

---

---

## ИСТОРИЧЕСКИЕ НАУКИ

---

---

DOI 10.15593/perm.kipf/2018.1.06

УДК 316:001.891

### САМООРГАНИЗОВАННО-КРИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В СОЦИОГУМАНИТАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Д.С. Жуков

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4561-2882>

В статье рассмотрены подходы теории самоорганизованной критичности (СОК) к изучению социальных феноменов. Теория СОК обладает эвристическими возможностями для объяснения некоторых нелинейных эффектов, таких как спонтанные вспышки социополитической активности в результате нарушения соразмерности причин и следствий. Представлены признаки критического состояния, в частности розовый шум. Идентификация розового шума как атрибута СОК позволяет применять самоорганизованно-критические модели (СК-модели) для имитации исследуемых систем. Простые обобщенные СК-модели демонстрируют фундаментальные закономерности СОК. Такие модели создавались главным образом для имитации естественнонаучных феноменов, однако многие из них могут быть перенесены и в социогуманитарные изыскания. Представлены некоторые наиболее успешные и популярные СК-модели. Обсуждены социальные смыслы, которые могут быть сопоставлены с данными моделями. А именно, рассмотрены ВТW-модель (модель кучи песка), DR-модель, модель лесного пожара, BS-модель (модель эволюции), модель блоков и пружин, модель ветвящегося процесса.

Возрастание темпов и рисков социального развития в современном мире представляет собой системный вызов, который стимулировал тренд на изучение нелинейных, внешне неожиданных эффектов социально-политической динамики. СК-модели способны, в частности, имитировать условия перехода систем в критическое состояние, возникновение лавин (масштабных социальных трансформаций, революций, массовых движений и т.п.) под воздействием ординарных факторов и несильных импульсов. СК-модели показывают, как микроуровневые правила взаимодействия множества простейших элементов – при наличии, в частности, петель обратных причинно-следственных связей – могут генерировать сложное нелинейное поведение системы в целом.

*Ключевые слова:* самоорганизованная критичность, розовый шум, моделирование социальных систем, имитационное моделирование, критическое состояние, модель кучи песка, лавина, социальные трансформации, исторические процессы, нелинейные эффекты.

### SELF-ORGANIZED CRITICAL MODELS IN SOCIAL STUDIES

Dmitry S. Zhukov

Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4561-2882>

The article is focused on the approaches of the theory of self-organized criticality (SOC) to the study of social phenomena. The SOC-theory has heuristic possibilities for explaining some nonlinear effects, such as spontaneous outbursts of socio-political activity as a result of violation of causes and effects proportionality. The author presents attributes of a critical state, specifically pink noise. Pink noise identification allows applying self-organized critical models (SC-models) for the simulation of the investigated systems. Simple SC-models are the generalized simulation of a number of phenomena. The models demonstrate some fundamental regularity of SOC. SC-models were created mainly for imitation of natural-science phenomena. However, many SC-models can be transferred to social studies. The author considers some SC-models which are most successful and popular.

---

© Жуков Дмитрий Сергеевич – кандидат исторических наук, доцент кафедры международных отношений и политологии, e-mail: ineternatum@mail.ru.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-06-00082а «Применение теории самоорганизованной критичности для изучения и моделирования социальных систем и исторических процессов».

The main goal of the article is to discuss social meanings that can be compared with the following models: BTW-model (sand heap model), DR-model, forest fire model, BS-model (model of evolution), block and spring model, branching process model. Modern social risks are a systemic challenge that stimulated the study of nonlinear unexpected effects of socio-political dynamics. SC-models are able to simulate the conditions for transition to a critical state, the occurrence of avalanches (large-scale social transformations, revolutions, mass movements, etc.) under the influence of ordinary factors and weak impulses. SC-models show the mechanism by which the micro-level rules for the interaction of the simplest elements can generate a complex nonlinear behavior of the system, due to the cause-effect loops.

*Keywords:* self-organized criticality, pink noise, social simulations, imitation modeling, critical state, sand heap model, avalanche, social transformations, historical processes, nonlinear effects

## Введение

Теория самоорганизованной критичности (СОК) в течение нескольких десятилетий широко распространилась в естественно-научных дисциплинах и проникает в социогуманитарное исследовательское пространство.

Сформировался целый класс имитационных моделей в духе теории СОК (самоорганизованно-критических моделей – СК-моделей), которые играют важную роль в изучении критичности, разъясняя механизмы возникновения розового шума, лавин, прочих эффектов теории. Исследуя поведение некоторых таких моделей, можно понять, какими свойствами должна обладать система, чтобы поддерживать себя в критическом состоянии. Эти модели позволяют ставить компьютерные эксперименты, которые демонстрируют поведение, хорошо интерпретируемое и похожее на реальное. Как часто бывает с имитационными моделями, область применения многих СК-моделей оказалась существенно более широкой, нежели та, для которой они создавались.

Задача статьи – рассмотреть некоторые СК-модели и представить варианты их применения для изучения социальных объектов и процессов. Полагаем, элементы и условия многих таких моделей могут быть сопоставлены с представлениями социогуманитарных наук, что дает возможность использовать результаты моделирования для приращения социального знания.

## СОК, розовый шум и лавины

Самоорганизованная критичность может возникать только в таких системах, которые обладают рядом необходимых свойств, состоят из множества элементов, содержат причинно-следственные петли (обратные связи), являются целостными.

Целостность самоорганизованно-критической системы (СК-системы) подразумевает, что все ее элементы связаны прямо или опосредованно. Событие в некоторой точке в некоторый момент времени коррелирует с событием в другой точке в другой момент времени. Причем такие корреляции уменьшаются с течением времени и при удалении точек по степенному закону, то есть несколько медленнее, чем в простых системах. Это означает, что СК-система, во-первых, имеет долгую память и, во-вторых, события в ней «чувствуют» друг друга на больших расстояниях. Локальные кратковременные события в таких условиях могут иметь следствия, влияющие на огромное множество иных событий во всей системе на длительных временных отрезках. Такие микрособытия, как правило, представляются простыми, тогда как макроповедение системы – сложным. Сложность генерируется простыми событиями, но не может быть сведена к их сумме. Любопытно, что в целостных системах, как правило, не важно, где именно произошло то или иное событие: статистические свойства систем от этого не меняются [1]. Разрушение целостности влечет за собой выход из состояния СОК и обычно связано с утратой сущностных свойств системы.

В СК-системах даже несильные воздействия инициируют причинно-следственные волны, которые затухают недостаточно быстро и могут пройти по всей системе. Множество таких волн накладываются, иногда усиливая, а иногда ослабляя друг друга. Поэтому в состоянии критичности основные параметры систем изменяются в режиме розового шума ( $1/f$ -шума), который считается атрибутом СОК. Розовый шум (рис. 1) – это процесс, который состоит из подъемов и спадов, каждый из которых также представляет собой совокупность меньших подъемов и спа-

дов, которые, в свою очередь, также являются набором еще меньших подъемов и спадов и т.д. Розовый шум это фрактальный процесс, каждый элемент которого подобен целому [2]. Розовый шум, а также иные «следы» СК-систем (некоторые степенные распределения) обладают свойством масштабной инвариантности. Они соединяют в себе изменения или элементы различных размеров. Здесь нет какого-то одного главного (характерного) масштаба, в котором была бы сосредоточена основная масса изменений/элементов.

