

Network economics: approaches to modeling of network structures

Votinov A.

Сетевые экономические модели: подходы к моделированию сетевых структур

Вотинов А. И.

*Вотинов Антон Игоревич / Votinov Anton - лаборант-исследователь,
Центр перспективного финансового планирования, макроэкономического анализа и статистик и финансов,
Научно-исследовательский финансовый институт
Министерства финансов, г. Москва*

Аннотация: развитие технологий предоставляет возможность дешево и быстро обмениваться информацией, что способствует развитию интеграционных процессов. Финансовый сектор является одним из первых, кто начал использовать технологии для интеграции. Кризис 2008 года показал, что банкротство одного крупного игрока может запустить каскад дефолтов. В данной работе проведен обзор методов, позволяющих учесть наличие сетевых эффектов. Данные методы включают в себя сетевую эконометрику, агентно-ориентированные и графические модели.

Abstract: the development of IT determines the pace of information exchange which improves the integration of economic processes. The financial sector was one of the first which adopted technologies for integration. The Financial crisis of 2008 demonstrated that the bankruptcy of one large participant could launch a cascade of defaults. A review of different methods that allow taking into account network effects is carried out in the paper. These methods include network econometrics, agent-oriented models (AOM) and graphical models.

Ключевые слова: графы, сетевые эффекты, каскад банкротств, финансовый кризис 2008 года, агентно-ориентированные модели, графические модели.

Keywords: graphs, network effects, a cascade of bankruptcies, the financial crisis of 2008, agent-based models, graphical models.

За последние несколько десятилетий сетевые эффекты начали играть важную роль в мировой экономике. Глобализация усилила макроэкономические связи между государствами, финансовые рынки характеризуются тесными и запутанными взаимоотношениями, высокотехнологические отрасли сильно зависят от разветвленных сетей поставщиков. Экономическая теория подсказывает, что диверсификация – это хорошо, а отсутствие разнообразия – плохо. Например, зависимость отечественной экономики от нефтегазового сектора привела к сильному падению ВВП, начавшемуся в 2014 году.

Тем не менее, нельзя утверждать, что наличие разнообразных экономических связей - это всегда хорошо. Кризис 2008-го года продемонстрировал, что недостаточно иметь хорошо диверсифицированный портфель, надёжность которого оценивается тремя буквами «А». Банкротство одного крупного банка, достаточно тесно связанного со всей финансовой системой, может запустить порочный круг дефолтов. Несмотря на то, что в целом сетевые эффекты диверсифицируют экономику, сильный внешний шок акселерируется за счёт этих эффектов и обрушивается на экономику.

Сетевые эффекты являются палкой о двух концах. С одной стороны, тесная связь между агентами снижает негативные шоки и распределяет их равномерно между всеми участниками процесса. С другой стороны, хорошая диверсификация усиливает сильные внешние шоки за счёт эффекта заражения. Кризисы нового глобализованного мира показали, что учёт связей между экономическими агентами является не менее важным, чем анализ самих агентов. При этом стоит учитывать, что современный мир характеризуется становлением и развитием крупных интеграционных союзов, таких как, например, АСЕАН [1] и ЕАЭС [2].

Современные макроэкономические исследования редко учитывают наличие тесных взаимосвязей между агентами. Интерес к моделям данного типа начал зарождаться после кризиса 2008 года, когда стало понятно, что структура экономики определяет её поведение. Целью данной статьи является демонстрация необходимости учёта сетевых экономических эффектов. В работе также представлено несколько подходов к их моделированию, основанных на сетевой эконометрике, агентно-ориентированном подходе и графических моделях.

Необходимость учёта сетевых эффектов.

Существует ряд работ, которые затрагивают вопросы существования сетевых эффектов. В работе [3] авторы исследуют зависимость между структурой экономики и волатильностью агрегированного выпуска. В предложенной модели закрытой экономики функционирует n различных секторов, взаимосвязь которых определяется матрицей Леонтьева. Матрица Леонтьева - это матрица W , в которой элемент w_{ij} является долей продукции j -го сектора в производстве продукции i -го сектора. В равновесии каждый сектор производит объём продукции, определяемый выражением:

$$v = \frac{\alpha}{n} [I - (1 - \alpha)W]^{-1} \mathbf{1}, \quad (1)$$

где W^{-1} - транспонированная матрица Леонтьева, $\mathbf{1}$ - единичный вектор, α - параметр, заданный производственной функцией. Вектор v определяет конечный выпуск каждого сектора. Выпуск всей экономики определяется выражением

$$y = v' \epsilon, \quad (2)$$

где ϵ - вектор случайных экзогенных шоков, дисперсия элементов которого постоянна.

