

УДК 538.971

ОБРАЗОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ОБЛУЧАЕМЫХ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ И ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

*М.В.Алтайский, В.В.Иванов, С.А.Корнев,
О.Л.Орелович, И.В.Пузынин, В.В.Черник*

Обсуждаются результаты обработки микрофотографий поверхностей веществ, облученных импульсными высокоточными электронными и ионными пучками. Показано, что на облучаемой поверхности могут образоваться фрактальные структуры. Их размерности определены с помощью box-counting алгоритма.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Fractal Structure Formation on the Surfaces of Solids Subjected to High Intensity Electron and Ion Treatment

M.V.Altaisky et al.

We discuss the results of scanning electron microscopy of surfaces of the solids subjected to high intensity electron and ion beam treatment. The appearance of fractal structures on the modified surfaces is shown. The fractal dimensions of these structures were estimated by box-counting algorithm.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Введение

Поверхностная модификация материалов высокоточными электронными и ионными пучками находит широкое применение в высоких технологиях [1,2]. Однако, несмотря на обилие экспериментального материала, механизм взаимодействия интенсивных пучков с поверхностью твердого тела еще не до конца ясен. Понимание процесса изменения морфологии поверхности облучаемых образцов может дать ключ к построению физической модели, которая, с одной стороны, может объяснить наблюдаемые результаты, а с другой — позволит контролировать процесс формирования поверхностного слоя. Последнее обстоятельство особенно важно для практического применения.

При облучении материалов импульсными высокоточными электронными и ионными пучками наблюдаются как структурно-фазовые изменения, так и изменения морфологии поверхностного слоя, толщина которого зависит от кинетической энергии

частиц пучка. Вместе с тем, результаты исследований в области физики конденсированных сред, в частности, формирования конденсированной системы в неравновесных условиях [3], когда образуемое вещество представляет собой не сплошную среду, а пористые фрактальные структуры, позволяют по-новому подойти к вопросам морфологии поверхности образцов, облучаемых электронными и ионными пучками. Кроме того, развитие современных методов вычислительной физики [4] позволяет применить новые подходы для решения рассматриваемой проблемы.

В настоящей работе обсуждается новый механизм формирования фрактальных структур в поверхностном слое твердого тела, облучаемого сильноточными электронными и ионными пучками. Приводятся результаты численного анализа фрактальных структур для различных образцов.

1. Механизм образования получения фрактальных структур при облучении импульсным пучком

В настоящее время известно несколько методов получения фрактальных структур на поверхности твердых тел:

- электрический взрыв проволоки [5];
- нагревание вольфрамовой спирали в вакууме [6];
- взрыв материала [7];
- сжигание SiH [8];
- лазерное облучение металлов [9,10].

В последнем случае, при облучении образца лазерным излучением вблизи поверхности образуется слабоионизированный пар металла, который, расширяясь в пространство, вначале охлаждается, а затем конденсируется на ионах. Когда температура образующихся частиц становится меньше температуры плавления материала, частицы металла кластеризуются, образуя фрактальные структуры в поверхностном слое облучаемого металла.

Нами обсуждается новый механизм формирования фрактальных структур, суть которого состоит в следующем. При облучении поверхности образца импульсным пучком частиц в образце, на глубине, определяемой кинетической энергией бомбардирующих частиц, в течение короткого промежутка времени происходит заметное выделение энергии. В результате этого при облучении образца электронами происходит плавление поверхностного слоя с последующей кристаллизацией или аморфизацией, а в случае ионного пучка наблюдается ионное перемешивание [11]. При этом в условиях интенсивной диссипации происходят фазовые превращения вещества, характеризующиеся образованием пористых фрактальных агрегатов, подобно тому, как это имеет место при лазерном облучении металлов [9,10].

Если такой механизм действительно реализуется, то наш подход имеет ряд преимуществ по сравнению с лазерным облучением:

- максимально используется энергия пучка;
- достигается большая глубина проникновения пучка в образец;
- возможна регулировка энергии, выделяемой в образце.