Системы в состоянии критичности, как правило, переживают быстрые и значительные изменения – лавины. В самом крайнем варианте – это срыв одного или нескольких ключевых параметров в бесконечность. Розовый шум поэтому считается предвестником быстрой и радикальной трансформации. Впрочем, известны реальные СК-системы, которые, обладая специфическими механизмами обеспечения устойчивости, существуют неограниченно долго. Постоянное ожидание катастрофы – нормальное состояние для подобных систем.

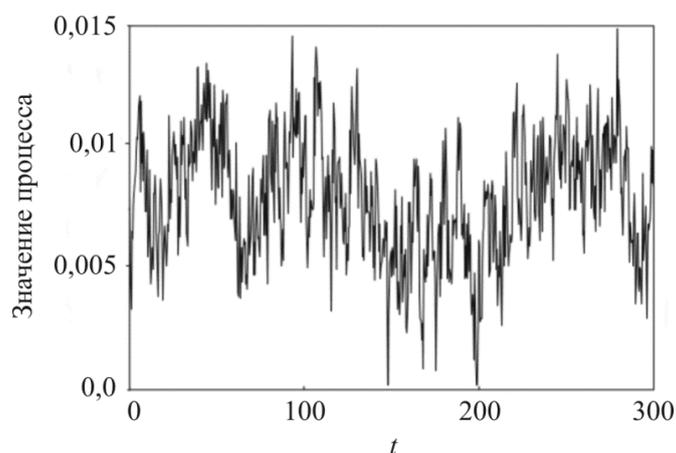


Рис. 1. Образец искусственного, розового шума, сгенерированный посредством кода «powernoise» в MatLab. Значения процесса и времени даны в условных единицах

Теория СОК претендует на то, чтобы дать универсальное объяснение природы розового шума и различных эффектов, с ним связанных. Теория связывает макродинамику системы с поведением множества мельчайших элементов. Розовый шум и затем лавины возникают под влиянием цепочек микроуровневых событий. Для запуска процессов, ведущих к лавине, требуются очень несильные воздействия-инициаторы. Это могут быть внешние импульсы или случайные отклонения. Если система обладает определенными внутренними свойствами, причинно-следственные петли не дают начальным импульсам затухнуть. Множество взаимодействующих элементов системы не могут прийти в равновесие. Однако долгое время катастрофические процессы не проявляются заметным образом. Лавина, как правило, возникает и увеличивается очень быстро. Это может означать социальный взрыв или землетрясение, массовое вымирание животных или катастрофический разлив реки.

Так возникает нелинейный эффект – нарушение соразмерности причин и следствий. Ординарные микропричины генерируют экстраординарное макрособытие. Вчера или год назад некоторые обычные факторы, казалось бы, не имели никакого эффекта, а сегодня они вызывают катастрофу.

Внешнему наблюдателю должно казаться, что лавина возникает совершенно неожиданно и, следовательно, беспричинно. Конечно, причины имеются всегда. Кроме того, мы можем с помощью теории СОК относительно легко обнаружить системы, которые находятся в преддверии лавины. Розовый шум может быть точно вычислен. Он может служить индикатором

для диагностирования состояния системы: обнаружение розового шума в том или ином сигнале позволяет выдвигать гипотезы и интерпретации на основании теории СОК.

Базовой эвристической метафорой СОК является динамика осыпания кучи песка (рис. 2) [3, с. 50].

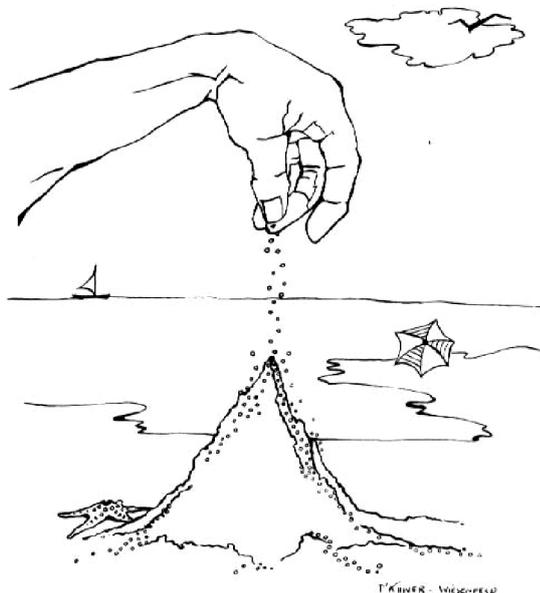


Рис. 2. Куча песка – символ теории СОК (рисунок Элейн Визенфелд)

В центр (на вершину кучи) постоянно насыпаются песчинки – совсем немного. Однако это инициирует общесистемные последствия. Добавление песчинок приводит к осыпанию песка со склона. Если добавляется, например, по три песчинки в секунду, то это не значит, что осыпятся также три песчинки в секунду. В реальности мы можем наблюдать периоды, когда песок вообще не осыпается со склона, несмотря на то, что на вершину продолжают сыпаться все новые песчинки. Иногда возникают оползни – причем оползни разных размеров, – захватывающие разные площади склона. Большие оползни чередуются с маленькими. Их механизм довольно прозрачен.

Склон кучи песка не идеально ровный: какие-то его участки наклонены немного больше, какие-то – немного меньше. Участки/кластеры с сильным наклоном нестабильны и осыпаются – происходят небольшие оползни. Эти оползни ведут к уменьшению локального наклона на ряде участков, но могут

вместе с тем приводить к существенному (или не существенному) увеличению наклона на соседних участках. Если соседние участки из-за оползней становятся также нестабильными, то это в конце концов может привести к лавине – сползанию всех или большей части участков. В этом случае участки ведут себя как единый кластер, система становится целостной именно в критической точке.

Чередование оползней разных (всех возможных) размеров представляет собой событийный ряд, который является розовым шумом. Наконец, возникает лавина – оползень, который захватывает большую, возможно, даже всю площадь склонов.

Лавина, как и любой другой оползень, инициируется всего лишь одной песчинкой, которая переместилась вниз по склону. Разумеется, это не какая-то особая песчинка. Она смогла «сыграть историческую роль», поскольку вся система находилась в критическом состоянии: средний наклон кучи был близок к критическому, а потенциально нестабильные участки (с очень большим локальным наклоном) представляли собой почти связанный кластер. В такой ситуации достаточно одного слабого воздействия, чтобы вся система начала вести себя как единое целое – синхронно осыпаться. Это хорошая иллюстрация связи микроуровневых процессов (вплоть до отдельного события) с макроповедением системы в состоянии СОК.

### Обзор литературы

В природе обнаружено большое количество систем, генерирующих розовый шум. Это и разливы рек, и динамика излучения некоторых звезд, и электрическая активность головного мозга человека, и частота пробок на дорогах и др. Подобное состояние систем, которое можно также назвать прерывистым равновесием, Г.Г. Малинецкий разъясняет следующим образом: «...[Это явление] наблюдается в процессе биологической эволюции, функционировании со-

циальных и технических систем. Типичной оказывается ситуация, когда в течение очень большого времени ничего заметного не происходит, а затем стремительные изменения кардинально меняют облик системы, наступает время революций, что, разумеется, не отменяет множества мелких событий, которых мы просто не замечаем» [4, с. 39].

Экспансию идей и методов теории СОК в различных (в том числе социальных) науках поддержали Д. Тьюкот [5, 6], М. Бьюкенен [7], Г. Бранк [8, 9, 10, 11], Г.Г. Малинецкий [4].

