

Теория самоорганизованной критичности как теория сложности

В.Н. Костюк

Аннотация. В статье рассматриваются следствия песочной модели П. Бака, изучающей поведение лавин (самопроизвольных ссыпаний части песка, возникающих на поверхности кучи при увеличении угла ее наклона). Постепенно некоторые лавины охватывают всю поверхность кучи целиком. Возникает состояние самоорганизованной критичности, или нелинейного равновесия кучи. С этих позиций в статье анализируются кризисы, возникшие в мировой экономике после 2000 года.

Ключевые слова: самоорганизованная критичность, сложность, флуктуации, нелинейное равновесие, критическое время, докритическое время, экономический кризис.

Введение

Хорошо известно, что традиционные равновесные модели характеризуют в основном процессы, значительные изменения в которых вызываются внешними воздействиями. Однако со временем все больший интерес стали вызывать другие модели, изучающие возможные изменения структуры и способов поведения системы безотносительно к внешним воздействиям. К ним относится и модель растущей кучи песка, содержащая положительные обратные связи и большое число исходных элементов.

1. Стандартная модель растущей кучи песка

Важным вкладом в общую модель нелинейных процессов, приводящих со временем к спонтанным изменениям в них, послужила созданная в конце прошлого века группой исследователей во главе с датским физиком Пером Баком песочная модель [1, 2, 9, 10]. В основе этой модели лежит поведение растущей кучи песка. Предполагается, что сцепление песчинок между собой на поверхности кучи является до-

статочно сильным, чтобы отделить процессы на поверхности кучи от тех, какие происходят внутри нее. Это позволяет ограничиться рассмотрением процессов на поверхности кучи.

Согласно этой модели, каждую секунду на вершину кучи падает по одной песчинке, т.е. рассматриваемая система является *открытой*. Благодаря ее открытости поверхность кучи постепенно становится все более крутой. Увеличение крутизны рано или поздно приводит к тому, что какая-то из песчинок на поверхности становится неустойчивой и сдвигается вниз, увлекая за собой некоторые из соседних песчинок. Такой процесс может повторяться, создавая цепную реакцию смещения песчинок вниз по поверхности кучи. В итоге возникают *лавины* различной величины.

Первоначально эти лавины локальны и предсказуемы, их возникновение и дальнейшее поведение определяются только рельефом отдельных наблюдаемых участков поверхности кучи. Такое поведение кучи считается простым, поскольку отдельные лавины не связаны между собой. Растущая крутизна склона (угол наклона) служит *управляющим параметром*, опреде-

ляющим средние размеры и частоту лавин, а также среднее число песчинок, покидающих кучу (скатывающихся вниз на плоскую подложку, которая служит основанием кучи).

Со временем растущий наклон поверхности кучи достигает значения, при котором куча уже не сможет расти, так как количество добавляемого песка в среднем становится равным количеству песка, который покидает кучу. Такое состояние является *стационарным*, поскольку среднее количество песка в куче и ее средняя крутизна теперь постоянны во времени.

Динамика поведения кучи теперь изменяется. Для поддержания стационарного баланса между насыпаемым песком и ссыпавшимся песком все части поверхности кучи должны быть взаимосвязанными. Поэтому время от времени в стационарной куче будут возникать лавины, охватывающие *всю поверхность кучи*. Это и есть, по Баку, состояние самоорганизованной критичности кучи. Вместо локальной динамики отдельных лавин возникает единая динамика для всей поверхности кучи. Поведение лавин уже невозможно предсказать, исходя из свойств отдельных частей поверхности кучи. Такая куча обладает свойством *целостности* и в этом смысле становится уже *сложной системой*. Изучение закономерностей ее поведения можно рассматривать как одну из теорий сложных систем.

Обозначим угол наклона кучи в стационарном состоянии через z_{cr} , а само стационарное состояние кучи назовем ее *критическим* состоянием. По отношению к нему можно выделить три качественно разных состояния кучи:

$z < z_{cr}$ – докритическое состояние кучи;

$z = z_{cr}$ – критическое состояние кучи;

$z > z_{cr}$ – сверхкритическое состояние кучи.

В докритическом состоянии лавин мало, они небольшие по размерам и ими можно практически пренебречь. В критическом состоянии число и размеры лавин растут, а их появление, как показывают эмпирические исследования, удовлетворяет *степенному* распределению вероятностей.

