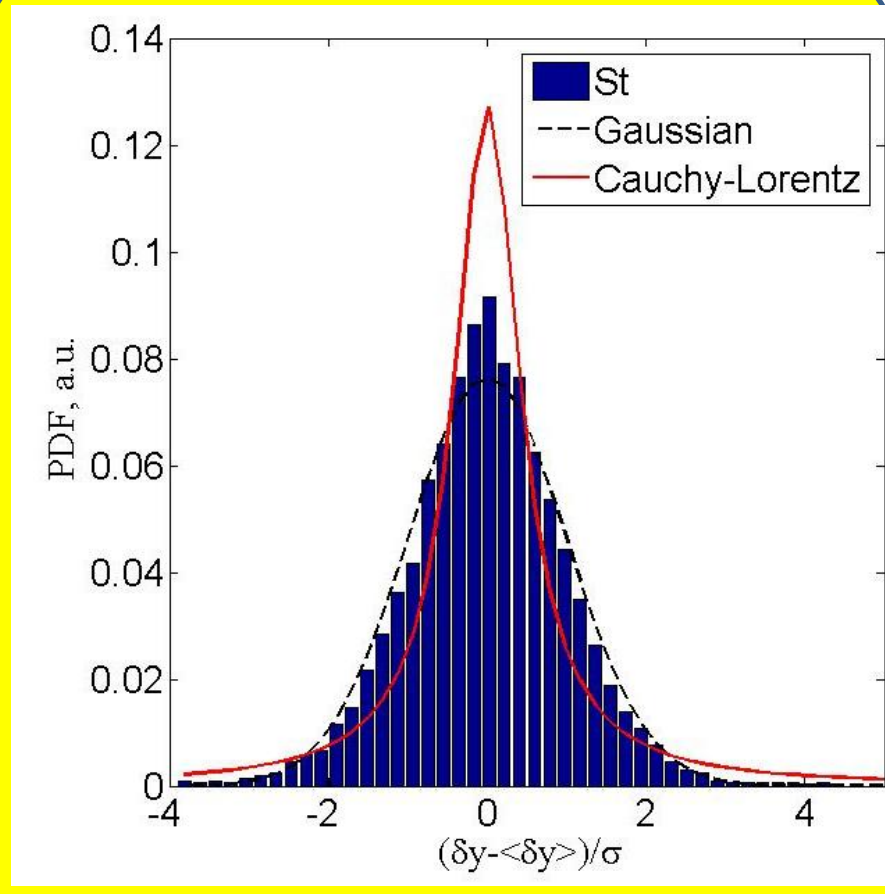
В термоядерных установках p от -2,4 до -2,8

Для сравнительных образцов (отливка и молибден в магнетронном разряде) p от -1,97 до -2,2.

Функция распределения высот стохастического рельефа



Вольфрам в плазме КСПУ-Т
Негауссова статистика распределения высот



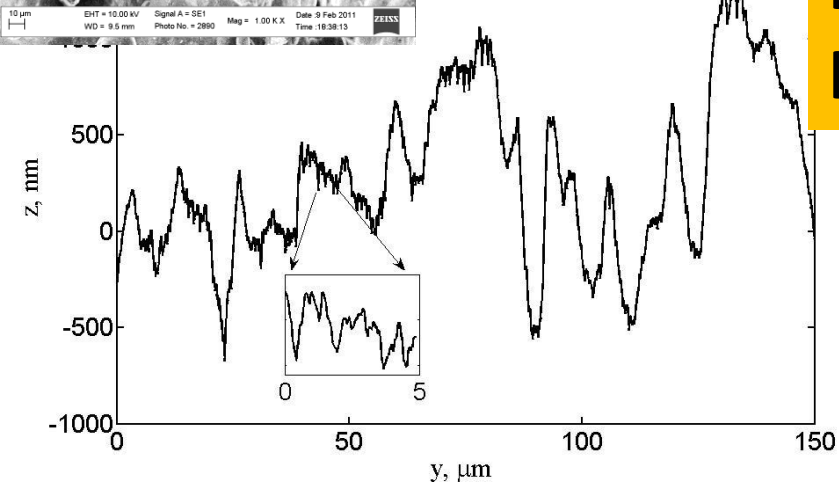
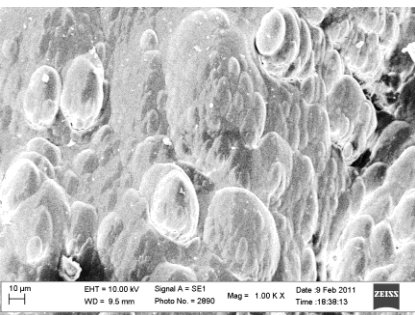
Броуновская шероховатость
промышленной стальной отливки

