

Критическое поведение металлов, актинидов и металлического плутония в явлении самоорганизации при высокоинтенсивном воздействии

А. Я. Учаев, Н. И. Сельченкова, И.Р.Трунин

**Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-
исследовательский институт экспериментальной физики**

e-mail: uchaev@expd.vniief.ru

$$dE = TdS - PdV$$

$$\frac{T}{dV} = \frac{P}{dS}$$

$$P < 0, \quad dV < 0$$

Параметры нагружения

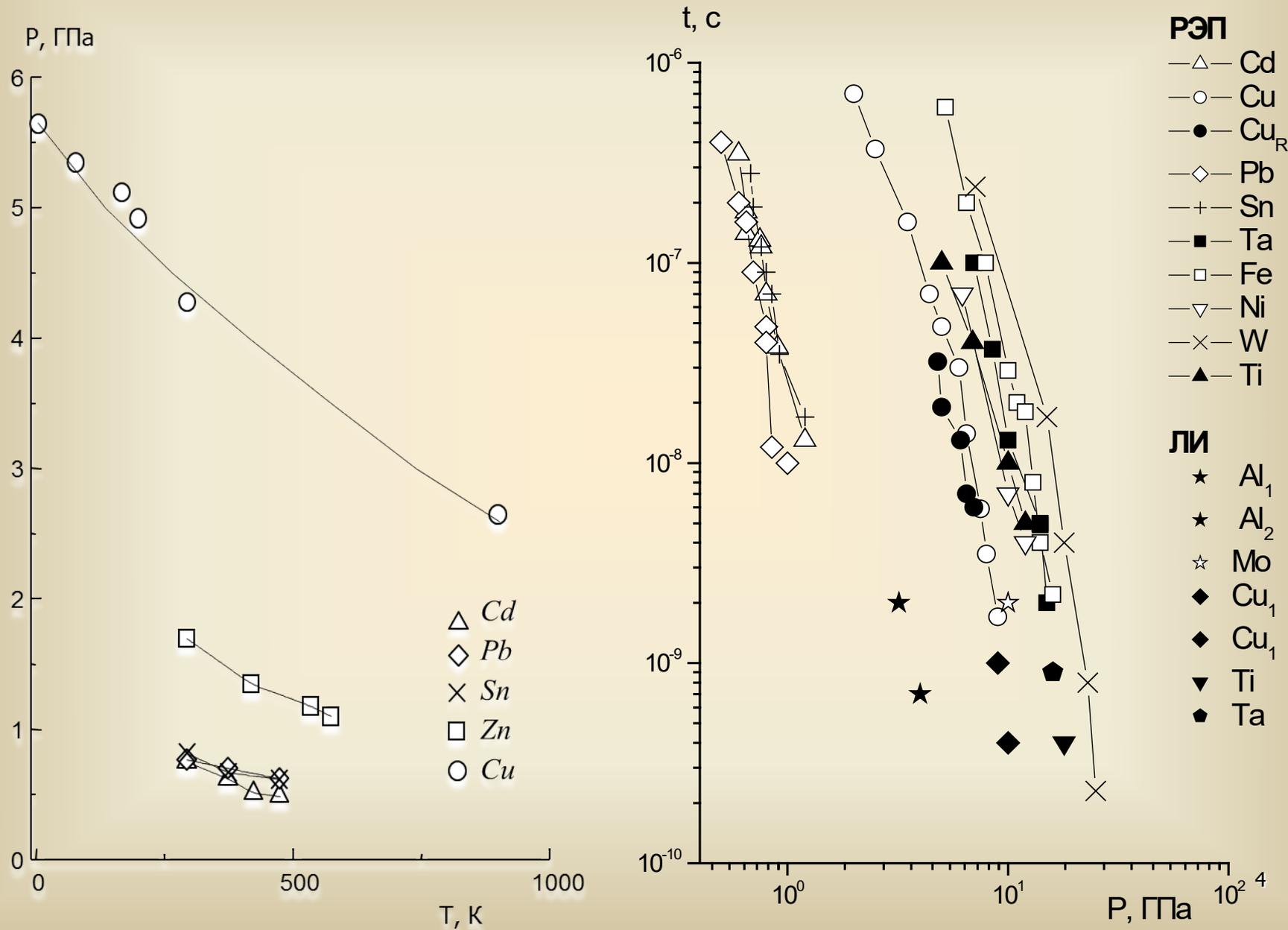
Релятивистские электронные пучки (РЭП)

- Начальная температура ($T \sim 4 \text{ К} \div 0,8 \text{ Т пл.}$)
- Плотность поглощенной энергии
 $dE/dm \sim 10 \div 10^3 \text{ Дж/г}$
- Давление $P - 1 \div 100 \text{ ГПа}$
- Скорость ввода энергии
 $dT/dt \sim 10^{12} \text{ К/с}$
($dE/dt \sim 10^{11} \text{ Дж/(г·с)}$)
- Диапазон долговечности
 $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10} \text{ с}$
- $\tau_i \sim 1 \text{ нс}$

Импульсы лазерного излучения (ЛИ)

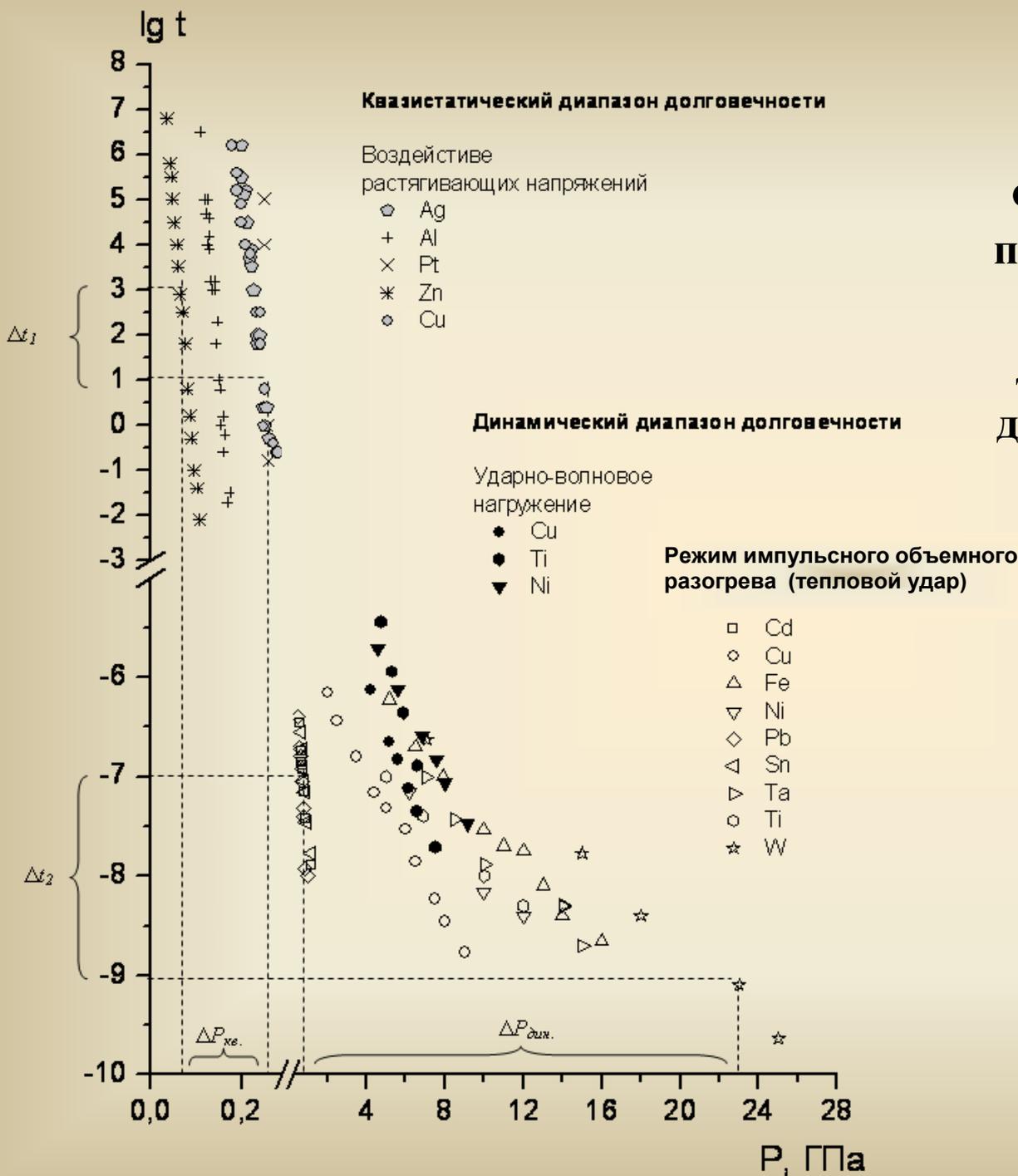
- Энергия одиночного импульса $E \sim 100 \div 1000 \text{ мДж}$
- Плотность мощности
 $\frac{dE}{dm} > 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ ($d \sim 0,1 \text{ мм}$)
- Длительность импульса
 $t_0 \sim 10^{-10} \div 10^{-12} \text{ с}$
- Диапазон долговечности
 $t \sim 10^{-9} \div 10^{-10} \text{ с}$
 $\tau_i \sim 10 \text{ пс}$
- $J \sim 10^{15} \text{ Вт/см}^2$
- $\tau_i \sim 40 \text{ фс}$

Температурно-временные закономерности процесса динамического разрушения при воздействии теплового удара

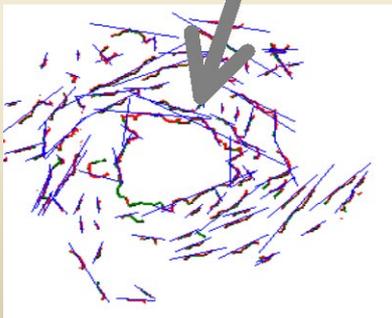


**Временные зависимости
долговечности металлов
от критического давления,
приводящего к разрушению,
в квазистатическом и в
динамическом диапазонах
долговечности (t в секундах)**

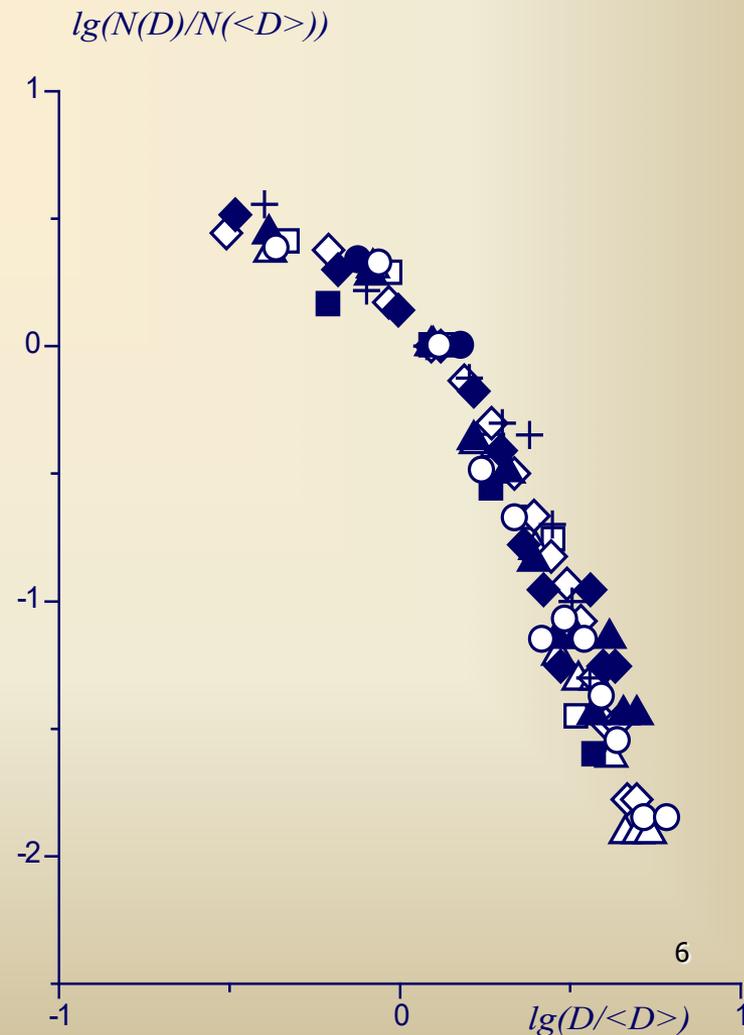
$$\Delta t_1 = \Delta t_2; \Delta P_{дин} > \Delta P_{кв}$$



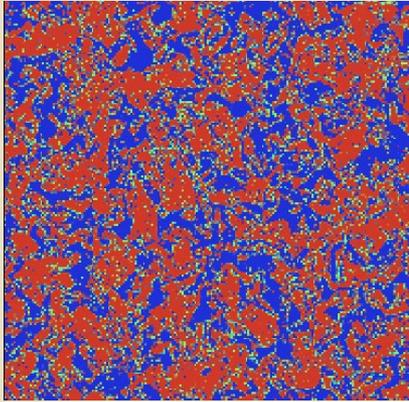
Структурирование полос скольжений кристаллической решетки вокруг центров разрушений и касательные к полосам скольжения



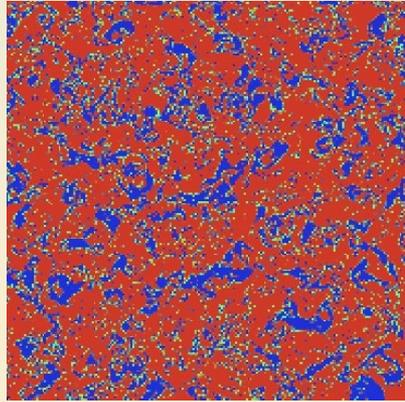
Распределение центров разрушения по размерам в *Fe* ($\Delta=4\cdot 10^{-4}$ м) и *Cu* ($\Delta=10^{-3}$ м) образцах