Авторы работы вводят показатель влиятельности сектора $d_i = \sum_{j=1}^n w_{ij}$. Чем больше значение d_i , тем большее значение имеет i -й сектор для экономики в целом. Показано, что волатильность выпуска пропорциональна коэффициенту вариации влияния секторов, что можно выразить формулой

$$(\text{Var}(y_n))^{1/2} \propto \left(\frac{1+CV_n}{\sqrt{n}} \right) \quad (3)$$

где коэффициент вариации выражается формулой

$$CV_n = \frac{1}{\bar{d}_n} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d}_n)^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где \bar{d}_n – среднее значение по всем d_i .

Анализ полученных выражений позволяет сделать вывод, что полностью диверсифицированная экономика, для которой коэффициент вариации равен нулю, будет менее подвержена внешним шокам. Действительно, волатильность выпуска будет убывать по мере роста количества секторов n со скоростью, пропорциональной $\frac{1}{\sqrt{n}}$. Внешний шок одного сектора будет равномерно распределён по всей экономике и не сможет вызвать кризис. Если же в экономике один сектор доминирует над всеми остальными ($CV_n \propto \sqrt{n}$), то волатильность выпуска будет определяться только одним доминирующим сектором, что частично описывает влияние шока цен на углеводороды в 2014 году.

Авторы работы продемонстрировали, что структура экономики сильно влияет на её устойчивость. Данный подход можно масштабировать как до уровня отдельно взятого сектора, так и на мировую экономику в целом. Наличие одного влиятельного сектора (агента или страны, в зависимости от уровня масштабирования) накладывает серьёзные систематические риски на экономику.

Другая работа, связанная с влиянием сетевых эффектов на функционирование экономической структуры, является [4]. Авторы анализируют системный риск банковского сектора Российской Федерации на примере рынка межбанковского кредитования (МБК). При анализе рынка МБК было показано, что он обладает ярко выраженной кластерной структурой. Данный факт накладывает определённые систематические риски на банковскую систему, так как дефолт одного банка может повлиять на финансовую стабильность всех банков из кластера.

Оригинальность работы заключается в анализе каскадного распространения дефолтов по банковской системе. Авторы провели итеративное численно моделирование, при котором дефолт одного банка влиял на финансовую состоятельность контрагентов через рынок МБК. Было продемонстрировано два факта. Во-первых, наличие сетевых эффектов действительно приводит к образованию дефолтных. Во-вторых, размер дефолтного кластера тем больше, чем больше кредитных связей имел первоначальный банк.

В целом, работа [4] отражает негативный эффект сетевых эффектов. Финансовая несостоятельность одного достаточно крупного банка, который сильно связан с другими кредитными организациями, может запустить волну дефолтов. Учёт сетевых эффектов на примере графов межбанковского кредитования является важным аспектом анализа систематических рисков банковской системы.

Другая модель, представленная в работе [5], позволяет уловить нелинейный эффект диверсификации. Авторы статьи рассматривают финансовый сектор США, где предполагают, что банки связаны друг с другом за счёт некоторого фактора. В качестве связующего фактора может выступать рынок межбанковского кредитования или инвестирование в похожие финансовые инструменты. В работе представлена теоретико-игровая модель, отражающая зависимость распределения частоты дефолтов от степени влияния общего фактора, характеризующегося параметром a . Так, на рисунках 1, взятых из работы [5], представлены две функции плотности частоты дефолтов для абсолютно несвязного ($a = 0$) и связного ($a = 63,8\%$) секторов. Несмотря на то, что для связного сектора характерна большая вероятность меньшей частоты дефолтов, распределение имеет толстый правый хвост. Вероятность каскада дефолтов для связного сектора больше, чем для несвязного сектора.

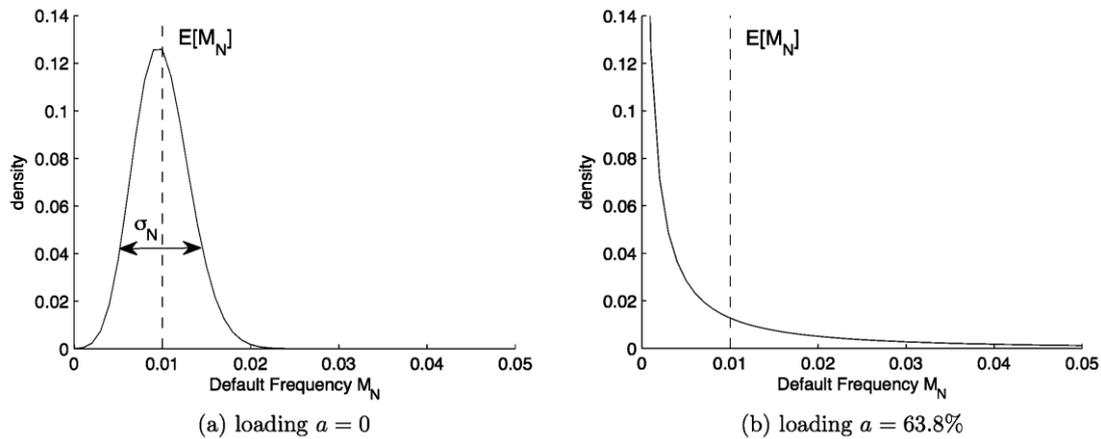


Рис. 1. Зависимость распределения частоты дефолтов от фактора a .