Фрактальность – статистическое самоподобие структуры после обработки высокотемпературной плазмой поверхности

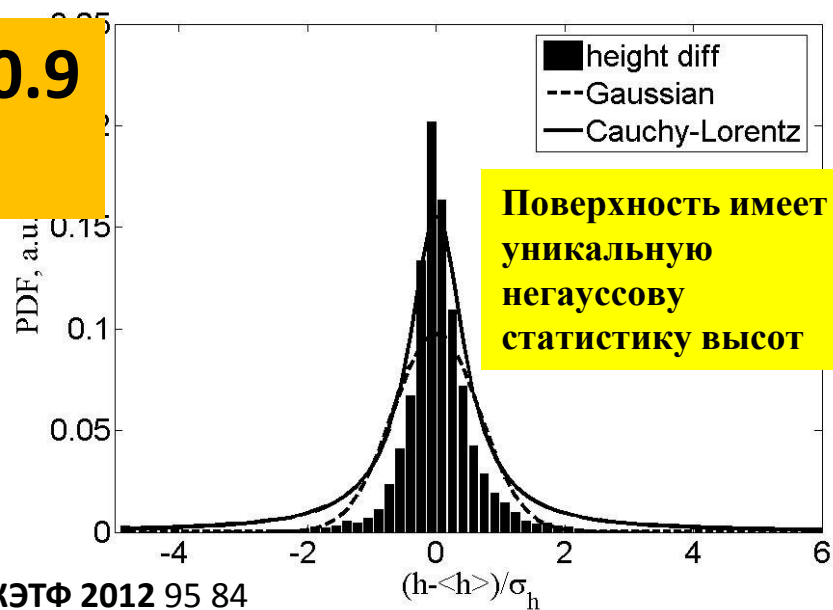
Автомодельность функции распределения высот:

$$x \rightarrow ax : P(x) = a^{-H} P(ax), a > 0$$

H – показатель Хёрста,
H=0.5 для простейшего самоподобия
H=0.7-0.9 для самоорганизованных систем