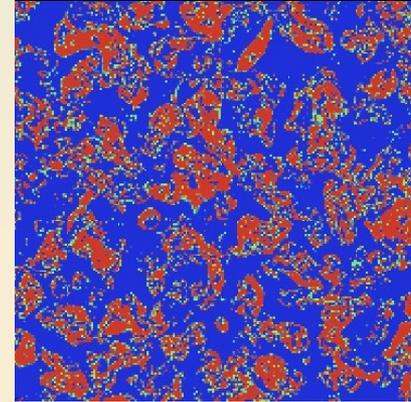
Растровые изображения картин гравитационного турбулентного перемешивания двух несжимаемых жидкостей разной плотности (три слоя на разной высоте от границы раздела жидкостей $h_1 < h_2 < h_3$)



h_1

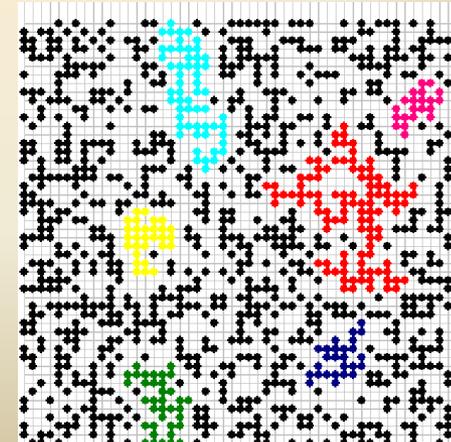
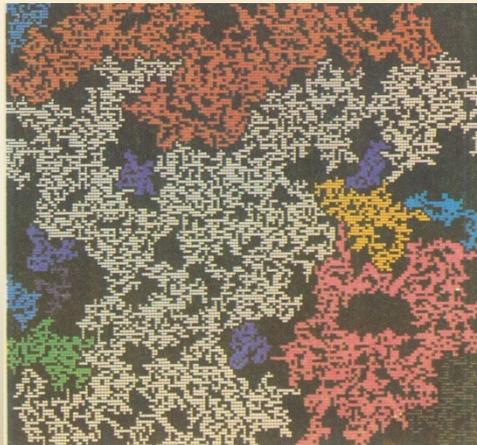
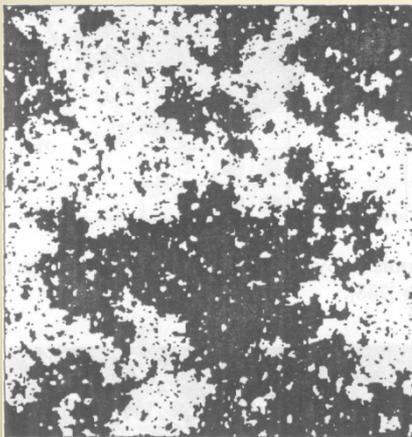


h_2

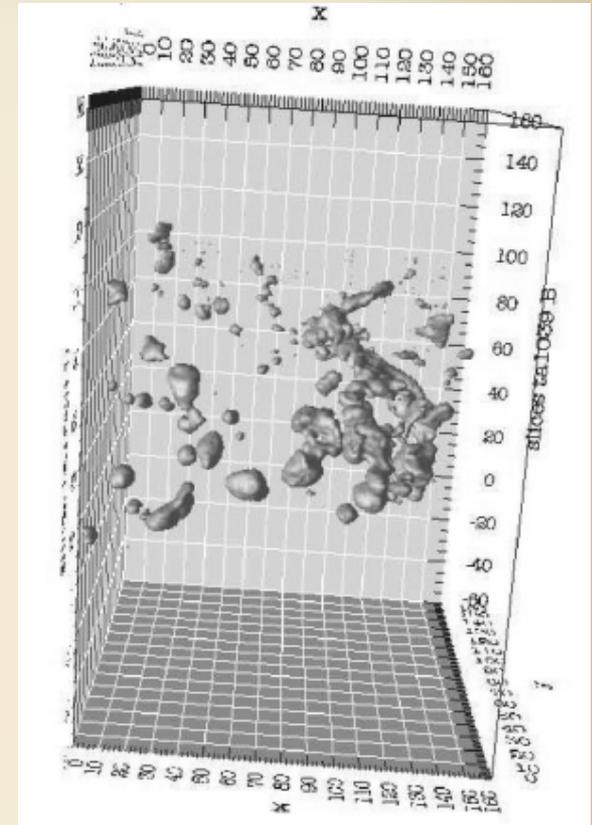
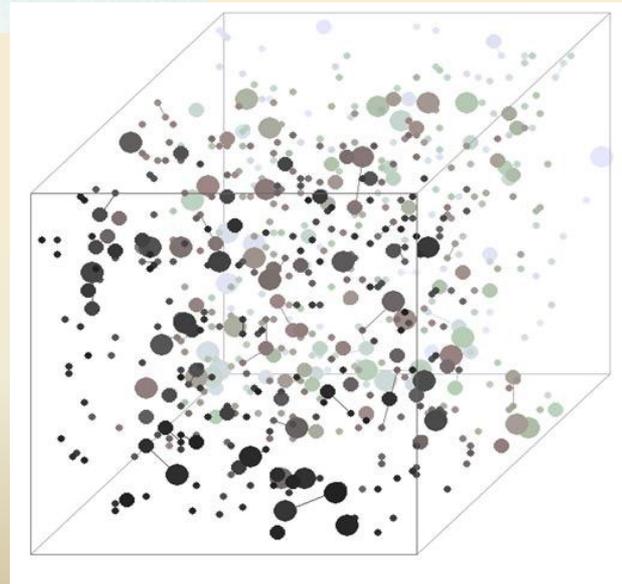
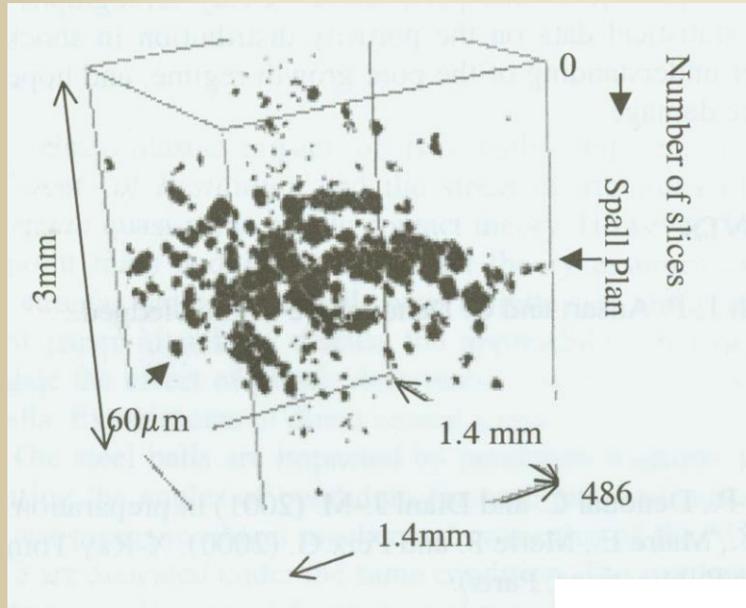


h_3

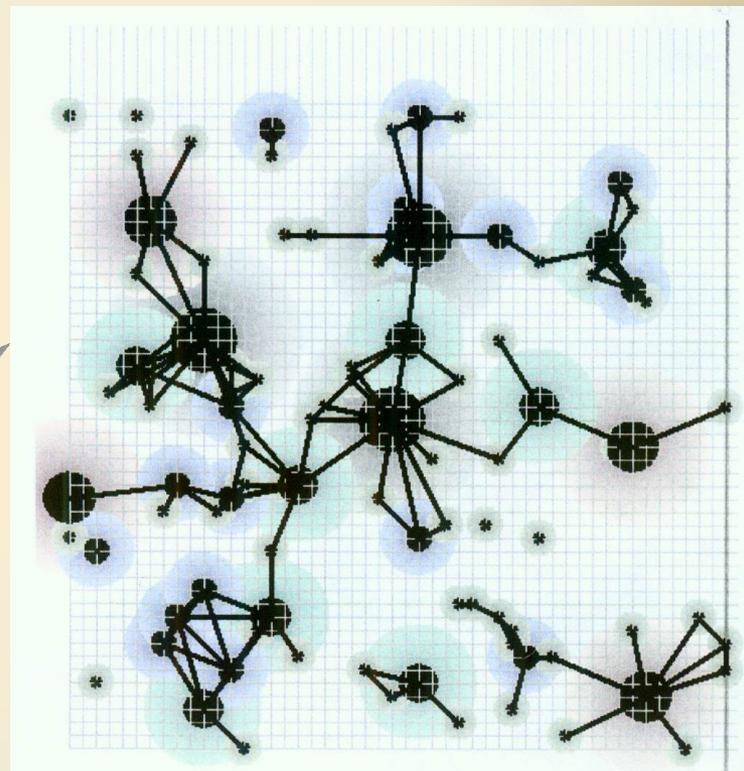
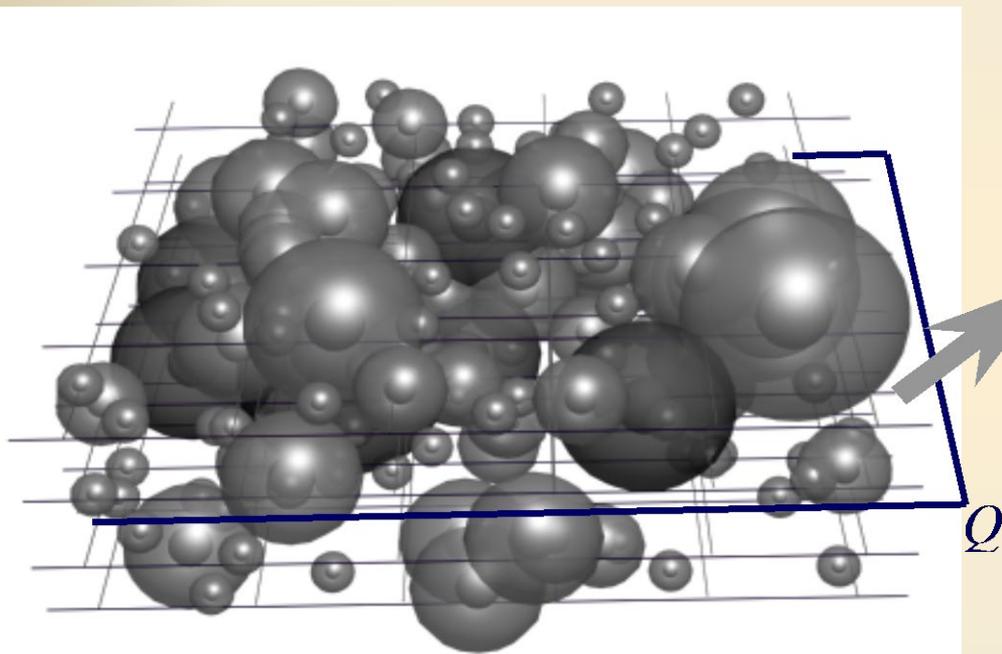
Примеры подобия возникновения бесконечных кластеров различной природы вблизи критической точки



**Восстановленная трехмерная область разрушения в медном образце (а);
трехмерная визуализация восстановленного танталового образца (б);
объемный перколяционный кластер (модельный расчет) (в)**

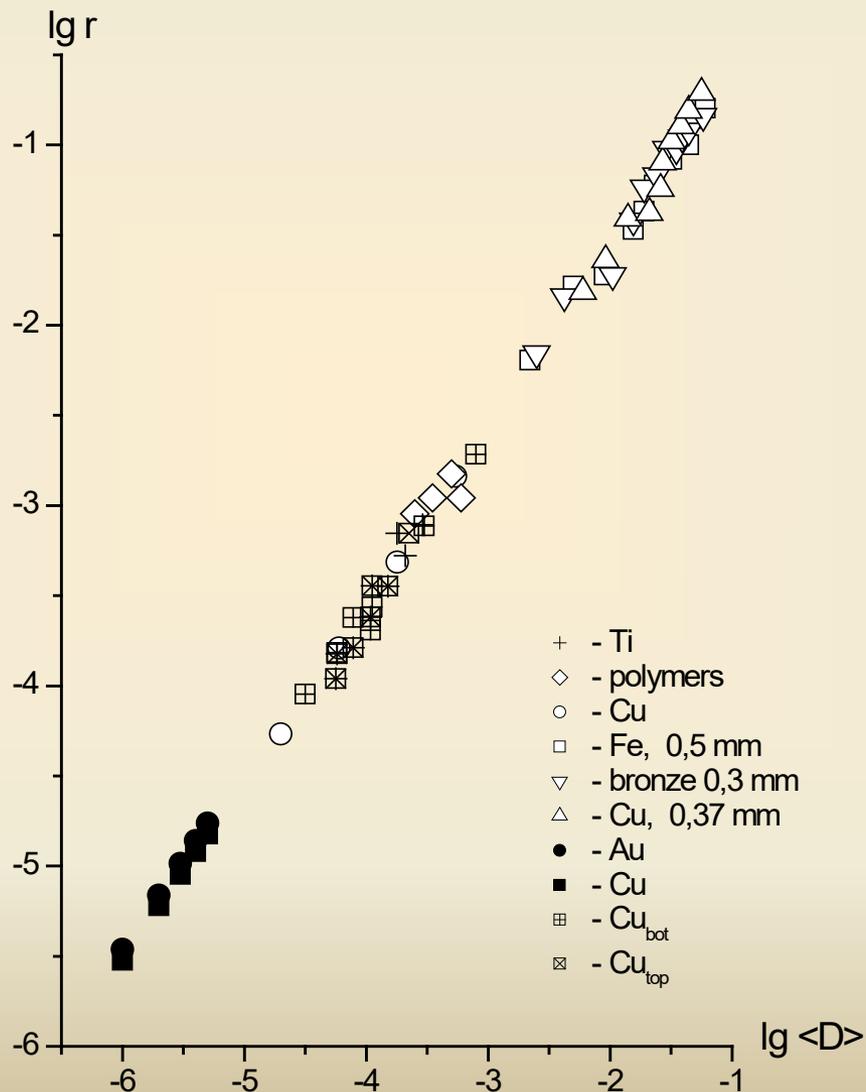


Объемный перколяционный кластер каскада центров разрушения (а); перколяционный компьютерный шлиф, который получен сечением плоскостью Q объемного (б)



Зависимость среднего расстояния $r=N^{-1/3}$ между элементами диссипативных структур от их среднего размера $\langle D \rangle$.