В сверхкритическом состоянии крутизна склона, а также величина и число лавин продолжают расти. Но этот рост неустойчив. В ответ на дальнейшее увеличение количества песка куча

увеличивает сброс «лишнего» песка на подложку, уменьшая z до критического уровня.

Существенно также, что критическое состояние является грубым по отношению к возможным изменениям в куче. Например, изменяя силу трения между песчинками (делая песок более влажным или более сухим), мы на время отклоняемся от существующего критического состояния, но спустя некоторое время оно восстанавливается в несколько иной форме. Внешний вид кучи изменится, но динамика останется критической. Всякий раз, когда кто-то пытается увести кучу от критического состояния, она неизменно возвращается к нему [2, с. 97].

Постоянное возвращение к критическому состоянию при любых отклонениях от него позволяет предположить, что оно представляет собой особый вид устойчивого *равновесия* растущей кучи и всех «кучеподобных» систем, которое можно назвать *нелинейным*, или, по Баку, *прерывистым*, равновесием.

Если система находится в таком равновесии, то значительные изменения в ней могут произойти как при сильном внешнем воздействии, так и в результате постепенных внутренних изменений. Традиционным примером такого положения дел может служить гипотетическое падение крупного метеорита на Землю, вызвавшего гибель динозавров. Такое событие, если оно действительно имело место в прошлом, достаточно для исчезновения динозавров, но оно не является необходимым. Если Земля находится в состоянии нелинейного равновесия, то гибель динозавров *могла* быть вызвана внутренними причинами, возникшими в ходе биологической эволюции.

В условиях нелинейного равновесия спонтанно могут возникать события (флуктуации) самых разных масштабов, от малых до очень больших (катастроф). Для обширного класса систем вида $\{N(s), s\}$ величина N может быть представлена в виде отрицательной степени другой величины s :

$$N(s) = s^{-r}, \quad 0 > r < 2 \quad (1)$$

В указанных пределах величина r может варьироваться, порождая различные виды самоорганизованной критичности.

Хорошо известным примером равенства (1) является закон Гутенберга-Рихтера для землетрясений, согласно которому число землетрясений N с энергией E определяется как

$$N(E) \sim E^{-b}. \quad (2)$$

Здесь b – константа, значение которой в зависимости от тектонической структуры региона может варьироваться от 0,5 до 1,5. Такой закон ничего не говорит о конкретном землетрясении, но показывает, как количество землетрясений какого-то одного масштаба соотносится с количеством землетрясений другого масштаба. Он выражает «свойство не разлома, а земной коры в целом или, по меньшей мере, большой географической области» [2, с.141].

Число таких примеров, соответствующих различным воплощениям самоорганизованной критичности, легко можно увеличить, и их общая форма свидетельствует о том, что задача объяснения поведения любой такой системы состоит в нахождении конкретного значения показателя γ в равенстве (1). При этом качественно разным системам в состоянии самоорганизованной критичности соответствуют разные значения показателя γ .

Казалось, все очень просто. Однако с нахождением конкретного значения показателя γ возникают принципиальные трудности всякий раз при попытке найти способ формального вычисления этого показателя. «Модель проста, но получить для нее аналитический результат – слишком сложная задача для математиков и физиков-теоретиков. Во всяком случае, никому до сих пор не удалось это сделать» [2, с.109]. По-видимому, это связано с тем, что теория самоорганизованной критичности предполагает не жесткую, а мягкую формализацию, обычно присущую междисциплинарным исследованиям.

В условиях мягкой формализации указанную трудность в нахождении показателя степени γ можно преодолеть эмпирически. Для этого достаточно, например, прологарифмировать обе стороны равенства (1), чтобы получить равенство

$$\lg N(s) = -\gamma \lg s. \quad (3)$$

Геометрически это прямая линия, а показатель степени γ задает наклон этой линии.

Таким равенством воспользовался, в частности, основоположник теории степенных рас-

пределений вероятностей Вильфредо Парето. Он изучал распределение богатства в различных обществах и в разное время. Разбив людей на группы по величине личного дохода, Парето подсчитал их численность в каждой категории и представил результаты в виде графика, на одной оси которого он откладывал уровень дохода, а на другой – количество людей с таким доходом. Оказалось, что графики похожи для разных стран и разных эпох: богатых везде и всегда очень мало, а бедных – очень много.