H=0.7-0.9
H=3-D_f

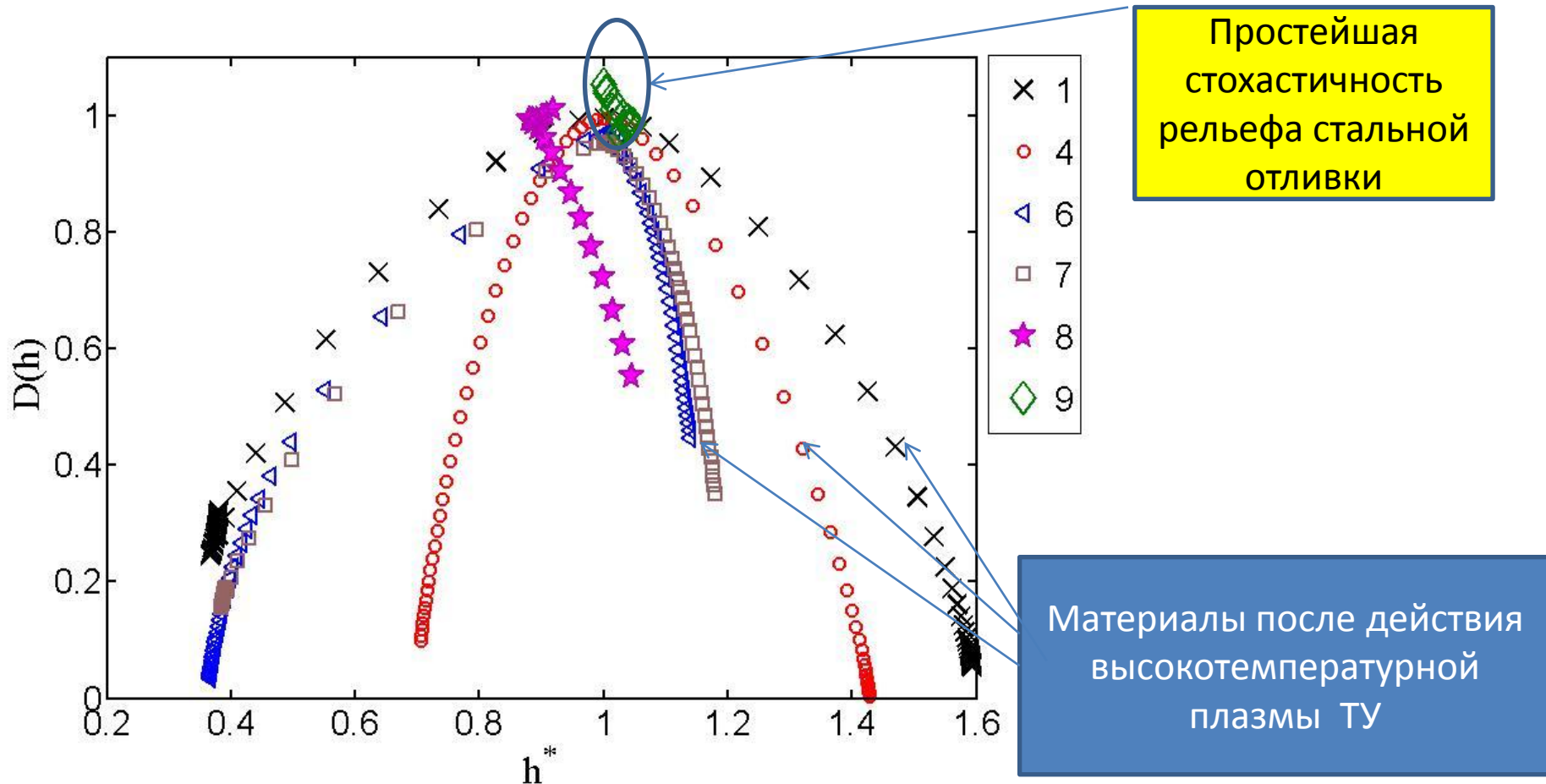


Поверхность имеет уникальную негауссову статистику высот

Будаев В.П., и др. Письма в ЖЭТФ 2012 95 84

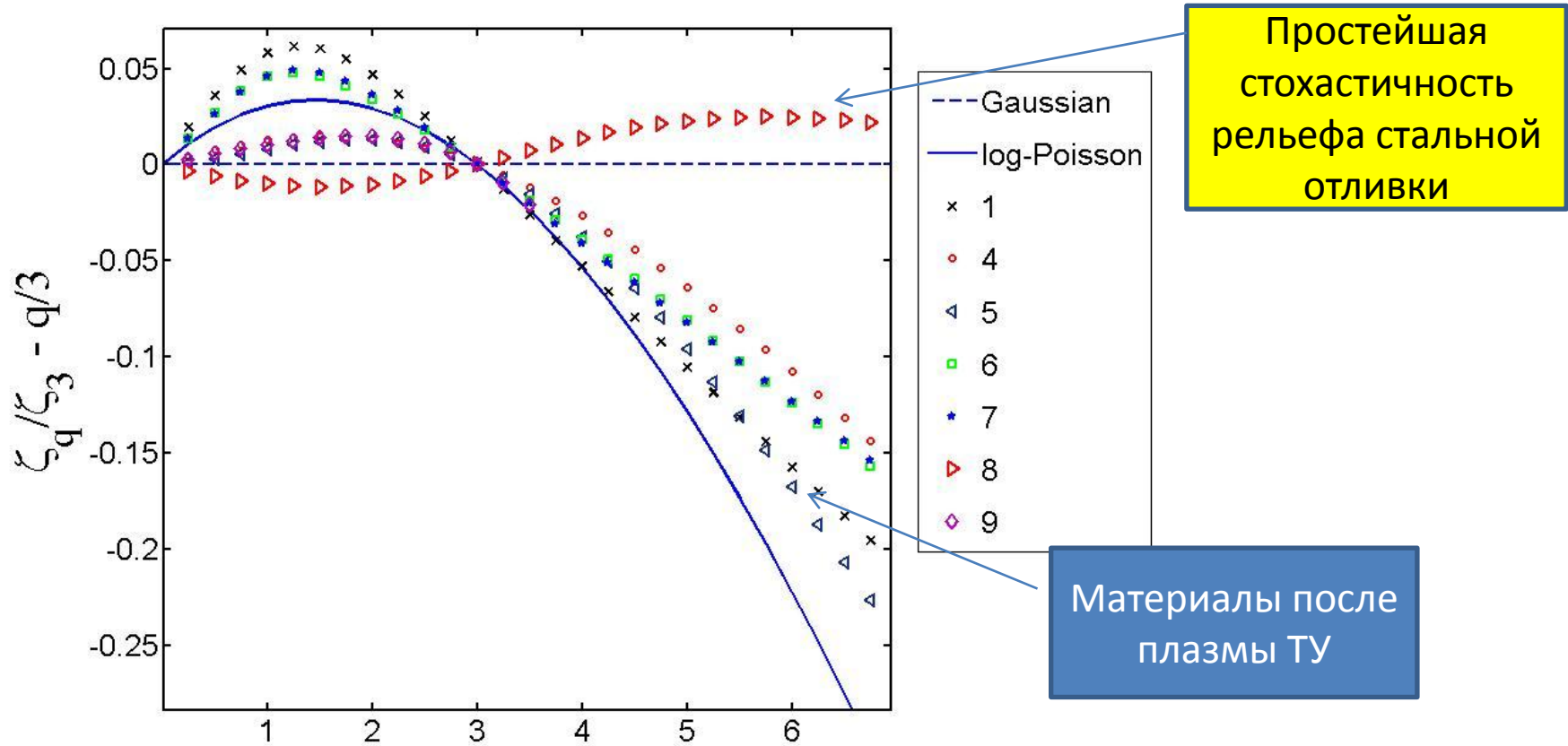
Подобие другим уникальным материалам: фрактальная размерность кластеризации такая же как и в металлических стеклах ($D_f = 2,31$), агрегатах кремния ($D_f = 2.27 \div 2.65$), квази-кристаллах

Мультифрактальность статистики рельефа после плазменной обработки



Мультифрактальный спектр $D(h)$ в зависимости от показателя Гельдера h
Уширен для материалов после испытаний в ТУ : уширение $\Delta h = (0,47-1,23)$
В сравнении со сравнительными образцами (стальной отливкой и Мо в магнетроне) $\Delta h = 0,1-0,25$

Свойство статистического самоподобия рельефа после плазменной обработки



Скейлинг $\zeta(q)$, структурных функций (моментов)
 $S_q(l) = \langle |\delta y|^q \rangle$, $\delta y = z(x+l) - y(x)$, $S_q(l) \sim l^{\zeta(q)}$