Размеры r и $\langle D \rangle$ даны в см.



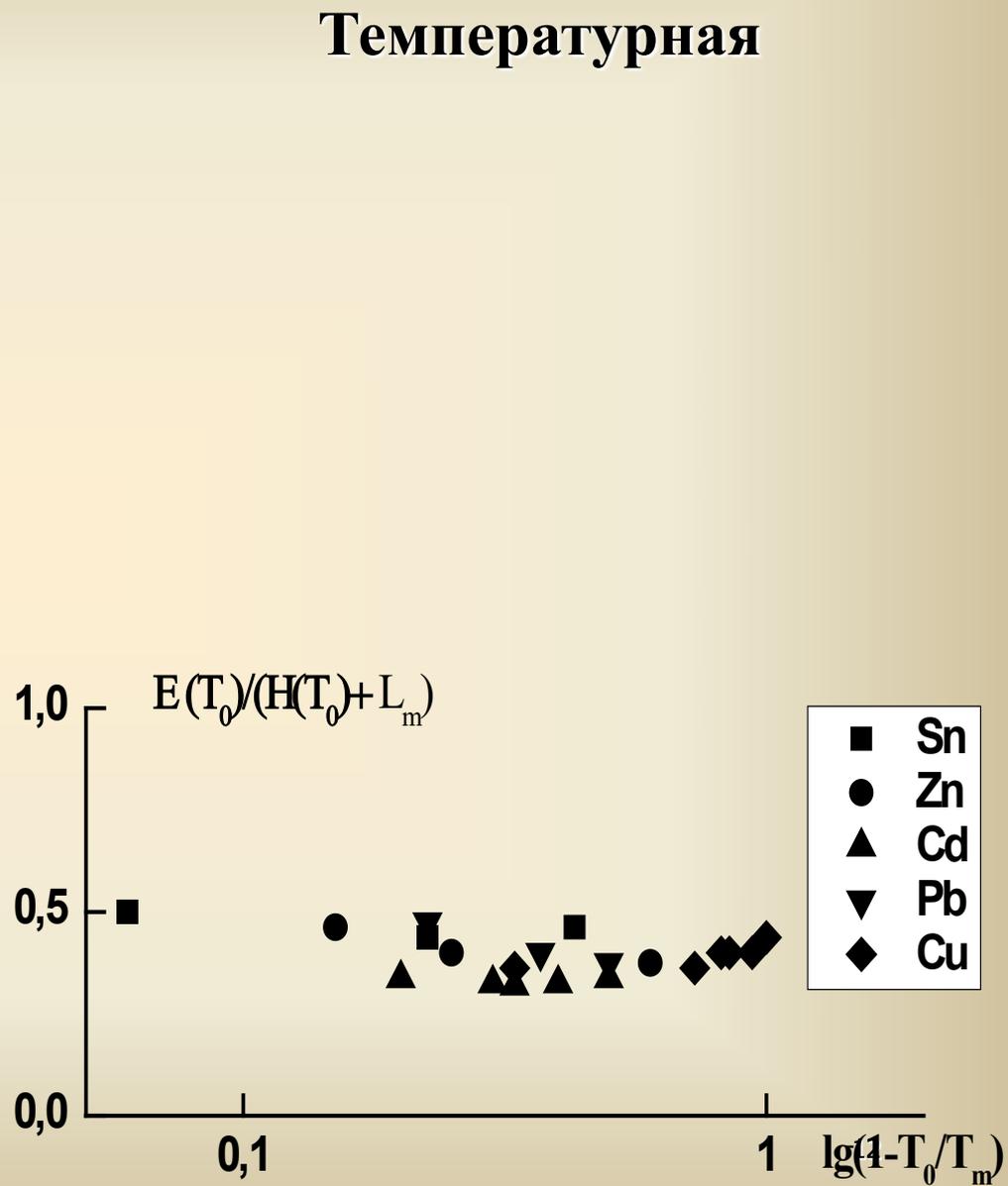
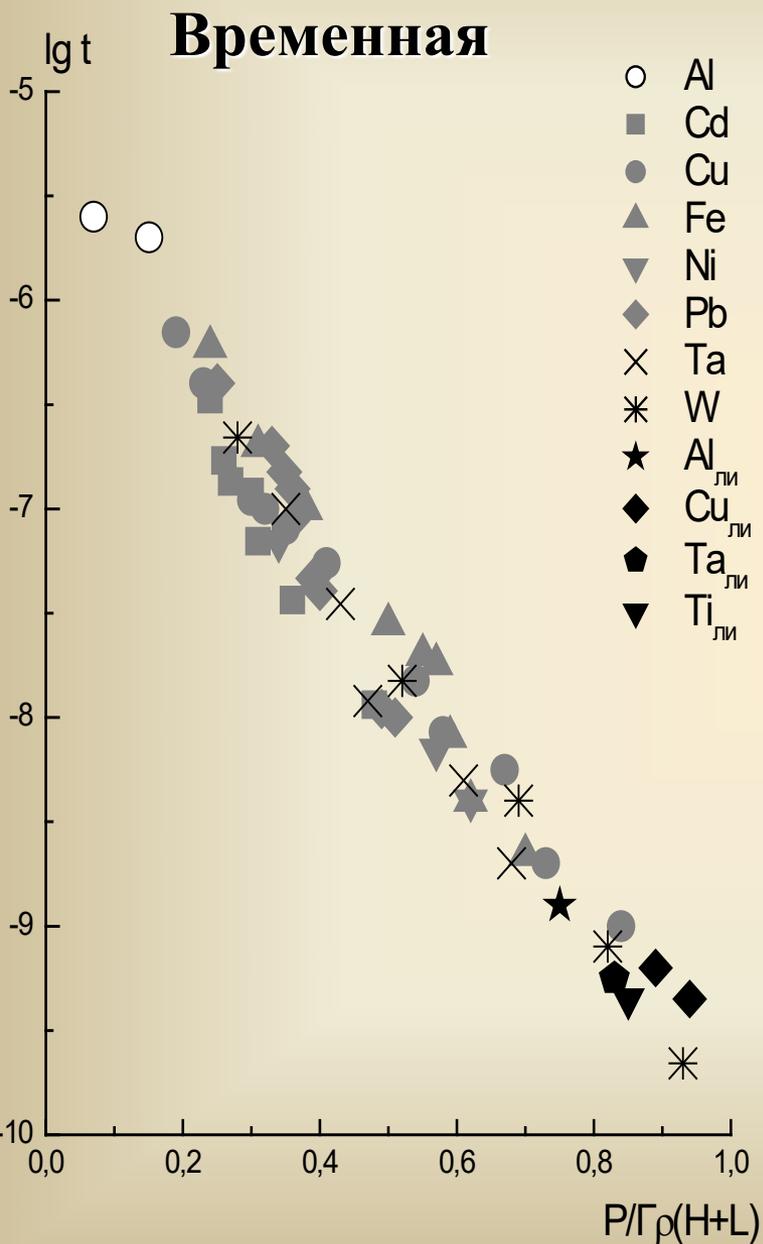
Временная зависимость критического давления и долговечности

$$P^\gamma(t) \cdot t_r = \text{const},$$

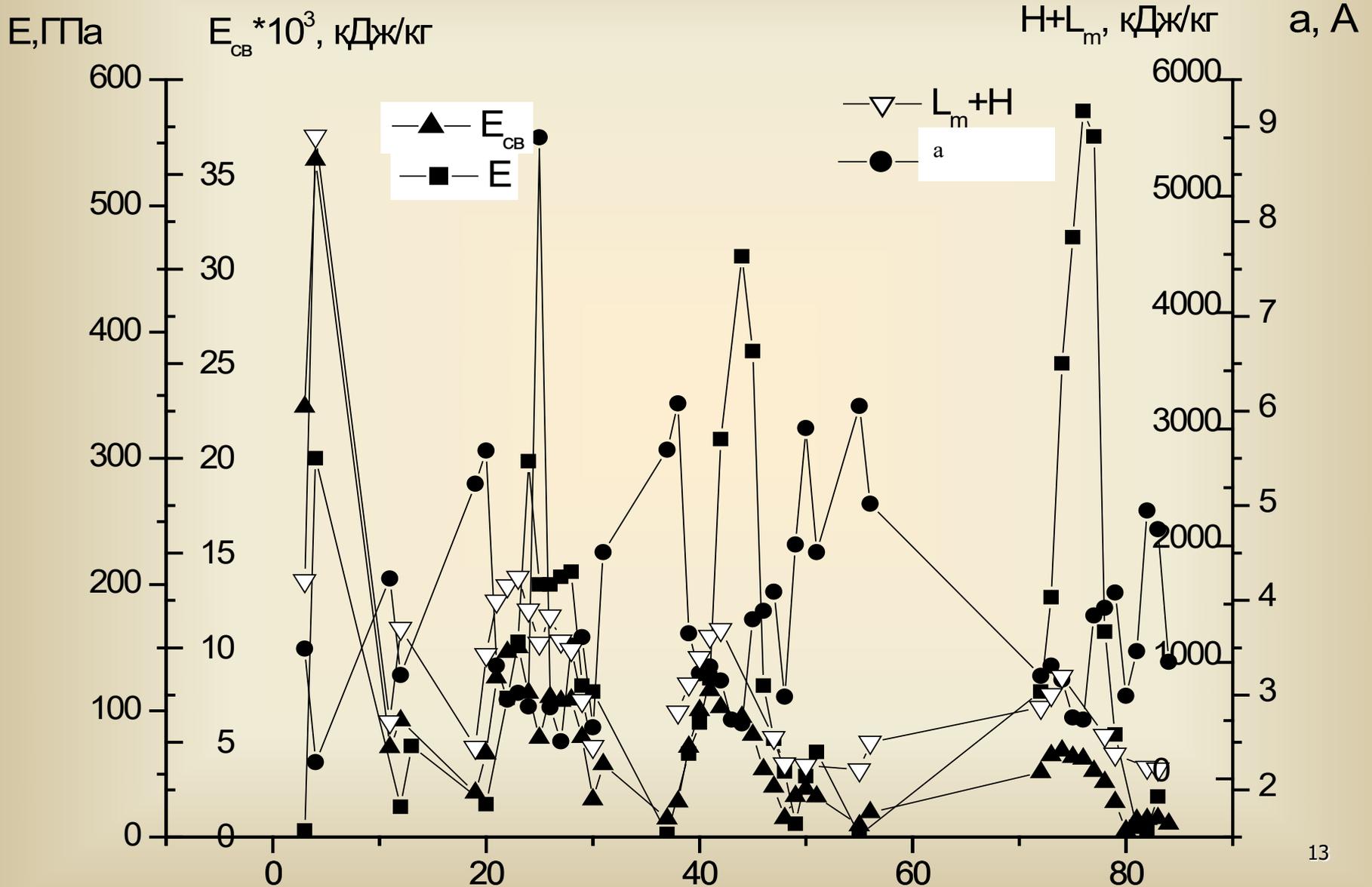
$$\left(\frac{P}{H + L} \right)^\gamma t = \text{const} \quad \left(\frac{P}{H + L} \right) = I(P)$$

где $\gamma = 3,8$ для всех исследованных материалов в диапазоне долговечности $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с; t_r - время разрушения

Зависимости процесса динамического разрушения металлов при воздействии РЭП, ЛИ:

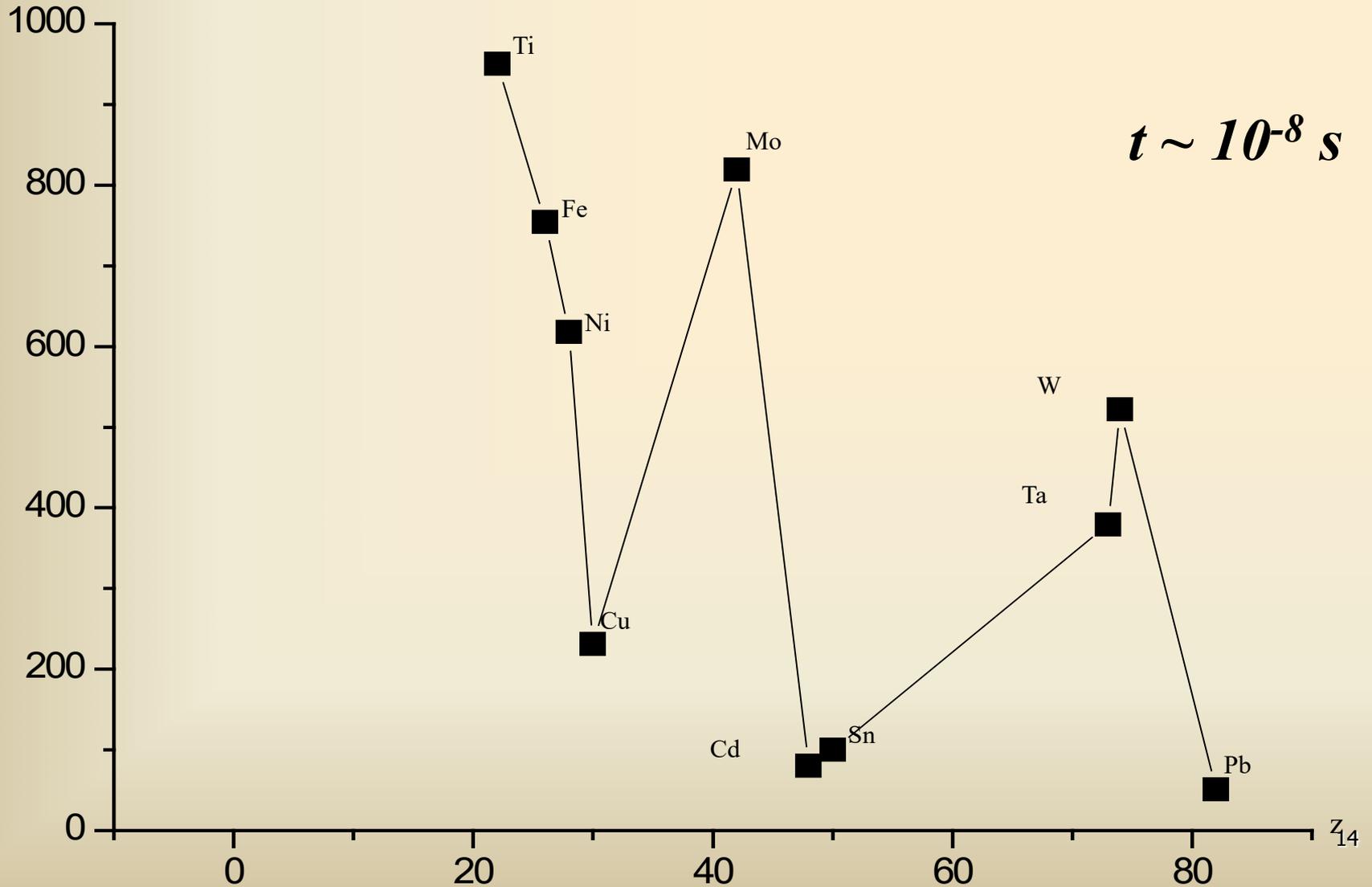


Зависимость физических параметров от порядкового номера металла Z

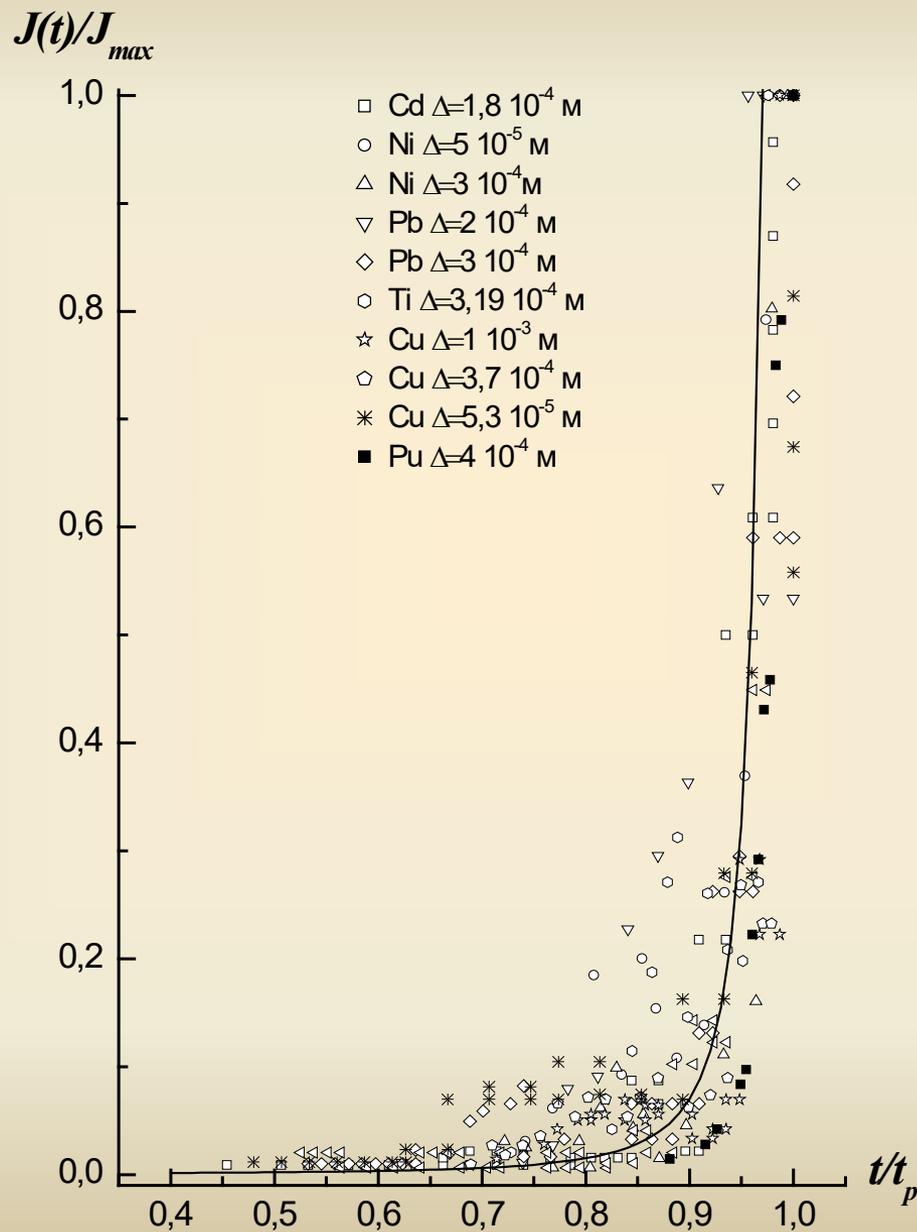


Зависимость критического давления, приводящего к разрушению ряда металлов, от порядкового номера при долговечности $t \sim 10^{-8} s$

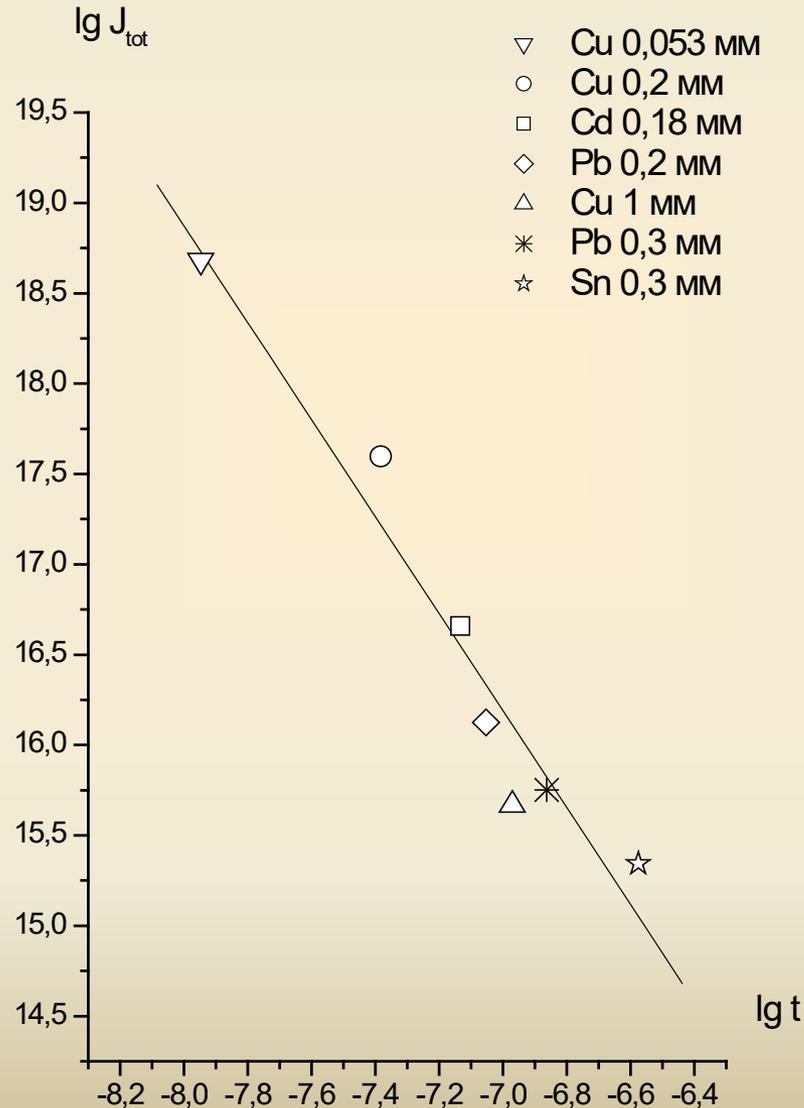
$E_{кр}$, Дж/г



Скорость центров образования в координатах t/t_p , $J(t)/J_{max}$



Зависимость максимальной скорости центрообразования от времени разрушения (долговечности) для ряда исследованных металлов



$$J(t) \sim t^{-2,5}$$

Временная зависимость плотности центров разрушения и скорости центрообразования, выраженные через динамический инвариант

$$N(t) = N_{tot} \exp\left(\frac{t \cdot I(t_p)}{B}\right)^{0,4} \left(1 - \frac{t \cdot I(t_p)}{B}\right)^{-1,2}$$

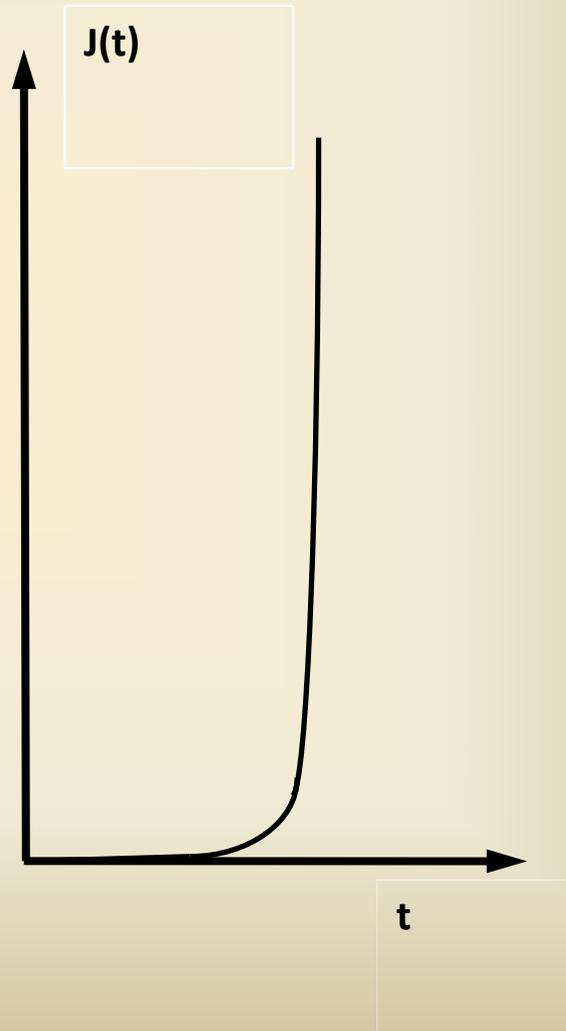
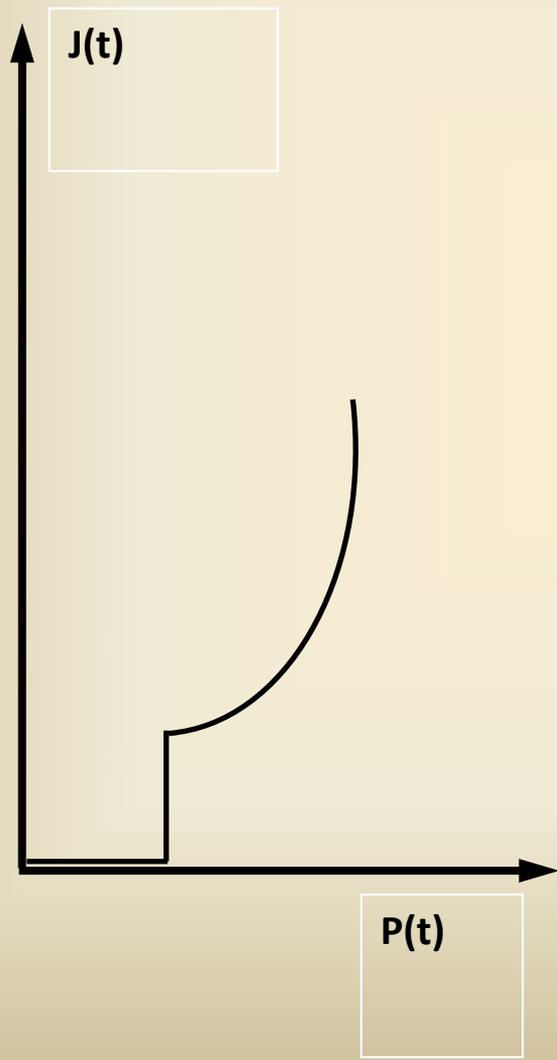
$$J(t) = J_{tot}(t_p) \exp\left(\frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{0,2} \left(1 - \frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{-2,2}$$