В логарифмической шкале Парето получил прямую, которая имела угол наклона, равный $-3/2$ (отрицательный наклон). При таком наклоне основная часть общественного богатства сосредоточена в руках немногочисленной элиты. Значение показателя степени γ , равное $-3/2$, Парето считал универсальным.

В алгебраической записи формула (закон) Парето имеет вид:

$$P(u) = (u|m)^{-\gamma}, \quad \gamma = -3/2 \quad (4)$$

Она указывает, какая доля людей P имеет доход больше заданного уровня u , m – минимальный доход. Пусть, например, u – доход, вдесятеро превышающий минимальный. Тогда $P(u) = 10^{-3/2} = 0,032 = 3,2\%$. Чуть более 3% имеет доход, на порядок превышающий минимальный.

В общем случае, когда исследователь анализирует поведение системы $[N(s), s]$ посредством временных рядов и в двойном логарифмическом масштабе получает аналог равенства (3), то из этого можно получить три важных следствия. Во-первых, изучаемая система обладает свойством самоорганизованной критичности. Во-вторых, угол наклона полученной прямой служит эмпирической оценкой значения степенного показателя γ . В-третьих, поскольку прямая линия выглядит одинаково в любой своей части, то равенство (3) свидетельствует о наличии масштабной инвариантности в системах самоорганизованной критичности. Ни в каком масштабе не имеется каких-либо отличительных признаков, какие отличали бы данный масштаб от других масштабов представления сложной системы. Отсюда следует, что одним из инструментов изучения самоорганизованной критичности может служить теория фракталов [6].

Отметим также двойственность понятия причины в системах самоорганизованной критичности. Что является причиной какого-то конкретного землетрясения – критическое состояние всей земной коры или внутренние напряжения в некоторой ее части?

Один из возможных ответов на этот вопрос можно найти в рамках песочной модели. Глобальные лавины (большие катастрофы) не имеют конкретной причины – они являются следствием возникновения самоорганизованной критичности как свойства *всей поверхности кучи*, а не отдельных ее частей. Применительно к землетрясениям это означает, что общей их причиной является самоорганизованная критичность всей земной коры.

Именно такой ответ и дает Пер Бак. Но это неполный ответ. Он справедлив для очень больших периодов времени, на много порядков превышающих продолжительность отдельных землетрясений. Уменьшив рассматриваемый период времени и пространственной соотнесенности до масштаба отдельных землетрясений, получаем другой ответ, связанный с локальной структурой определенного участка земной коры в определенное время. Это уже частная (локальная) причина отдельного землетрясения. Поэтому для отдельных землетрясений вполне разумно *дополнительно* искать их специфические причины, не ограничиваясь общими свойствами самоорганизованной критичности. Это утверждение не является прямым следствием самоорганизованной критичности земной коры в целом, но оно *совместимо* с ним.

Таким образом, общей причиной любого конкретного землетрясения служит самоорганизованная критичность всей земной коры, его частной причиной является связанное с этим землетрясением состояние конкретного разлома в рассматриваемое время. Иначе говоря, в общем случае имеет место и то, и другое. Это сближает позиции теоретиков самоорганизованной критичности и практических геологов.

2. Докритическое время

Важное значение имеет не только критическое, но и докритическое время. Это время, какое требуется для перехода системы в состояние самоорганизованной критичности.

Оказалось, что разные типы систем самоорганизованной критичности имеют различное по величине докритическое время. Наибольшее докритическое время характерно для эволюции земной коры и для биологической эволюции. Это также было отмечено П. Баком. «Законы землетрясений не могут быть поняты на основе анализа землетрясений, случившихся за время, сравнимое с человеческой жизнью; нужно принять в расчет геофизические процессы, происходившие в течение сотен миллионов лет ... Невозможно понять биологическую эволюцию, наблюдая в лабораторных условиях за развитием нескольких поколений в популяции крыс или бактерий» [2, с. 76-77]. Для многих других видов систем самоорганизованной критичности докритическое время намного меньше.

Но какова причина таких больших различий в величине докритического времени? П. Бак не рассматривает этот вопрос, хотя он очень важен. По нашему мнению, все дело в разных уровнях сложности отдельных систем самоорганизованной критичности.

Различия в величине докритического времени позволяют выделять различные уровни сложности в сложных системах самоорганизованной критичности. Это позволяет расширить область применимости теории самоорганизованной критичности далеко за пределы первоначальных равенств (1) – (3).