Анализируемые образцы были получены на установке ЭЛИОНА (ЛСВЭ ОИЯИ), позволяющей формировать электронные и ионные пучки со следующими параметрами [12]:

— кинетическая энергия ионов и электронов	100 + 150 кэВ
— длительность импульса тока пучка	300 нс
— плотность тока пучка электронов	100 + 1000 А/см ²
— плотность тока пучка ионов	5 + 200 А/см ²
— сорт ионов	C ⁺ , Ti ⁺ .

Блок-схема установки показана на рис.1, а на рис.2 приведены вольт-амперные характеристики источника ионов для типичных материалов: Be, C, Cu, Al. Для облучения использовались металлы, металлические пленки на подложках из кремния, а также высокотемпературные сверхпроводники. Микрофотографирование поверхности облученных образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе JSM870.

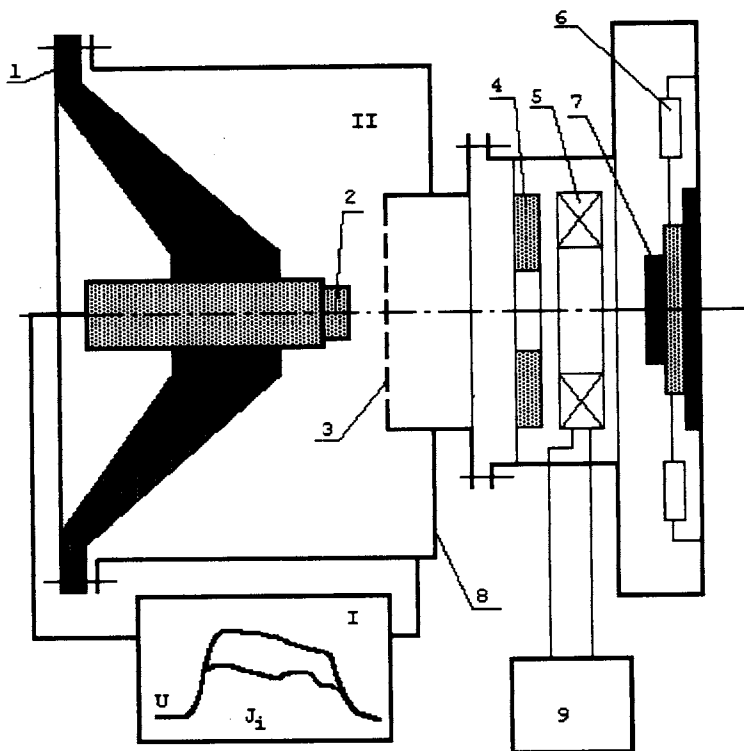


Рис.1. Блок-схема установки. I — генератор импульсного напряжения, II — плазменный эмиттер электронов и ионов, 1 — проходной высоковольтный изолятор, 2 — эмиттер частиц; 3 — вытягивающий электрод, 4 — коллиматор, 5 — трансформатор Роговского, 6 — шунт тока, 7 — образец, 8 — вакуумная камера, 9 — осциллограф

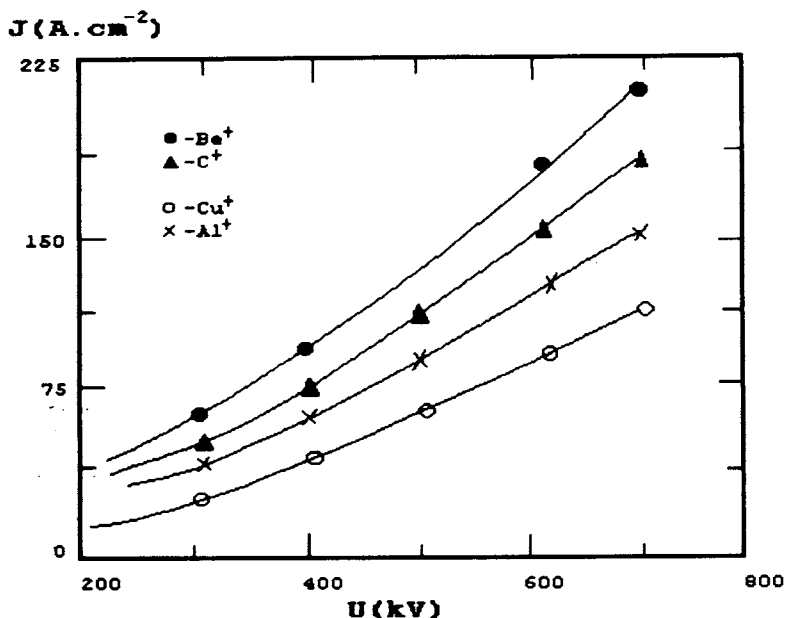


Рис.2. Вольт-амперная характеристика ионного диода установки ЭЛИОНА для типичных материалов Be, C, Cu, Al, снятая при длительности импульса 300 нс. Расстояние между анодом и катодом — 7 мм

