

Математические и статистические методы

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШОКОВ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ РОССИИ

Клачкова Ольга Александровна

кандидат экономических наук, доцент,

МГУ имени М.В. Ломоносова, экономический факультет

(г. Москва, Россия)

Кореньяк Григорий Владимирович

студент магистратуры,

МГУ имени М.В. Ломоносова, экономический факультет

(г. Москва, Россия)

Шагас Наталия Леонидовна

кандидат экономических наук, доцент,

МГУ имени М.В. Ломоносова, экономический факультет

(г. Москва, Россия)

Аннотация

В статье рассматривается влияние локальных шоков в отдельных отраслях на макроэкономические показатели с использованием современных межотраслевых моделей и российских статистических данных. На основе динамической модели межотраслевых связей идентифицированы ключевые сектора российской экономики, наиболее значимые с точки зрения передачи долгосрочных шоков. К ним отнесены сырьевые и энергетические отрасли, оптовая и розничная торговля, а также транспортные услуги. Подтверждена важность этих отраслей через анализ центральности в сети производственных связей. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки антикризисной политики, направленной на повышение устойчивости ключевых отраслей, мониторинг цен и поддержку устойчивых цепочек поставок.

Ключевые слова: межотраслевой баланс, производственные сети, колебания выпуска.

JEL коды: D57, E17, E23, E32.

Для цитирования: Клачкова О.А., Кореньяк Г.В., Шагас Н.Л. Математическое моделирование распространения шоков по отраслям экономики России // Научные исследования экономического факультета. Электронный журнал. 2025. Том 17. Выпуск 3. С. 38-52. DOI: 10.38050/2078-3809-2025-17-3-38-52.

Клачкова О.А., e-mail: sparrow889@gmail.com

Кореньяк Г.В., e-mail: griko9999@gmail.com

Шагас Н.Л., e-mail: nshagas@gmail.com

Введение

В последнее время в экономической теории и практике все большее внимание уделяется проблемам влияния изменений показателей деятельности отдельных фирм и отраслей на агрегированные макроэкономические показатели (Carvalho, Nirei, Saito, Tahbaz-Salehi, 2021; Korovkin, Makarin, 2023). Инструментом для исследования подобных проблем, как правило, является модель межотраслевого баланса, которую разработал Василий Леонтьев (Леонтьев и др., 1958), за что впоследствии удостоился Нобелевской премии по экономике.

В данной работе мы проверяем на российских данных гипотезу, что снижение выпуска одной из отраслей (шок выпуска, выступающий в качестве экзогенного фактора) через межотраслевые связи приводит к большему по величине снижению общего выпуска в стране, чем в этой отрасли. Иными словами, совокупный размер экономических потерь определяется особенностями распространения шока в производственных цепочках внутри страны. На уровне фирм объяснение гипотезы состоит в том, что ухудшение положения поставщиков одной компании способно привести к ухудшению ее собственной деятельности. Аналогичным образом, снижение спроса может вынудить компанию сократить объемы производства, что неизбежно негативно отразится на ее поставщиках. Такие процессы способны запустить порочный круг.

Несмотря на сравнительно небольшое количество исследований в данной области, вызванное, главным образом, недостаточной доступностью сетевых данных о взаимодействиях между компаниями или отраслями, изучение механизмов распространения шоков в производственных цепочках остается актуальной научной задачей. С развитием технологий продукция становится все более сложной (Hausmann et al., 2013), что требует использования множества разноплановых компонентов и вовлечения значительного числа поставщиков. В результате производственные цепочки расширяются, и динамика распространения секторальных колебаний вызывает все больший интерес, в то время как моделирование этих процессов становится все более сложным.

Роль производственных цепочек выше в развивающихся странах (Bagley, Aqeel, Zlotnicka, 2016) по сравнению с развитыми, где основным драйвером производительности является технологический прогресс с очевидным положительным трендом. Ярким примером является энергетический кризис в Южной Африке, длящийся с 2007 г. Перебои в электроснабжении, вызванные нехваткой мощностей и высокой степенью изношенности электростанций государственной монополии «Eskom», привели к тому, что около 80% системы здравоохранения страны находилось под угрозой. Кроме того, кризис стал причиной увеличения уровня преступности и замедления экономического роста. Экономические потери от этих проблем оцениваются в миллиарды долларов.

Целью работы является определение для экономики России наиболее значимых секторов с точки зрения распространения шоков их выпуска на ВВП. К сожалению, нам недоступны данные на уровне взаимодействия отдельных фирм, существуют сетевые данные только на уровне отраслей (таблицы «затраты–выпуск»). Следующим ограничением является тот факт, что на момент проведения исследования имеются данные только за 2021 г. и ранее, причем согласно постановлению Правительства¹ подобные таблицы разрабатываются «один раз в пять лет за годы, оканчивающиеся на 1 и 6». Мы используем симметричные таблицы «затраты–выпуск» за 2016 и 2021 гг., построенные по типу «продукт–продукт» и содержащие 98

¹ URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/comment-tzv-2016.htm> (дата обращения: 05.04.2025)

однородных групп продуктов, которые соответствуют общероссийскому классификатору видов экономической деятельности, действующему на момент сбора данных.