Источник: [5].

Диверсификация экономической структуры традиционно считалась эффективной стратегией защиты от систематических рисков. Тем не менее, исследования показывают, что это не всегда так. Даже при наличии хорошо диверсифицированного рынка финансовая несостоятельность одного ключевого игрока может запустить порочный круг. Данный факт отражает необходимость учёта сетевых эффектов в современных макроэкономических моделях. Изучение структуры сектора и факторов, на неё влияющих, является важной прикладной задачей, которая позволит в лучшей степени управлять систематическим риском любой системы.

Подход к оцениванию сетевых эффектов.

Выявление наличия сетевых эффектов, а так же их качественных и количественных оценок является важной и перспективной задачей эконометрического анализа. Получение надёжных оценок связи между экономическими агентами позволит проводить эффективную макроэкономическую политику, направленную на снижение систематического риска. Тем не менее, сетевая эконометрика (network econometrics) находится на раннем этапе развития. Систематическое изучение данного направления появилось лишь недавно в передовых американских высших учебных заведениях. Особый интерес к сетевой эконометрике появился после кризиса 2008 года, когда стало ясно, что наличие сетевых эффектов может являться ключевым фактором развития и распространения кризисных явлений.

Одной из первых работ, посвящённых сетевой эконометрике, является [6]. В работе представлена модель, целью которой является анализ социального взаимодействия между индивидами. В частности, модель была сформулирована с целью идентифицировать три типа взаимодействия: эндогенный, при котором поведение индивида определяется внутригрупповыми факторами; экзогенный, когда поведение индивида определяется внешними факторами; коррелированный, когда внутригрупповое поведение объясняется схожими социально-демографическими факторами. В упрощённом виде, модель можно записать в следующем виде:

$$y_i = \alpha + \beta \sum_{j=1}^N W_{ij} y_j + \nu X_i + \gamma \sum_{j=1}^N W_{ij} X_j + \varepsilon_i, \quad (5)$$

где y_i - эндогенная характеристика поведения i -го индивида; X_i - факторы, влияющие на поведение i -го индивида. Таким образом, параметр β отражает эндогенные эффекты, ν - экзогенные, γ - коррелированные. Элемент W_{ij} отражает связь между i -м и j -м индивидами.

В общем случае модель сложно оценить. В работе [6] обсуждаются вопросы условий идентификации модели и подход к её нелинейному и непараметрическому обобщению. В более современной работе [7] авторы предлагают, во-первых, теоретико-игровое обоснование данной модели с точки зрения теории поведения потребителя, во-вторых, анализ модели на предмет её идентифицируемости в зависимости от разной априорной информации.

Другой подход к анализу взаимодействие агентов предложен в работе [8]. Автором работы предложена оценка гетерогенного влияния участников группы на поведение индивида, что отличается от модели 5, где учитывается влияние всей группы как единого целого. Данная модель имеет следующий вид:

$$y_{it} = \alpha_i + \beta_i x_{it} + \sum_{j \neq i} \gamma_{ij} x_{jt} + \mu_i z_{it} + \delta_t + \varepsilon_i, \quad (6)$$

где y_{it} - интересующая характеристика i -го индивида в момент времени t ; α_i - индивидуальный фиксированный эффект; β_i - коэффициент влияния индивидуальных характеристик x_{it} на y_{it} ; γ_{ij} - коэффициент влияния характеристик j -го индивида x_{jt} на характеристику i -го индивида y_{it} ; μ_i - коэффициент влияния экзогенных факторов z_{it} ; δ_t - фиксированный временной эффект.

Для оценки модели автор предлагает использование панельных данных, что значительно увеличивает количество информации, доступной для оценивания сетевых эффектов. Оценка модели происходит с применением LASSO-регуляризации и авторского пошагового алгоритма минимизации пенализированной функции потерь. Использование LASSO-регуляризации позволяет справиться с большим количеством параметров, включённых в модель, идентифицировать наличие сетевых эффектов без использования априорной информации. Подробнее о LASSO-регуляризации можно прочитать в [9].