2. Определение фрактальной размерности

Для анализа микрофотографий была разработана программа PLATO, использующая box-counting алгоритм, описанный в [13]. Процедура обработки изображений на микрофотографиях состояла в следующем. Все графические файлы (растры), полученные в результате сканирования микрофотографий, приводились к черно-белой шкале: всего 256 градаций от черного (0) до белого (255). Затем растры преобразовывались согласно следующему алгоритму. Выбирался граничный цвет X : $0 < X < 255$. Затем все цвета, начиная с цвета X и выше, заменялись на белый цвет, а остальные — на черный. При этом цвет X выбирался таким образом, чтобы изоцветовая линия имела максимальную длину.

Для проверки работоспособности программы и определения погрешности были проведены измерения размерностей тестовых объектов: прямой линии ($D = 1$), кривой Коха ($D = \ln 4 / \ln 3 \approx 1,2618\dots$), кривой Гивена ($D = \ln 6 / \ln 3 \approx 1,63092\dots$). Относительная погрешность не превышает 0,04.

Вывод о том, что изображения на микрофотографиях, полученных в процессе экспериментов с электронно-ионным источником, являются фракталами, основан на результатах вычислений длины кривой, «разделяющей» участки разного цвета. Подсчитав количество квадратов $N(\delta)$ со стороной δ , необходимых для покрытия указанной кривой, можно определить длину как $L(\delta) = N(\delta)\delta$.

3. Результаты

Проведен анализ данных экспериментов, выполненных с целью изучения процесса изменения морфологии поверхности и улучшения эксплуатационных свойств облучаемых материалов.

3.1. Электронное облучение

Приведем результаты облучения стали У8 и пленки Nb(3)Ge на подложке из нержавеющей стали.

Рис.3 содержит фотографию поверхности облученной инструментальной стали У8, полученную на сканирующем электронном микроскопе. Облучение проводилось электронным пучком с кинетической энергией 250 кэВ при токе 1000 А и длительности импульса 300 нс.

Фотографии поверхности Nb(3)Ge, взятые из работы [14], приведены на рис.4. На них показана поверхность пленки Nb(3)Ge, полученной на ленте из нержавеющей стали из паровой фазы (рис.4а) и облученной импульсным электронным пучком при

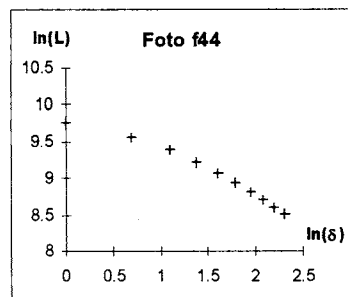
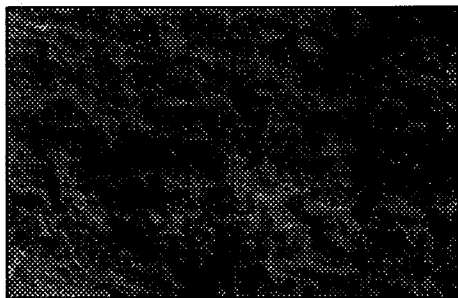


Рис.3. Микрофотография поверхности облученной инструментальной стали У8 и график зависимости длины изоцветовой линии L от размера ячейки покрытия δ (в пикселях). Найденная размерность изолинии $D = 1,7$.