1. Модели влияния распространения шоков в отдельных фирмах или отраслях на макроэкономические показатели

Теоретическое описание распространения шоков в экономике строится на динамических моделях общего равновесия. В базовой статье (Long, Plosser, 1983) предполагается, что каждая фирма производит товар, который может быть использован другими фирмами для производства конечного продукта либо потреблен. Фирмы сталкиваются со случайным шоком производительности, который изменяется в каждый период времени. Шоки производительности могут передаваться от одной фирмы к другой через производственную сеть. Производственная функция, как и функция полезности домохозяйства, является функцией Кобба–Дугласа с постоянной отдачей от масштаба. В работе демонстрируется влияние шоков производительности отдельных отраслей на динамику агрегированного выпуска. Модель используется в качестве фундамента для более современных исследований.

Так, на основе вышеупомянутой модели, в статьях (Acemoglu et al., 2012; Acemoglu, Ozdaglar, Tahbaz-Salehi, 2017) определяются условия того, что шоки в отдельных отраслях будут перерастать в шоки совокупного выпуска в статической модели. Связи между отраслями описываются в виде графа, который различается для разных экономик в зависимости от характера этих связей (являются ли рассматриваемые отрасли только поставщиками или одновременно и потребителями продукции других отраслей). Рассматривая различные характеристики графа, которым описывается экономика, авторы выясняют, что важную роль в распространении шоков играют косвенные эффекты, или эффекты второго порядка, определенные как доля выпуска секторов, зависящих от сектора, в котором произошел шок². Важным результатом статьи является теоретическая формализация того, как возможность появления и величина крупных шоков в значительной степени зависят от структуры графа.

В нашей статье мы будем работать с модификацией модели (Acemoglu, Carvalho, 2012) исследованием (Liu, Tsyvinsky, 2020), в котором к модели общего равновесия добавлена динамическая составляющая в виде издержек подстройки экономики после шока. Этот подход подробно изложен в следующем параграфе.

Помимо теоретической ценности сетевой подход применим и на практике. (Carvalho, Nirei, Saito, Tahbaz-Salehi, 2021), используя модель общего равновесия из вышеупомянутого исследования (Acemoglu, Carvalho, 2012), рассматривают экономику Японии в виде графа при помощи данных о транзакциях на уровне фирм, а также оценивают величину шока, которому подверглась Япония в результате землетрясения 2011 г. Авторы показывают, что помимо прямого влияния на совокупный выпуск от закрытия фирм, находившихся в зоне землетрясения, существуют эффекты более высоких порядков, косвенные эффекты, из-за которых локальные шоки могут перерастать в крупные макроэкономические кризисы. Модель предполагает цепочки поставок экзогенными, таким образом переоценивает величину шока, не учитывая эффект замещения поставщиков, что соответствует созданию новых ребер в графе.

² Речь необязательно о секторах. К примеру, косвенные эффекты на уровне фирм: доля выпуска фирм, покупающих товар фирмы X в совокупном выпуске.

Передача шоков по производственным цепочкам также подтверждается (Barrot, Julien, 2016). На данных о связях между поставщиками и клиентами, сообщаемыми американскими публичными компаниями, авторы выясняют, что фирмы, закупающие товары у компаний, пострадавших в результате природных катастроф (используются данные обо всех крупных стихийных бедствиях в США за период 1985–2016 гг.), теряют 2–3 п.п. роста продаж. При этом эффект временный, но он тем больше, чем выше частота и специфичность сделок. Потери продаж приводят к значительным потерям, порядка 1%, рыночной стоимости акций. Эффект распространяется и на других поставщиков, которые также испытывают снижение роста продаж после катастрофы.

При этом не стоит переоценивать роль производственных цепочек в природе шоков: (Вагаев, Farhi, 2021) на основе модели (Acemoglu, Carvalho, 2012) и анализа изменений экономики, вызванных COVID-19, приходят к выводу, что при выполнении предпосылок модели, занятость, выпуск и инфляция колеблются в зависимости от шоков предложения или спроса вне зависимости от вида производственной цепочки. То есть структура взаимосвязей фирм на рынке не влияет на распространение шоков.

В данной работе методологически мы опираемся именно на статью (Liu, Tsyvinsky, 2020), поскольку нам недоступны данные о взаимодействиях на уровне фирм в России, следовательно, не представляется возможным реализовать микроэкономический подход в духе (Barrot, Julien, 2016; Carvalho, Nirei, Saito, Tahbaz-Salehi, 2021; Korovkin, Makarin, 2023). Однако для эмпирического анализа межотраслевых взаимодействий работа (Liu, Tsyvinsky, 2020) является наиболее подходящей, так как в ней предлагается продвинутый динамический подход.

2. Динамический подход на основе модели общего равновесия

В статье (Liu, Tsyvinsky, 2020) описана модель, учитывающая издержки подстройки объемов производства к новому равновесию. Авторы находят, что наиболее разрушительны шоки, связанные с отраслями, в которых товар, прежде чем дойти до конечного потребителя, должен пройти длинную цепочку.

Экономика страны может быть представлена в виде графа, вершины которого соответствуют экономическим субъектам, а товарно-денежный поток между ними – ребрам. С учетом доступности данных вершинами могут являться фирмы, а могут – отрасли. Авторы приводят в пример сравнение горизонтальной и вертикальной экономик: в горизонтальной экономике практически нет затрат на подстройку, поэтому шоки не оказывают сильного воздействия на состояние экономики в целом. В то время как в вертикальной экономике, которая характеризуется длинными цепочками от сектора к потребителю, шоки могут распространяться в течение длительного времени, подстройка выпуска происходит долго из-за наличия большого числа посредников. Примеры вертикальных и горизонтальных связей проиллюстрированы на рис. 1.