Стохастические свойства поверхности:

после горячей плазмы в термоядерных установках
отличаются от иных условий кластеризации

№	образец	P $S(k) \sim k^p$	индекс Хёрста H	Мульти- фрактальность Δh
1	вольфрам, облучен плазмой в КСПУ-Т, 2 импульса с нагрузкой 2 МДжм ⁻² , рис.1б [22-24]	-2.62	0.86	1.25
2	вольфрам, облучен плазмой в КСПУ-Т, более 50 импульсов с нагрузкой 2 МДжм ⁻² , [22-24]	-3.18	0.81	0.58
3	углеродная пленка, из токамака Т10, образец №1 из [1]	-2.49	0.78	0.55
4	углеродная пленка, из токамака Т10, образец №2 из [1], рис.1б	-2.59	0.77	0.74
5	углерод, графитовая мишень, облучена плазмой в NAGDIS-II [29]	-2.29	0.68	0.91
6	сталь нержавеющая, облучена плазмой в КСПУ-Т [30]	-2.85	0.72	0.50
7	сталь нержавеющая, облучена плазмой в КСПУ-Т [30, 25]	-2.87	0.68	0.47
8	Молибден, после облучения в магнетронном разряде рис.1в [31]	-2.2	0.6	0.25
9	стальная отливка после отверждения, рис.1г	-2.41	0.58	0.1