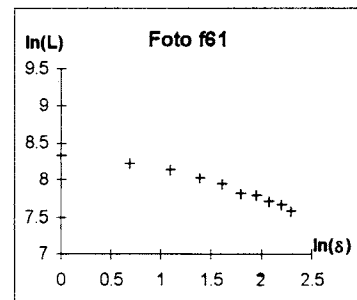
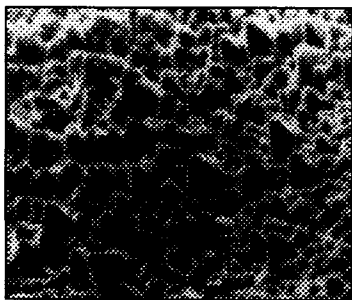


Рис.4а. Микрофотография поверхности пленки Nb(3)Ge, полученной из паровой фазы на подложке из нержавеющей стали и график зависимости длины изоцветовой линии L от размера ячейки покрытия δ (в пикселях). Найденная размерность изолинии $D = 1,6$.

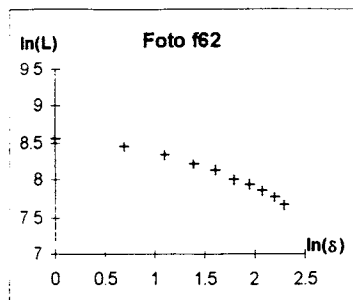
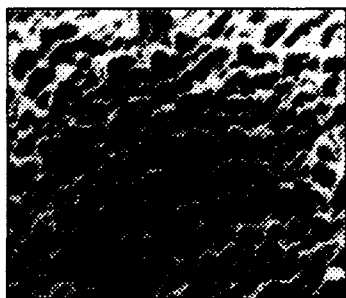


Рис.4б. Микрофотография облученной поверхности Nb(3)Ge $I = 300 \text{ A/cm}^2$ и график зависимости длины изоцветовой линии L от размера ячейки покрытия δ (в пикселях). Найденная размерность изолинии $D = 1,5$

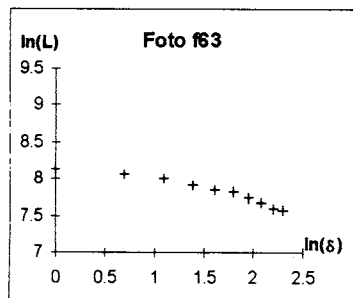
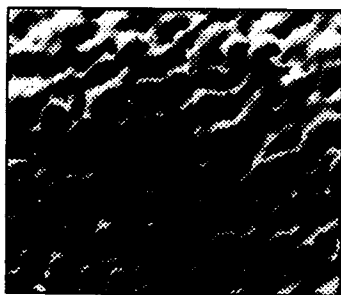


Рис.4в. Микрофотография облученной поверхности Nb(3)Ge $I = 700 \text{ A/cm}^2$ и график зависимости длины изоцветовой линии L от размера ячейки покрытия δ (в пикселях). Найденная размерность изолинии $D = 1,4$

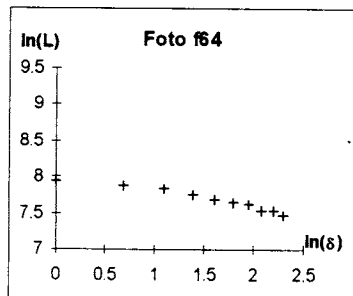
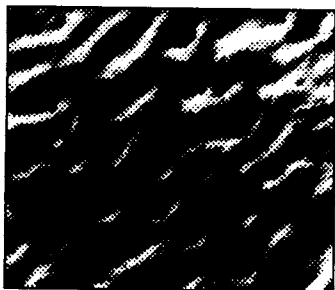


Рис.4г. Микрофотография облученной поверхности Nb(3)Ge $I = 1000 \text{ A/cm}^2$ и график зависимости длины изоцветовой линии L от размера ячейки покрытия δ (в пикселях). Найденная размерность изолинии $D = 1,3$

различной плотности электронного тока: 300 A/cm^2 — рис.46, 700 A/cm^2 — рис.4в, 1000 A/cm^2 — рис.4 — при кинетической энергии электронов 100 кэВ и длительности импульса тока пучка 30 нс. В последнем случае на фотографиях виден поверхностный проплач пленки.

3.2. Ионное облучение

Фотографии поверхности пленки Ti, облученной ионами Ti, представлены на рис.5а и 5б. Режимы облучения отличались кинетической энергией однозарядных ионов титана: рис.5а соответствует энергии ионов титана 250 кэВ, рис.5б — 400 кэВ.