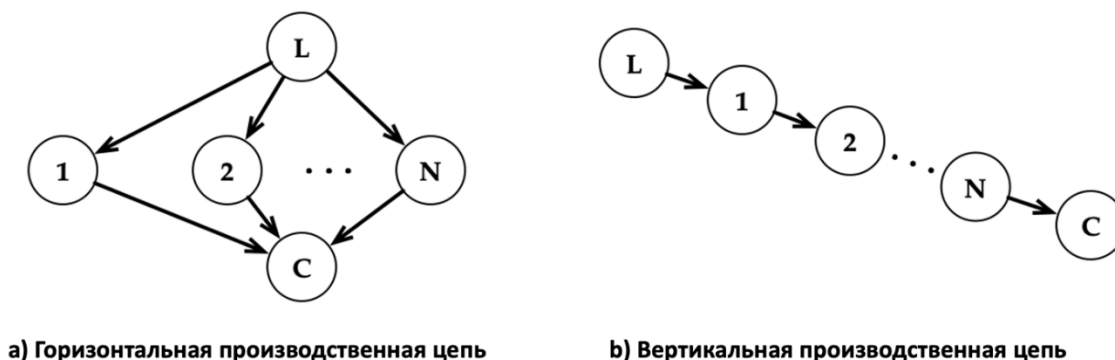


Рисунок 1. Примеры горизонтальной (а) и вертикальной (b) экономик (Liu, Tsyvinsky, 2020)

Если шок будет наблюдаться в секторе L в экономике (а), то восстановление к исходному равновесию произойдет спустя один момент времени, однако в экономике (b), если произойдет шок в секторе L (выпуск этого сектора уменьшится), остальные секторы по производственной цепочке будут уменьшать свой выпуск, причем это будет происходить столько моментов времени, сколько ребер ведет от L до C. Когда в секторе L все нормализуется, производство конечного товара не сможет выйти к исходному уровню мгновенно, так как остальные секторы все еще производят объем меньше равновесного, и нужно определенное время для того, чтобы каждый сектор поэтапно начал наращивать объемы производства и в итоге оно вернулось на прежний уровень. Чем длиннее цепочка, тем больше издержки подстройки, и тем более существенный урон от шоков будет для экономики в целом. В реальности связи между секторами чаще всего бывают двусторонними, что дополнительно усложняет процесс восстановления.

Модель предполагает экзогенное предложения труда и N секторов экономики, которые при помощи труда и промежуточных товаров производят конечные продукты, идущие на потребление, цены для всех производителей считаются заданными. В стандартной модели (Acemoglu, Carvalho, 2012) производство промежуточных поставок в случае шока моментально возвращалось к равновесным значениям, в то время как в модели (Liu, Tsyvinsky, 2020) происходит постепенное, долгосрочное движение к равновесию. Из-за таких дополнительных издержек подстройки (обозначается как параметр δ) микрошоки в отдельных секторах могут оказывать большое влияние на экономику в целом. Считается, что издержки подстройки есть только в секторах, производящих промежуточные продукты, но не при производстве конечного товара. При условии $\delta = 0$, модель совпадает с (Acemoglu, Carvalho, 2012). Наконец, еще один источник долгосрочных изменений – предпочтения потребителя, который ценит потребление в настоящий момент больше, чем будущее (параметр дисконтирования полезности от потребления во времени ρ).

Для понимания, как устроено распространение шоков по производственной цепочке, рассмотрим формулу:

$$GDP_t \equiv 1 * IO * \beta_t$$

GDP – выпуск в экономике, 1 – единичный вектор (для суммирования),

IO – таблица «затраты – выпуск»,

β – вектор доли выпуска секторов в совокупном выпуске экономики.

Доля секторов во времени меняется следующим образом:

$$\beta_{t+1} = IO * \beta_t$$

Это значит, что если в некотором секторе L произошел шок в момент времени t (его доля в общем выпуске сократилась), то он через матрицу затраты-выпуск перейдет в секторы, которые «потребляют» товар сектора L в момент времени $t+1$, через матрицу «затраты-выпуск» в квадрате ($\beta_{t+2} = IO * \beta_{t+1} = IO^2 * \beta_t$) перейдет в секторы «второй степени дальности» в момент времени $t+2$ и т. д., иначе говоря, шок будет накапливаться уже в долгосрочном периоде.

