

В сборник "Управление в социально-экономических системах"
Раздел 1. Особенности социально-экономических систем

Устойчивость открытых макроэкономических систем

Урицкая О.Ю.

Устойчивость экономической системы проявляется в ее способности сохранять или поддерживать ожидаемый режим функционирования, несмотря на действующие возмущения. В широком смысле это свойство означает сохранение значений экономических параметров в ожидаемых рамках благодаря постоянному действию внутренних и внешних управляющих факторов, что проявляется во флуктуациях наблюдаемых экономических переменных. Например, на открытом рынке цены флуктуируют под воздействие спроса, предложения, нормативных ограничений, правил и т.п. В более узком, математическом смысле устойчивость означает способность системы к возвращению в исходное равновесное состояние при отклонениях от этого состояния, выраженных в изменении параметров либо переменных описания.

Нарушение устойчивости экономической системы проявляется в *критических* и *кризисных* событиях – резких изменениях значений наблюдаемых переменных (и состояния системы в целом) при плавном изменении управляющих параметров. Наиболее опасны долговременные нарушения устойчивости, сопровождающиеся глубокой перестройкой структуры и поведения системы. В то же время, обратимые и кратковременные неустойчивые состояния рассматриваются в литературе как необходимое условие для прогрессивного развития системы. Таким образом, можно говорить о локальной (вблизи равновесной траектории) и глобальной (общей в среднем) устойчивости системы.

Основными видами устойчивости экономических систем считаются равновесная устойчивость, стационарный режим и гомеостазис [15].

Равновесная устойчивость – ситуация, характеризующаяся взаимодействием разнонаправленных сил, так что наблюдаемые свойства и параметры экономической системы остаются неизменными. С точки зрения свойств рыночной системы равновесие – это состояние системы, характеризующееся сбалансированностью спроса и предложения.

С точки зрения воздействующих на систему сил говорят о принципе устойчивости, который используется в теории игр в качестве принципа оптимальности решения и относится к моделям рационального поведения (стратегий) игроков. Устойчивое состояние системы в этом случае либо предполагается априори при построении модели, либо описывается через количественные соотношения управляющих факторов, что требует перечисления и числовой (количественной и вероятностной) оценки каждого и всех управляющих факторов. Этот принцип требует соблюдения чрезвычайно жестких условий и ограничений и, в конечном счете, отражает лишь

абстрактную ситуацию, не имеющую отношения к реальным экономическим системам.

Основными недостатками подхода к определению устойчивости системы с точки зрения равновесия являются его статичность (в центре внимания находится лишь точка равновесия), линейность, предполагающая прямо пропорциональный отклик системы на внешнее воздействие или внутреннее изменение, и детерминизм. В литературе констатируется факт, что сложный экономический процесс не может быть равновесным, и неравновесные стохастические модели могли бы более адекватно отражать реальные экономические ситуации. Однако в рамках балансовых и игровых моделей невозможно реализовать нелинейный динамический подход [17], и потому с их помощью не описываются эволюционные стохастические процессы, сопровождающиеся временной или полной потерей устойчивости системы, приводящей к кризису.

Устойчивость в стационарном режиме допускает динамику в форме циклического повторения одной и той же последовательности состояний. Наблюдение циклических зависимостей в динамических процессах связано с ограниченностью применяемых математических методов, не учитывающих стохастические составляющие процесса, которые обычно относили к ошибкам измерения, тогда как в действительности они являются существенной частью механизма саморегуляции системы. Например, циклы конъюнктуры Кондратьева и его выводы о существовании наложенной цикличности экономического развития при более точном анализе непрерывно отслеживаемых параметров, который позволяет современная вычислительная техника, оказались проявлением статистической масштабной инвариантности, свойственной фрактальным временным рядам. Поэтому на сегодняшний день стационарный режим как вид устойчивости системы не связывают со сложными экономическими системами, а методика оценки устойчивости и моделирования динамических процессов на основе выявления циклов не используется в анализе систем макроуровня, так как не оправдывает себя в построении надежных долгосрочных прогнозов [24, 29, 30, 32, 50, 71].

Устойчивость в режиме гомеостазиса – наиболее близкая к реальным экономическим задачам форма равновесия, обеспечивающая состояние стабильное функционирование открытой динамической макроэкономической системы во взаимодействии со средой [15]. Гомеостатическое равновесие трактуется как неизменность существенных параметров системы при изменении внешних факторов. Такой подход является наиболее близким к специфике сложных самоорганизующихся экономических систем, так как предполагает их самоподстройку системы как к сильным, так и слабым воздействиям, и допускает возможность устойчивого неравновесного состояния системы. Гомеостатическая интерпретация устойчивости согласуется с выводами теории эффективного рынка, заключающимися в том, что вся существующая информация о его состоянии в каждый момент заложена в текущих значениях паритетных цен.

Понятие гомеостатического равновесия пришло в экономику сравнительно недавно, и соответственный математический аппарат только начинает разрабатываться, так как требует учета не только основных, с точки зрения традиционного экономического моделирования, управляющих факторов, но и всей дополнительной информации, содержащейся в детальной форме временных рядов, в которой, согласно теории эффективного рынка, она заложена.

Пристальное внимание к проблеме равновесия в экономике уделялось еще основателями математической школы политической экономии – О.Курно, Л.Вальрасом, В.Парето, А.Вальдом и др. [19, 28-31]. При изучении рыночного равновесия, находившегося в центре их внимания, они ограничивались статическим приближением. Одним из первых экономистов, уделявших необходимое внимание фактору времени в определении равновесного режима экономических процессов, стал один из лидеров кембриджской школы А.Маршалл. Им отмечалось, что даже в стабильно функционирующей экономике динамика рыночных цен имеет сложный характер и подвержена различным факторам в зависимости от рассматриваемого временного интервала. Если в краткосрочном периоде цены формируются в основном под влиянием спроса, то в долгосрочном плане большую роль приобретает изменения предложения. Более завершённую форму понятие о динамическом равновесии в экономической системе приобрело в работах Дж.Хикса, одного из преемников Маршалла. Однако Хикс рассматривал экономическую динамику в упрощённом виде как последовательный ряд состояний статического равновесия [8, 49].

Принципиально новый этап и уровень научного анализа равновесия в экономике начался с работ П.Самуэльсона. Согласно его подходу, экономическая наука базируется на двух гипотезах: экономического максимума и экономического равновесия. Они взаимосвязаны: экономическое равновесие предполагает существование некоего "максимума", к которому стремится система. Равновесие по Самуэльсону представляет собой устойчивое состояние, при котором имеет место тенденция к саморегулированию. По своей сущности оно динамично и гомеостатично. Стационарное же состояние возникает лишь в упрощённых моделях. Если предшественники Самуэльсона выводили динамику из нарушения статики, то он провозгласил статику вырожденным случаем динамики. Самуэльсона рассматривают также как одного из главных представителей течения неоклассического синтеза – попытки объединения идей экономического классицизма с кейнсианством, получившей впоследствии свое развитие в теориях капитала Фишера и Найта [8,19].

Трудами этих и других экономистов послевоенного поколения было окончательно подтверждено, что закономерности поддержания равновесия в финансово-экономической системе могут быть выявлены лишь при анализе ее временной эволюции. Так, например, количественный анализ взаимосвязи цен и предложения товаров требует учета запаздывания во времени. Более того, было показано, что в динамической макроэкономической системе не постоянны и темпы изменения переменных. Экономические процессы имеют нелинейный

самоорганизующийся характер, и его исследование требует соответствующего математического аппарата, создание которого, по существу, только начинается.

В настоящее время учение об экономическом равновесии вступило в новую фазу своего развития. Направление этого развития обусловлено несколькими факторами: усложнением и глобализацией мировой экономики, внедрением в экономическую науку современных математических методов нелинейной динамики и статистической физики, а также появлением новейших компьютерных технологий, делающих возможным наблюдение и исследование сложных явлений и процессов непрерывно во времени.

1. Динамическое равновесие макроэкономической системы и информационная эффективность рынка

Теория эффективного рынка – одна из общепринятых финансовых парадигм, согласно которой данный рынок считается эффективным, если цены на нем быстро и адекватно реагируют на информацию об изменениях конъюнктуры спроса и предложения. Способность рынка отслеживать в реальном времени всю существенную экономическую информацию является условием поддержания его динамического равновесия.

Различают три формы информационной эффективности рынков: слабую, среднюю и сильную [4]. При слабой форме эффективности последовательные изменения цены не зависят один от другого, что делает невозможным предсказание будущего движения цены, опираясь лишь на историю рынка. Отсюда, в частности, следует невозможность систематического получения выгоды на бирже с помощью одних только методов технического анализа. Рыночная эффективность в средней форме означает, что цены рынка полностью и в любое время отражают не только предысторию биржевых котировок, но и всю остальную публичную информацию (публикуемые отчеты, законы и т.п.) о состоянии рынка. Эффективность рынка проявляется в сильной форме, если его цены отражают как публичную, так и частную информацию (например, информацию, полученную от государственных служащих).

Исключительная важность теории эффективного рынка в эпоху компьютеризации объясняет растущий в последние годы интерес к роли экономической информации. Согласно теории Р.Лукаша [8,15,19], исследовавшего фундаментальные последствия фактора рациональных ожиданий на устойчивость макроэкономических систем, экономическая устойчивость требует, чтобы субъекты экономики использовали всю доступную им информацию, не совершая при этом систематических ошибок при принятии решений. Работы Лукаша и ряда других экономистов (Т.Сарджентома и Н.Уолесса) существенно расширяют область применения теории эффективного рынка в ее сильной форме, показывая, что динамическое равновесие макроэкономических систем предполагает выполнение тех же условий, что и равновесие финансовых рынков. В частности, выведенные ими критерии предполагают совершенную гибкость всех цен, так что рынки "расчищаются" практически мгновенно в любой момент (условие ликвидности)

[4,17]. Расчистка рынка означает установление равновесных цен, при которых избыточный спрос исчезает. Причину циклических изменений экономики последователи теории эффективного рынка и рациональных ожиданий видят в экзогенных для самой экономики, случайных для нее воздействиях. Они также объясняют существующие трудности управления макроэкономическими системами: поскольку ожидания экономических субъектов базируются на той же информации, что и ожидания политиков, эти субъекты ведут себя так, чтобы нейтрализовать меры правительственного давления.