Плазменная установка НИУ «МЭИ» для обработки материалов : вольфрам, молибден, титан, нерж. сталь

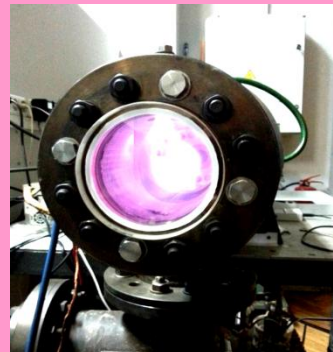
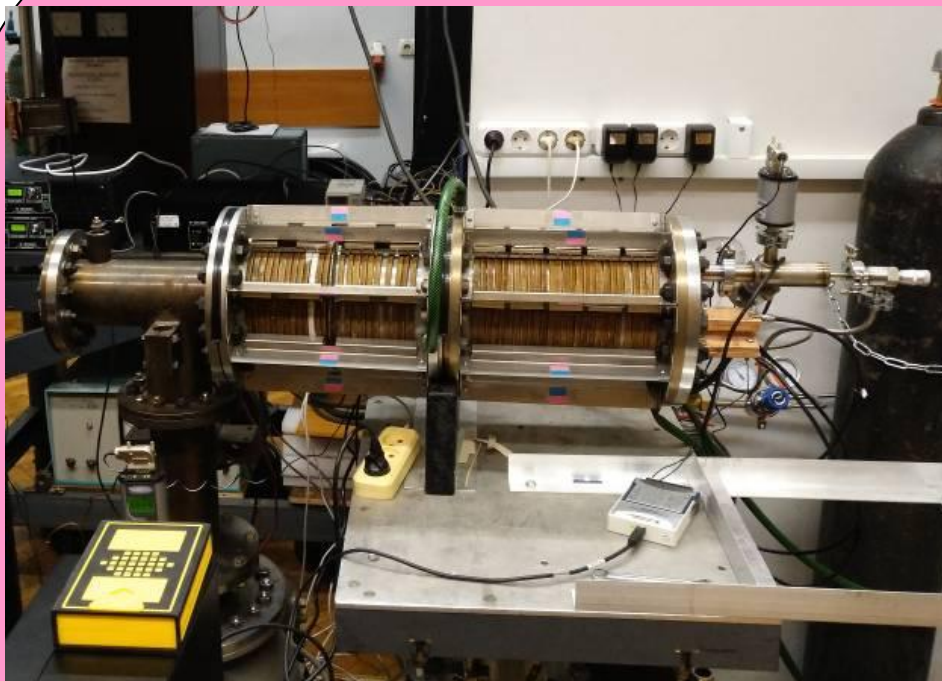
Параметры плазмы :

Длительность $\Delta t = 8$ часов

Температура $T_e = (4 \div 30)$ эВ

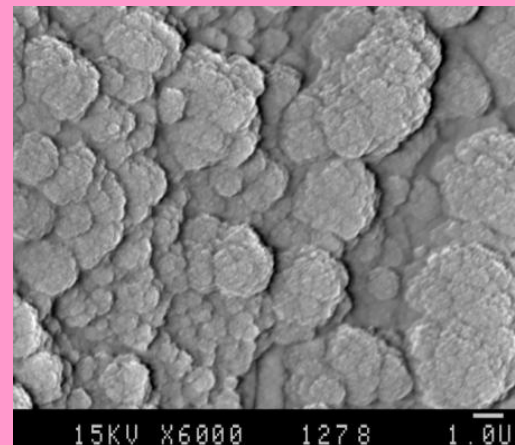
Плотность плазмы $n = 10^{17} \div 10^{18} \text{ м}^{-3}$

Испытание материалов -тепловые
нагрузки $0.5 \div 5 \text{ МВт/м}^2$



Получение наноструктурированной развитой
поверхности тугоплавких материалов при
экспонировании в горячей плазме- формирование
фрактальной структуры