Г. Бранк ставит вопросы о сущности внезапных социальных трансформаций в истории: «Нелинейные динамические процессы самоорганизованной критичности... позволяют объяснить ряд нерешенных аномалий... Почему исторические данные почти всегда содержат несколько экстремальных значений? ...Почему тривиальные случаи иногда развиваются во внезапные изменения... В среде с самоорганизованной критичностью, которая характерна для человеческой истории, величина причины часто не связана с величиной ее следствия» [10, с. 25].

В теоретических и обзорных работах [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18] можно встретить множество утверждений, что теория СОК применима и эвристически продуктивна в социогуманитарных дисциплинах. Т. Крон и Т. Грунд [19] на уровне философского обобщения попытались обосновать тезис, что современное общество имеет атрибуты критического состояния.

Однако за пределами экономики имеется лишь небольшое число статей, в которых содержатся доказательства наличия СОК в конкретных социальных процессах.

Одной из ранних попыток доказать наличие СОК в социальной реальности является работа Д. Робертса и Д. Тьюкота [20], посвященная военным конфликтам. Л.-Е. Цедерман [21] также обнаружил степенные законы в истории войн. М. Биггс [22] показал, что степенные законы проявляются в классовых конфликтах в Чикаго и стачках в Париже в конце XIX века. В 2014 году С. Пиколи, М. дель Кастилло-Массот, Х. Рибейро, Е. Ленци и Р. Мендес опубликовали работу [23], в которой демонстрируется степенной закон в распределении вооруженных столкновений в Ираке, Афганистане и Северной Ирландии. И.Шимада и Т.Кояма [24], изучая динамику электоральных предпочтений в Японии, предположили, что наличие эффектов СОК может указывать на меру готовности системы к социополитической трансформации. Р.-А. Тьетар [25] обнаружил признаки критичности в деятельности крупной корпорации.

Эффекты СОК весьма часто обнаруживаются в агентно ориентированных моделях [5, 26, 27].

В России предложения исследовать социальные процессы в духе синергетики (в частности, с позиции теории СОК) прозвучали в трудах Л.И. Бородкина [14, 28, 29] и С.П. Курдюмова, Г.Г. Малинецкого, А.В. Подлазова [30]. Работы Л.В. Сморгунова инициировали внимание к сложным системам политологов [31]. Большое значение для расширения сферы применения теории СОК имела диссертация А.В. Подлазова «Новые математические модели, методы и характеристики в теории СОК» [1]. Д. Жуков, В. Канищев и С. Лямин показали наличие розового шума в некоторых рядах исторических данных [32, 33, 34, 35].

### **Что заставляет СК-системы длительное время пребывать в точке бифуркации?**

Критическое состояние – это фактически пребывание в точке бифуркации. Ведь именно в точке бифуркации нарушается соразмерность причин и следствий – поэтому малые (кратковременные, несильные и локальные) воздействия могут оказать решающее влияние на выбор аттрактора, то есть на судьбу всей системы. Однако для проявления такого эффекта необходимо, чтобы управляющий параметр, например угол наклона в куче песка, был весьма точно настроен на критическое значение. «Критическая точка, – пишет А.В. Подлазов, – разделяет хаотическое (докритическое) и упорядоченное (сверхкритическое) состояния... В хаотической фазе... [малое воздей-

ствие пока] еще быстро затухает в пространстве и времени, а в упорядоченной – уже не может ощутимо повлиять на сложившуюся структуру системы. Однако в самой критической точке [и только в ней] малые причины могут приводить к большим следствиям» [1, с. 15–16].

Классической иллюстрацией точки бифуркации является камень, поставленный на вершину горы (рис. 3). В какую сторону скатится камень, чтобы занять устойчивое положение у подножья, то есть каков будет аттрактор системы, зависит от малого (и, весьма вероятно, случайного) воздействия – например, несильного дуновения ветра.

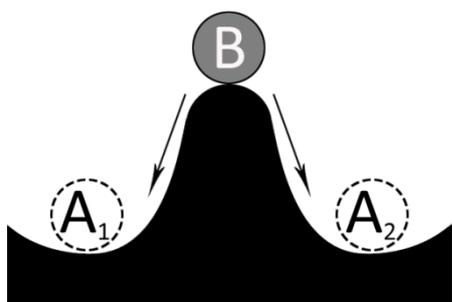


Рис. 3. Камень на вершине горы – пример системы в точке бифуркации (*B*), где/когда происходит выбор одного из конечных устойчивых состояний (аттракторы  $A_1$  и  $A_2$ )

На первый взгляд представляется очевидным, что система чрезвычайно быстро минует точку бифуркации. Во многих случаях это действительно так. Если даже дуновения ветра достаточно, чтобы столкнуть камень вниз, то он сможет удержаться на вершине весьма недолго. Малые воздействия быстро выводят управляющий параметр из критического значения.

Однако, как оказалось, в природе и обществе существует множество систем, которые значительное время пребывают в критическом состоянии, в точке бифуркации.

Что заставляет системы вести себя подобным образом? В мысленном эксперименте с камнем на

горе по умолчанию предполагается, что камень был помещен на вершину неким экспериментатором. Но какой экспериментатор удерживает значение управляющего параметра в критической точке, когда речь заходит о реальных системах? Обнаружилось, что некоторые системы в силу своих внутренних свойств и внешних обстоятельств способны сами настраивать управляющий параметр нужным образом, то есть самоорганизовываться в критическое состояние. Огромный интерес представляют механизмы такой самонастройки. В рамках теории СОК описано множество таковых конкретных механизмов и предпринята попытка выявить их универсальные черты.

Для иллюстрации одного из таких механизмов рассмотрим кучу песка, помещенную на *L*-образную подставку, которую можно произвольно наклонять (рис. 4).

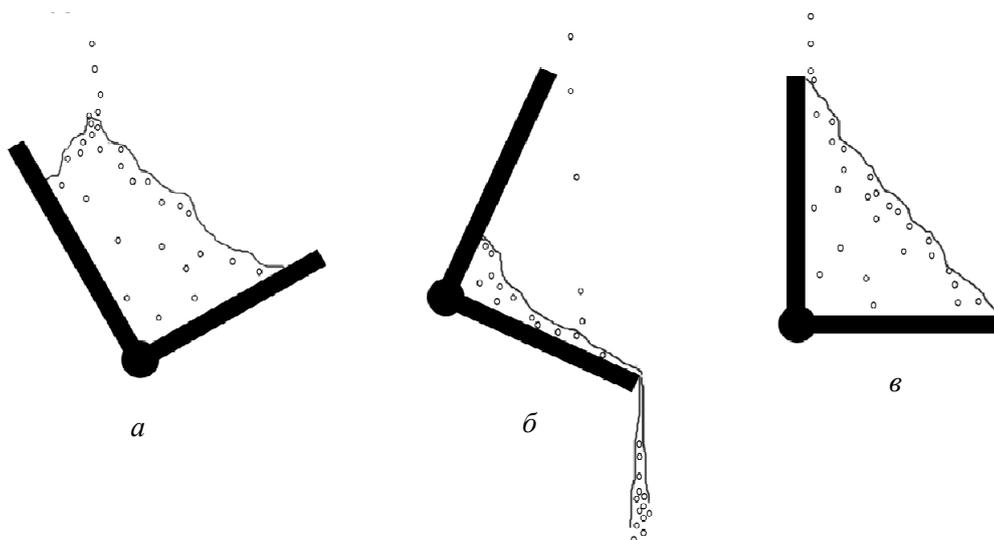


Рис. 4. Модифицированная модель кучи песка: сверхкритическое (*a*), докритическое (*b*) и критическое (*v*) состояния

Рассмотрим сценарии с участием экспериментатора. Если наклон подставки не дает песку ссыпаться вниз (рис. 4, *a*), то куча находится в упорядоченном и стабильном состоянии. Поскольку приток песчинок сверху (извне) невелик, это не влияет существенно образом на систему в обозримом промежутке времени. Если экспериментатор слишком сильно наклонит подставку (рис. 4, *b*), куча перейдет в хаотическое состояние и ссыплется с подставки. В этом случае добавление нескольких песчинок сверху тоже ничего не решает.