Закономерности распространения и использования информации в экономике являются, таким образом, краеугольным камнем теории эффективного рынка и рациональных ожиданий. Лежащие в основе этих концепций допущение о том, что информация в обществе может распространяться беспрепятственно, ее обработка не требует затрат ни денег, ни времени, а реакция всех участников рынка может быть мгновенной, еще десять лет назад представлялось как далекая от жизни абстракция. Однако благодаря бурному развитию информационных технологий, интернета и основанных на них систем электронных торгов перечисленные допущения все более сближаются с реальностью.

Основы учения об "экономике информации" были заложены Дж. Стиглером. Согласно его модели [41], неопределенность будущего, фигурирующая в той или иной форме в построениях многих экономистов, следует трактовать как неинформированность участников экономического процесса. Степень неопределенности может быть снижена приобретением значимой информации, однако это требует затрат на сбор данных и их обработку. Принимаемые в реальной жизни решения не всегда оптимальны ввиду того, что затраты на поиск и осмысление информации, необходимой для достижения оптимума, могут превышать возможный выигрыш от его достижения. Очевидно, что при снижении стоимости обработки экономической информации, которое отмечается в последние годы, а также все большей ее доступности, возможность достижения теоретического оптимума по Стиглеру становится все более реальным. Следует, однако, отметить, что это справедливо лишь в отношении долговременной динамики макроэкономических систем. Так, например, данные о внутрисуточных колебаниях биржевых котировок является платной информацией, распространяемой специализированными биржевыми агентствами, в то время как среднесуточные значения этих котировок, как правило, предоставляются теми же агентствами на бесплатной основе.

Из современных работ в области информационной экономики следует отметить исследования Дж. Мирлеса и У. Викри, обнаруживших важную роль информационных асимметрий при взаимодействии экономических субъектов [8,19,41].

Развитие идеи о динамическом равновесии экономических систем в области финансового сектора экономики привело к появлению теории управления портфелями Марковица [15], а так же анализа равновесия финансовых рынков Мертона и Шарпа [4,15], включающей методики

оценивания финансовых активов. Необходимо отметить, что все эти теории, ныне широко используемые в финансовой математике, в явной или неявной форме исходят из предположения о марковском характере изменения рыночных котировок. При этом постулируется, что движение цен в каждый момент времени зависит только от их предыдущего значения и не зависит от ценовых изменений в более ранние моменты времени. Следовательно, никакая историческая информация не может улучшить прогноз биржевого показателя. Таким образом, свойство марковости в точности совпадает с положениями слабой формой теории эффективного рынка.

Предположение о марковости динамики биржевых цен, сформулированная в форме модели геометрического броуновского движения, позволило Р.Мертону, Ф.Блэку и М.Скоулзу разработать теорию производных финансовых инструментов (деривативов), применимую к исследованию динамики фондовых и валютных рынков [15,98]. В модели ценообразования Блэка-Скоулза определяющую роль играет значение волатильности, то есть статистической подвижности финансового показателя. В исходной формулировке модели волатильность принимается за постоянную величину, оцениваемую на основе усреднения логарифмических приращений цены, значения которых полагаются полностью некоррелированными. В последствии было обнаружено, что это допущение в общем случае неверно, и построение адекватной статистической модели волатильности и ее прогноз остается важной задачей в современных теориях оценивания опционов.

Изучению связи информационной эффективности валютных рынков с динамической устойчивостью макроэкономических систем посвящены работы Р.Манделла и Дж.Флеминга, заложившие теоретический базис для создания единой европейской валютной зоны. Р.Манделлом была установлена взаимосвязь денежной и фискальной политики с системой обменного курса, а также с международной торговлей и потоками капитала [4,19, 65, 84]. Согласно его подходу валютный курс является важнейшей количественной характеристикой состояния макроэкономической системы. Им также исследованы монетарные и фискальные инструменты управления обменным курсом, а также обоснованы преимущества модели плавающих курсов национальных валют. Проведенный им анализ стабильности мировой валютной системы показал, что жесткая кредитно-денежная политика центральных банков по ограничению валютных колебаний, как правило, не способствует предотвращению валютных кризисов. В формулировке Р.Манделла кризис означает такое нарушение равновесия финансово-экономической системы, которое угрожает подорвать сложившееся соотношение параметров, считающихся основой ее стабильности [8]. Он также определяет понятие коллапса, под которым понимается полный слом сложившегося порядка в макроэкономической системе, разрушения ее институциональной структуры, при котором теряют смысл описывающие эту структуру параметры. Кризис можно считать предвестником коллапса, который наступает в двух случаях: когда внутренние параметры системы достигают некоторых граничных значений либо когда механизм управления не позволяет обеспечить равновесие

системы. В обоих случаях ее динамика становится неустойчивой. Проблему валютного кризиса Р.Манделл рассматривает как задачу принятия превентивных мер, страхующих макроэкономическую систему от перехода к коллапсу, то есть обеспечивающих ее долговременное устойчивое функционирование.

Понимание механизмов валютных кризисов особенно актуально для систем плавающих валютных курсов. В таких системах валютный фактор приобрел столь большое значение и оказывает столь быстрое воздействие на национальные экономики отдельных государств, что его справедливо относят к разряду стратегических факторов глобализации мирового хозяйства.

На рынке FOREX отчетливо проявляется отмеченная выше тенденция совершенствования информационного доступа и средств накопления и обработки информации [4,8]. В 70-годах валютный рынок в основном имел дело с данными, фиксируемыми через большие временные интервалы (от недели до года), в 80-х годах появилась возможность анализа ежедневных данных, а в 90-х был произведен переход к внутрисуточному анализу, обусловленный резким развитием компьютерной техники повышением эффективности средств записи, хранения и обработки статистической информации, поступающей непрерывным образом. Все эти факторы сделали возможным эффективное отслеживание текущего состояния международного валютного рынка. В то же время, национальные валютные системы могут обнаруживать существенные отклонения от эффективного состояния. Как показано в настоящей работе, такие отклонения являются одним из индикаторов предкризисной динамики.

Одним из следствий теории эффективного рынка является самоорганизующийся характер динамического равновесия в макроэкономических системах. Применительно к национальным валютным системам это означает невозможность целенаправленного воздействия на колебания плавающих обменных курсов в периоды крупномасштабных валютных кризисов, что неоднократно подтверждалось на практике [4,23,25]. Так, например, Банк Англии для поддержания курса фунта стерлингов с июня по сентябрь 1992 года безуспешно тратил около 40 млрд.долл. ежемесячно. Центральный Банк Швеции в этот же период продал на валютном рынке 26 млрд.долл. Годом позже Банк Франции за один день (30 июля 1993 года) истратил из своих валютных резервов 60 млрд.долл., пытаясь поддержать франк в пределах лимитов Европейской валютной системы. 3 марта 1995 года Центральные банки пятнадцати западных стран, стремясь поддержать курс доллара по отношению к йене, осуществили валютные интервенции в громадных размерах. За период с июня по 17 августа 1998 года для поддержания курса рубля Центральный Банк России продал почти 13 млрд. долл. Ни в одном из перечисленных предпринятых мер не привели к желаемому изменению в сложившихся тенденциях динамики обменных курсов.

В то же время, проявилась отчетливая тенденция валютных систем к самоорганизации, не зависящая от усилий центробанков, благодаря которой в периоды после резкого снижения курса национальной валюты, как правило,

наблюдалось ее реальное укрепление [17]. Так, в период после Азиатского кризиса 1997 года в Таиланде реальный валютный курс вырос примерно на 25%, в Индонезии – на 40%, в Южной Корее – на 20%. При анализе причин крупномасштабных валютных кризисов второй половины 1990-х годов в официальном докладе директора МВФ было подчеркнуто, что одной из их причин стало снижение устойчивости национальных валютных систем из-за применявшейся политики управляемых валютных курсов [20,69].

Таким образом, исследование устойчивости гомеостатического равновесия макроэкономических систем является актуальной задачей современного системного анализа. Выявление закономерностей развития и определение численных критериев такого состояния относится к наиболее важным целям экономической математики, от успеха достижения которых зависит эффективность планирования и управления экономическими процессами, возможность прогнозирования и предупреждения финансовых кризисов, и, в конечном счете, стабильность экономики государства в целом.

2. Экономический кризис как катастрофа в большой интерактивной системе

Согласно современной классификации, макроэкономическая система, как и все уровни ее иерархической организации, относится к классу больших интерактивных систем (БИС) [2, 5, 22, 27, 42,43]. БИС являются сложными, вероятностными и динамическими системами с управлением, обладающими определенной самостоятельностью, возможностями саморегулирования и самоорганизации. Отличительной особенностью БИС являются нелинейные взаимодействия большого числа элементов, относящихся к различным уровням иерархии. Вследствие действия внешних и внутренних факторов динамика параметров таких систем имеет стохастический вид и, как правило, не может быть описана аналитически. Стохастической динамикой обладают многие экономические показатели, отражающие суммарное взаимодействие процессов функционирования БИС: показатели производства, потребления, накопления, обмена и т.д., такие как биржевые цены и индексы, обменные курсы валют, налоговые поступления в бюджет и т.п.

Устойчивость БИС при ее взаимодействии со средой является результатом непрерывной самоподстройки. Быстро реагируя на изменения спроса и других условий экономической конъюнктуры, такая система восстанавливает и поддерживает свое динамическое равновесие, которое реализуется в режиме гомеостаза [15].

Наиболее существенным проявлением нарушения устойчивости в системах рассматриваемого класса являются критические и кризисные события – резкие изменения фазового состояния системы при плавном изменении управляющих параметров. Эти события могут быть обратимыми (критические флуктуации [89]) и необратимыми (кризисы), сопровождающиеся глубокой перестройкой структуры и поведения БИС [1,15,104]. В макроэкономике примерами нарушения системной устойчивости являются финансовые кризисы

и обвалы рынков, а также нарушения стационарных режимов функционирования системы. Их предсказание и предотвращение является одной из важнейших задач.