Например, Бак считает возможным рассматривать человеческую мысль как лавину, а сам процесс мышления как самоорганизуемую систему. «Объем информации в ДНК достаточен для того, чтобы задать общие правила нейронных соединений, но совершенно недостаточен для того, чтобы описать всю схему нейронных связей. Хотя некоторая изначальная запрограммированность имеет место (ведь мозг ома-ра отличается от мозга человека), функциональность мозга развивается в течение жизни индивидуума. Это означает, что структура мозга должна быть самоорганизующейся, а не жестко спроектированной изначально. Функциональность мозга в значительной степени создается теми задачами, которые мозг решает» [2, с. 220]. Докритическое время имеет в этом случае порядок нескольких десятилетий.

Возможно, что формирование более сложной системы самоорганизованной критичности первоначально требует большей величины докритического времени, но когда такая система уже сформирована, то на последующем уровне соответствующее докритическое время уже намного меньше.

Исключительно важным оказалось и предположение о том, что феномен самоорганизованной критичности постепенно возникает и в экономике. Первым это обнаружил на частных примерах основоположник теории фракталов Б.Мандельброт, изучая изменения рыночных товарных цен на хлопок. Он показал [7], что в рыночной экономике распределение колебаний цен хлопка и многих других товаров на рынке следует степенному закону в форме (3). Впоследствии было показано, что аналогичные закономерности присущи и сложно устроенным финансовым рынкам [4, с.184].

Затем Бак *предположил*, что вся современная экономика (во всяком случае, ее развитая часть) уже находится в состоянии самоорганизованной критичности и что возникающие в ней флуктуации аналогичны колебаниям земной коры. Кризис 1929г., говорит он, экономисты рассматривают как нечто особенное и специфическое, хотя на самом деле это всего лишь проявление перехода экономики в состояние самоорганизованной критичности [2, с. 63].

Как только экономика входит в состояние самоорганизованной критичности, то флуктуации в ней, в том числе большие, становятся неизбежными. «Нет способа стабилизировать экономику и избавиться от флуктуаций регулированием процентной ставки и другими мерами. Рано или поздно что-нибудь другое и совершенно неожиданное нарушит сколь угодно тщательно выстроенный баланс, и где-то еще в системе произойдет крупная лавина» [2, с.235].

Важность этого утверждения определяется тем, что *если оно верно*, то оно изменяет классическое представление об экономическом равновесии, согласно которому в равновесии не существует кризисов и что экономическое равновесие желательно потому, что при определенных условиях оно может гарантировать успешное бескризисное развитие. На самом деле в сложных условиях самоорганизованной

критичности равновесие (в экономике в том числе) представляет собой нелинейный процесс, в котором возникают флуктуации всех размеров, в том числе очень большие и разрушительные, т.е. кризисы различной силы, каждый из которых создает некоторые новые возможности.

Однако слишком близкая аналогия между землетрясениями и экономическими кризисами является чрезмерной. В экономике существуют факторы, убыстряющие и усложняющие происходящие в ней процессы по сравнению с теми, какие в среднем имеют место в земной коре. Одним из них является появление и возрастающая активность человеческого фактора, приводящая к экономическому росту и к появлению все новых и новых условий жизнедеятельности людей. Кроме того, кризисы в экономике возникают не только непосредственно в ее критическом состоянии, но и при *взаимодействии критического и сверхкритического состояний*. И так как в сверхкритическом состоянии размеры флуктуаций огромны, то быстрый возврат экономики из сверхкритического состояния в критическое увеличивает частоту и число больших катастроф. Некоторые из них становятся глобальными (охватывают большую часть мировой экономики), другие остаются локальными, действуя в рамках отдельных стран. Кроме того, при приближении кризиса все рынки в экономике начинают взаимодействовать между собой, хотя до этого они функционировали раздельно. Это увеличивает не только силу, но и сферу грядущего кризиса.

С этих позиций необходимым признаком перехода экономики в состояние самоорганизованной критичности является быстрое увеличение числа и силы локальных кризисов и неизбежное появление более редких глобальных экономических кризисов.

Первый глобальный экономический кризис имел место еще в 1929 – 1933 годах (Великая Депрессия), но Вторая мировая война изменила дальнейшее направление экономических процессов и отложила возникновение самоорганизованной критичности, усилив локальные тенденции в экономике. Более того, в последние десятилетия прошлого века в мировой экономике имело место состояние «Великого спокойствия» с небольшим

количеством ограниченных по силе локальных флуктуаций. Это оправдывало господствующее в экономической теории представление о бескризисности равновесия.