*Будаев В.П. и др Вопросы атомной науки и техники,
Сер.Термояд. синтез 2017*



15KV X6000 1278 1.0U

Выводы

- 1. При испытаниях мишеней из вольфрама, графита, стали в плазме термоядерных установок с экстремальными нагрузками до 2 МДж/м^2 обнаружена неоднородная стохастическая кластеризация поверхности со свойствами самоподобия структуры гранулярности от наномасштабов до макромасштабов.**
- 2. Такая кластеризация качественно отличается от простейшей шероховатости типа броуновской поверхности, что показано на примерах сравнительных образцов - молибдена после экспонирования в установке с магнетронным разрядом и образца отливки стали с типичной простейшей шероховатостью, сформированной при отверждении после плавления.**
- 3. Получены степенные спектры и статистические характеристики стохастических рельефов материалов из термоядерных установок, они соотносятся со спектральными и статистическими характеристиками турбулентности пристеночной плазмы, что свидетельствует в пользу механизма фрактального роста поверхности под действием плазмы.**
- 4. Сооружена плазменная установка в НИУ «МЭИ» для испытаний материалов нагрузками до 5 МВт/м^2 и получения стохастического фрактального рельефа на тугоплавких металлах**

Спасибо за внимание!

Аннотация

Представлены результаты исследования поверхности, сформированной мощными потоками высокотемпературной плазмы на тугоплавкие металлы – вольфрам и нержавеющую сталь. Наблюдается неоднородная стохастическая кластеризация поверхности со свойствами самоподобия структуры гранулярности от наномасштабов до макромасштабов, подобная ранее описанной фрактальной структуре углеродных материалов. Оценены статистические характеристики иерархической гранулярности и масштабной инвариантности, которые качественно отличаются от свойств простейшей шероховатости типа броуновская поверхность, что, возможно, обусловлено универсальными механизмами формирования стохастической кластеризации материалов под влиянием высокотемпературной плазмы.

Стандартная теоретическая модель агломерации, наиболее часто рассматриваемая в литературе, основана на кинетическом уравнении Смолуховского (см. [12,13]): две частицы (кластеры) с массами m_1 и m_2 взаимодействуют и слипаются с вероятностью сформировать новую частицу (кластер) с массой $m=m_1+m_2$. В такой модели предполагается, что агрегация необратима в том смысле, что большие частицы (кластеры) не распадаются. В стандартной модели агломерации эволюция и распределение кластеров по масштабам (массам и размерам) определяются математической формой ядра $K(m_1, m_2)$ в кинетическом уравнении, в литературе наиболее часто рассматриваются ядра со свойствами самоподобия (см., например, [13]):

$$K(hm_1, hm_2, hm) = h^\eta K(m_1, m_2, m), \quad K(m_1, m_2) \sim m_1^\mu m_2^\nu, \quad \mu + \nu = \eta. \quad (1)$$

Для кинетического уравнения с таким ядром рассматривается автомодельное решение со степенным спектром, полученное с использованием результатов теории А.Н. Колмогорова [14] и развитых В.Е.Захаровым [15-17] методов получения универсальных спектров кинетических уравнений в рамках теории слабой турбулентности (см. также [18]) для числа частиц N с массой m :

$$N(m) = Cm^{-(3+\eta)/2}, \quad (2)$$

где C – постоянный коэффициент.

Из (1) и (2) следует, что для процессов агломерации с различными характеристиками самоподобия (см. (1)) будут наблюдаться различные спектры (2) . Это свойство можно использовать для классификации процессов стохастической кластеризации.

В литературе обсуждается формальная аналогия (см. [18]) между уравнением для нелинейного процесса фрагментации-агрегации и кинетическим уравнением, описывающим 3-х волновую турбулентность, для которой рассматривается спектр в подходе Колмогорова-Захарова (2). Перераспределение массы между кластерами в процессе агломерации (соединение/распад кластеров разного размера) аналогичен каскадному процессу передачи энергии в турбулентности. Такое рассмотрение позволяет использовать достижения теории турбулентности для описания распределения кластеров по масштабам и иерархической гранулярности поверхности, наблюдаемой в экспериментах (см. напр. [7,1]).

В стандартной модели агломерации предполагается, что нет пространственной корреляции между агрегатами. В реальных условиях эволюции поверхности под действием плазмы в токамаках и других ТУ эти допущения не выполняются - существуют пространственно-временные корреляции процессов ([1,19]). Также возможны процессы распада кластеров (в аналогии с турбулентностью – обратный каскад). Эти процессы приводят к отклонению от спектра, рассматриваемого в подходе Колмогорова-Захарова (2). Теоретически такая возможность обсуждается, например, в [18], где рассматривается мультифрактальный скейлинг корреляционной функции.