При анализе причин финансовых кризисов 1990-х годов, охвативших многие регионы мира и затронувших страны Юго-Восточной Азии, Южной Америки и Восточной Европы, включая кризис в России в августе 1998 года [4,17], основное внимание было уделено внутренней фискальной политике и темпов экономических реформ в этих стран [60, 69], а также ошибкам в действиях и рекомендациях международных финансовых организаций, приведших к формированию неустойчивых платежных балансов [17]. Однако очевидное сходство динамики протекания кризисов в структурно различных макроэкономических системах наводит на мысль о существовании универсальных системных механизмов возникновения и развития системной неустойчивости. На рис. 1 продемонстрированы примеры временных рядов обменных курсов российского рубля, бразильского реала и индонезийской рупии, включающие резкие скачки, связанные с неуправляемой девальвацией этих валют в периоды финансовых крахов. Несмотря на экономические и геополитические различия между странами, во всех трех случаях прослеживается сходный сценарий изменения структуры валютных флуктуаций, что подтверждается при нелинейной аппроксимации временных рядов с применением моделей критической динамики [109,110].

С точки зрения концепции БИС, существование универсальных сценариев катастроф в экономических системах является не только возможным, но и закономерным. Как демонстрируют численные физические модели, многие важные характеристики БИС слабо зависят от особенностей локального взаимодействия элементов и определяются главным образом их кооперативным поведением [45]. При приближении к точке кризиса это поведение управляется интегральными макроскопическими параметрами, обнаружение которых дает ключ к диагностике критического состояния и анализу его внутренних механизмов [111].

Теоретические исследования БИС, активно проводимые на протяжении последних 15 лет, показали, что кризисные явления являются неотъемлемым свойством устойчивой динамики таких систем. Это утверждение известно как принцип самоорганизованной критичности (СК), впервые сформулированный П.Баком, С.Чангом и К.Визенфельдом на основе исследования моделей клеточных автоматов [2,46,47]. Область его применения охватывает широкий круг систем, находящихся под действием внешнего потока энергии и информации и способных к особому режиму распространению внутренних возмущений, при котором близкие к потере устойчивости элементы формируют крупномасштабные сети самоорганизующихся связей. Наглядной иллюстрацией такого рода возмущений, получивших название лавин, может служить стихийное формирование коллективных стратегий на фондовом и валютном рынке [76,105,106].

При соблюдении перечисленных выше требований большая интерактивная система самопроизвольно стремится к состоянию СК. Этот

режим характеризуется свойством пограничной устойчивости [114], которая, по мнению ряда авторов, является наиболее гибкой и адаптивной формой стационарной динамики БИС в условиях изменчивой внешней среды [18,22]. Критический характер СК выражен в конечной вероятности появления крупномасштабных лавин, в противоположность поведению вдали от критической точки, где вероятность таких событий убывает экспоненциально. Размер s_L и время релаксации t_L лавин в состоянии СК подчиняются степенным функциям распределения вида $p \sim s_L^{-\tau}$ и $p \sim t_L^{-\tau}$ [101]. Такая статистика означает чувствительность БИС к малым возмущениям; в ряде случаев изменение состояния отдельно взятого элемента способно вызвать обширную реакцию вторичных взаимодействий, приводящих к перестройке всей системы.

Анализ результатов компьютерного моделирования БИС [111] показывает, что система в состоянии СК подвержена действию неустойчивостей двух типов (рис. 2).

В роли неустойчивостей 1-го типа выступают сами лавины, каждая из которых может рассматриваться как неравновесный фазовый переход [14]. Эти обратимые критические события представляют собой естественную реакцию системы на внешние и внутренние возмущения и, согласно принципу П.Бака, являются неотъемлемым свойством стационарной динамики БИС [45]. После окончания каждой лавины система остается в близкой окрестности СК. Причиной лавин служит накопление близких к порогу возбуждения элементов, которые несут потенциальную угрозу крупномасштабной устойчивости системы. Основная часть лавин носит локализованный характер, что позволяет системе плавно восстанавливать свое стационарное состояние и поддерживать постоянный средний уровень концентрации неустойчивых элементов. С кибернетической точки зрения, СК-лавины формируют самосогласованную систему обратных связей, которые обеспечивают устойчивость целостных характеристик БИС под действием неупорядоченных внешних возмущений. Неустойчивости 1-го типа приводят к формированию стационарной фрактальной структуры временных рядов интегральных параметров БИС [35].

Нарушения устойчивости 2-го типа, которые соответствуют масштабным экономическим кризисам, связаны с нарушением условий нормального распространения лавин и, как результат, отклонением системы от точки СК [111]. Такие события, в отличие от неустойчивостей 1-го типа, могут приводить к значительным и необратимым изменениям интегральных характеристик системы. При анализе временных рядов они могут проявляться в появлении скачков, трендов, резком возрастании амплитуды флуктуаций и других явлениях, характерных для кризисных периодов в сложных системах. Следует отметить, что к причинам кризисных событий не относится простое усиление действия внешних факторов: БИС способны подстраиваться к таким изменениям с помощью обратимых критических неустойчивостей, обеспечивающих глобальную асимптотическую устойчивость точки СК.

Причиной кризисов в БИС обычно служат структурные изменения в системе, такие, как, например, изменение режима взаимодействия и обмена информацией между элементами, порога их возбуждения, изменение граничных условий, а также внесение в систему дополнительных обратных связей. В зависимости от характера и степени выраженности этих изменений реакция системы может быть как мгновенной, так и замедленной, с постепенным накоплением предкризисных нарушений. В случае замедленной реакции существует теоретическая возможность заблаговременного обнаружения нарушений и прогноза катастрофы.

Переходные состояния, возникающие при развитии кризисов, могут характеризоваться хаотизацией динамики системы или, напротив, ее избыточным упорядочиванием по отношению к СК [18]. Как будет показано ниже, эти состояния могут регистрироваться по изменениям в структуре временных рядов. Один из характерных признаков приближающейся катастрофы состоит в длительном нахождении системы в суперкритическом режиме. Степенные показатели распределений лавин в таком режиме снижаются, что приводит к увеличению вероятности крупномасштабных неустойчивостей и снижению возможностей адаптации к внешним изменениям. Поведение БИС на этом этапе реакции упрощается и по ряду признаков становится похожим на поведение системы с малым числом степеней свободы [39]. Однако, поскольку реальная структурная сложность системы при этом не меняется, такая динамика закономерно приводит к коллапсу системы, после которого взаимодействие элементов нарушается, и возникает состояние субкритичности. Вслед за этим возможно постепенное возвращение системы в состояние СК либо формирование условий для нового кризиса.

Разработанные к настоящему времени теории финансовых кризисов [52,61,78], основанные на методологии БИС, не противоречат рассмотренному выше механизму крупномасштабной катастрофы. В качестве ведущей причины кризисов в этих теориях часто рассматривается изменение режима взаимодействия между участниками рынка, в частности, имитационное поведение и формирование спонтанных коллективных стратегий брокеров [48], приводящее к спекулятивному подъему биржевых котировок и росту финансового "пузыря" [59]. Для рынков развивающихся стран более характерны попытки государственного вмешательства в процессы биржевых торгов с целью создания управляемых ценовых "коридоров" [41], что также снижает число степеней свободы системы и выводит ее из динамического равновесия. Принцип СК позволяет предсказать, что все эти состояния должны характеризоваться нарушенной по отношению к устойчивому состоянию структурой временных рядов экономических индексов. В тех случаях, когда предкризисный период занимает достаточно продолжительное время, нарушения устойчивости могут быть обнаружены заблаговременно по изменениям фрактальных характеристик ряда.

Следует также отметить, что предлагаемый критерий предкризисной динамики хорошо согласуется с современными методами оценки и прогноза рисков в теории динамических систем [3,28,29,34,64], теории управления

[9,20,30,31,91] и финансовой статистике [8,21,54,73,75], предусматривающих учет вероятностной структуры управляющих параметров при оценке устойчивости сложных систем. Однако для его реализации необходимы адекватные методы анализа, позволяющие определить диапазоны нормальных значений параметров флуктуаций экономических показателей и их отклонения от нормы. Такие методы рассмотрены в следующем разделе.

3. Фрактальные характеристики макроэкономической системы и методы их определения

На протяжении XX века предпринимались неоднократные попытки построить модель динамики экономической системы, которая бы адекватно учитывала ее стохастическую природу. Классические теоретико-вероятностные модели берут свое начало от работы Л.Башелье (1900), который предложил рассматривать динамику цен как винеровский случайный процесс, описывающий колебания линейной системы под действием бесконечно большого числа независимых друг от друга факторов, что не противоречило имевшимся в то время данным по динамике биржевых индексов [6,96]. Дальнейшие исследования показали, что в динамике цен существенную играют роль процентные ставки, которые приводят к появлению детерминированных экспоненциальных трендов на фоне случайного блуждания, вызванного мгновенными изменениями конъюнктуры рынка, что привело к созданию теории геометрического броуновского движения рыночных показателей [96]. Однако основная часть исходных предположений относительно корреляционной структуры рыночных флуктуаций при этом была сохранена.

Центральным утверждением классического подхода является упоминавшийся выше постулат о статистически независимом поведении приращений биржевых показателей, позволяющий эффективно использовать аппарат марковских случайных процессов для решения дифференциальных уравнений ценовой динамики [75]. Утверждается, что автокорреляционная функция $C(\tau) = \langle x(t)x(t-\tau) \rangle_t$ последовательности приращений $x = y(t) - y(t + \Delta t)$ показателя $y(t)$ на масштабе времени Δt имеет вид

$$C = C_0(\Delta t)\delta(\tau) \quad (0.1)$$

где $\delta(\tau)$ – дельта-функция Дирака, которая равна нулю всюду, кроме $\tau = 0$. Это предположение известно как слабая форма теории эффективного рынка (ТЭР) [98], согласно которой идеально действующая финансовая система поддерживает постоянный баланс спроса и предложения, благодаря чему значения ценовых показателей в каждый момент времени включают в себя всю существующую информацию о конъюнктуре рынка. Как уже было отмечено, одним из следствий ТЭР является невозможность предсказания динамики цен на основе анализа ее предыстории, что в точности отвечает соотношению (0.1).