Однако с началом текущего столетия частота и сила флуктуаций в экономике резко возросла. Увеличилось число и сила локальных кризисов, возник очень сильный глобальный кризис 2008 – 2009 годов, с завершением которого локальные потрясения продолжали существовать. К их числу относится и российский кризис 2014 – 2016 годов. Большие нерегулярные и плохо прогнозируемые скачки периодически возникают на мировом рынке нефти и на мировых финансовых рынках. Увеличилась общая неопределенность в экономике.

Кроме того, новые кризисы потеряли свой циклический характер, т.е. спад перестал содержать в себе условия нового подъема. Это затрудняло преодоление таких кризисов [4, с 140 – 141] и также свидетельствовало о возможном начале перехода значительной части мировой экономики в состояние самоорганизованной критичности.

В таких состояниях возникают нерегулярные взаимопереходы линейного и нелинейного равновесий. Линейное экономическое равновесие представляет собой медленно меняющийся во времени процесс, в котором для реализации каждого уровня предполагаемого дохода достаточно принять на себя определяемый в теории уровень риска. Для финансовых рынков справедлива в таких случаях теория портфеля Шарпа. Поведение инвестора, следующего этой теории в условиях линейного равновесия, можно считать рациональным.

Аналогичная ситуация возникает в сфере производства. В силу малых темпов изменения издержек, спроса, уровня цен, налогов и стоимости кредитов, хозяйствующий субъект всегда может приблизительно верно рассчитать свою будущую прибыль, отталкиваясь от существующего положения дел. В этом смысле его поведение тоже является рациональным.

Все изменяется в условиях нелинейного экономического равновесия. Это быстро меняющийся процесс, в котором на рынках уже нет однозначного соответствия между уровнем принимаемого риска и величиной возникающе-

го дохода. С ростом принимаемого уровня риска реальный доход может вырасти, упасть или остаться без изменений.

В реальном секторе экономики величина издержек и будущего дохода также становятся неопределенными. Вместе с неизбежными флуктуациями разных размеров, это приводит к большому числу ошибок, которых нельзя предвидеть заранее из-за неизбежного отставания существующей теории от быстро изменяющейся реальности. По этой причине рациональное поведение инвесторов становится ошибочным, основанным на неоправданных ожиданиях. Больше шансов на успех имеется у тех, кто мыслит нестандартно и способен своими действиями изменить близкую ему часть реальности в свою пользу. Это позволяет ему получать больший по сравнению с конкурентами доход и прибыль.

Место рациональных ожиданий занимает семейство ожиданий, в котором рациональные ожидания становятся только одними из возможных. Помимо них, возникают ожидания на основе предполагаемого или реального конкурентного преимущества, а также иррациональные ожидания, некоторые из которых могут неожиданно осуществляться.

Преодоление в этих условиях более частых и более сильных кризисов неизбежно потребовало более активного участия государства в экономической деятельности, обладающего сравнительно большими ресурсами для устранения последствий неизбежных ошибок. Прежняя наивно-либеральная концепция экономической активности, основанная на преуменьшении роли государства в экономике и преувеличении роли «невидимой руки» рынка, стала быстро устаревать. Экономика становится слишком сложной, чтобы ее можно было хорошо организовать либо только государственным вмешательством, либо только спонтанными действиями рынка. Требуется непростой синтез этих активностей.

Вместе с тем сохраняется актуальность другой части либеральной концепции: значимость индивидуальной свободы в экономическом развитии со временем только растет [3]. Индивидуальная и групповая свобода, ограниченная только необходимостью не нарушать принятые

законы, становится важной производительной силой общества. Увеличивается социальная и экономическая значимость индивидуального, малого и среднего бизнеса. Растет их взаимная связь с крупным бизнесом, который становится основным заказчиком для многих малых и средних предприятий. Индивидуальный человеческий капитал, присущий всем видам человеческой деятельности, начинает расти быстрее любых других видов капитала.

Заключение

В заключение формулируем сначала основные выводы, к которым пришел Пер Бака относительно экономического развития на основе теории самоорганизованной критичности.

1. Если рыночная экономика уже находится в состоянии самоорганизованной критичности, то устранить в ней большие флуктуации практически невозможно.