В работе [10] представлена математическая модель спроса на рынке межбанковского кредитования банковского сектора Великобритании в периоды до, во время и после кризиса 2008 года. Авторы использовали модель, чем-то схожую с моделью из работы [7]. Было продемонстрировано, что сеть межбанковского кредитования позволяет как абсорбировать, так и усиливать шоки ликвидности. Так, например, в докризисный период банки были слабовосприимчивы к риску и активно кредитовали друг друга, что в последствии усилило внешний финансовый шок. Напротив, после кризиса банки начали вести себя осторожнее, что сделало систему менее восприимчивой к внешним угрозам.

Развитие вычислительных мощностей делает возможным использование сложных симуляционных агентно-ориентированных моделей. Основная идея данных моделей заключается в моделировании экономики, максимально приближённой к реальности по масштабам. Агентно-ориентированная модель экономики может включать в себя несколько десятков секторов, в каждом из которых функционирует несколько сотен фирм и потребителей. Поведение всех агентов определяется заранее определёнными функциями, что позволяет смоделировать их взаимоотношения.

Основным преимуществом агентно-ориентированных моделей является возможность оценить систематические риски всей системы. Многократные симуляции хорошо откалиброванной модели позволяют не только сконструировать распределение рисков, а также оценить влияние тех или иных факторов на устойчивость системы. Более подробно с агентно-ориентированными моделями можно ознакомиться в работах [11] и [12].

Другой подход к анализу сетевых эффектов пришёл из машинного обучения и называется графические модели. В основе данного подхода лежит использование графов. Цель анализа заключается в определении факторов, влияющих на наличие и силу связей между вершинами графа, где вершинами могут выступать как агенты экономической деятельности, так и какие-то искусственные факторы. К данному классу моделей можно отнести байесовские сети, определяющие вероятностные зависимости между вершинами. Так, например, такая сеть может определять вероятностное распределение кредитов, выданных одним банком другому в зависимости от каких-либо факторов. Подробнее с графическими моделями можно ознакомиться в работе [13].

Заключение

Развитие информационных технологий и высокоскоростных средств передачи информации стимулируют глобализацию экономических процессов. Международный финансовый рынок характеризуется тесными и многочисленными взаимосвязями. Было продемонстрировано, что структура таких тесно связанных рынков предопределяет их систематические риски. Интеграционные процессы не только снижают и распыляют риски среди всех участников системы, но и акцелируют сильные внешние шоки, запуская каскад несостоятельности. Анализ экономических структур и факторов, определяющих их характеристики, является перспективной задачей. В рамках данной работы предложен обзор некоторых подходов, развитие которых могло бы перенести управление рисками на новый, структурный уровень.

Литература

1. Яковлев И. А., Кабир Л. С., Никулина С. И., Ракова И. Д. Региональные финансовые механизмы и их роль в обеспечении финансовой стабильности (опыт АСЕАН) // Научно-Исследовательский Финансовый Институт. Финансовый Журнал. № 5, 2016.
2. Абрамов В. Л., Алексеев П. В. Инвестиционное сотрудничество государств-членов ЕАЭС как ключевой фактор их устойчивого развития // Научно-Исследовательский Финансовый Институт. Финансовый Журнал. № 4, 2016.
3. Acemoglu D., Carvalho V. M., Ozdaglar A. and Tahbaz-Salehi A. The network origins of aggregate fluctuations // *Econometrica*, 80 (5):1977–2016, 2012.
4. Леонидов А. В., Румянцев Е. Л. Оценка системных рисков межбанковского рынка России на основе сетевой топологии // Журнал Новой экономической ассоциации. 3 (19):65–80, 2013.
5. Denbee E., Julliard C., Li Y. and Yuan K. Network risk and key players: a structural analysis of interbank liquidity // Financial Markets Group (FMG) Discussion Paper dp734, 2014.
6. Manski C. F. Identification of endogenous social effects: The reflection problem // *The review of economic studies*. 60(3):531–542, 1993.

7. *Blume L. E., Brock W. A., Durlauf S. N. and Jayaraman R.* Linear social interactions models // *Journal of Political Economy*. 123(2):444–496, 2015.
8. *Manresa E.* Estimating the structure of social interactions using panel data // *CEMFI Working Paper*, 2013.
9. *Tibshirani R.* Regression shrinkage and selection via the lasso // *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*. Pages 267–288, 1996.
10. Yvonne Kreis and Dietmar Leisen. Systemic risk in a structural model of bank default linkages // Available at SSRN 2699242, 2015.
11. *Mandel A.* Agent-based dynamics in the general equilibrium model // *Complexity Economics*, 2012. T. 1. № 1. C. 105-121.
12. *Gintis H.* The dynamics of pure market exchange // *Approaches to the Evolving World Economy: Complex Dynamics, Norms, and Organizations*, 2012.
13. *Chandrasekhar A.* Econometrics of network formation / *Oxford Handbook on the Econometrics of Networks*, forthcoming, 2015. T. 12.