Постулат о независимости приращений был положен в основу ряда общеизвестных экономических теорий и моделей, включая теорию оценивания опционов и теорию портфелей [20,55,96,98]. Однако с появлением более совершенных вычислительных средств и систем коммуникаций, накоплением достаточного объема статистического материала стало ясно, что в строгом смысле это предположение, как и ТЭР в целом, неверны [68]. Реальная динамика рыночных показателей обнаруживает ненулевые корреляции на всех масштабах времени, от секундных интервалов до периодов в несколько лет [88,99]. Кроме того, оказалось, что гипотеза независимых приращений не согласуется с формой плотности их вероятности, значительно отличающейся от гауссовой [66,81]. И, наконец, было установлено [63], что флуктуации абсолютных значений приращений обладают многомасштабной корреляционной структурой и описываются кумулятивным распределением $P(X > x) \sim x^{-\alpha}$ [98] с показателем α , не позволяющим получать устойчивые оценки подвижности (волатильности) показателей, одного из главных входных параметров классических моделей ценовой динамики. Эти наблюдения привели к пересмотру роли ТЭР, которая в последнее время потеряла свой фундаментальный статус и стала рассматриваться как удобное приближение к более сложному поведению финансовых показателей, описываемому закономерностями нелинейных интерактивных систем [74,114].

Хотя условие (0.1) в общем случае не соблюдается, оно остается удобным критерием для выявления нарушений эффективного состояния систем. Общая тенденция отклонений от ТЭР состоит в том, что наиболее низкий уровень автокорреляций обнаруживается в динамике стабильных показателей экономически развитых стран, в то время как неустойчивые системы развивающихся стран обычно характеризуются более заметной корреляционной структурой приращений [28,29]. Однако стандартный спектрально-корреляционный анализ [10,12,40] не является достаточно чувствительным методом для количественной оценки этого эффекта [107]. Кроме того, экономические временные ряды обладают свойством масштабной инвариантности (фрактальности), приводящей к расходимости $C(\tau)$ при больших τ и не позволяющей описать структуру ряда с помощью конечного набора корреляционных времен [11]. Наиболее адекватный математический аппарат для исследования таких процессов был сформирован на основе методов фрактального анализа.

Известно, что фрактальными свойствами обладают многие природные, технические и социально-экономические системы, относящиеся к классу БИС [16,45]. В широком смысле фрактальность подразумевает инвариантность каких-либо свойств объекта при изменении масштаба наблюдения. Для временного ряда в роли такого масштаба выступает переменный временной интервал. По определению [13], случайный временной ряд $x(t)$ является фракталом, если его приращения на интервалах Δt обладают свойством статистической самоаффинности, то есть

$$\langle |x(t + \Delta t) - x(t)| \rangle = \frac{1}{r^H} \langle |x(t + r\Delta t) - x(t)| \rangle \quad (0.2)$$

для любого $r > 0$ в пределах диапазона фрактального поведения ряда. Такое поведение предполагает масштабно-инвариантную форму графика $x(t)$: его участки, соответствующие различным временным масштабам, выглядят сходным образом и статистически подобны целому ряду (рис. 3). Главной количественной мерой фрактального объекта служит его размерность подобия (фрактальная размерность) D [16]. Для случайного временного ряда D обычно находится в пределах от 1.0 до 2.0. Левая граница этого интервала значений соответствует евклидовой размерности линии, правая – размерности двумерной поверхности. При $D=1$ график временного ряда имеет гладкую аналитическую форму, при $D=2$ он выглядит крайне иррегулярно и стремится "заполнить" собой область построения. На практике, как правило, случайный временной обладает промежуточным дробным значением фрактальной размерности.

Было показано [113], что размерность процесса с независимыми приращениями, описываемого корреляционной функцией вида (0.1), равна 1.5. Это значение отвечает ТЭР, что подтверждается при анализе временных рядов экономических и финансовых показателей развитых стран. В первом приближении $D=1.5$ может рассматриваться как теоретически ожидаемое значение фрактальной размерности для состояния СК идеального функционирующей экономической системы. В то же время, на определенных интервалах времени даже наиболее эффективные рынки могут показывать другие значения D [7,26,37], что делает необходимым экспериментальное определение границ нормы отклонений фрактальной структуры каждого типа экономических показателей.

Наиболее простой метод оценивания размерности состоит в покрытии графика ряда непересекающимися квадратными ячейками линейного размера L и подсчете их количества N как функции L . Для фрактального эта функция ведет себя как $N \sim L^D$, что в пределе $L \rightarrow 0$ соответствует определению дробной размерности Хаусдорфа – Безиковича [13]. Использование такого метода на практике осложнено тем, что существующие алгоритмы прямого вычисления D , как правило, неэффективны и требуют длительных компьютерных вычислений. Кроме этого, оценка размерности по покрытию не свободно от противоречий, связанных с самоаффинной структурой большинства временных рядов, требующей использования разных масштабных коэффициентов в вертикальном и горизонтальном направлениях [33]. В связи с этим вместо непосредственного определения размерности обычно оценивают вспомогательные фрактальные индексы, связанные с D известными соотношениями (табл.1).

Таблица 1. Связь фрактальных индексов с размерностью временного ряда и их значения, соответствующие теории эффективного рынка

Название метода	Индекс	Связь с фрактальной размерностью	ТЭР
Спектральный метод	β	$D = 5/2 - \beta/2$	2.0
Метод Херста	H	$D = 2 - H$	0.5
Метод Пенга	α	$D = 3 - \alpha$	1.5

Одним из широко известных фрактальных методов является метод Херста (метод нормированного размаха) [77]. Метод состоит в исследовании отношения размаха R (разницы между максимальным и минимальным значением проинтегрированного временного ряда) к среднеквадратичному отклонению S ряда как функции временного масштаба Δt . Для фрактального ряда выполняется соотношение $R/S = (\Delta t/2)^H$, где H - индекс Херста, входящий в определение самоаффинности (0.2) и связанный с фрактальной размерностью зависимостью $D = 2 - H$ [16]. В качестве уточненной модификации метода нормированного размаха используется метод структурной функции [86], основанный на непосредственном применении соотношения (0.2) при анализе данных. Индекс Херста отличается высокой чувствительностью к наличию слабых корреляций между приращениями ряда. При $H > 0.5$ корреляции имеют положительный знак, при $H < 0.5$ - отрицательный. Значение $H = 0.5$ ($D = 1.5$) соответствует независимым приращениям с нулевыми автокорреляциями [33]. Для количественной оценки степени выраженности корреляций во временном ряде с неоднородной фрактальной структурой ($H = H(\Delta t)$) используется формула $2^{[2H(\Delta t)-1]} - 1$ [99].

Другой известный метод фрактального анализа основан на вычислении Фурье-спектра мощности $S(f)$ исследуемых фрактальных флуктуаций. Низкочастотная часть спектра спадает по степенному закону $S \sim 1/f^\beta$, что позволяет оценить размерность, используя соотношение $D = (5 - \beta)/2$ [113]. В отсутствие крупномасштабных корреляций приращений спектральный индекс $\beta = 2$, что согласуется с данными анализа устойчивых экономических временных рядов [32]. К недостаткам спектрального метода относится низкая точность оценки фрактальных индексов при исследовании коротких временных рядов, а также высокая чувствительность к нестационарным помехам в изучаемых данных [29].

Наиболее устойчивым в этом отношении фрактальным методом является метод Пенга (detrended fluctuation analysis) [57, 97, 112], алгоритм которого включает необходимые поправки на различные по масштабу тренды в динамике экономических показателей. Возможность учета трендовых составляющих особенно важна при исследовании флуктуаций валютных курсов, подверженных долгосрочным инфляционным процессам, что предопределило использование этого метода в настоящей работе. Подробное описание алгоритма метода Пенга изложено в главе 2.

4. Экспериментальные исследования фрактальной динамики рынков и модели финансовых кризисов

Как уже отмечалось выше, колебания экономических показателей обнаруживают крупномасштабные корреляции, указывающие на систематические отклонения систем от эффективного состояния. Использование фрактальных методов позволяет дать количественную характеристику таким отклонениям и проследить их связь с нарушением устойчивости экономической системы.

Общие взгляды на возможности применения методов фрактального анализа при решении экономических проблем изложены в [35-38,44,87,107]. При обсуждении возможностей применения фрактальных методов подчеркивается важность использования нестационарного подхода, позволяющего сопоставить динамику изменения фрактальных индексов на разных участках исследуемого ряда. Наряду с нестационарным методом Пенга был рассмотрен ряд алгоритмов, позволяющих характеризовать эффекты перемежаемости (интермиттанса) флуктуаций финансовых индексов [70]. Было показано, что сопоставление структуры различных данных может потребовать одновременного учета нескольких стохастических параметров, причем в методологическом отношении фрактальные подходы позволяют восполнить существующий недостаток связей между эмпирическими исследованиями финансовых рынков и экономическими теориями [44].

В работе [90] был проведен спектральный анализ флуктуаций приращений 20 основных акций NYSE (New York Stock Exchange). Результаты показали, что спектр приращений достоверно отличается от спектра "белого шума" с $S = const$, что указывает на корреляции исследуемых случайных процессов. Структура наблюдаемых спектров оказалась индивидуальна для различных типов акций. К более однозначным выводам позволило прийти применение спектрального метода к исследованию совокупных биржевых индексов [89] и абсолютных значений приращений курсов акций, который позволил обнаружить степенное поведение спектральной плотности мощности исследуемых рядов, согласующееся с результатами применения методов Пенга [72] и структурной функции [89].

Исследование флуктуаций валютных курсов (японской йены, британского фунта стерлингов, канадского и сингапурского доллара) методом нормированного размаха позволило выявить масштабную неоднородность этих процессов [98]. Согласно полученным оценкам, в на интервалах времени более 90 суток индекс Херста $H = 0.5$; при $\Delta t = 30...90$ $H > 0.5$; при $\Delta t < 30$ индекс может принимать еще более высокие значения, однако фрактальная структура в этом диапазоне масштабов нестабильна. Наиболее устойчивое персистентное поведение с положительными корреляциями приращений наблюдается при $\Delta t = 30...90$. Аналогичное поведение с $H > 0.5$ было выявлено и при исследовании методом Херста флуктуаций курсов акций и облигаций [99]. Обнаруженный эффект рассмотрен как проявление долговременных тенденций,

замаскированных быстрыми изменениями рыночных цен, связанными с краткосрочными спекулятивными операциями. Долговременные тенденции имеют масштабно-инвариантный характер, связанный со способностью рынка "запоминать" изменения предпочтений инвесторов. Вопреки положениям ТЭР, роль этих изменений не сводится к мгновенной подстройке цен, а выражается в долговременных трендах, которые могут длиться годами.