14. А.Н. Колмогоров, ДАН, 30, 299 (1941)

15. В.Е. Захаров, Журн. Прикл. Мех. Тех. Физ. (4) 35 (1965)

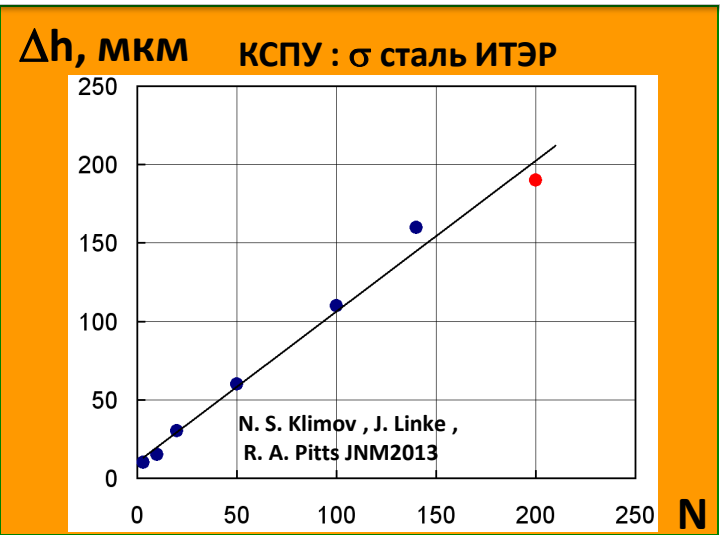
16. V. Zakharov and N. Filonenko, Doklady Akad. Nauk. SSSR 170, 1292 (1966).

17. V. Zakharov, V. Lvov, and G. Falkovich, Kolmogorov Spectra of Turbulence (Springer-Verlag, Berlin, 1992).

18. C. Connaughton, R. Rajesh, O. Zaboronski, Physical Review Letters, 94 (19), 194503 (2005)

19. В.П. Будаев, С.П. Савин, Л.М. Зеленый , УФН, 181, 905–952 (2011)

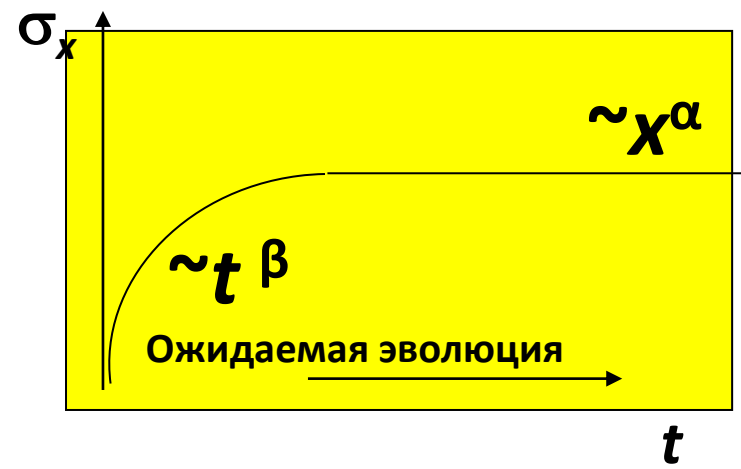
Рост шероховатости Теоретическое рассмотрение эволюции поверхности: универсальный скейлинг