2. Любая попытка их устранения предполагает жесткую централизацию всех решений, растущая часть которых будет ошибочной из-за недостатка обратных связей в процессах принятия решений. Постепенное накопление ошибочных решений приведет в итоге к коллапсу экономики. Именно так была разрушена добившаяся сначала больших успехов советская экономика (этот пункт приводится в несколько измененной форме по сравнению с оригиналом).

3. «Наиболее здоровым состоянием экономики может оказаться децентрализованное самоорганизованно-критическое состояние с флуктуациями любых размеров и любой продолжительности» [2, с. 236, 242].

Наше обсуждение свойств самоорганизованной критичности показывает, что к этим выводам следует добавить новые.

4. Существуют различные виды самоорганизованной критичности, различающиеся между собой по уровню сложности в зависимости от характерной для них величины докритического времени. Чем сложнее система самоорганизованной критичности, тем меньше ее докритическое время (в предположении, что более простые формы самоорганизованной критичности уже сформированы).

5. Стандартная теория самоорганизованной критичности не является логически полной и

допускает поэтому непротиворечивые расширения, специфические для разных типов сложных систем. Наиболее важным из них является возможное возникновение в системах самоорганизованной критичности с относительно небольшим докритическим временем человеческого фактора, создающего дополнительные возможности ее функционирования. Помимо спонтанных переходов из одних состояний в другие в таких системах возникают целенаправленные переходы, инициированные человеком.

6. Перечисленные выводы взаимосвязаны. Например, из вывода 3 следует, что даже децентрализованное самоорганизованно-критическое состояние экономики, наиболее благоприятное, по мнению Бака, для человека, не в состоянии предотвратить возможность возникновения в неопределенном (возможно, даже близком) будущем появления сметающей все на своем пути мегалавины, способной уничтожить человеческую цивилизацию.

Принципиальное положительное решение этой опасной для человека проблемы основано на выводе 5. Изменяя подходящим образом структуру экономики, человек может заблаговременно перейти в другое ее состояние, в котором угроза разрушительной мегалавины не исчезает (иначе возникает противоречие с определением самоорганизованной критичности), но становится более отдаленной во времени. Такой процесс может повторяться время от времени. В этом случае поведение достаточно сложной экономики будет подчиняться известному закону Льюиса Кэрролла, согласно которому надо все время бежать, чтобы оставаться на месте.

7. Неверно считать, что любое сложное поведение системы и поведение на основе самоорганизованной критичности являются синонимами. Поведение на основе самоорганизованной критичности действительно является сложным, приводящим к появлению целостности системы, но обратное неверно. Сложное поведение системы (экономики в том числе) может иметь и другие альтернативные формы. Мир слишком сложен, чтобы его можно было ограничить рамками самоорганизованной критичности.

Литература

1. Бак П., Чен К. Самоорганизованная критичность// В мире науки. 1991. №3, с.16-24.
2. Bak P. How nature works: The science of self-organized criticality. Springer-Verlag, New York, Inc. 1996).
3. Костюк В.Н. Социальная эволюция и свобода//Системные исследования. Методологические проблемы. М., УРСС, 2005.
4. Костюк В.Н. Нестационарная экономика. Влияние роста сложности на экономическое развитие. М., Леланд, 2013.
5. Костюк В.Н. Неравновесное поведение финансовых рынков//Труды ИСА РАН, т. 64. вып. 1, 2014, с. 36 – 44.
6. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Техносфера. М., 2006.
7. Мандельброт Б., Хадсон Р. Непослушные рынки. Фрактальная революция в финансах. М., 2006.
8. Подлазов А.В. Теория самоорганизованной критичности – наука о сложности//Будущее прикладной математики М., УРСС, 2005, с.404 – 426.
9. Шиллер Р. Иррациональный оптимизм. Альпина Паблишер. М., 2013
10. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f-noise// Phys. Rev. Lett. 1987. V.59, P.381-384.
11. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality// Phys. Rev. A. 1988. V.38, N1, p.364-3.

Костюк Владимир Николаевич. Главный научный сотрудник ИСА ФИЦ ИУ РАН. Окончил Одесский ГУ, исторический факультет в 1958 году и механико-математический факультет в 1965 году. Доктор философских наук, доктор экономических наук, профессор. Автор 240 печатных работ. Область научных интересов: методология науки, теория самоорганизованной критичности, теория сложности, теория нелинейных систем, экономические и финансовые кризисы.
E-mail: vlad.kostiuk@gmail.com