Было установлено, что неравномерное распределение размерности по временным масштабам анализируемых рядов в ряде случаев приводит к необходимости использования мультифрактальных и вейвлетных методов анализа [53,100,103]. В этой связи был рассмотрен метод независимых измерений индекса Пенга в различных диапазонах временных периодов. Разница значений индекса на этих диапазонах была рассмотрена в качестве возможного диагностического признака, позволяющего количественно оценить отклонение состояния рынка от эффективного, а состояние системы – от точки СК [108].

Фрактальные корреляции экономических и финансовых временных рядов тесно связаны с алгебраическим поведением плотности вероятности их приращений в области больших отклонений от средних значений. Удобной моделью такого поведения является семейство устойчивых распределений Леви. Степенной показатель α_p этих распределений, называемый индексом Парето, связан с индексом Херста соотношением $\alpha_p = 1/H$ [98]. При $\alpha = 2$ распределения Леви вырождаются гауссово распределение, и фрактальная размерность исходного временного ряда принимает значение 1.5, отвечающее ТЭР. Как показывает анализ распределения доходов промышленных компаний Японии, США и Европы, степенная форма распределений тесно связана с механизмами конкурентного взаимодействия между участниками рынка и практически не проявляется в тех секторах экономики, где это взаимодействие ослаблено вмешательством государства [93]. С точки зрения теории БИС эта закономерность выглядит естественной, поскольку эффекты нелинейных взаимодействий являются необходимым условием самоорганизации сложных систем и их эволюции к состоянию СК.

Статистика Леви обнаруживается и при анализе волатильности (подвижности) рынков ценных бумаг [72,85]. Степенной характер распределения прослеживается в широком диапазоне значений приращений, что указывает на наличие общего механизма больших и малых колебаний биржевых цен, аналогичного критическим лавинам в БИС [46,47].

Исследование высокочастотных флуктуаций волатильности методом Пенга было проведено в работе [79]. В качестве данных использовались 5-секундные значения венгерского биржевого индекса BUX за период 1997-1998 гг., включавший крах венгерского финансового рынка в октябре 1997 г. Результаты показали, вероятность этого события была высока, на что указывает степенная форма распределения значений, подчиняющаяся классической форме закона Парето с $\alpha = 1.5$ [98]. Найдены также сильные автокорреляции в динамике значений волатильности.

В то же время, было обнаружено [92,96], что высокочастотные колебания финансовых индексов на масштабах времени меньше суток подвержены систематическим изменениям, связанным с графиком работы брокеров и психологическими факторами, влияющими на чистоту транзакций в разное время суток. Учитывая этот факт, для получения объективных оценок фрактальной структуры рыночных показателей целесообразно использовать более грубое временное разрешение (начиная с динамики среднесуточных значений).

Фрактальные корреляции в колебаниях подвижности фондовых и валютных рынков были обнаружены также в целом ряде других исследований. При этом была отмечена необходимость создания новой теории оценивания опционов, учитывающих реальную корреляционную структуру финансовых данных [95]. В качестве возможных решений этой проблемы было предложено дробное интегрирование уравнений стохастической динамики цен [51], внесение нелинейных поправок в стандартные модели оценивания [63] либо использование кластерной статистической модели подвижности рынков [56, 95].

Возможность статистического прогноза динамики экономических индексов интенсивно обсуждается в литературе. Действительно, временные ряды финансовых индексов нередко обнаруживают признаки предсказуемого низкоразмерного поведения. Наглядным примером служит динамика греческого фондового индекса ASTI. Использование метода нормированного размаха показало устойчивую фрактальную структуру этих данных, причем результаты анализа ляпуновских показателей позволяют предположить существование предсказуемого детерминистического процесса с ограниченным числом степеней свободы, развивающегося на фоне случайных флуктуаций индекса [94].

На основе исследования корреляций абсолютных значений приращений были разработаны методы статистического прогноза времени и масштаба смены тенденций на фондовых рынках в периоды их устойчивой фрактальной динамики [58,80]. Однако такие методы не позволяют определять направление изменений, что объясняется сравнительно слабыми корреляциями знаков приращений [96]. В связи с этим следует отметить, что при исследовании достаточно больших статистических выборок знаки изменений финансовых показателей могут обнаруживать нетривиальную временную структуру, обнаруживаемую по достоверным отличиям условной вероятности различных форм апериодических колебаний [44,79,114]. Проблеме математического прогноза поведения биржевых цен в устойчивых состояниях фондовых рынков было посвящено немало исследований [43,62,67,82,102]. Однако устойчивое предсказание финансовых индексов в целях получения регулярной прибыли практически невозможно ввиду способности эффективных рынков подстраиваться к изменению стратегий его участников [83].

В работе [96] был проведен систематический анализ современных моделей крахов и кризисов на финансовых рынках. В основе большинства обсуждаемых моделей лежат методы экономофизики ("физики финансов") и

теории фазовых переходов в системах класса БИС. Обоснована целесообразность построения абстрактных моделей, переносящих акцент с описания детальных закономерностей равновесного протекания финансовых процессов на закономерности их изменения и превращения при возникновении критических состояний.

В модели Конта-Бушо [96] рынок представлен как самоорганизующаяся критическая система со сложными обратными связями, находящаяся на границе областей устойчивого и неустойчивого поведения. Крупномасштабные кризисы в модели обусловлены появлением "спонтанной кооперативности" в поведении трейдеров, приводящей к возникновению суперкритических флуктуаций. Критическая точка, связанная с такими состояниями, поддерживается внутренней динамикой модели, а не внешними факторами, что позволяет рассматривать модель Конта-Бушо как один из вариантов модели СК, адаптированный к описанию финансовых рынков. Похожими свойствами обладает и финансовая модель Бака [48], в которой учтена возможность существования двух стратегии принятия решений на финансовом рынке: рациональной, основанной на анализе долгосрочных тенденций, и шумовой, состоящей в подстройке трейдеров под быстрые флуктуации цен. При преобладании первой из этих стратегий число степеней свободы рынка уменьшается, что приводит к потере его крупномасштабной устойчивости и создает предпосылки развития кризиса

В модели Сорнетта-Йохансена [104,105] также рассмотрены кооперативные эффекты как главный фактор предкризисной динамики. Их причиной является подражательное поведение инвесторов в условиях нехватки объективной информации о состоянии рынка. Основное внимание при решении уравнений модели было уделено аналитическому описанию формы колебаний финансовых индексов до и после наступления кризиса. В частности, было показано, что предкризисное состояние характеризуется сочетанием степенной и лог-периодической динамики параметров состояния системы. Нарастанием вероятности h приближающегося биржевого краха происходит по закону $h(t) = (t_c - t)^{-\gamma} [B_0 + B_1 \cos(\omega \ln(t_c - t) + \psi)]$, где $t_c > t$ – момент краха. К аналогичному выводу пришли и некоторые другие авторы [44]. Однако проверка модели Сорнетта-Йохансена при анализе биржевых кризисов привела к неоднозначным результатам [104]. С одной стороны, было обнаружено, что некоторым кризисам действительно предшествовали периоды роста биржевых цен с колебаниями, основная частота которых приближенно описывается уравнением модели. С другой стороны, фаза этих колебаний крайне неустойчива, а их структура остается фрактальной вплоть до момента краха и включает сложную иерархию периодов, выходящую за рамки рассматриваемой модели.

Проведенный анализ литературы позволяет сделать вывод, что ни в одной из опубликованных к настоящему времени моделей финансовых и экономических кризисов фрактальная структура временных рядов не была рассмотрена как источник количественной информации о предкризисных

нарушениях устойчивости системы. Эта возможность до сих пор не была использована и в области эмпирических исследований динамики рыночных показателей, где фрактальные методы используются главным образом для определения крупномасштабных корреляций в устойчивых состояниях исследуемых систем. Таким образом, проведенная нами работа по определению предкризисных изменений фрактальной динамики временных рядов носит приоритетный характер и открывает новое направление в использовании методов и подходов сложных систем в финансовой и экономической практике.

Заключение

Понятие гомеостатического равновесия, трактуемого как неизменность существенных параметров системы, испытывающей влияние внешних факторов, является наиболее близким к специфике сложных самоорганизующихся макроэкономических систем, так как предполагает их самоподстройку системы как к сильным, так и слабым воздействиям, и допускает возможность устойчивого неравновесного состояния системы в режиме самоорганизованной критичности. Гомеостатическая интерпретация устойчивости согласуется с выводами теории эффективного рынка, заключающейся в том, что вся существующая информация о его состоянии в каждый момент заложена в текущих значениях паритетных цен. Одним из следствий теории эффективного рынка является самоорганизующийся характер динамического равновесия в макроэкономических системах. Экономические процессы имеют нелинейный самоорганизующийся характер, и его исследование требует соответствующего математического аппарата, создание которого только начинается.

На основе анализа литературы показано, что макроэкономические системы относятся к классу больших интерактивных систем. Кризисная динамика таких систем может изучаться на основе теории самоорганизованной критичности с использованием методов фрактального анализа временных рядов.

Наиболее устойчивым состоянием БИС является состояние СК. Временные ряды интегральных показателей экономических БИС имеют стохастическую форму и обладают фрактальной временной структурой с дробным значением размерности $D=1.5$, отвечающим критерию эффективного рынка. При нарушении динамического равновесия и отклонении от состояния СК размерность меняется в большую либо меньшую сторону от уровня 1.5. Такие изменения могут использоваться для определения предкризисных состояний, связанных с нарушением нормального режима кооперативных взаимодействий в системе.

На основе рассмотренных фактов выдвинута гипотеза о возможности фрактальной диагностики экономической системы по временным рядам и получения численной оценки предкризисных нарушений ее динамической устойчивости. Согласно этой гипотезе, подтвержденной эмпирически в дальнейшем исследовании, экономические и финансовые кризисы связаны с

формированием суб- и суперкритических режимов динамики, которые могут быть обнаружены по отклонениям за пределы нормы размерности и интенсивности флуктуаций экономических индексов задолго до наступления кризисов.

Такой подход полностью согласуется с представлениями современной теории сложных систем, рассматривающей фрактальные флуктуации в таких системах как одно из необходимых условий их устойчивого функционирования.

Результаты проведенного исследования подтверждают возможность фрактальной диагностики предкризисных нарушений в макроэкономических системах и указывают на то, что наиболее устойчивым состоянием динамики таких систем является состояние самоорганизованной критичности, характеризуемое фрактальной структурой временных рядов с размерностью 1.5, отвечающей теории эффективного рынка. При нарушении динамического равновесия и отклонении от состояния СК размерность закономерно меняется, что может использоваться для своевременного эффективного обнаружения и прогноза предкризисных состояний в открытых макроэкономических системах.