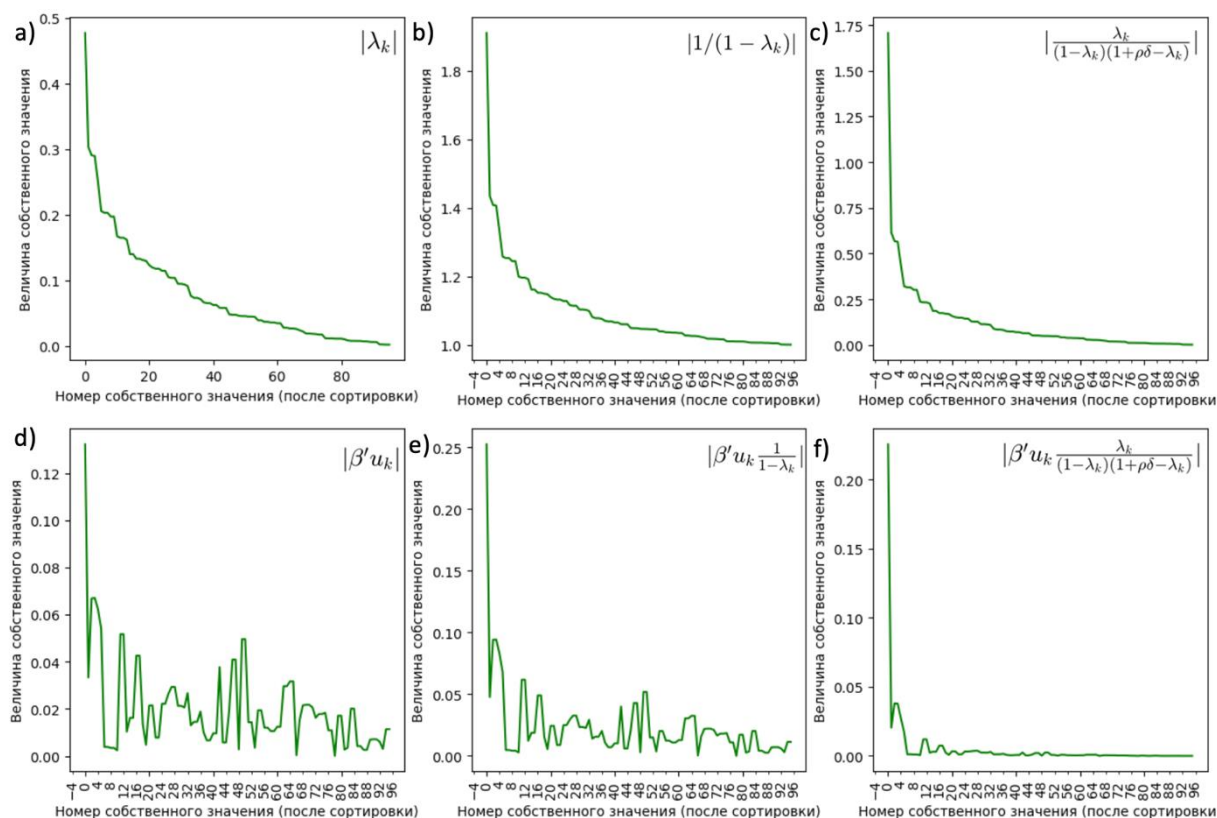
Видно, что непосредственно структура матрицы «затраты-выпуск» (IO) оказывает влияние на совокупный выпуск. Мы можем приблизить матрицу «затраты-выпуск» матрицей меньшего ранга (понижить размерность) с помощью собственных векторов. При этом векторы с большими собственными значениями будут оказывать большее влияние на долгосрочную динамику ВВП. Секторы, которые соответствуют векторам с наибольшими собственными значениями, являются самыми важными для экономики страны с точки зрения долгосрочного распространения шоков в производственных цепочках.

В статье (Liu, Tsyvinsky, 2020) выделяются подобные критически важные отрасли для экономики США. Мы применим их подход на российских данных: будем работать с таблицами «затраты-выпуск» 2016 и 2021 гг. Как указано выше, мы используем симметричную таблицу «затраты-выпуск», построенную по типу «продукт-продукт» и содержащую 98 однородных групп продуктов, которые соответствуют общероссийскому классификатору видов экономической деятельности, действующему на момент сбора данных. В симметричной таблице «затраты-выпуск» каждой паре секторов i, j соответствует ячейка A_{ij} , характеризующая количество продукта сектора i в млн р., использованного в производстве продукта сектора j . Параметры δ и ρ мы полагаем такими, что $\delta \cdot \rho = 0,1$, как это сделано в статье, на которую мы опираемся (небольшая вариация этих параметров от 0,09 до 0,11 не меняет полученных нами результатов).

Результаты расчетов для данных 2016 г. приведены на рис. 2. На рисунке 2а изображены собственные значения матрицы затраты-выпуск, на рис. 2б – их вклад в долгосрочный эффект от шока без учета издержек подстройки, на рис. 2с – вклад в долгосрочный эффект от шока с учетом издержек подстройки и коэффициента дисконтирования. Собственные значения – разные по величине, на основе рисунка 2с можно выделить несколько первых по порядку собственных значений, в большей степени определяющих вклад отраслей (по таблице «затраты-выпуск») в распространение шоков и, как следствие, в ВВП.

Рисунок 2d отражает величину совокупных потерь экономики в нулевом периоде, при условии, что шок произошел в секторе, описываемым собственным вектором k (это вектор размера 98 на 1, каждый элемент может быть поставлен в соответствие отрасли, чем большее относительное значение этот элемент имеет в собственном векторе, тем больше этот собственный вектор соответствует отрасли). Рисунки 2е и 2f отражают величину совокупных потерь экономики в долгосрочном периоде в моделях без издержек подстройки и с издержками подстройки соответственно. Видно, что с учетом передачи шоков по сети значимость вклада собственных векторов с большими собственными значениями увеличивается (сравнение рис. 2f с рис. 2е). Например, первому по номеру собственному вектору на рис. 2f соответствует число по оси ординат, чуть большее 0,2. Это значит, что отрасли, вошедшие в этот вектор, составляют более 20% совокупного долгосрочного выпуска в модели с учетом подстройки, поэтому шок

этого собственного вектора приведет к потерям в размере более 20% совокупного долгосрочного выпуска.