$$\sigma = \langle h(x,t) - \langle h(x,t) \rangle \rangle^{1/2}$$

$$\sigma \sim x^\alpha \Phi(t/x^{\alpha/\beta})$$

$$\sigma \sim x^\alpha \quad \sigma \sim t^\beta$$



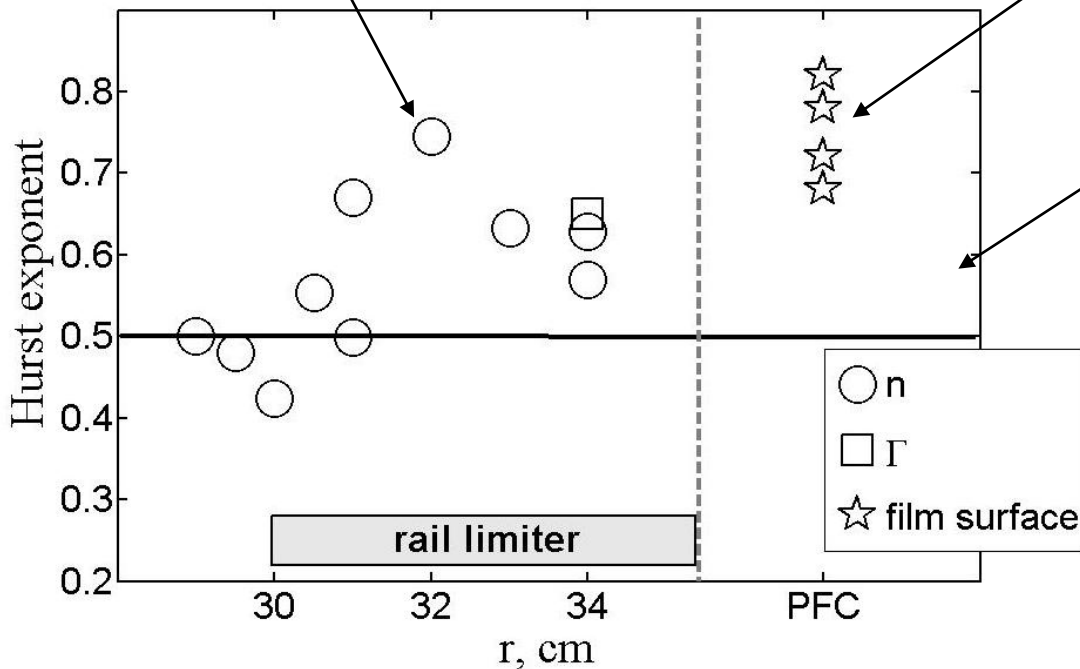
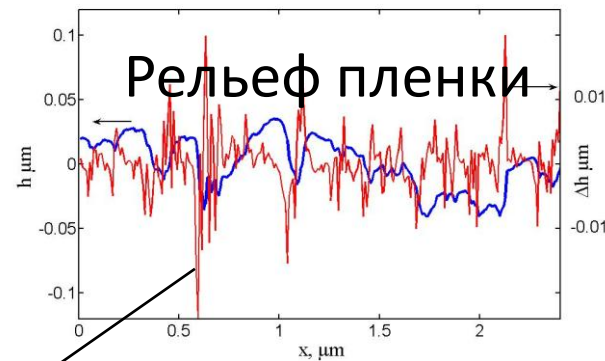
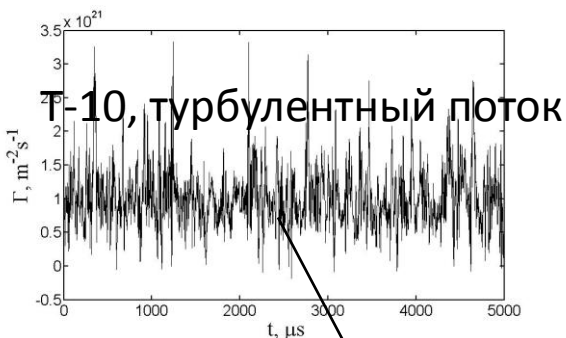
Описание роста шероховатости поверхности: кинетическое уравнение (Смолуховского), уравнение КПЗ (Kardar-Parisi-Zhang – рост границы фаз), ур-е Бюргерса (агломерация); автомодельные решения с зависимостью от высоты/времени $\sigma \sim x^\alpha \Phi(t/x^{\alpha/\beta})$

Эксперимент (токамак Т-10, КСПУ, N-II) $\alpha = 0.7 - 0.85 > 1/2$ (неброуновская)

Прогноз для длительной эксплуатации W в ИТЭР : насыщение роста шероховатости поверхности (стойкость материалов под плазменной нагрузкой)

Budaev, Physica A, 2007, 382,359
Будаев и др, Физика плазмы, 2013,39,923

Пристеночная турбулентность и фрактальная структура пленок : взаимосвязь свойств самоподобия



Показатель самоподобия $H > 1/2$
для пристеночной турбулентности и переосажденных пленок
ФРАКТАЛЬНЫЙ РОСТ