Список использованной литературы

1. Арнольд В.И. Теория катастроф. – М.: Наука, 1990. – 126 с.
2. Бак П., Чен К. Самоорганизованная критичность // В мире науки. – 1991. № 3. – С. 16 – 24.
3. Балабанов И.Т. Риск-менеджмент. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 192 с.
4. Баринов Э.А., Хмыз О.В. Рынки: валютные и ценных бумаг. – М.: Экзамен, 2001. – 608 с.
5. Басин М.А. Синергетика и методы науки. – СПб.: Наука, 1998. – 439 с.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1974. – 463 с.
7. Гуляева О.С., Толкаченко Г.Л., Цветков В.П., Цветков И.В. Фрактальная размерность в исследовании динамики валютного курса // Моделирование сложных систем. – 2000. № 3. – С. 52 – 64.
8. Евро – дитя Манделла? Теория оптимальных валютных зон. – Сб.статей: пер. с англ. – М.: Дело, 2002. – 368 с.
9. Исследование операций. Методологические основы и математические методы. – М.: Мир, 1981. – 712 с.
10. Кендэл М. Временные ряды. – М.: Финансы и статистика, 1981, 320 с.
11. Кешнер М.С. Шум типа $1/f$. // ТИИЭР. – 1982. Т.70, № 2. – С. 60 – 67.
12. Кильдишев Г.С., Френкель А.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. – М.: Статистика, 1973. – 254 с.
13. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
14. Лавенда Б. Статистическая физика. Вероятностный подход. – М.: Мир, 1999. – 432 с.

15. Лопатников Л.И. Экономико-математический словарь: словарь современной экономической науки. – М.: Дело, 2003. – 520 с.
16. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
17. Масленников В.В. Зарубежные банковские системы. – М.: Элит-2000, 2001. – 392 с.
18. Музалевская Н.И. Урицкий В.М. Стохастические методы функциональной диагностики и коррекции в медицине // Телемедицина: новые информационные технологии на пороге 21 века. – СПб.: Анатолия, 1998. – С. 209 – 243.
19. Мэнкью Н.Г. Принципы макроэкономики. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.
20. Рэдхэд К., Хьюс С. Управление финансовыми рисками. – М.: ИНФРА-М, 1996. – 288 с.
21. Соложенцев Е.Д., Карасев В.В. Логико-вероятностная оценка банковских рисков и мошенничеств в бизнесе. – СПб: Политехника, 1996. – 60 с.
22. Тимашев С.Ф. О законе эволюции природных систем // Журн. физ. химии, 1994. Т.68. №.12. – С. 2216 – 2223.
23. Урицкая О.Ю. Влияние предкризисного нарушения фрактальной структуры колебаний обменных курсов на характеристики активной фазы валютного кризиса // Современные проблемы и методы совершенствования государственного и муниципального управления. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 341 – 364.
24. Урицкая О.Ю. Исследование устойчивости налоговых поступлений методами фрактального анализа // Современные проблемы и методы совершенствования государственного и муниципального управления. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 365 – 378.
25. Урицкая О.Ю. Определение оптимального диапазона флуктуаций валютных курсов методом статистической температуры // Современные проблемы и методы совершенствования государственного и муниципального управления. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 378 – 393.
26. Урицкая О.Ю. Перспективы применения фрактальных методов анализа к исследованию аperiodических колебательных процессов в экономике // Современные проблемы и методы совершенствования управления. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. – С. 142 – 149.
27. Урицкая О.Ю., Федотов А.В. О применении теории самоорганизованной критичности в моделировании сложных экономических систем. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – С. 124 – 131.
28. Урицкая О.Ю. Основы теории экономического риска: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 59 с.
29. Урицкая О.Ю. Основы теории экономического риска. Риск в экономических системах: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. – 170 с. (10.75 п.л.).
30. Урицкая О.Ю. Принятие решений в условиях неполной информации и риска: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005.
31. Урицкая О.Ю. Теория принятия решений: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 94 с.

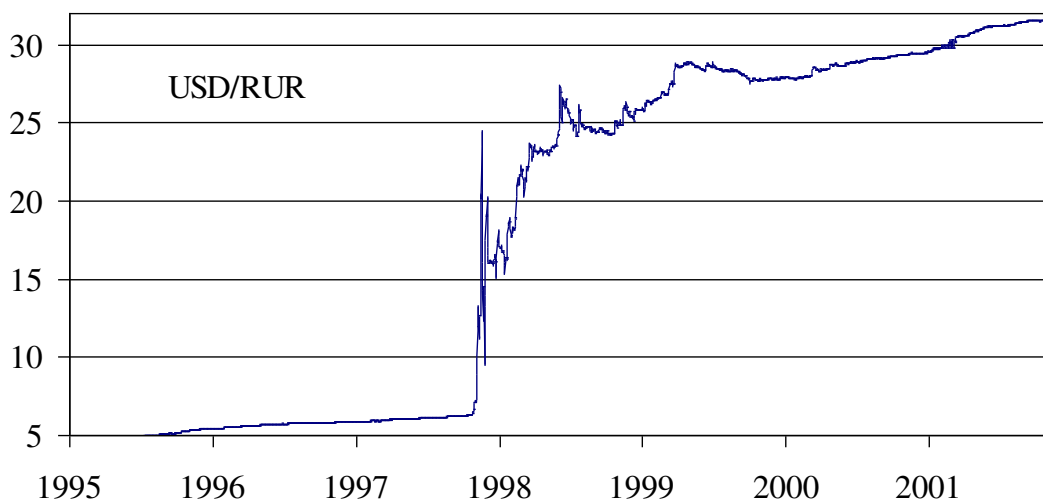
32. Урицкая О.Ю., Урицкий В.М. Фрактальный анализ динамики валютных курсов в странах с различными системами финансового регулирования // Сб. докладов IV Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM 2001 (25-27 июня 2001 г., С.-Петербург). – СПб.: СПбГУ, 2001, Т.2. – С. 188 – 191.
33. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 263 с.
34. Хованов Н.В. Математические модели риска и неопределенности. – СПб.: СПбГУ, 1998. – 204 с.
35. Цветков В.П., Рыжиков В.Н., Цветков И.В., Иванов В.В. Фрактальные методы в изучении социально-экономических систем // Моделирование сложных систем. – Тверь.: ТвГУ, 1999. – С. 87 – 94.
36. Цветков И.В. Фрактальные методы в изучении социально-экономических систем // Моделирование сложных систем. – Тверь.: ТвГУ, 1999. – С. 97 – 108.
37. Цветков И.В. Фрактальная размерность в исследовании динамики валютного курса // Моделирование сложных систем. – Тверь.: ТвГУ, 2001. – С. 27 – 38.
38. Цветков И.В. Фрактальная размерность временного ряда как "флаг" катастроф в социально-экономических процессах // Моделирование сложных систем. – Тверь.: ТвГУ, 2001. – С. 57 – 69.
39. Шустер Г. Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
40. Эренбург А. Анализ и интерпретация статистических данных. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 325 с.
41. Этот изменчивый обменный курс. – Сб.статей: пер. с англ. – М.: Дело, 2001. – 384с.
42. Andersen J.V., Sornette D. Increasing returns while lowering large risks // Journal of Risk Finance. – 2001. V.2(3). – P. 70 – 82.
43. Anderson P.W., Arrow J.K., Pines D., eds. The Economy as an Evolving Complex System. – California: Addison-Wesley, Redwood City, 1988. – 217 p.
44. Ausloos M., Vandewalle N., Boveroux Ph. et al. Applications of statistical physics to econometric and financial topics // Physica A – 1999. V. 274. – P. 229 – 240.
45. Bak P. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. – Oxford: Oxford University Press, 1997. – 294 p.
46. Bak P., Tang C. Earthquakes as a Self-Organized Critical Phenomenon // J. of Geophys. Res. – 1989. V.94, № B11. – P. 15635 – 15637.
47. Bak P, Tang C., Wiesenfeld K. Self-Organized Criticality: an Explanation of 1/f Noise // Phys. Rev. Lett. – 1987. V.59. – P. 381 – 384.
48. Bak P., Paczuski M., Shubik M. Price Variations in a Stock Market with Many Agents // Physica A. – 1997. V.246. – P. 430 – 453.
49. Bayoumi T. Formal model of optimal currency areas // IMF Staff Paper. –1994. V.41(1). – P. 537 – 556.
50. Berg A., Pattillo C. Are Currency Crises Predictable? A Test // IMF Staff Papers, 1999, v. 46, N 2, p. 107–38.
51. Bollerslev T., Mikkelsen H.O. Modeling and pricing long memory in stock market volatility // Journal of Econometrics. – 1996. V. 73. – P. 151 – 184.