Рассмотрим поведение той же кучи песка без экспериментатора (рис. 4, *в*). Критическое состояние существует на границе хаоса и порядка. Немногочисленные песчинки, которые насыпаются сверху, приводят к тому, что куча, хотя и медленно, растет. Наклон увеличивается, то есть управляющий параметр достигает критического значения, когда осыпание только-только начинается. В результате через некоторое время происходит серия оползней разной величины, и, наконец, лавина – песок ссыпается с подставки вниз. Это событие уменьшает кучу и, следовательно, наклон. Однако весьма быстро (за счет небольшого притока песка извне) наклон вновь возрастает – и песок вновь ссыпается. Система, таким образом, сама поддерживает угол наклона в критическом (или почти критическом) состоянии.

Это происходит благодаря сопряжению двух процессов – релаксации (сыпание песка с подставки вниз) и роста напряжения (добавление песчинок). Эту своего рода диалектику СК-систем описывает А.В. Подлазов: «Критическое состояние... не может быть положением статического равновесия, поскольку малые внешние воздействия в его окрестности не могут вызывать больших откликов. То есть система должна пребывать в динамическом равновесии, которое возникает как результат противоборства двух противоположенных тенденций. Обыкновенно одна из них – это некий естественный путь развития системы, а вторая – отбраковка (с возвращением к началу пути) элементов, продвинувшихся по нему слишком далеко, то есть экстремальное правило. При этом существенно, что такая отбраковка продвигает в развитии другие элементы системы благодаря наличию между ними (локального) взаимодействия... Таким образом происходит динамическая стабилизация системы. Однако для стабилизации именно в окрестности критической точки... необходимо, чтобы скорость отбраковки (релаксации) была намного больше развития (возмущения), то есть необходимо разделение временных масштабов» [1, с. 93].

### **Некоторые СК-модели и их социальные смыслы**

Состояние СОК можно с высокой степенью вероятности идентифицировать, обнаружив степенные распределения особого рода в спектрограмме сигнала, который издает система, или в результатах функционирования системы. Констатация факта, что некоторые социальные системы в течение некоторых периодов функционируют в режиме СОК, открывает возможность применять для их изучения СК-модели.

На данный момент разработано огромное множество СК-моделей, подавляющее большинство которых следует отнести к клеточным автоматам (агентно ориентированным моделям, искусственным сообществам). И хотя каждая из них способна описывать широкий круг феноменов и демонстрировать универсальные свойства СК-систем, тем не менее имеется разная степень соответствия той или иной модели некоторому кругу социальных явлений. Основные параметры и элементы модели должны быть таковы, чтобы можно было корректно сопоставить их с параметрами и элементами реальной системы. Только в этом случае возможно получение модельных результатов, которым можно дать качественные интерпретации.

СК-модели создавались главным образом для имитации естественно-научных феноменов, однако многие из них могут быть перенесены и в социогуманитарные изыскания. Пред-

ставим некоторые наиболее успешные и популярные СК-модели и попытаемся описать классы социальных явлений, которые они способны имитировать.

1. *VTW-модель* (модель П. Бака, Ч. Танга и К. Визенфельда) является одним из многочисленных вариантов модели кучи песка. Вброс песчинок в случайные ячейки модельного пространства (двумерная решетка, рис. 5) приводит к увеличению локального наклона, который обозначается числами в ячейках [3, с. 99]. Если число превышает некоторый заданный экспериментатором порог, происходит осыпание (в терминологии Бака – опрокидывание): в исходной ячейке число уменьшается на некоторую величину, а в соседних ячейках (в которые ссыпались песчинки с сильно наклоненного участка) числа увеличиваются. Если в соседних ячейках это приводит к превышению порога, то процесс осыпания продолжается. Избыток песка (то есть лишний наклон), достигнув краев, покидает модель.

1	2	0	2	3
2	3	2	3	0
1	2	4	3	2
3	1	3	2	1
0	2	2	1	2

1	2	0	2	3
2	3	3	3	0
1	3	0	4	2
3	1	4	2	1
0	2	2	1	2

1	2	0	2	3
2	3	3	4	0
1	3	2	0	3
3	2	0	4	1
0	2	3	1	2

Рис. 5. Пример работы VTW-модели: три последовательных состояния модельного пространства

распространения активности пока не будет. Но процесс продолжается, и растет вероятность того, что хотя бы один из соседей уже достиг критического значения..., а следовательно, первое опрокидывание вызовет и второе. Одно опрокидывание следует за другим... По мере дальнейшего добавления песка будут случаться все бóльшие и бóльшие оползни, или лавины, но останутся и относительно мелкие события» [3, с. 101].

Размышляя о «жизни в мире куч песка», П. Бак делает несколько принципиальных замечаний: «Когда куча достигла стационарного критического состояния,... одна песчинка способна вызвать лавину, затрагивающую кучу целиком. Небольшое изменение, которое в других обстоятельствах осталось бы незамеченным, оборачивается катастрофой... Части критической системы нельзя понять, рассматривая их по отдельности. Локальная динамика отражает тот факт, что данная местность – часть целой кучи... В критическом состоянии функциональной единицей является уже не отдельная песчинка, а именно куча песка. Редукционистский подход здесь не имеет смысла. Состояние, в котором находятся элементы системы, характеризуемое, к примеру, локальным наклоном, возникло только потому, что эти элементы являются частями целого» [3, с. 105, 106].

В социогуманитарном предметном пространстве VTW-модель способна имитировать коммуникацию и иные виды социального взаимодействия в совокупности малых групп. В соответствии с условиями модели элементы (люди) имеют возможность взаимодействовать лишь в рамках локальных сообществ/кластеров (коммуницировать только с соседями), но сами сообщества могут связываться через посредство близлежащих кластеров даже с дальними участками системы. Нестабильные (точнее – минимально стабильные) кластеры могут быть разрозненными, но система (если она пребывает в состоянии критичности) балансирует на грани образования суперкластера, когда все сообщества связаны со всеми (хотя и опосредованно). В такой системе отсутствует глобальная коммуникация и механизмы централизованного взаимодействия. Поэтому модель воспроизводит общество, недостаточно структурированное на макроуровне, но хорошо

П. Бак следующим образом описывает поведение модели (пороговое значение он принимает равным 3): «В начале процесса... неустойчивых ячеек нет. Значение... у всех ячеек меньше 3, и песчинки остаются там, куда упали. После большого числа шагов по добавлению песчинок в ячейки решетки высота где-нибудь обязательно превысит значение 3. Вряд ли в любой из четырех соседних ячеек высота тоже достигла 3 так быстро, поэтому

связанное на микроуровне. Социальные феномены, которые могут, таким образом, имитировать ВТW-модель, связаны с трансформацией институтов – главным образом неформальных институтов, таких как традиции, уклады, ценности. Подобные правила социальной игры не подвергаются общему обсуждению, но осмысливаются и практикуются в совокупности малых групп.