Обозначения: u_k – собственный вектор k , λ_k – собственное значение k , ρ – коэффициент дисконтирования, β – вектор долей секторов в ВВП.

Рисунок 2. Графики распределения собственных значений, а также величин шоков на данных ТЗВ 2016 г. (построено авторами)

Структура графа (как и таблицы «затраты–выпуск») несимметрична, собственные векторы не ортогональны друг другу, они коррелированы, таким образом отражают шоки в одних и тех же секторах экономики.

Для экономики России в 2016 г. мы имеем следующие результаты: на основе рис. 2f выделим три собственных значения и три собственных вектора и рассмотрим секторы, соответствующие наибольшим числам в этих векторах. Выделяем три вектора по «методу локтя», поскольку на рис. 2f наблюдается резкий спад в величине потерь долгосрочного выпуска при шоке векторов с номерами больше 3. В таблице 1 приведены секторы, соответствующие данным выделенным наибольшим собственным значениям. Число секторов в табл. 1 различается, так как если в собственном векторе какому-то сектору соответствует близкое к нулю число, то вклад этого сектора в шок, передаваемый этим собственным вектором, минимален.

Таблица 1

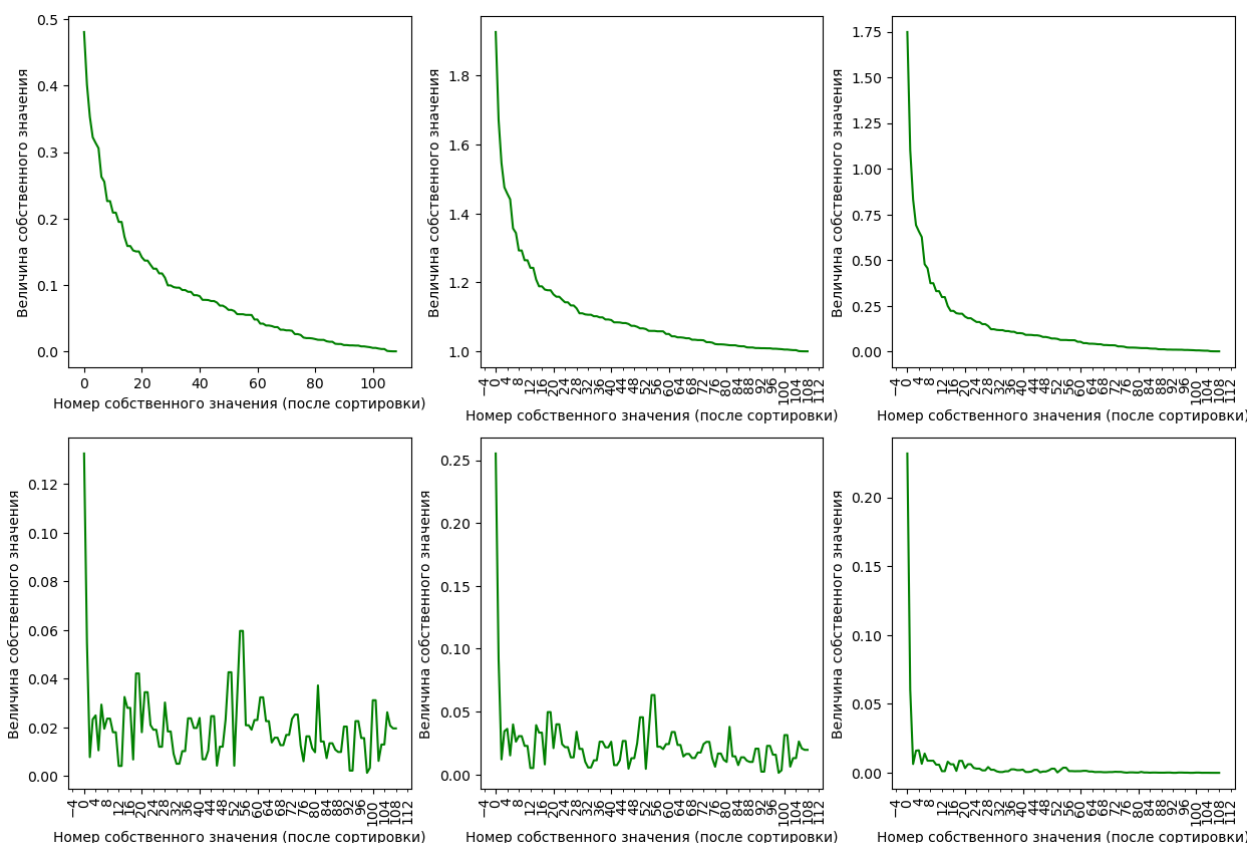
Отрасли, соответствующие наибольшим коэффициентам для ключевых векторов, по данным ТЗВ 2016 г.