where A, B – const

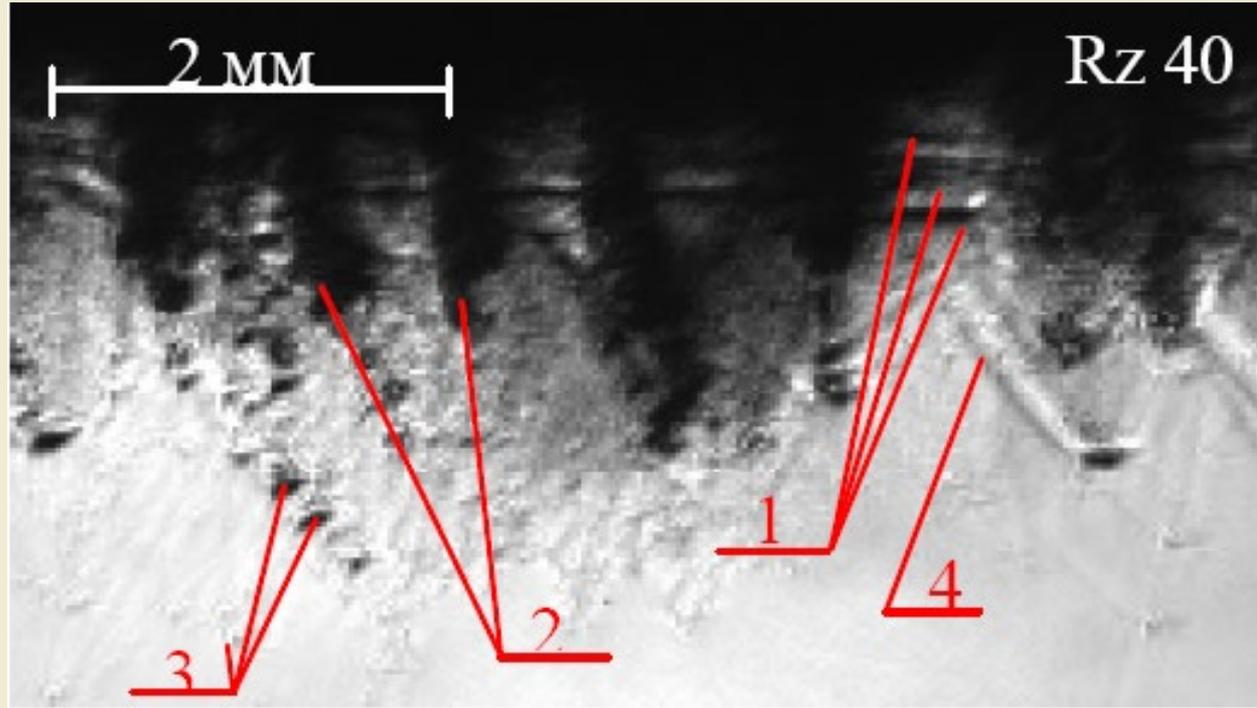
Основные выражения модели NAG и иерархической релаксационной модели

Параметр	Модель NAG	Иерархическая релаксационная модель
Распределение центров разрушения по размерам	$N(R) = N_0 \exp\left(-\frac{R}{R_0}\right)$	$N(D) = \frac{N(\bar{D})}{\bar{D}^{-\alpha}} D^{-\alpha}, \quad \alpha \sim 1,6$
Скорость центрообразования	$\dot{N} = \dot{N}_0 \exp\left(\frac{P_S - P_H}{P_I}\right) \cdot \mathcal{G}(P_S - P_H),$ <p>P_S, P_H, P_I – параметры, \mathcal{G} - функция Хевисайда</p>	$J(t) = J_{tot}(t_p) \exp\left(\frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{0,2} \left(1 - \frac{t \cdot I(t_p)}{A}\right)^{-2,2}$
Скорость центров разрушения	$\frac{dR}{dt} = A \cdot R$	$\frac{dD}{dt} \sim C_R, \quad C_R - \text{скорость Релея}$

Скорость центрообразования в модели NAG (а) и релаксационной иерархической модели (б) разрушения конструкционных материалов



**Выброс частиц со свободной поверхности свинцового образца
(шероховатость Rz40) после выхода УВ на свободной поверхности –
в момент времени 3,8 мкс**



- 1 – отколы;
- 2 – микроструи;
- 3 – частицы;
- 4 – УВ в воздухе

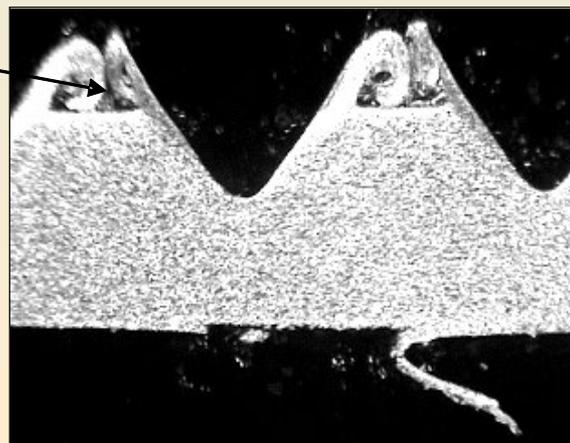
Вид разрушенных пирамидок (а); шлиф медного образца после воздействия РЭП (б); продукты диспергирования на преграде (в); вид диспергированных частиц металла на подложке (г); грань медной пирамидки (x200) (д)



x45

а

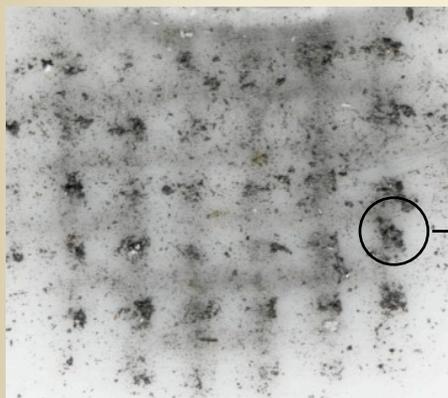
Область
кумулятивных
выбросов



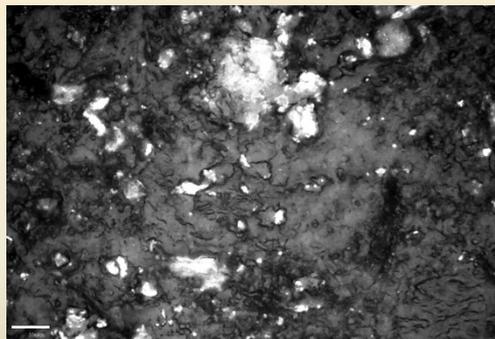
x40

б

↑
откольный слой
направление воздействия

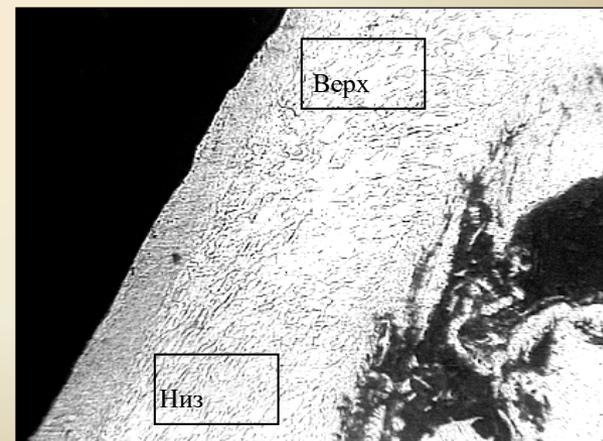


в



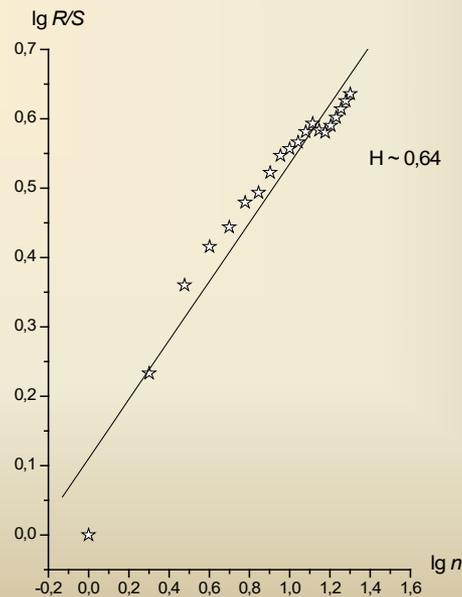
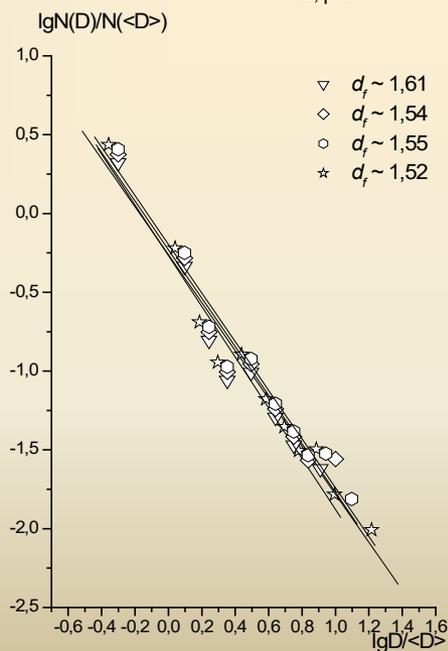
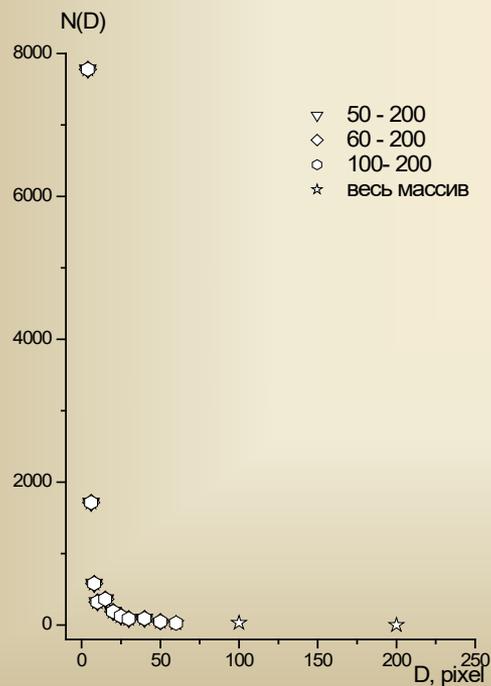
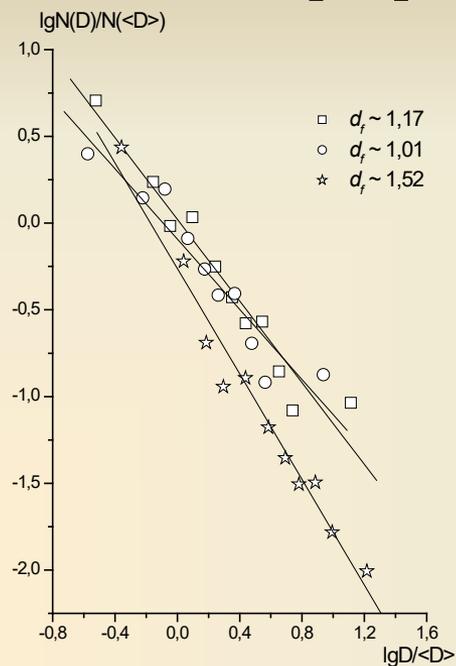
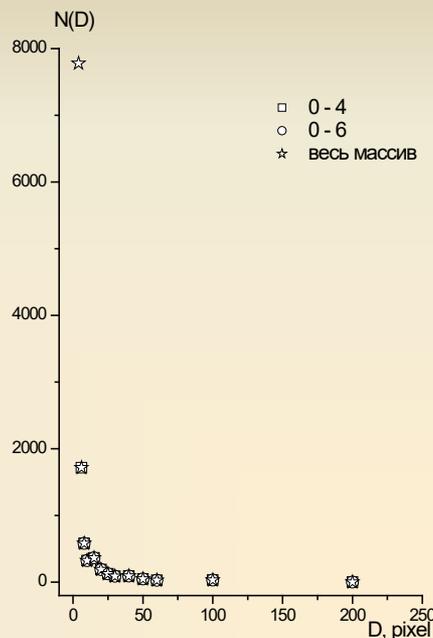
10 μm