В ряде случаев общесистемная коммуникация невозможна в силу формальных запретов или общей неразвитости инфраструктуры, и общество вынуждено коммуницировать в рамках соседских сообществ (например, традиционных общин или подпольных ячеек). Так происходит подготовка к революциям и протестным акциям в отсутствие глобальных коммуникаций типа Интернета или прессы.

ВТW-модель, очевидно, имитирует также и некоторые сетевые эффекты, если предполагается, что люди взаимодействуют преимущественно локально. Подобная ситуация не является исключительной: многие распространенные социальные нормы – конформистские установки, коррупционные принципы, патриархальные традиции и т.п. устаиваются и разрушаются почти исключительно в микрогруппах: в сфере непосредственных контактов, без значимого влияния многомиллионных сетевых пабликов и публичных дебатов.

2. *DR-модель*, предложенная Д. Дхаром и Р. Рамасвами, представляет собой одну из сильно модифицированных песочных моделей. Модельное пространство – двумерная ячеистая структура, свернутая в вертикальный цилиндр. Ряды квадратных ячеек смещены друг относительно друга подобно кирпичной кладке (рис. 6).

Как и в ВТW-модели, каждая ячейка имеет значение; если оно превышает пороговое, равное 2, то ячейка осыпается. Две песчинки из нее переходят в две нижние ячейки, значение каждой из которых увеличивается на единицу. Напряженность инициируется только в верхнем ряду ячеек (верхний край цилиндра), а песок сыпается только вниз. То есть волны напряжения-релаксации распространяются сверху вниз. Одна и та же волна никогда не проходит дважды одну и ту же ячейку. Если ячейка нижнего ряда получает значения выше порогового, то две песчинки покидают модельное пространство. Эти правила генерируют оползни разных размеров, причем по мере работы модели возникают возможности для лавин на все более обширных участках.

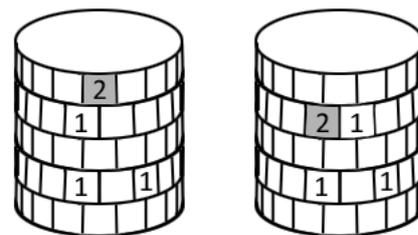


Рис. 6. Пример работы DR-модели: два последовательных состояния модельного пространства

Социальные смыслы DR-модели связаны главным образом с процессами внутри иерархий. Модель позволяет имитировать строго иерархические социальные системы, где управляющие воздействия распространяются исключительно сверху вниз, например прохождение приказов в многозвенных аппаратах государственного, военного и корпоративного управления. В историческом плане модель, возможно, пригодна для имитации реформ «сверху». Естественное ограничение модели – игнорирование откликов «снизу» – от объекта управления или преобразования. Однако нетрудно представить реальные исторические и даже современные системы, для которых также характерно данное ограничение.

3. *Модель лесного пожара*, подобно моделям кучи песка, реализуется на двумерной решетке. В каждой ячейке располагается условное дерево – элемент, который может пребывать в одном из трех состояний: живое дерево (может потенциально поддерживать огонь), горящее дерево (с определенной вероятностью распространяет огонь на соседние элементы, превращается в пепел) и собственно пепел (не способен поддерживать огонь, но с определенной вероятностью опять превращается в дерево). С некоторой частотой в лесу – модельном пространстве – происходят самовозгорания деревьев, что приводит к пожарам и образованию пепелищ –

кластеров, невосприимчивых к огню. Если пепелищ много (недавно состоялись сильные пожары), то случайные возгорания, останавливаясь на границе пепелищ, имеют мало шансов широко распространиться и быстро затухают. Если возгорания не было слишком долго и модельное пространство сплошь заросло деревьями, то любой пожар уничтожит с большой вероятностью весь лес. В зависимости от параметров модели она может пребывать в промежуточном – критическом – состоянии, когда случаются пожары с разным охватом площади. Распределение размеров пожаров в этом случае описывается степенным законом.

Модель лесного пожара является, пожалуй, наиболее популярной в плане симуляции социополитических исторических процессов. Модель демонстрирует механизмы, действующие в возбудимой среде и приводящие к войнам и восстаниям. Страны или повстанцы после очередной вспышки активности на некоторое время оказываются выведенными из игры по разным причинам: смерть, физическое истощение или, напротив, достижение цели – захват желаемых ресурсов, территорий, власти. Но естественные геополитические или внутрисоциальные процессы ведут к восстановлению наступательного/протестного потенциала.

Рассмотрев статистику войн начиная с XV века, Д. Робертс и Д. Тьюкот приходят к выводу: «Можно качественно интерпретировать крушение порядка в мире, уподобив этот процесс возникновению огня в модели лесного пожара. В этой модели иногда возникает пожар, а иногда – нет. Иногда возникает сильный пожар, а иногда – слабый. Но статистика частоты, силы пожаров подчиняется степенному закону. С точки зрения мирового порядка есть небольшие конфликты, которые могут или не могут перерасти в крупные войны. Стабилизирующие и дестабилизирующие влияния, очевидно, весьма сложны. Полученные нами результаты свидетельствуют, что мировой порядок ведет себя как самоорганизованная критическая система, независимая от усилий, предпринимаемых для контроля и стабилизации взаимодействий между людьми и странами» [20, с. 357].

Любопытные исторические параллели проводит А.В. Подлазов: «Модель лесного пожара дает также хорошую аналогию с такими историческими событиями, как войны и эпидемии. Пожар, захвативший некоторую территорию, приводит к тому, что ее ячейки оказываются в одинаковых условиях, то есть синхронизированными... Они в дальнейшем развиваются сходным образом и имеют тенденцию снова вспыхивать одновременно. Эпидемии и войны, разрушая привычный уклад жизни и опустошая значительные территории, также приводят к синхронизации,... [примером которой может служить] объединение Руси под властью Москвы после эпидемии чумы в XIV веке и Куликовской битвы» [1, с. 27].

4. *BS-модель*, или *модель эволюции*, создана совместно П. Баком и К. Снеппеном [27]. Модель Бака–Снеппена представляет собой в самом простом случае кольцо из нескольких элементов, значения которых изменяются по некоторым правилам и воздействуют на соседние элементы (рис. 7).

«Мы решили, – писал П. Бак, – разместить [биологические] виды по кругу. Каждый вид взаимодействует с двумя своими ближайшими соседями... В начале вычислительного эксперимента мы связывали с каждым видом случайное число от 0 до 1 [которое является значением приспособленности]... Затем вид с наименьшей приспособленностью заменялся другим видом [со случайным значением приспособленности]... Приспособленность соседей [выбывшего вида] просто заменялась новым случайным числом между нулем и единицей. В конечном счете наша модель оказалась проще, чем любая модель, придуманная кем-либо когда-либо для чего-либо: случайные числа выстроены по кругу, на каждом шаге наименьшее число и два его соседа заменяются новыми случайными числами. И это все! Такая процедура повто-

ряется снова и снова... Кто сказал, что сложность не может быть простой? Эта простая схема ведет к гораздо более разнообразному поведению, чем мы можем вообразить. Сложность ее поведения резко контрастирует с простотой ее устройства» [3, с. 182–184].