Собственный вектор 1 ($\lambda \sim 0,5$)	Собственный вектор 2 ($\lambda \sim 0,3$)	Собственный вектор 3 ($\lambda \sim 0,3$)
Электроэнергия Оптовая торговля	Электроэнергия Газовая отрасль	Железо, чугун, сталь и ферросплавы

Собственный вектор 1 ($\lambda \sim 0,5$)	Собственный вектор 2 ($\lambda \sim 0,3$)	Собственный вектор 3 ($\lambda \sim 0,3$)
Недвижимость Услуги транспортные Услуги, связанные с предпринимательской деятельностью Нефтепродукты Нефть Газовая отрасль Услуги по финансовому посредничеству Услуги железнодорожного транспорта Услуги транспортирования по трубопроводам Железо, чугун, сталь и ферросплавы Работы строительные	Недвижимость Оптовая торговля	Металлы основные драгоценные и цветные прочие Вторичное сырье Уголь Суда, летательные и космические аппараты Услуги железнодорожного транспорта Услуги транспортные

Источник: составлено авторами.

Таким образом, экономика России и ее производственные цепочки в 2016 г. больше всего зависели от отраслей, представленных в табл. 1. Аналогично проведем расчеты по данным 2021 г.



Обозначения: u_k – собственный вектор k , λ_k – собственное значение k , ρ – коэффициент дисконтирования, β – вектор долей секторов в ВВП.

Рисунок 3. Графики распределения собственных значений, а также величин шоков на данных ТЗВ 2021 г. (построено авторами)

Результаты расчетов для данных 2021 г. приведены на рис. 3. Описание рис. 3 совпадает с тем, которое мы давали для рис. 2. На основе рис. 3f выделим одно собственное значение и один собственный вектор, рассмотрим секторы, соответствующие наибольшим числам в этом векторе. Выделяем ровно один вектор, поскольку на рис. 3f наблюдается резкий спад в величине потерь ВВП при шоке векторов с номерами больше 1. В таблице 2 приведены секторы, соответствующие данным выделенным наибольшим собственным значениям.

Таблица 2

Отрасли, соответствующие наибольшим коэффициентам для ключевых векторов, по данным ТЗВ 2021 г.

Собственный вектор 1 ($\lambda \sim 0,5$)
Электроэнергия
Оптовая торговля
Нефть
Нефтепродукты
Недвижимость
Финансовые услуги
Железо, чугун, сталь и ферросплавы
Услуги по грузовым перевозкам
Услуги железнодорожного транспорта
Услуги транспортирования по трубопроводам
Газовая отрасль

Источник: составлено авторами.

Несмотря на то, что количество собственных векторов уменьшилось при переходе от данных 2016 г. к данным 2021 г., критические для экономики России секторы с точки зрения долгосрочного распространения шоков практически остались неизменными.

Во-первых, речь идет об услугах по производству, передаче и распределению электроэнергии. Электроэнергия является необходимым условием функционирования любого сектора экономики, она оказывает ключевое влияние на промышленность и производство. Трудно представить любую форму деятельности без электроэнергии, поэтому перебои в снабжении либо же изменения цен на электроэнергию будут приводить к сильным шокам выпуска.

В-вторых, нефтяная, газовая отрасль и черная металлургия. Продукты производства этих отраслей активно используются в других секторах промышленности, на которых опирается экономика нашей страны.

В-третьих, услуги по оптовой торговле и разнообразные транспортные услуги. Две эти отрасли взаимосвязаны и дают мультипликативный эффект. Оптовая торговля является связующим звеном между производителем и рынком, давая возможность малому и среднему бизнесу экономить на масштабе и обеспечивать товарооборот. С помощью транспортных услуг реализуются сложные логистические цепочки, простирающиеся по всей территории нашей страны, гарантируя ее пространственную связность.

В-четвертых, отрасль недвижимости, в рамках которой коммерческая недвижимость необходима для функционирования бизнеса, а некоммерческая имеет высокую социальную значимость.

3. Центральность по собственному значению

Как было показано на рисунке 1, экономику страны можно представить в виде графа, в котором отрасли являются вершинами, а объемы товаров и услуг, производимые отраслями, соответствуют весам на ребрах. Основным способом идентифицировать наиболее важные вершины в графе является расчет центральности вершин. Способов рассчитать центральность вершины много: по степени, по близости, по кратчайшему пути, при этом наиболее подходящей для нашей работы является центральность по собственному значению, поскольку она позволяет учесть не только ближайших соседей вершины, но и более далекие связи, эффекты высоких порядков. Кроме того, данную центральность можно интерпретировать как долгосрочную меру важности вершины, потому что если в каком-то секторе происходит шок в первом периоде, то ближайшие соседи этого сектора, связанные с ним ребром, пострадают во втором периоде, в третьем периоде шок пройдет путь в два ребра и т. д. Объясним данную идею, приводя математическую формализацию концепции центральности по собственному значению и ее связь с распространением шоков по производственной цепочке.

Пусть выпуск секторов в нулевом периоде описывается вектором $x(0)$. Используя технологическую матрицу, основанную на таблицах «затраты–выпуск», мы получаем выпуск в первом периоде:

$$x(1) = A * x(0).$$

Аналогичными рассуждениями можно получить связь между выпуском в период t с начальным выпуском:

$$x(t) = A^t * x(0).$$

Если найти базис из собственных векторов матрицы A , то с помощью него можно записать вектор $x(0)$:

$$x(0) = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n,$$

где $v_1, \dots, v_n$ – собственные векторы матрицы A (соответствующие собственные числа равны $\lambda_1, \dots, \lambda_n$), $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ – коэффициенты разложения вектора первоначального выпуска по базису из собственных векторов. Важно отметить, что в силу структуры матрицы A , в которой в клетке ij записана доля продукта сектора i , использованного в производстве продукта сектора j , базис из собственных векторов существует, причем наибольшему собственному значению (пусть это будет λ_1) соответствует собственный вектор со строго положительными координатами³.