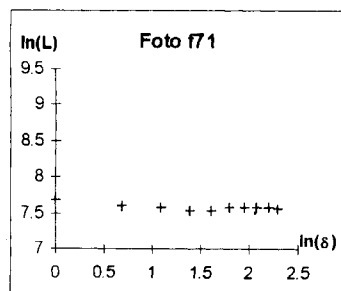
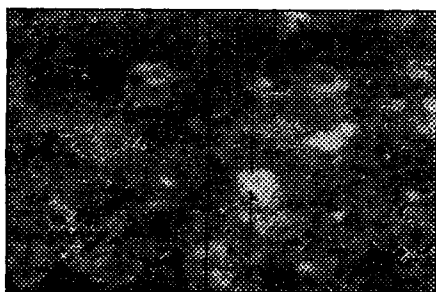


Рис.5а. Микрофотография облученной поверхности пленки Ti $U = 250$ кэВ и график зависимости длины изоцветовой линии L от размера ячейки покрытия δ (в пикселях). Найденная размерность изолинии $D = 1,0$

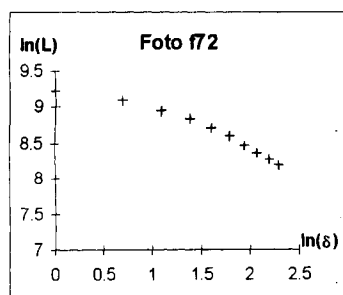
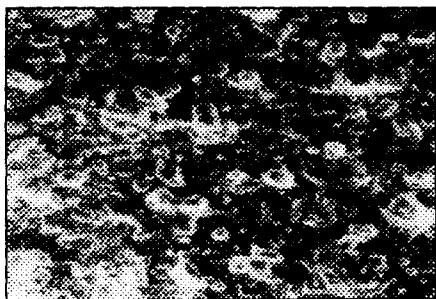


Рис.5б. Микрофотография облученной поверхности пленки Ti $U = 400$ кэВ и график зависимости длины изоцветовой линии L от размера ячейки покрытия δ (в пикселях). Найденная размерность изолинии $D = 1,6$

3.3. Фрактальные структуры

Для гладких кривых при $\delta \rightarrow 0$ величина $L(\delta)$ стремится к постоянной величине, равной ее длине. Однако для кривых на микрофотографиях этого не происходит. На графиках, приведенных возле каждой микрофотографии, показана зависимость $L(\delta)$ от δ , построенная в логарифмическом масштабе. Из этих графиков следует, что длины

кривых описываются приближенной формулой $L(\delta) \sim \delta^{1-D}$ с показателем степени $D > 1$. Этот факт указывает на то, что структуры, изображенные на фотографиях, имеют фрактальный характер.

Из рассмотрения представленных экспериментальных данных и результатов численного анализа следует, что поверхность облученных образцов имеет фрактальную природу. При этом заметим, что наши результаты носят предварительный характер, и нами не проводится детальный анализ применимости некоторых модельных представлений для описания получаемых экспериментальных результатов.

4. Обсуждение результатов

Формирование фрактальных структур на поверхности раздела (интерфейса) наблюдается экспериментально уже достаточно давно, прежде всего в процессах образования тонких полупроводниковых пленок (см., например, [10]) и кристаллизации. Простейшая модель, описывающая такие процессы, — нелинейное стохастическое дифференциальное уравнение типа Кардара — Паризи — Занга (KPZ) [15], поведение решений которого хотя и объясняется качественно, но в силу математических трудностей, обусловленных значительным вкладом от нелинейного члена $\lambda(\nabla h)^2$, не может быть однозначно связано с управляющими параметрами внешней среды, в которой происходит формирование фрактальных агрегатов.

В случае пучковых технологий процессы происходят за очень короткие времена, квазиadiaбатически. Роль нелинейного члена, упомянутого выше, при этом падает и такие параметры структуры, как пористость (а следовательно, фрактальная размерность) и прочность, полностью определяются свойствами материала и свойствами пучка. В простейшей модели типа KPZ, в условиях малости нелинейного члена, анализ подобия дает для размерности напыляемой поверхности $D_F = 2,5 + \Delta$. Малая поправка Δ определяется энергетическим разбросом пучка и скоростью поверхностной диффузии. Оба параметра хорошо контролируются: первый — изменением параметров источника частиц, второй — предварительной обработкой поверхности образца [16].