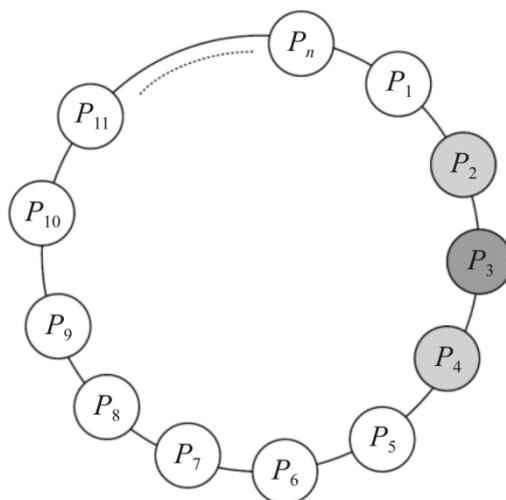


Рис. 7. Модель эволюции (вариант) [36, с. 81]

Если записать, как изменялась приспособленность видов, то получим как небольшие колебания, так и огромных масштабов эволюционные катастрофы (массовые вымирания). Это и есть прерывистая стабильность.

Социальные смыслы модели эволюции, очевидно, связаны с ее способностью описывать конкуренцию взаимозависимых субъектов: например, рыночную конкуренцию между предприятиями, борьбу группировок внутри элиты, борьбу информационных ресурсов за внимание пользователей в Сети и т.п. Любопытно, что «свобода конкуренции» в модели неизбежно влечет за собой массовые вымирания видов – то есть такие ситуации, когда не «выигрывает сильнейший», а проигрывают все. Собственно, способность неограниченной конкуренции в длительной перспективе повышать эффективность производства была поставлена под сомнение математиками и экономистами не раз.

5. *Модель блоков и пружин* базируется на геологической метафоре. Имеются две плиты, одна из которых медленно и равномерно движется и тащит за собой по поверхности неподвижной плиты несколько блоков. Сами блоки связаны своего рода пружинами (рис. 8).

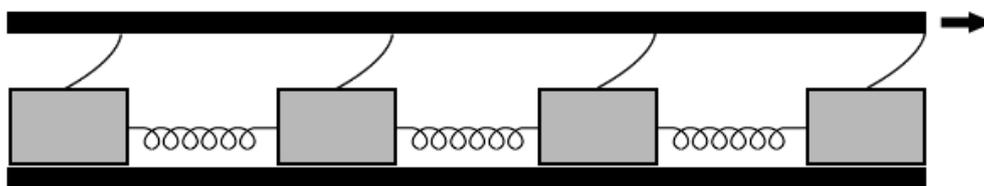


Рис. 8. Модель блоков и пружин, участок модельного пространства (одномерный вариант)

Нижняя плита обладает некоторой шероховатостью, в результате чего блоки движутся неравномерно. Сила трения удерживает блоки некоторое время в неподвижности. Однако в некоторый момент один из блоков, сила воздействия на который верхней плиты превысила силу трения, делает рывок и быстро сдвигается. Это приводит к растягиванию пружины между ним и последующим блоком, который начинает испытывать более сильное воздействие и тоже, воз-

можно, делает рывок. В результате периоды неподвижности сменяются рывками разного масштаба (в такие рывки может быть вовлечено разное количество блоков) от одного до всех. Медленное и равномерное накопление напряжения в системе (движение верхней плиты) генерирует подвижки разного размера, в том числе и всеобщие резкие сдвиги после периодов стабильности.

Модель, как ясно из ее устройства, изначально создавалась для имитации возникновения землетрясений при смещении литосферных плит. Однако она подходит и для имитации разного рода трансформаций социальных сред под воздействием одного драйвера. Примером такой ситуации является давление некоего модернизационного института (государства или «передового класса») на социальные среды, которые являются в определенной мере инертными/архаичными и гетерогенными, то есть создающими социальное трение. Такое трение как препятствует движению/прогрессу, так и обуславливает его скачкообразный характер.

*б. Модели ветвящегося процесса* довольно часто опираются на метафору радиоактивного распада. Например, в рНК-модели модельное пространство представляет собой решетку, некоторые ячейки которой заняты стабильными частицами. Случайным образом добавляется нестабильная частица, которая либо распадается, либо, если сталкивается с другой частицей, вызывает ее распад. Возникшие в результате распада новые частицы также должны занять в соответствии с некоторыми правилами ячейки, где могут опять-таки столкнуться с находящимися там частицами. Черeda распадов продолжается до тех пор, пока все частицы не займут ячейки и поэтому станут стабильными. Если изначальная плотность стабильных ячеек высока (то есть они занимают все или почти все ячейки), то лавина распадов, инициированная одной нестабильной частицей, займет все модельное пространство. Если изначальная плотность частиц низкая, то добавление новых частиц будет вызывать лавины разных размеров – как маленькие, так и большие, – пока, наконец, в модельном пространстве не накопится слишком много частиц и не возникнет всеобщая лавина.

Модели ветвящегося процесса пригодны для имитации распространения/размножения информации в Интернете, в частности в социальных сетях. Репосты в этом случае приводят к многократному отражению исходного сообщения. Наличие большого количества пустых ячеек-пользователей, не чувствительных к сообщению и не распространяющих его – способствует угасанию лавины. Напротив, большая плотность активных репостеров стимулирует взрывообразное продвижение контента.

В социальных науках распространяется сетевой подход [37]. Накоплен значительный опыт имитации сетей посредством агентно ориентированных моделей. Полагаем, наиболее интересные сетевые феномены (такие как спонтанный рост активности пользователей, быстрое распространение некоторых сообщений в масштабе всей Сети и т.п.) могут имитироваться именно СК-моделями.

### **Заключение**

Далеко не все СК-модели хорошо изучены. Тем не менее накоплен достаточно большой объем знаний о принципах функционирования и типах поведения наиболее известных моделей. Эти знания могут применяться в исследованиях, если удастся показать, что та или иная реальная система может быть корректно сопоставлена с некоторой хорошо изученной моделью. Гипотезы в таком случае строятся посредством перенесения модельных свойств на реальные объекты. Такие гипотезы имеют высокие шансы быть подтвержденными эмпирикой.

СК-модели способны, в частности, имитировать условия перехода систем в критическое состояние, возникновение лавин (масштабных социальных трансформаций, революций, мас-

совых движений и т.п.) под воздействием ординарных факторов и несильных импульсов. СК-модели показывают, как микроуровневые правила взаимодействия множества простейших элементов при наличии, в частности, петель обратных причинно-следственных связей могут генерировать сложное нелинейное поведение системы в целом.

Возрастание темпов и рисков социального развития в современном мире представляет собой системный вызов, который стимулировал тренд на изучение нелинейных, внешне неожиданных эффектов социально-политической динамики. Возникло представление о нарушении соразмерности причин и следствий в ходе некоторых общественных трансформаций: в определенных условиях слабые импульсы, будучи правильно приложенными, могут вызывать масштабные последствия. Необходимо научиться предвидеть хотя бы принципиальную возможность подобных эффектов, использовать или просто учитывать их для управления социальной реальностью.