г

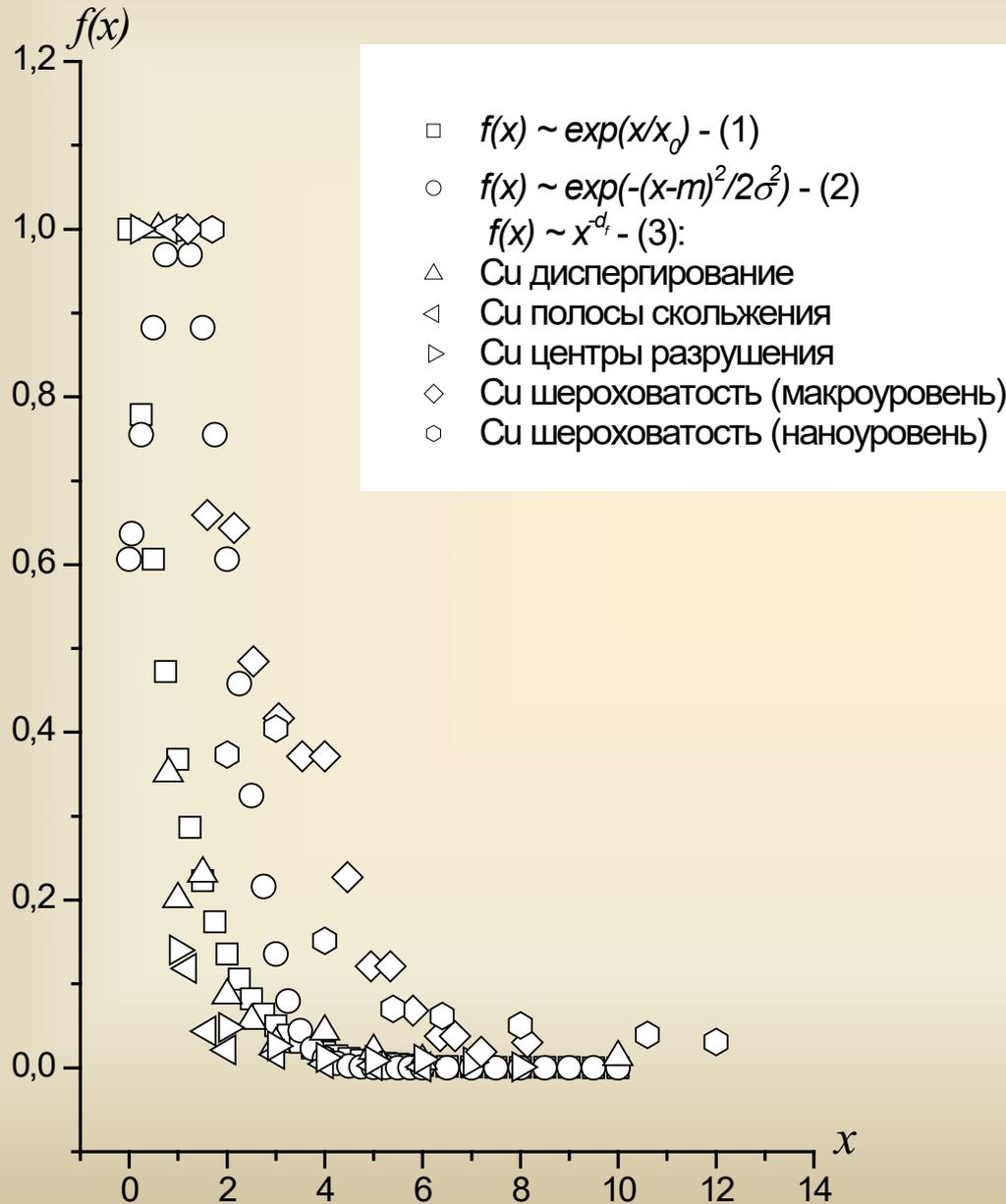


д

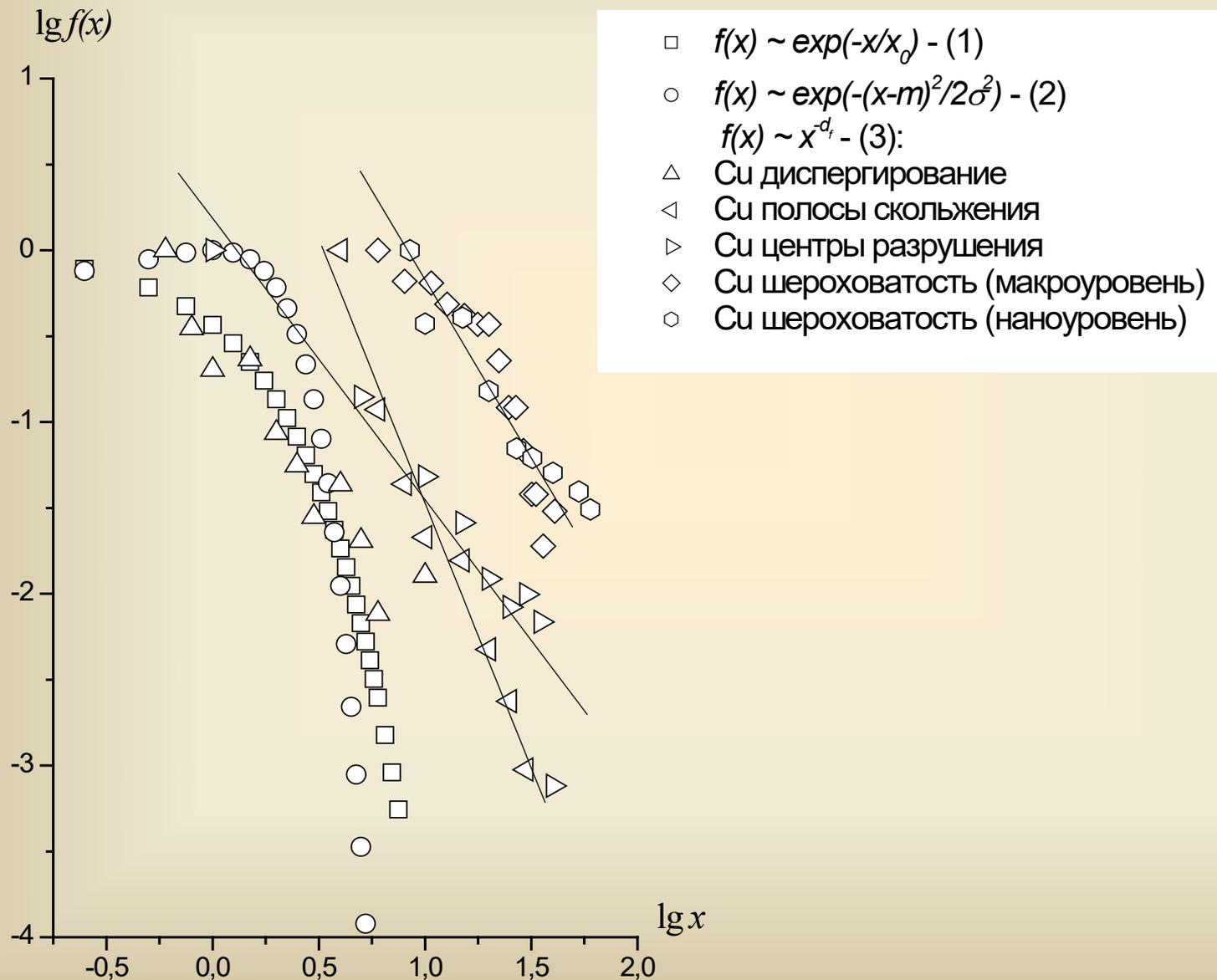
Внешний вид диспергированных частиц из пирамидки (Cu, угол раствора $\alpha \sim 60^\circ$) и результаты математической обработки диспергированных частиц



Распределение вероятностей величин, характеризующие различные физические процессы



Распределение вероятностей величин, характеризующие физические процессы в двойном логарифмическом масштабе



Для построения графика нормального распределения среднее значение m и дисперсия σ выбирались равными единице, $x \in [0 \div 10]$; для экспоненциального распределения $x \in [0 \div 10]$; $x_0 = 1$.

Разница между нормальным и степенным распределением носит принципиальный характер. Если статистика системы описывается нормальным распределением, то 99,7 % событий отклонятся от среднего значения не более чем на 3σ (так называемое правило трех сигм), а вне диапазона 5σ находятся всего лишь 10^{-6} событий. Поэтому можно пренебречь редкими событиями вне интервала 3σ .

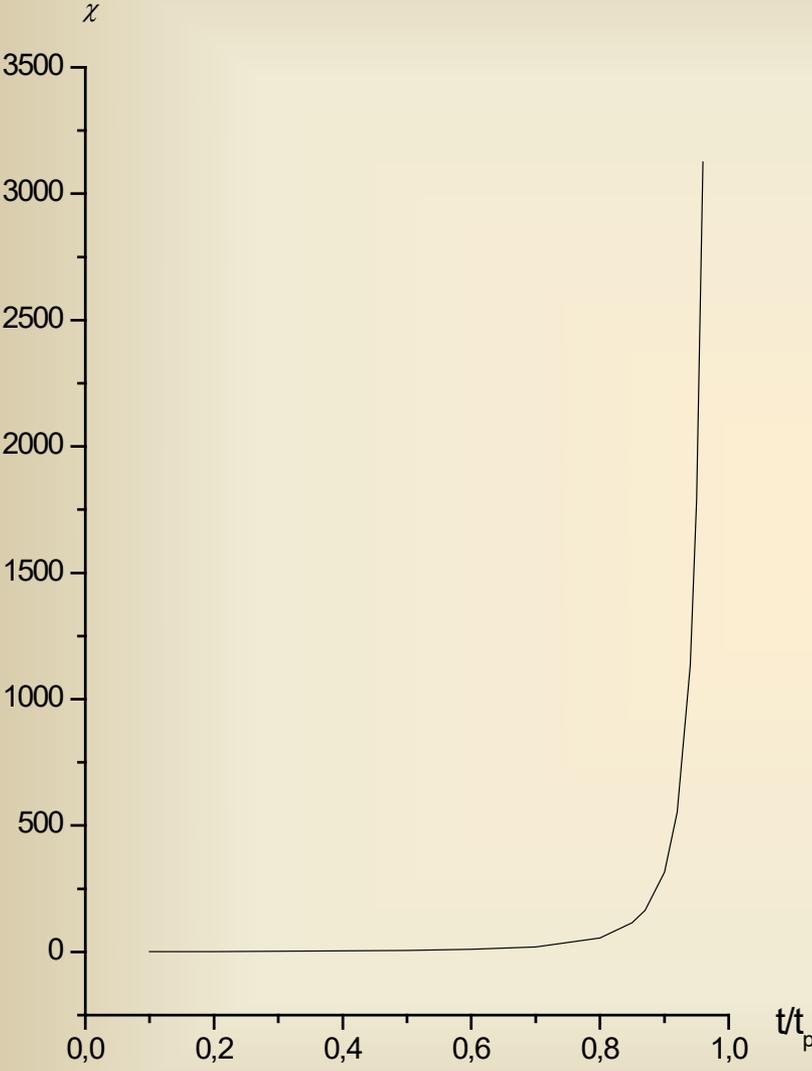
При степенном распределении плотность вероятности на хвостах распределения существенно больше, чем при нормальном распределении и редкими событиями пренебречь нельзя.

Природа степенных законов распределения определяется взаимосвязью релаксационных процессов на различных масштабных временных уровнях. Вероятность события $P(x)$ от величины x имеет вид $P(x) \sim x^{-\alpha}$ на графике в координатах $\lg x$, $\lg P(x)$ будет лежать на одной прямой для всех значений x .

Энергетические параметры металлов и параметры нагружения

Элемент	ат. №	$\frac{H_{\dot{\gamma}} + L_{\ddot{\epsilon}}}{\dot{I}_{\text{нóáĕ}}}$	$E_{\text{кр}}, \text{Дж/Г}$ при $t \sim 10^{-8} \text{ с}$	$\frac{E_{\text{ĕđ}}}{\dot{I}_{\dot{\gamma}} + L_{\ddot{\epsilon}}}$ при $t \sim 10^{-8} \text{ с}$	$\frac{E_{\text{ĕđ}}}{\dot{I}_{\text{нóáĕ}}}$ при $t \sim 10^{-8} \text{ с}$
Al	13	0,151	—	—	—
Ti	22	0,16	950	0,537	0,086
Fe	26	0,18	754	0,585	0,105
Co	27	0,16	—	—	—
Ni	28	0,15	618	0,533	0,080
Cu	29	0,144	394	0,575	0,083
Zn	30	0,157	—	—	—
Mo	42	0,18	819	0,537	0,097
Cd	48	0,18	80	0,494	0,089
Sn	50	0,12	100	0,525	0,063
Ta	73	0,186	379	0,495	0,092
W	74	0,165	522	0,570	0,094
Pb	82	0,116	51	0,510	0,059
U ²³⁸	92	0,12	94,38	0,56	0,07

Временная зависимость восприимчивости на масштабе времени разрушения



По определению:

$$K = V \left(\frac{\partial^2 u}{\partial V^2} \right) = \frac{\varphi''}{a}$$

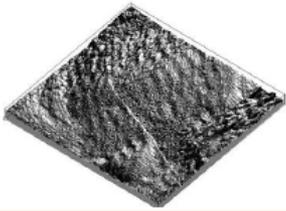
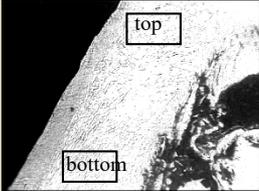
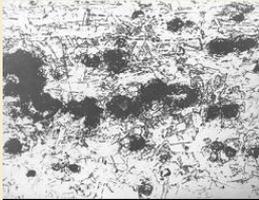
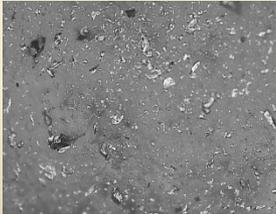
φ- парный потенциал,
 a – межатомное расстояние