52. Bouchaud J.-P., Potters M. *Theory of Financial Risk: From Statistical Physics to Risk Management*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 415 p.
53. Bouchaud J.-P., Potters M., Meyer M. *Apparent Multifractality in Financial Time Series*, 1999. – 375 p.
54. Bouchaud J.-P., Potters M. *Worst Fluctuation Method for Fat Value-at-Risk Estimates*. 1999. – 200 p.
55. Bouchaud J.-P. *The Black-Scholes Option Pricing Problem in Mathematical Finance: Generalization and Extensions for a Large Class of Stochastic Processes* // *J. Physics*. – 1994. V.4. – P. 863 – 881.
56. Bouchaud J.-P., Iori G., Sornette D. *Real-World Options: Smile and Residual Risk* // *Risk*. – 1996. V.9. – P. 61 – 65.
57. Buldyrev S.V., Dokholyan N.V., Goldberger A.L. et al. *Analysis of DNA Sequences Using Methods of Statistical Physics* // *Physica A* – 1998. V.249. – P. 430 – 438.
58. Bush S. *Market cycles review: forecast summary* // *Cycles*. – 1993. V.44, №.3. – P. 166 – 170.
59. Campbell J.Y., MacKinlay A.C. *The Econometrics of Financial Markets*. – Princeton: Princeton University Press, N.J., 1997. – 243 p.
60. Checki T.J., Stern E. *Financial crises in the emergent markets: the roles of the public and private sectors* // *Current Issues of Economics and Finance* (Federal Reserve bank of New York). – 2000. V.6(13). – P. 1 – 6.
61. Coe P.J. *Financial crisis and the Great depression: a regime-switching approach* // *Journal of Money, Credit, and Banking*. – 2002. V.34(1). – P. 76 – 93.
62. Dacaragona M.M. et al. *A Geographical Model for the Daily and Weekly Seasonal Volatility in the Foreign Exchange Market* // *J. Int'l Money and Finance*. – 1993. V.12. – P. 413 – 428.
63. Ding Z., Granger C.W.J. *Modeling volatility persistence of speculative returns: A new approach* // *Journal of Econometrics*. – 1996, V.73. – P. 185 – 215.
64. Djaferis T.E., Schick I.C. *System Theory: Modeling, Analysis and Control*. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. – 476 p.
65. Dragulescu A., Yakovenko V.M. *Statistical Mechanics of Money* // *The European Physical Journal B*. – 2000. V.17. – P. 723 – 729.
66. Embrechts P., Kluppelberg C., Mikosch T. *Modeling Extremal Events*. – Berlin: Springer-Verlag, 1997. – 196 p.
67. Engsted T. *Does the long-term interest rate predict future inflation?* // *The Rev. of Economics and Statistics*. – 1995. V.77, №.1. – P. 42 – 54.
68. Farmer J.D. *Physicists Attempt to Scale the Ivory Towers of Finance* // *Computing in Science & Engineering*. – 1999. Nov./Dec. – P. 26 – 39.
69. Fischer S. *The Financial Crisis in Emerging Markets: Some Lessons* // *International Monetary Fund, Annual Reports*. – 1999. – P. 4 – 8.
70. Ghashghaie et al., *Turbulent Cascades in Foreign Exchange Markets* // *Nature*. – 1996. V.381. – P. 767 – 770.
71. Goldfajn I., Valdes R.O. *Are Currency Crises Predictable?* // *European Economic Review*, 1998, v. 42, N3–5, p. 873–85.

72. Gopikrishnan P., Plerou V., Liu Y. et al. Scaling and correlation in financial time series // *Physica A*. – 2000. V.287. – P. 362 – 373.
73. Granger C.W.J. *Forecasting in Economics // Time Series prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past*. – Reading: Addison-Wesley, 1993. – P. 529 – 538.
74. Grassia P.S. Delay, feedback and quenching in financial markets // *Eur. Phys. J.* – 2000. V.17B. – P. 347 – 362.
75. Grauwe, P., Dewachter, H. Chaos in the Dornbusch model of exchange rate // *Kredit und Kapital*. – 1992. V.25(1). – P. 26 – 54.
76. Hirabayashi T., Takayasu H., Miura H. et al. The behavior of a threshold model of market price in stock exchange // *Fractals*. – 1993. V.1, № 1. – P. 29 – 40.
77. Hurst H.E., Black R.P., Simaika Y.M. *Long-term storage: an experimental study*. – London: Constable, 1965. – 260 p.
78. Ivanova K. Toward a phase diagram for stocks // *Physica A*. – 1999. V.270. – P. 567 – 577.
79. Janosi I.M., Jaecsco B., Kondor I. Statistical Analysis of 5 s Index Data of the Budapest Stock Exchange // *Physica A*. – 1999. V.269. – P. 111 – 124.
80. Kaufman S.K. A New Method of Forecasting Trend Change Dates // *Cycles*. – 1990. V. September/October. – P. 245 – 248.
81. Koedijk K.G., Schafgans M.M.A., De Vries C.G. The Tail Index of Exchange Rate Returns // *J. Int. Economics*. – 1990. V.29. P. 93 – 108.
82. LeBaron B. Nonlinear Diagnostics and Trading Rules for High-Frequency Foreign Exchange Rates // *Time Series prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past*. – Reading: Addison-Wesley, 1993. P. 457 – 474.
83. Lequarre J.Y. Foreign Currency Dealing // *Time Series prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past*. – Reading: Addison-Wesley, 1993. – P. 131 – 138.
84. Levy-Yeyati E., Sturzenegger F. Exchange Rate Regimes and Economic Performance // *IMF Staff Papers*, 2001, v. 47, p. 62–98.
85. Lux T. The Stable Paretian Hypothesis and the Frequency of Large Returns: An Examination of Major German Stocks // *Applied Financial Economics*. – 1996. V.6. – P.463-475.
86. Mandelbrot B.B. The Variation of Certain Speculative Prices // *J. Business*. – 1963. V.36. – P. 394 – 419.
87. Mantegna R.N., Stanley H.E. *Introduction in Econophysics: Correlations and Complexity in Finance*. – Cambridge: Cambridge University Press, UK, 1999. – 312 p.
88. Mantegna R.N., Stanley H.E. Scaling Behavior in the Dynamics of an Economic Index // *Nature*. – 1995. V. 376. – P. 46 – 49.
89. Mantegna R.N., Stanley H.E. Stock Market Dynamics and Turbulence: Parallel Analysis of Fluctuation Phenomena // *Physica A*. – 1997. V.239. – P. 255 – 266.
90. McCullough B.D. A Spectral Analysis of Transactions Stock Market Data // *The Financial Review*. – 1995. V.30, № 4. – P. 823 – 842.
91. Mukaidono M. *Fuzzy Logic for Beginners*. – London: World Scientific, 2001. – 105 p.

92. Muller U.A. et al. Statistical Study of Foreign Exchange Rates, Empirical Evidence of a Price Scaling Law, and Intraday Analysis // *J. Banking and Finance*. – 1990. V.14. – P.1189 – 1208.
93. Okuyama K., Takayasu M., Takayasu H. Zipf's Law in Income Distribution of Companies // *Physica A*. – 1999. V.269. – P. 125 – 131.
94. Papaioannou G. Nonlinear Time Series Analysis of the Stock Exchange: the Case of an Emerging Market // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 1995. V.5, № 6. – P. 1557 – 1584.
95. Pasquini M., Serva M. Multiscaling and Clustering of Volatility // *Physica A*. – 1999. V.269. – P. 140 – 147.
96. Paul W., Baschnagel J. *Stochastic Processes from Physics to Finance*. – Berlin: Springer, 2000. – 232 p.
97. Peng C.-K., Halvin S., Hausdorff J.M. et al. Fractal mechanisms and heart rate dynamics // *J. of Electrocardiology*. – 1995. V. 28 Supplement. – P. 59 – 64.
98. Peters E.E. *Chaos and Order in capital Markets. A New View of Cycles, Prices, and Market Volatility*. – New York: John Wiley and Sons, 1992. – 238 p.
99. Peters E.E. Fractal Structure in the Capital Markets // *Financial Analysts Journal*. – 1989. V. July-August. – P. 32 – 37.
100. Ramsey J.B., Usikov D., Zaslavsky G.M. An analysis of U.S. stock price behavior using wavelets // *Fractals*. – 1995. V.3, №.2. – P. 377 – 389.
101. Robinson P.A. Scaling properties of self-organized criticality // *Phys.Rev. E*. – 1994. V.49, № 5. – P. 3919 – 3926.
102. Scheinman J., LeBaron B. Nonlinear Dynamics and Stock Returns // *J.Business*. – 1989. V.62. – P. 311 – 338.
103. Schmitt F., Schertzer D., Lovejoy S. Multifractal Analysis of Foreign Exchange Data // *Applied Stochastic Models and Data Analysis*. – 1999. V.15. – P. 29 – 53.
104. Sornette D. Predictability of catastrophic events: material rupture, earthquakes, turbulence, financial crashes and human birth // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. – 2002. V.99 (supp. 1). – P. 2522 – 2529.
105. Sornette D. *Why Stock Markets Crash: Critical Events in Complex Financial Systems*. – Princeton: Princeton University Press, N.J., 2003. – 456 p.
106. Sornette D., Johansen A., Bouchaud J.-Ph. Stock Market Crashes, Precursors and Replicas // *Journal of Physics I France*. – 1996. V.6. – P. 167 – 175.
107. Stanley H.E., Amaral L.A.N., Caning D. et al. Econophysics: Can Physicists Contribute to the Science of Economics? // *Physica A*. – 1999. V.269. – P. 156 – 169.
108. Stanley H.E., Amaral L.A.N., Goldberger A.L. et al. Statistical physics and physiology: Monofractal and multifractal approaches // *Physica A*. – 1999. V.270. – P. 309 – 324.
109. Uritskaya O.Yu. Forecasting of magnitude and duration of currency crises based on the analysis of distortions of fractal scaling in exchange rate fluctuations // *Noise and Fluctuations in Econophysics and Finance*. Eds. D.Abbott, J.-Ph.Bouchaud, X.Gabaix. – Proc. SPIE Vol.5848, 2005. – p. 17-26.

110. Uritskaya O.Yu. Fractal Methods for Modeling and Forecasting of Currency Crises // Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems. – Proc. FISS MASR, SPb., 2005. – p. 210-215.
111. Uritsky V.M., Muzalevskaya N.I. Self-Organized Criticality as a Possible Mechanism for Controlling $1/f$ Fluctuations in Living Systems // Proc.14th Int. Conf. on Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations. – Singapore: World Scientific, 1997. – P. 649 – 652.
112. Viswanathan G.M., Peng C.-K., Stanley H.E. et al. Deviations from uniform power law scaling in nonstationary time series // Physical Review E. – 1997. V.55, № 1. – P. 845 – 849.
113. Voss R.F. Random fractals: self-affinity in noise, music, mountains and clouds // Physica. – 1989. V.38D. – P. 362 – 371.
114. Zhang Y.-C. Toward a theory of marginally efficient markets // Physica A. – 1999. V.269. – P. 30 – 44.