### Список литературы

1. Подлазов А.В. Новые математические модели, методы и характеристики в теории самоорганизованной критичности: дис. ... канд. физ.-мат. наук; Ордена Ленина Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. – М., 2001. – 120 с.
2. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. – New York: W.H. Freeman and Company, 1982. – 468 p.
3. Бак П. Как работает природа: теория самоорганизованной критичности. – М.: УРСС, 2014. – 276 с.
4. Малинецкий Г.Г. Чудо самоорганизованной критичности. Вступительная статья // П. Бак как работает природа: Теория самоорганизованной критичности. – М: URSS, 2014. – С. 13–46.
5. Turcotte D.L. Self-organized criticality // *Reports on Progress in Physics*. – 1999. – Vol. 62. – No. 10. – P. 1377.
6. Turcotte D.L., Rundle J.B. Self-organized complexity in the physical, biological, and social sciences // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2002. – Vol. 99. – No. 1. – P. 2463–2465.
7. Buchanan M. *Ubiquity. The Science of History... or Why the World is Simpler Than We Think*. – London: Weidenfeld & Nicolson, 2000. – 288 p.
8. Brunk G.G. Self-Organized Criticality: A New Theory of Political Behaviour and Some of Its Implications // *British Journal of Political Science*. – 2001. – Vol. 31. – No. 2. – P. 427–445.
9. Brunk G.G. Understanding self-organized criticality as a statistical process // *Complexity*. – 2000. – Vol. 5. – No. 3. – С. 26–33.
10. Brunk G.G. Why Are So Many Important Events Unpredictable? Self-Organized Criticality as the “Engine of History” // *Japanese Journal of Political Science*. – 2002. – Vol. 3. – No. 1. – P. 25–44.
11. Brunk G.G. Why Do Societies Collapse? A Theory Based on Self-Organized Criticality // *Journal of Theoretical Politics*. – 2002. – Vol. 14. – No. 2. – P. 195–230.
12. Mathews M.K., White M.C., Long R.G. Why Study the Complexity Sciences in the Social Sciences? // *Human Relations*. – 1999. – Vol. 52. – No. 4. – С. 439–462.
13. Frigg R. Self-organised criticality – what it is and what it isn't // *Studies in History and Philosophy of Science Part A*. – 2003. – Vol. 34. – No. 3. – С. 613–632.
14. Бородкин Л.И. Методология анализа неустойчивых состояний в политико-исторических процессах // *Международные процессы*. – 2005. – Т. 3, № 7. – С. 4–16.
15. Andergassen R., Nardini F., Ricottilli M. Innovation Waves, Self-organized Criticality and Technological Convergence // *Journal of Economic Behavior & Organization*. – 2006. – Vol. 61. – No. 4. – С. 710–728.

16. Clauset A., Shalizi C., Newman M. Power-Law Distributions in Empirical Data // *SIAM Rev.* – 2009. – Vol. 51. – No. 4. – P. 661–703.
17. Pinto C.M.A., Mendes Lopes A., Machado J.A.T. A review of power laws in real life phenomena // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation.* – 2012. – Vol. 17. – No. 9. – С. 3558–3578.
18. Guastello S.J. *Chaos, Catastrophe, and Human Affairs: Applications of Nonlinear Dynamics To Work, Organizations, and Social Evolution.* – Abingdon: Psychology Press, 2013. – 456 с.
19. Kron T., Grund T. Society as a Self-Organized Critical System // *Cybernetics & Human Knowing.* – 2009. – Vol. 16. – No. 1–2. – С. 65–82.
20. Roberts D.C., Turcotte D.L. Fractality and Self-Organized Criticality of Wars // *Fractals.* – 1998. – Vol. 6. – No. 4. – С. 351–358.
21. Cederman L.-E. Modeling the Size of Wars: From Billiard Balls to Sandpiles // *American Political Science Review.* – 2003. – No. 1. – С. 135–150.
22. Biggs M. Strikes as Forest Fires: Chicago and Paris in the Late Nineteenth Century // *American Journal of Sociology.* – 2005. – Vol. 110. – No. 6. – С. 1684–1714.
23. Universal Bursty Behaviour in Human Violent Conflicts / S. Picoli, M. del Castillo-Mussot, H.V. Ribeiro, E.K. Lenzi, R.S. Mendes // *Scientific Reports.* – 2014. – Vol. 4. – P. 1–3.
24. Shimada I., Koyama T. A theory for complex system's social change: an application of a general 'criticality' model // *Interdisciplinary Description of Complex Systems.* – 2015. – Vol. 13. – No. 3. – P. 342–353. DOI: 10.7906/indecs.13.3.1
25. Thietart R.-A. Strategy dynamics: Agency, path dependency, and self-organized emergence // *Strategic Management Journal.* – 2016. – Vol. 37. – No 4. – P. 774–792. DOI: 10.1002/smj.2368
26. Bak P. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality.* – New York: Copernicus, 1996. – 212 p.
27. Evolution as a self-organized critical phenomenon / K. Sneppen, P. Bak, H. Flyvbjerg, M.H. Jensen // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* – 1995. – Vol. 92. – No. 11. – P. 5209–5213.
28. Бородкин Л.И. Бифуркации в процессах эволюции природы и общества: общее и особенное в оценке И. Пригожина // *Информ. бюл. ассоциации «История и компьютер».* – 2002. – № 29. – С. 143–157.
29. Бородкин Л.И. Моделирование исторических процессов: от реконструкции реальности к анализу альтернатив. – СПб.: Алетейя, 2016. – 304 с.
30. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В. Историческая динамика. Взгляд с позиций синергетики [Электронный ресурс] / Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2004. – № 85. – С. 1–16. – URL: [http://keldysh.ru/papers/2004/prep85/prep2004\\_85.html](http://keldysh.ru/papers/2004/prep85/prep2004_85.html).
31. Сморгун Л.В. Сложность в политике: некоторые методологические направления исследований // *Вестн. С-Петербург. ун-та. Сер. 6: Философия. Культурология. Политология. Право. Международные отношения.* – 2012. – № 4. – С. 90–101.
32. Zhukov D.S., Kanishchev V.V., Lyamin S.K. Application of the Theory of Self-Organized Criticality to the Investigation of Historical Processes // *Sage Open.* – 2016. – Vol. 6. – Iss. 4. DOI: 10.1177/2158244016683216
33. Жуков Д.С. Эвристические возможности теории самоорганизованной критичности в исследовании террористической и экстремистской активности // *PolitBook.* – 2016. – № 1. – С. 6–26.

34. Жуков Д.С., Канищев В.В., Лямин С.К. Исследование интенсивности крестьянских волнений в Европейской России во второй половине XIX в. средствами теории самоорганизованной критичности // Историческая информатика. – 2017. – № 1. – С. 38–51. DOI: 10.7256/2017.1.22145

35. Опыт изучения истории российского хлебного рынка средствами теории самоорганизованной критичности / Д.С. Жуков, В.В. Канищев, С.К. Лямин, Ю.А. Мизис // Историческая информатика. – 2015. – № 1. – С. 59–72.

36. Клименко И.Д., Иванов В.Э. Спектральный анализ шумовой модели Бака – Снеппена // Информационные технологии XXI века: сб. науч. тр. / ред. Е.А. Шеленок. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – С. 79–87.

37. Сморгун Л.В. Сетевой подход к политике и управлению // Полис. Политические исследования. – 2001. – № 3. – С. 103–112.