Тогда имеем:

$$\begin{aligned} x(t) &= A^t * (\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n) = \\ &= \sum_i \alpha_i * \lambda_i^t * v_i = \lambda_1^t * \sum_i \alpha_i * \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_1}\right)^t * v_i. \end{aligned}$$

³ По теореме Фробениуса–Перрона.

Так как λ_1 – наибольшее собственное значение, то в долгосрочном периоде, при стремлении t к бесконечности, $\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_1}\right)^t \rightarrow 0$, а значит, вклад всех векторов, кроме v_1 , будет также стремиться к нулю. Тогда $x(t)$ будет пропорционален собственному вектору v_1 .

Теперь покажем связь с центральностью по собственному значению. Пусть центральность вершины i обозначается c_i . Ее величина зависит от центральности «соседей»:

$$c_i = \frac{1}{\lambda} \sum_j^N \omega_{ij} c_j,$$

где λ – некоторая нормировочная константа, а ω_{ij} – элементы матрицы смежности для графа, описывающего нашу экономику, т. е. фактически элемент ij матрицы A .

В матричном виде получаем $\lambda * c = A * c$, что по определению значит, что вектор центральностей по собственному значению c – это собственный вектор матрицы A .

Итак, вектор центральностей вершин графа по собственному значению, с одной стороны, описывает наиболее важные отрасли с точки зрения учета далекого «соседства», а с другой стороны, пропорционален вектору выпусков отраслей в долгосрочном периоде.

Ранжирование секторов на основе центральности по собственному значению по данным 2016 г. приведено в табл. 3 (секторы, у которых значение центральности выше 0,2).

Таблица 2

Центральность секторов по собственному значению (отсортировано по убыванию центральности)

Отрасль	Центральность
Нефтепродукты	1,00
Передача электроэнергии	0,72
Строительные работы	0,69
Оптовая торговля	0,53
Розничная торговля	0,47
Услуги в сфере государственного управления	0,42
Недвижимость	0,41
Сельское хозяйство	0,36
Услуги транспортные вспомогательные	0,32
Мясо и мясные продукты	0,29
Вещества химические основные	0,27
Услуги сухопутного транспорта	0,27
Суда, летательные и космические аппараты	0,25
Нефть	0,22
Железо, чугун, сталь и ферросплавы	0,21

Источник: построено авторами по ТЗВ 2016 г.

Ранжирование секторов на основе центральности по собственному значению по данным 2021 г. приведено в табл. 4 (секторы, у которых значение центральности выше 0,2).

Таблица 4

Центральность секторов по собственному значению (отсортировано по убыванию центральности)

Отрасль	Центральность
Нефтепродукты	1,00
Строительные работы	0,42
Вещества химические и продукты химические	0,40
Электроэнергия	0,33
Сельское хозяйство	0,31
Оптовая торговля	0,30
Недвижимость	0,24
Услуги по складированию и вспомогательные транспортные услуги	0,24
Услуги по грузовым перевозкам	0,24
Железо, чугун, сталь и ферросплавы	0,23
Розничная торговля	0,22

Источник: построено авторами по ТЗВ 2021 г.

Как и в случае модели (Liu, Tsyvinsky, 2020), на основе центральности по собственному значению выявлены критические секторы. Список таких секторов в целом совпадает для двух реализованных подходов – это добывающие отрасли (нефть, газ, черная металлургия), это производство электроэнергии, торговля, транспортные услуги и отрасль недвижимости.

Заключение

В рамках представленной статьи исследован процесс воздействия локального шока в отдельной отрасли на экономику в целом, применены современные модели межотраслевого анализа на доступных российских данных, проверена устойчивость полученных результатов. Удалось идентифицировать наиболее значимые секторы российской экономики с точки зрения передачи шоков.

На основе применения динамической модели (Liu, Tsyvinsky, 2020) получен список наиболее значимых секторов экономики с точки зрения размера падения совокупного долгосрочного выпуска при наличии локального шока в одной отрасли. Из этого списка можно выделить сырьевые и энергетические отрасли, оптовую и розничную торговлю, транспортные услуги и недвижимость. Подход, основанный на центральности графа по собственному значению, подтверждает значимость выделенных секторов с точки зрения распространения долгосрочных шоков.

Результаты работы могут быть полезными для того, чтобы повысить устойчивость экономики перед различного рода шоками. Если известно, какие отрасли мощнее и быстрее «передают» шоки, стоит повышать устойчивость этих отраслей. Так, например, осознавая важность нефтяной отрасли для экономики, государство может стимулировать создание новых цепочек поставок нефти. Зная, что услуги по оптовой торговле играют существенную роль в распространении шоков, государство может в большей степени субсидировать ключевых оптовиков в периоды кризисов, а также помогать заблаговременно перестроить цепочки поставок с уклоном в сторону дружественных государств. Важным фактором кризисных явлений

может явиться скачок цен на продукцию выявленных отраслей (а в последние годы мы наблюдали резкие изменения как общего уровня цен, так и цен в отдельных отраслях). Поэтому особенно пристально необходимо следить за динамикой цен в этих отраслях, рост которых может служить сигналом негативных тенденций в экономике в целом. Для предотвращения кризисов важна превентивная защита – знание наиболее чувствительных к локальным шокам отраслей обеспечит большую устойчивость экономики.