При повышении энергии пучка ($W = IU\tau$, где I — ток пучка, U — кинетическая энергия, τ — длительность импульса), когда доминирующими становятся процессы плавления, кристаллизации и аморфизации, а роль прилипания кластеров уменьшается, основными процессами становятся быстрый разогрев и охлаждение поверхностного слоя, благодаря чему, как показано экспериментально [1], улучшаются прочностные свойства облучаемого материала. Именно это и наблюдалось при исследовании микрофотографий. Так, фрактальная размерность изолиний на фотографиях облученной инструментальной стали (рис.3) падает с увеличением интенсивности пучка с 1,6 до 1,3. В целом же, размерность изолиний попадает в пределы $1,3 \div 1,7$ (а самих поверхностей, следовательно, около $2,3 \div 2,7$), что неплохо согласуется с моделями типа KPZ, упомянутыми выше. Динамика этих процессов, безусловно, заслуживает глубокого исследования, хотя, по-видимому, не проявляется непосредственно в наблюдаемых свойствах поверхности.

В настоящей работе исследовалась не фрактальная размерность самой подвергшейся облучению поверхности, а лишь ее изо(цветовые) линии. Для достаточно гладких в трансверсальном направлении фрактальных поверхностей — это, например, имеет место для земного ландшафта — размерность поверхностей ровно на 1 превосходит размерность изолиний [17]; следовательно, можно оценить размерность самой поверхности и сравнить результаты с теоретическими предсказаниями. В случае металлов, подвергшихся поверхностной модификации, такая связь является хотя и весьма вероятной, но не самоочевидной. Здесь, безусловно, важны дальнейшие исследования, требующие прецизионной электронной микроскопии.

Выводы

Экспериментально показано, что в результате облучения твердых материалов импульсными сильноточными электронными и ионными пучками на поверхности образцов образуются фрактальные структуры, имеющие разные фрактальные размерности. Имеются определенные теоретические предпосылки к установлению связи между образуемой на поверхности материалов структурой и происходящими физико-химическими процессами, однако это требует дальнейшего более детального изучения исследуемого явления.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-96-02-19508) и поддержке ESPRIT (проект 21042).

Литература

1. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б. — Взаимодействие заряженных частиц с металлами и сплавами. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Materials Synthesis and Processing Using Ion Beams. — Materials Research Society Symposium Proceedings, v.316.(Ed. by R.J.Culbertson et al.), Pittsburg, USA, 1994.
3. Смирнов Б.М. — УФН, 1993, т.163, с.51.
4. Фракталы в физике. Труды VI Международного симпозиума по фракталам в физике (под ред. Л.Пьетронеро и Э.Тозатти, пер. с англ. под ред. Я.Г.Синая и И.М.Халатникова). МЦТФ, Триест, Италия, 9—12 июля, 1985.
5. Forrest S.R., Witten T.A. — J. Phys., 1979, v.A12, L.109.
6. Granqvist C.G., Buhrman R.A. — J. Appl. Phys., 1976, v.47, p.2200.
7. Ершов А.П., Луперштох А.Л., Коломийчук В.Р. — Письма в ЖТФ, 1990, т.16. с.43.
8. Hurd A.J., Shafer D., Martin J.E. — Phys. Rev., 1987, v.A35, p.2361.
9. Лушников А.А., Пахомов Ф.В., Черняев Г.А. — ДАН СССР, 1987, т.292, с.86.
10. Nanai L. et al. — Chaos, Solitons & Fractals, 1995, 5, p.9.
11. Korenev S.A., Perry A.J. — Vacuum, 1996, p.1089.
12. Корнев С.А. — Препринт ОИЯИ Р13-94-192, Дубна, 1994.

13. Oliver D. — *Fractal Vision: Put Fractals to Work for You*. SAMS Publishing, Carmel, USA, 1992.
14. Вавра И., Коренев С.А. — Препринт ОИЯИ Р13-88-60, Дубна, 1988.
15. Kardar M., Parisi G., Zhang Y. — *Phys. Rev. Lett.*, 1986, v.56, p.889.
16. Шулов В.А. и др. — *Поверхность*, 1995, 11, с.24.
17. Федер Е. — *Фракталы*, М.: Мир, 1991.