## References

1. Podlazov A.V. New mathematical models, methods, and characteristics in the theory of self-organized criticality [New mathematical models, methods and characteristics in the theory of self-organized criticality]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow order of Lenin Institute of applied mathematics M.V. Keldysh, 2001, 120 p.
2. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. New York, W.H. Freeman and Company, 1982, 468 p.
3. Bak P. Kak rabotaet priroda: teoriia samoorganizovannoi kritichnosti [How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality]. M, URSS, 2014, 276 p.
4. Malinetskii G.G. Chudo samoorganizovannoi kritichnosti. Vstupitel'naiia stat'ia [The miracle of self-organized criticality. Introductory article]. Bak P. Kak rabotaet priroda: teoriia samoorganizovannoi kritichnosti. M, URSS, 2014, pp. 13–46.
5. Turcotte D.L. Self-organized criticality. *Reports on Progress in Physics*, 1999, vol. 62, no. 10, pp. 1377.
6. Turcotte D.L., Rundle J.B. Self-organized complexity in the physical, biological, and social sciences. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, vol. 99, no 1, pp. 2463–2465.
7. Buchanan M. Ubiquity. The Science of History... or Why the World is Simpler Than We Think. London, Weidenfeld & Nicolson, 2000, 288 p.
8. Brunk G.G. Self-Organized Criticality: A New Theory of Political Behaviour and Some of Its Implications. *British Journal of Political Science*, 2001, vol. 31, no 2, pp. 427–445.
9. Brunk G.G. Understanding self-organized criticality as a statistical process. *Complexity*, 2000, vol. 5, no 3, pp. 26–33.
10. Brunk G.G. Why Are So Many Important Events Unpredictable? Self-Organized Criticality as the "Engine of History". *Japanese Journal of Political Science*, 2002, vol. 3, no. 1, pp. 25–44.
11. Brunk G.G. Why Do Societies Collapse? A Theory Based on Self-Organized Criticality. *Journal of Theoretical Politics*, 2002, vol. 14, no. 2, pp. 195–230.
12. Mathews M.K., White M.C., Long R.G. Why Study the Complexity Sciences in the Social Sciences? *Human Relations*, 1999, vol. 52, no. 4, pp. 439–462.
13. Frigg R. Self-organised criticality – what it is and what it isn't. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*. 2003, vol. 34, no. 3, pp. 613 – 632.
14. Borodkin L.I. Metodologiya analiza neustoiichivyykh sostoianii v politiko-istoricheskikh protsessakh [Methodology of analysis of unstable states in politico-historical processes]. *Mezhdunarodnye protsessy*, 2005, vol. 3, no. 7, pp. 4–16.
15. Andergassen R., Nardini F., Ricottilli M. Innovation Waves, Self-organized Criticality and Technological Convergence. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 2006, vol. 61, no. 4, pp. 710–728.
16. Clauset A., Shalizi C., Newman M. Power-Law Distributions in Empirical Data. *SIAM Rev.*, 2009, vol. 51, no. 4. P. 661–703.
17. Pinto C.M.A., Mendes Lopes A., Machado J.A.T. A review of power laws in real life phenomena. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, vol. 17, no. 9, pp. 3558–3578.
18. Guastello S.J. Chaos, Catastrophe, and Human Affairs: Applications of Nonlinear Dynamics To Work, Organizations, and Social Evolution. Abingdon, Psychology Press, 2013, 456 p.
19. Kron T., Grund T. Society as a Self-Organized Critical System. *Cybernetics & Human Knowing*, 2009, vol. 16, no. 1-2, pp. 65–82.
20. Roberts D.C., Turcotte D.L. Fractality and Self-Organized Criticality of Wars. *Fractals*, 1998, vol. 6, no. 4, pp. 351–358.
21. Cederman L.-E. Modeling the Size of Wars: From Billiard Balls to Sandpiles. *American Political Science Review*, 2003, no. 1, pp. 135–150.
22. Biggs M. Strikes as Forest Fires: Chicago and Paris in the Late Nineteenth Century. *American Journal of Sociology*, 2005, vol. 110, no. 6, pp. 1684–1714.
23. Picoli S., Castillo-Mussot M. del, Ribeiro H. V., Lenzi E. K., Mendes R. S. Universal Bursty Behaviour in Human Violent Conflicts. *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, pp. 1–3.
24. Shimada I., Koyama T. A theory for complex system's social change: an application of a general 'criticality' model. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 342–353. DOI: 10.7906/indecs.13.3.1
25. Thietart R.-A. Strategy dynamics: Agency, path dependency, and self-organized emergence. *Strategic Management Journal*, 2016, vol. 37, no. 4, pp. 774–792. DOI: 10.1002/smj.2368
26. Bak P. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. New York, Copernicus, 1996, 212 p.
27. Sneppen K., Bak P., Flyvbjerg H., Jensen M.H. Evolution as a self-organized critical phenomenon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1995, vol. 92, no. 11, pp. 5209–5213.

28. Borodkin L.I. Bifurkatsii v protsessakh evoliutsii prirody i obshchestva: obshchee i osobennoe v otsenke I. Prigozhina [Bifurcations in the processes of the evolution of nature and society: general and special in the evaluation of I. Prigozhin]. *Informatsionnyi biulleten' assotsiatsii «Istoriia i komp'iuter»*, 2002, no. 29, pp. 143-157.

29. Borodkin L.I. Modelirovanie istoricheskikh protsessov: ot rekonstruktsii real'nosti k analizu al'ternativ [Modeling of historical processes: from the reconstruction of reality to the analysis of alternatives]. Saint Petersburg, Aleteiia, 2016, 304 p.

30. Kurdiunov S.P., Malinetskii G.G., Podlazov A.V. Istoricheskaia dinamika. Vzgliad s pozitsii sinergetiki [Historical dynamics. A view from the standpoint of synergetics]. *Preprinty IPM im. M.V.Keldysha*, 2004, no. 85, pp.1-16, available at: [http://keldysh.ru/papers/2004/prep85/prep2004\\_85.html](http://keldysh.ru/papers/2004/prep85/prep2004_85.html) (accessed 10 December 2017)

31. Smorgunov L.V. Slozhnost' v politike: nekotorye metodologicheskie napravleniia issledovaniia [Difficulty in politics: some methodological directions of research]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 6: Filosofii. Kul'turologiia. Politologiia. Pravo. Mezhdunarodnye otnosheniia*, 2012, no. 4, pp. 90-101.

32. Zhukov D.S., Kanishchev V.V., Lyamin S.K. Application of the Theory of Self-Organized Criticality to the Investigation of Historical Processes. *Sage Open*, 2016, vol. 6, iss. 4. DOI: 10.1177/2158244016683216

33. Zhukov D.S. Evristicheskie vozmozhnosti teorii samoorganizovannoi kritichnosti v is-sledovanii terroristicheskoi i ekstremistskoi aktivnosti [Heuristic possibilities of the theory of self-organized criticality in the study of terrorist and extremist activity]. *PolitBook*, 2016, no. 1, pp. 6-26.

34. Zhukov D.S., Kanishchev V.V., Lyamin S.K. Issledovanie intensivnosti krest'yanskikh volnenij v Evropejskoj Rossii vo vtoroj polovine XIX v. sredstvami teorii samoorganizovannoi kritichnosti [A study of the intensity of peasant unrest in European Russia in the second half of XIX using the theory of self-organized criticality]. *Istoricheskaya informatika*, 2017, no. 1, pp. 38-51. DOI: 10.7256/2017.1.22145

35. Zhukov D.S., Kanishchev V.V., Lyamin S.K. Mizis YU.A. Issledovanie intensivnosti krest'ianskikh volnenii v Evropeiskoi Rossii vo vtoroi polovine XIX v. sredstvami teorii samoorganizovannoi kritichnosti [Experience in studying the history of the Russian grain market using the theory of self-organized criticality]. *Istoricheskaya informatika*, 2015, no. 1, pp. 59-72.

36. Klimenko I.D., Ivanov V.E. Spektral'nyi analiz shumovoi modeli Baka-Sneppena [Spectral analysis of the Buck-Sneppen noise model]. *Informatsionnye tekhnologii XXI veka*. Habarovsk, Tihookeanskij gosudarstvennyj universitet, 2015, pp. 79-87.

37. Smorgunov L.V. Setevoi podkhod k politike i upravleniiu [Network approach to policy and management]. *Polis. Politicheskie issledovaniia*, 2001, no. 3, pp. 103-112.

Получено: 12.12.2017

Принято к печати: 26.12.2017