$$K = N K_{am}$$

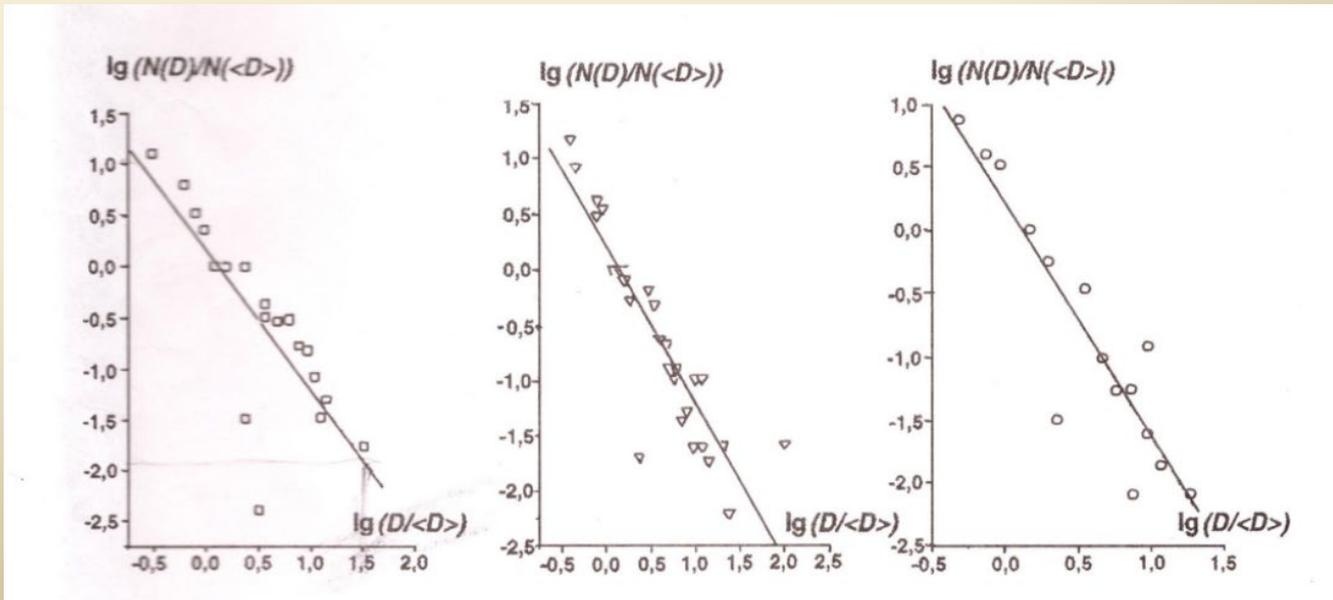
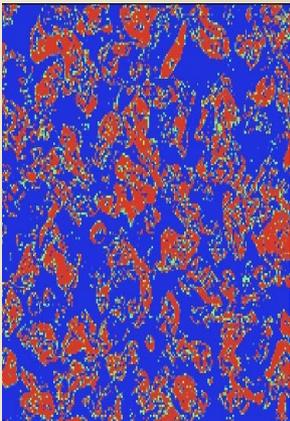
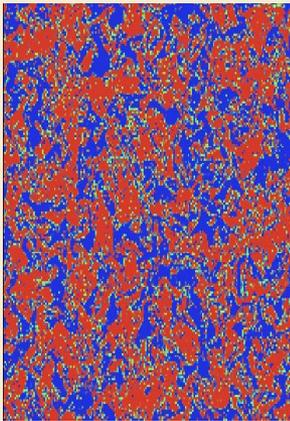
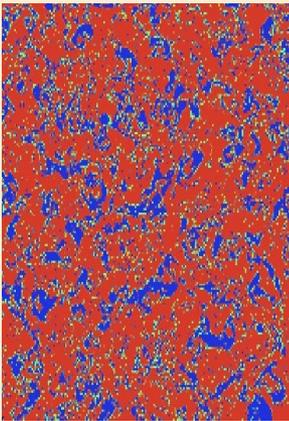
$N = 1/a^2$ – число атомов в см²

$$K' = (N - n_p) K_{am}, \quad n_p \sim \frac{N^{2/3} (t) \overline{D}^2}{a^2}$$

$$\chi \sim A \frac{1}{(1 - N^{2/3} \overline{D}^2)}, \quad \chi \sim \frac{1}{\left(1 - \frac{t}{t_p}\right)^{2,53}}$$

Масштабный уровень	Образец; толщина	Вид диссипативных структур	Фрактальная размерность, d_f	Показатель Херста, H	
нано	Cu; $\varnothing \sim 1$ мм		внутренняя поверхность центров разрушения	$\sim 1,67$	—
мезо I	Cu; высота пирамидки $h \sim 0,5$ мм		полосы скольжения	$\sim 1,69$ – bottom $\sim 1,62$ – top	$\sim 0,86$ – bottom $\sim 0,85$ – top
мезо II	Cu; $\varnothing \sim 0,2$ мм		центры разрушения	$\sim 1,82$	—
макро	Cu; $\varnothing \sim 0,2$ мм		шероховатость поверхностей разрушения	$\sim 1,59$	$\sim 0,58$
макро	Al		продукты диспергирования	$\sim 1,51$ – Al $\sim 1,52$ – Cu	$\sim 0,76$ – Al $\sim 0,64$ – Cu

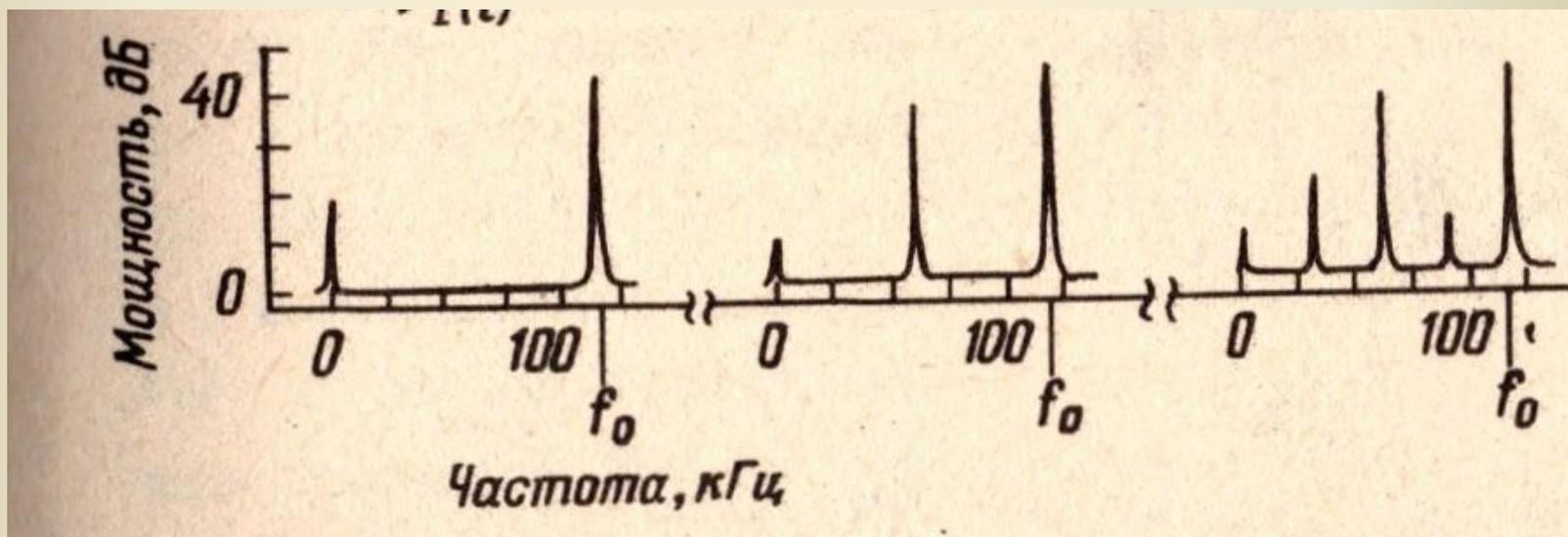
Картины гравитационного турбулентного перемешивания двух несжимаемых жидкостей и результаты математической обработки



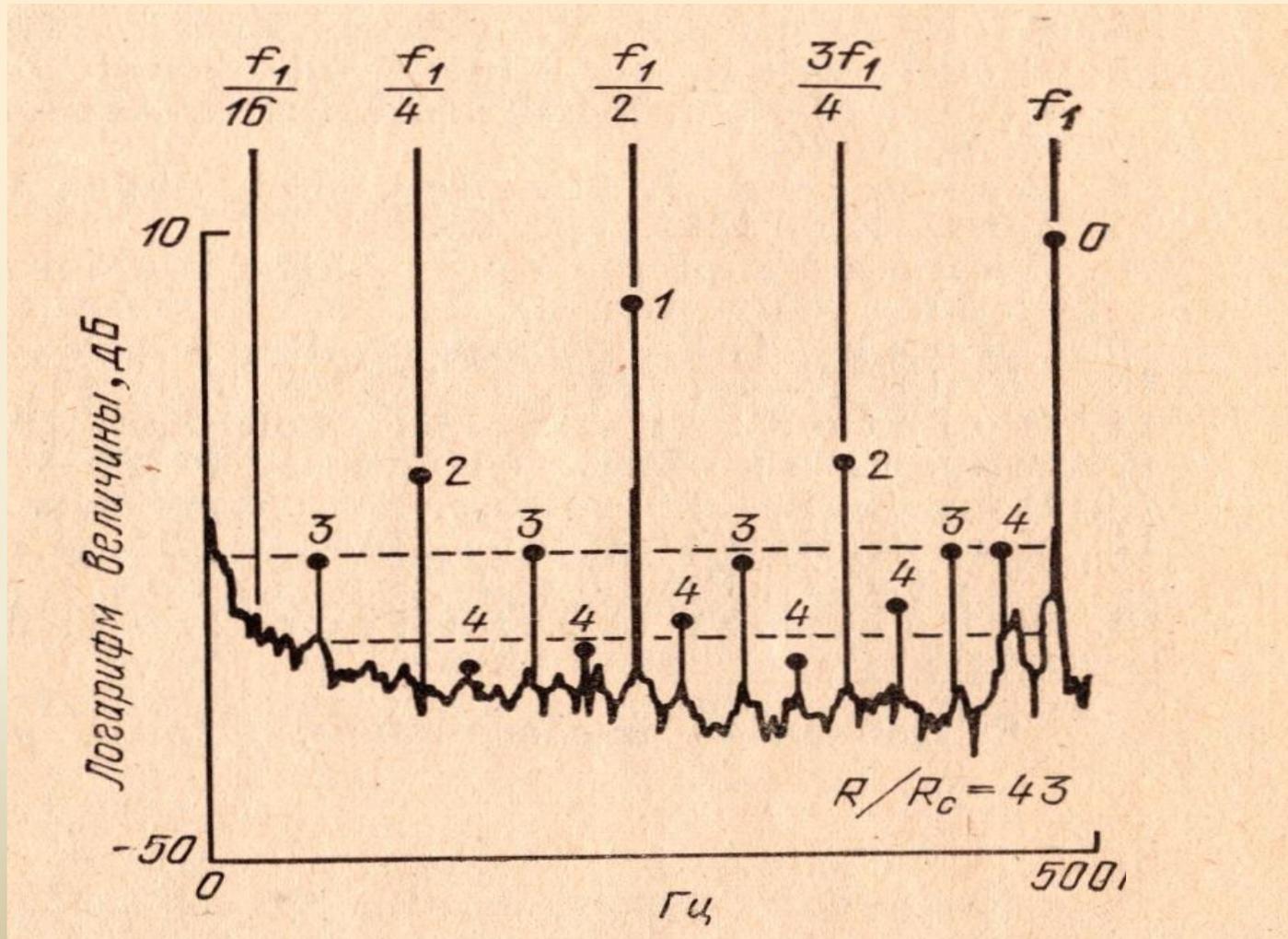
Фрактальные размерности диссипативных структур на четырех различных масштабных уровнях при воздействии релятивистских электронных пучков

Вид воздействия	Уровень исследований			
	Наноуровень (шероховатость внутренних поверхностей центров разрушений)	Микроуровень		Макроуровень (шероховатость поверхности разрушения)
		мезоуровень I (каскад полос скольжения кристаллической решетки)	мезоуровень II (каскад центров разрушения)	
Релятивистские электронные пучки	$1,565 \pm 0,097$	$1,684 \pm 0,126$	$1,496 \pm 0,113$	$1,486 \pm 0,074$

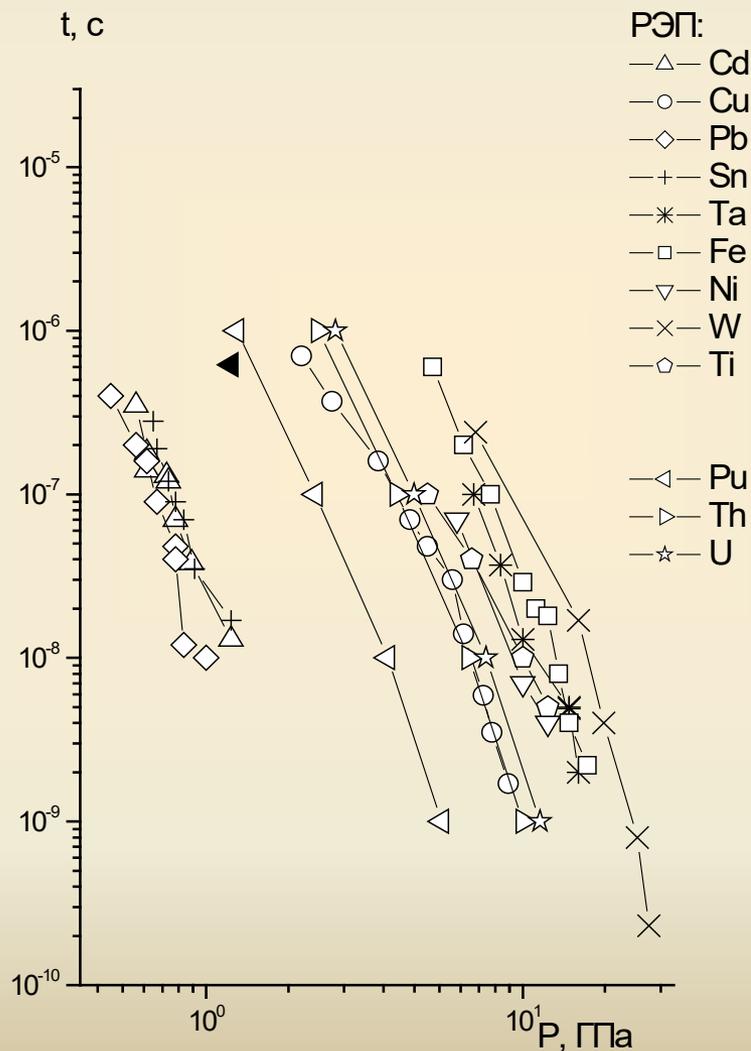
Результаты измерений колебаний тока $I(t)$ для кристаллического Ge при двойной инжекции и параллельных электрическом и магнитном полях. Значение напряжения на рисунках возрастают от 6 до 10 В