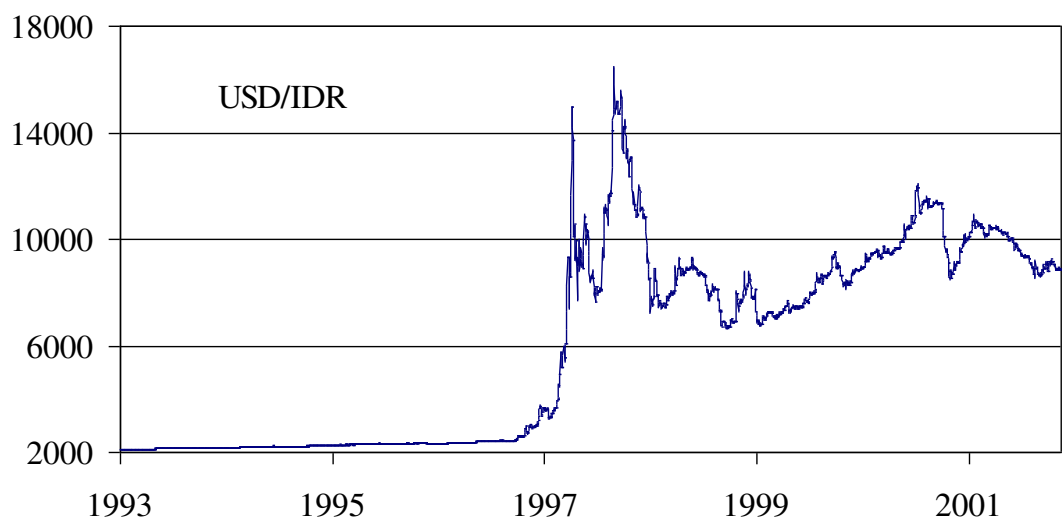
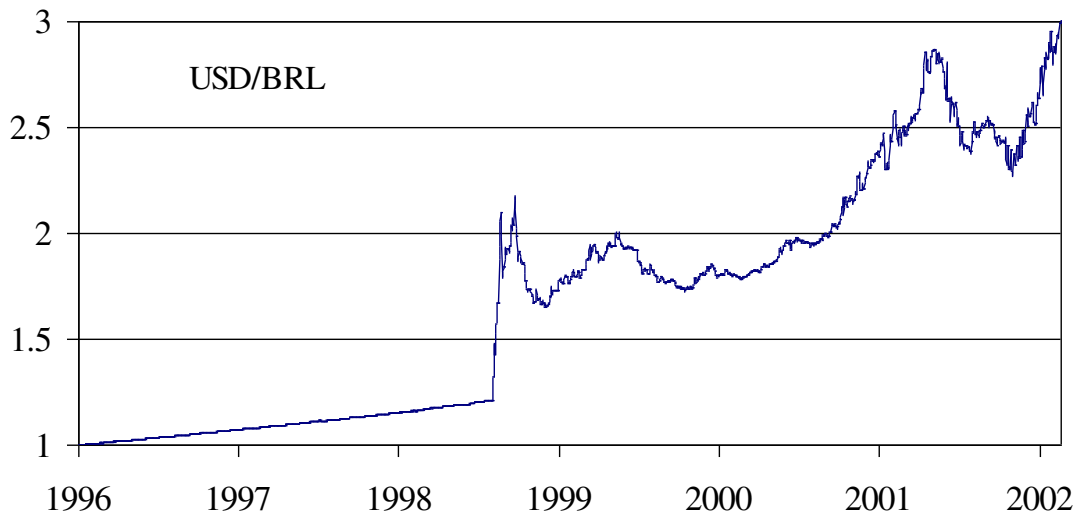


Рис. 1. Характерная динамика обменных курсов валют в периоды финансовых кризисов (сверху вниз: российский рубль, бразильский реал, индонезийская рупия).

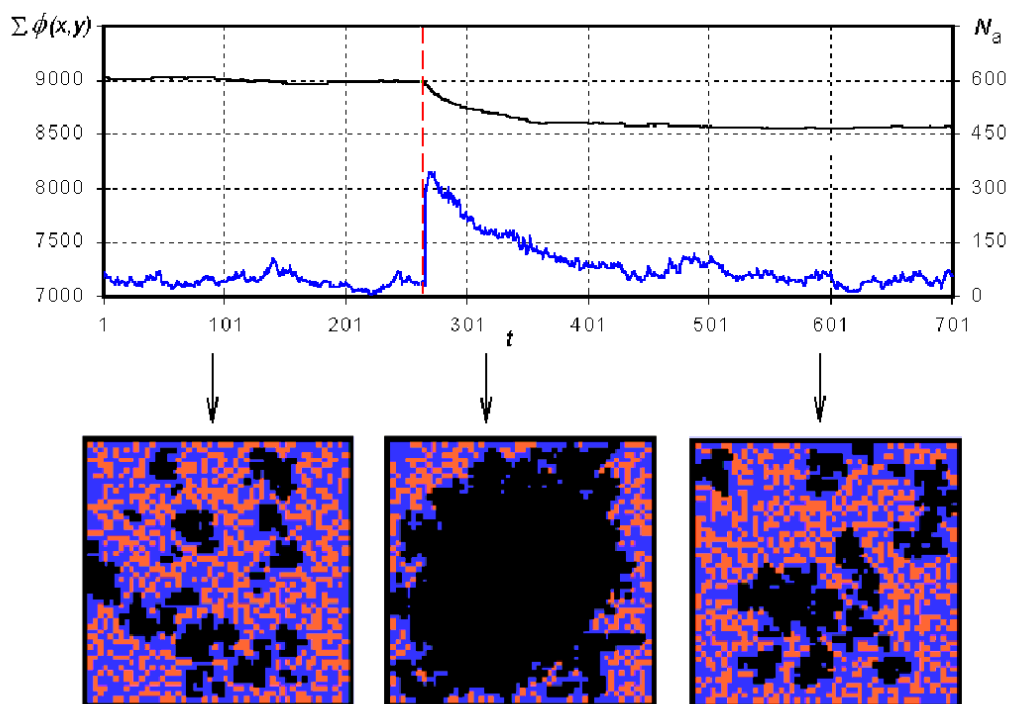


Рис. 2. Нарушение и восстановление устойчивости в клеточной модели самоорганизованной критичности с переменным порогом взаимодействия элементов [46,111].

Вверху: Изменение полной энергии $\sum \phi(x, y)$ и уровня активности N_a модели при ступенчатом понижении порога в момент времени, отмеченный вертикальной штриховой линией. Флуктуации N_a (нижний график) до и после этого события имеют фрактальную форму, что связано с катастрофами 1-го типа – масштабно-инвариантными лавинами, поддерживающими систему в состоянии СК. Перестройка системы при снижении порога взаимодействий, вызвавшая резкий рост N_a , относится катастрофам 2-го типа и рассматривается как прототип финансового кризиса.

Внизу: примеры поведения модели на разных фазах развития кризиса, характеризующихся критическим, суперкритическим и субкритическим режимом кооперативной динамики. Активные, пограничные и стабильные состояния отдельных элементов обозначены соответственно черным, темно-серым и светло-серым цветом.

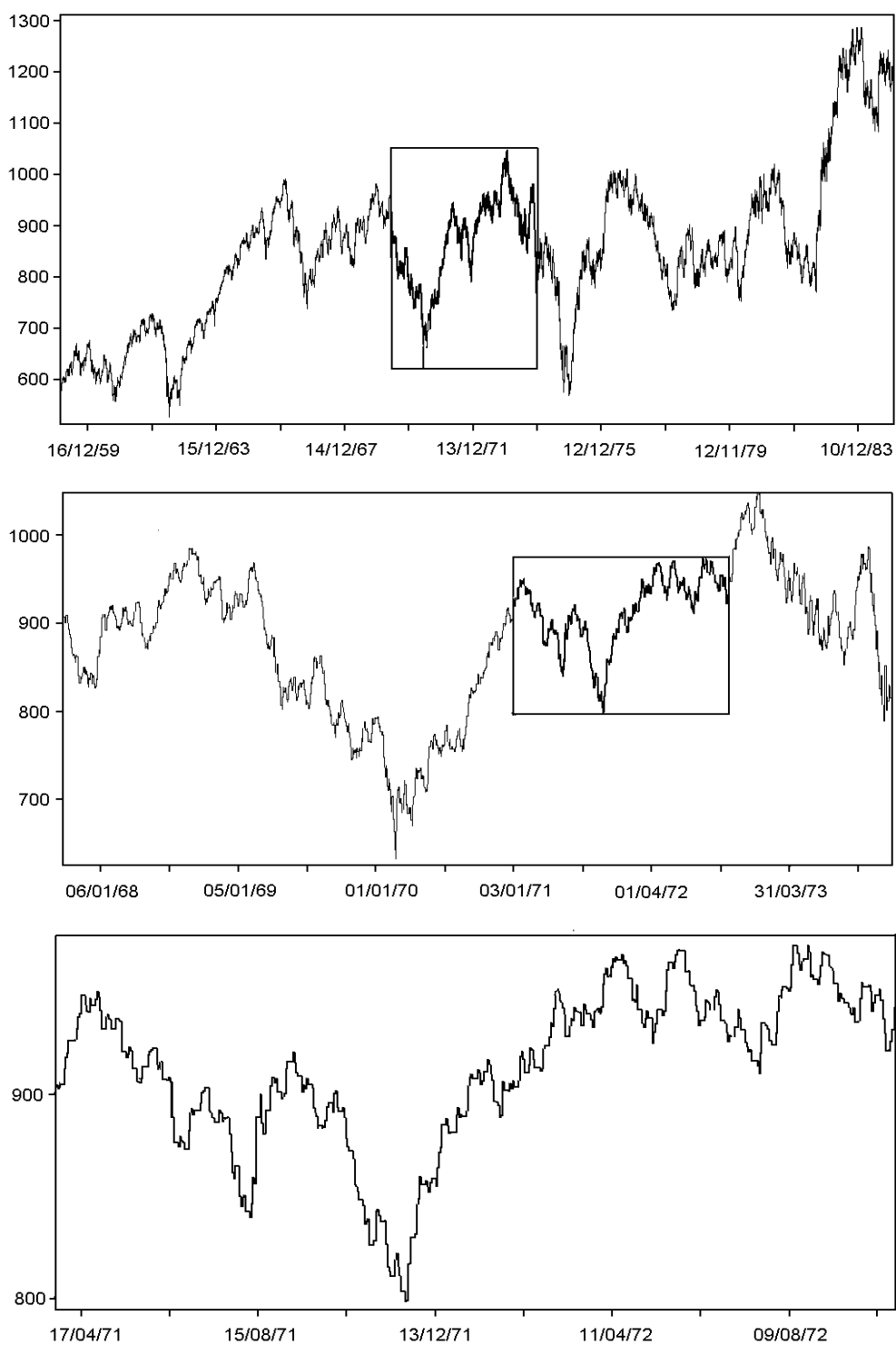


Рис. 3. Масштабно-инвариантная форма графика временного ряда (индекс Доу-Джонса): выделенные участки, соответствующие различным временным масштабам, выглядят сходным образом и статистически подобны целому ряду.