Спектр частот конвектирующей жидкости при переходе к турбулентности

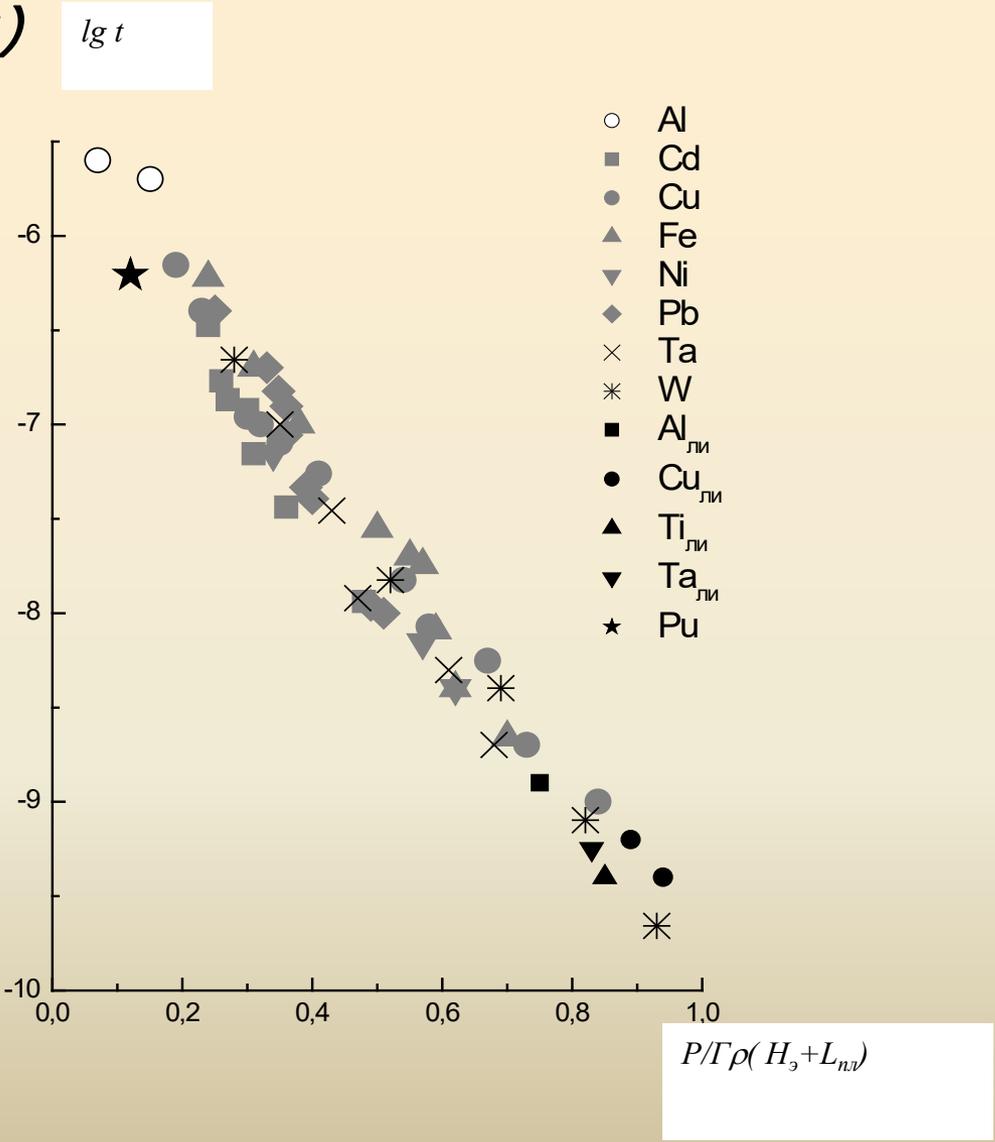


Временные зависимости процесса динамического разрушения ряда металлов (экспериментальные данные) при воздействии релятивистских электронных пучков и спрогнозированные временные зависимости металлов Pu, Th, U (расчет)

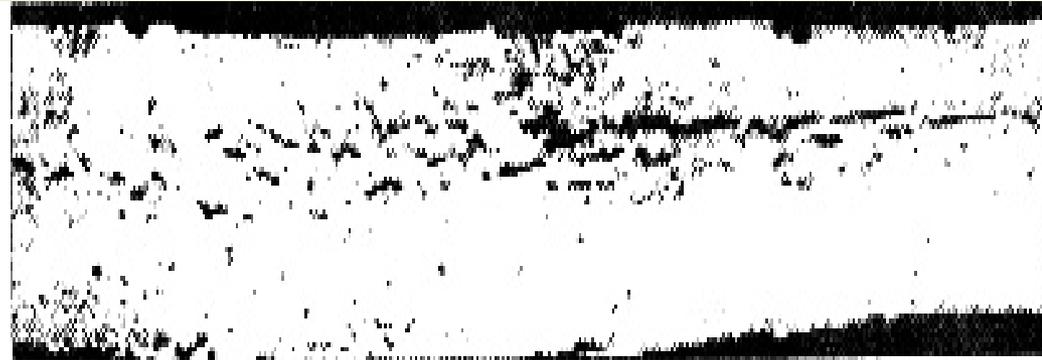


Временные зависимости процесса динамического разрушения ряда металлов при воздействии релятивистских электронных пучков и лазерного излучения в универсальных координатах:

$lg t, P/\Gamma\rho(H_{\alpha}+L_{пл})$



Аналогия в механизмах откольного разрушения: *а* - в бронзе, *б* - в металлическом Рн. Давление в металлическом Рн $P \sim 1, 2 - 1, 4$ ГПа

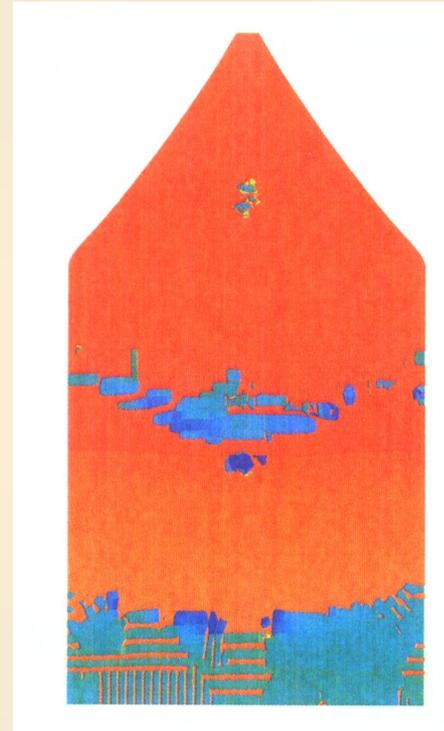
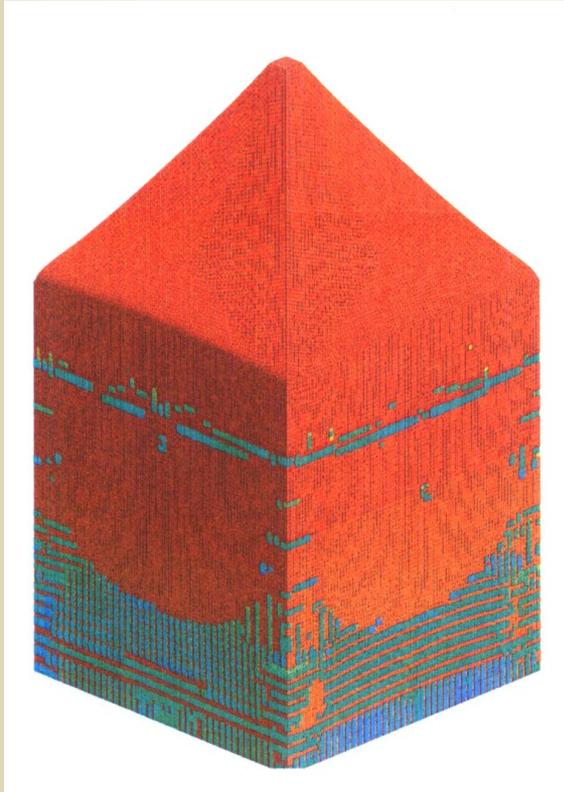


а



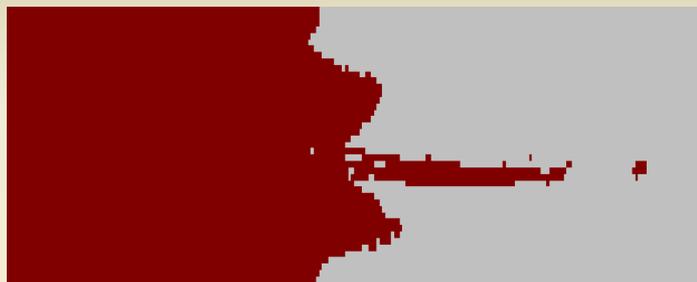
б

**Распределение плотности (а); в осевом сечении – (б).
Расчет 3D с использованием откольного разрушения.
Время 3 мкс**

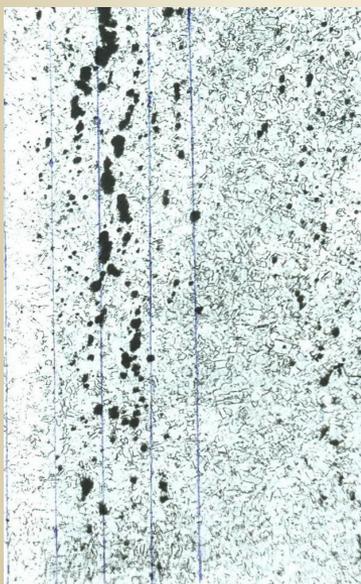


Синий цвет – практически нулевая плотность,
зеленый цвет – пористая среда.

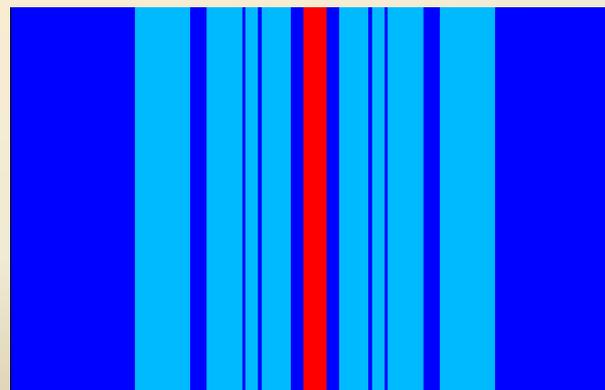
Вид струеобразования из образца Al на момент времени 17 мкс



Шлиф Si образца после
воздействия
релятивистских
электронных пучков



Поле поврежденности образца на момент
разрушения при $\Delta = 0,037\text{см}$ и $E_0 = 255\text{ Дж/г}$;
 ω - отношение разрушенного объема V_p к
исходному V_0 ; $\omega = V_p / V_0$;
голубой цвет $\omega = 0$, красный цвет $\omega = 1$



Получены новые кинетические переменные процессов разрушения и диспергирования металлов при амплитудах ударно-волнового нагружения $P \sim$ единицы-десятки ГПа, что является важным для верификации существующих расчетных кодов.

Выше изложенное имеет важное значение для верификации имеющихся динамических уравнений состояния и создания новых (адекватных), позволяющих описывать поведение металлов в экстремальных условиях с использованием существующих расчетных кодов.

Результаты проведенных исследований полезны при создании (разработки) новых уравнений состояний для описания поведения металлов в экстремальных условиях.

Приведенные результаты исследований необходимо учитывать при разработке высокоинтенсивной импульсной техники.

1. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. Бонюшкин Е.К., Завада Н.И., Новиков С.А., Учаев А.Я. – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998.
2. Кошелева Е.В., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Учаев А.Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений: монография - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.
3. Илькаев Р.И., Учаев А.Я., Новиков С.А., Завада Н.И., Платонова Л.А., Сельченкова Н.И. Универсальные свойства металлов в явлении динамического разрушения // ДАН, 2002, том 384, № 3. - С. 328-333.
4. Илькаев Р.И., Пунин В.Т., Учаев А.Я., Новиков С.А., Кошелева Е.В., Платонова Л.А., Сельченкова Н.И., Юкина Н.А. Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения // ДАН, 2003, том 393, № 3. - С. 326-331.
5. Кошелева Е.В., Сельченкова Н.И., Соколов С.С., Трунин И.Р., Учаев А.Я. О подобии динамических деструктивных процессов в металлах различной геометрии при различных амплитудно-временных характеристиках внешнего воздействия // Ядерная физика и инжиниринг, 2018, том 9, № 1. – С. 81–88.
6. Учаев А.Я., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Кошелева Е.В., Косачев В.В. О связи термодинамических и динамических свойств легких актинидов // Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, № 3. – С. 203-207.
7. A. Ya. Uchaev, V. T. Punin, N. I. Selchenkova, E. V. Kosheleva. Physical Longevity Nature of Light Actinides in Dynamic Failure Phenomenon // Physics of Atomic Nuclei, 2015. Vol. 78. No. 12, pp. 1353-1356.
8. Kosheleva E.V., Sel'chenkova N.I., Sokolov S.S., Trunin I.R. and Uchaeva A.Ya. On the Similarity of Dynamic Destructive Processes in Metals of Different Geometry under the Effect of External Impacts with Various Amplitude-Time Characteristics // Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – Vol. 81, No. 10. – PP. 1477–1483.