Список литературы

- Леонтьев В. и др. Исследования структуры американской экономики (Studies in the Structure of the American Economy / Пер. с англ. А.С. Игнатьева под ред. А.А. Конюса. М.: Госстатиздат, 1958.
- Acemoglu D., Ozdaglar A., Tahbaz-Salehi A. Microeconomic Origins of Macroeconomic Tail Risks // American Economic Review. 2017. Vol. 107. No. 1.
- Acemoglu D., Carvalho V., Ozdaglar A., Tahbaz-Salehi A. The Network Origins of Aggregate Fluctuations // Econometrica. 2012. Vol. 80. No. 5. P. 1977–2016.
- Bagley C.E., Aqeel H., Zlotnicka E.T. South Africa's Energy Crisis: Reconciling Economic Growth with Environmental Protection. London: SAGE, 2016.
- Baqae D., Farhi E. Keynesian Production Networks and the COVID-19 Crisis: A Simple Benchmark // AEA Papers and Proceedings. 2021. Vol. 111.
- Barrot J.-N., Sauvagnat J. Input Specificity and the Propagation of Idiosyncratic Shocks in Production Networks // The Quarterly Journal of Economics. 2016. Vol. 131. No. 3. P. 1543–1592.
- Carvalho V.M., Nirei M., Saito Y.U., Tahbaz-Salehi A. Supply Chain Disruptions: Evidence from the Great East Japan Earthquake // The Quarterly Journal of Economics. 2021. Vol. 136. No. 2.
- Hausmann R. et al. The Atlas of Economic Complexity: Mapping Paths to Prosperity. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2013.
- Korovkin V., Makarin A. Conflict and Intergroup Trade: Evidence from the 2014 Russia-Ukraine Crisis // American Economic Review. 2023. Vol. 113. No. 1. P. 34–70.
- Liu E., Tsyvinski A. Dynamical Structure and Spectral Properties of Input-Output Networks. NBER Working Paper. 2020. Dec. No. 28178.
- Long J.B., Plosser C.I. Real Business Cycles // Journal of Political Economy. 1983. Vol. 91. No. 1. P. 39–69.

MATHEMATICAL MODELING OF SHOCK PROPAGATION ACROSS THE SECTORS OF THE RUSSIAN ECONOMY

Olga A. Klachkova

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics
(Moscow, Russia)*

Grigoriy V. Korenyak

Master's student,

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics
(Moscow, Russia)*

Natalia L. Shagas

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics
(Moscow, Russia)*

Abstract

This article examines the impact of local shocks in individual sectors on macroeconomic performance using modern input-output models and available Russian data. Based on the dynamic network model the study identifies key sectors in the Russian economy that play a central role in transmitting long-term shocks. These include raw materials and energy industries, wholesale and retail trade, and transportation services. The significance of these sectors is further confirmed through an eigenvector centrality analysis within the production network. The findings offer practical implications for economic policy aimed at enhancing the resilience of critical sectors, improving supply chain stability, and monitoring price dynamics in strategically important industries. Such measures may serve as preventive tools for mitigating systemic risks and strengthening the economy's capacity to absorb shocks.

Keywords: Input-Output Linkages, Production Networks, Aggregate Fluctuations.

JEL: D57, E17, E23, E32.

For citation: Klachkova, O.A., Korenyak, G.V., Shagas, N.L. (2025) Mathematical Modeling of Shock Propagation Across the Sectors of the Russian Economy. Scientific Research of Faculty of Economics. Electronic Journal, vol. 17, no. 3, pp. 38-52. DOI: 10.38050/2078-3809-2025-17-3-38-52.

References

- Leont'ev V. i dr. Issledovaniya struktury amerikanskoy ekonomiki (Studies in the Structure of the American Economy / Per. s angl. A.S. Ignat'eva pod red. A.A. Konyusa. M.: Gosstatizdat, 1958. (In Russ.).
- Acemoglu D., Ozdaglar A., Tahbaz-Salehi A. Microeconomic Origins of Macroeconomic Tail Risks. *American Economic Review*. 2017. Vol. 107. No. 1.
- Acemoglu D., Carvalho V., Ozdaglar A., Tahbaz-Salehi A. The Network Origins of Aggregate Fluctuations. *Econometrica*. 2012. Vol. 80. No. 5. P. 1977–2016.
- Bagley C.E., Aqeel H., Zlotnicka E.T. South Africa's Energy Crisis: Reconciling Economic Growth with Environmental Protection. London: SAGE, 2016.
- Baqae D., Farhi E. Keynesian Production Networks and the COVID-19 Crisis: A Simple Benchmark. *AEA Papers and Proceedings*. 2021. Vol. 111.
- Barrot J.-N., Sauvagnat J. Input Specificity and the Propagation of Idiosyncratic Shocks in Production Networks. *The Quarterly Journal of Economics*. 2016. Vol. 131. No. 3. P. 1543–1592.
- Carvalho V.M., Nirei M., Saito Y.U., Tahbaz-Salehi A. Supply Chain Disruptions: Evidence from the Great East Japan Earthquake. *The Quarterly Journal of Economics*. 2021. Vol. 136. No. 2.
- Hausmann R. et al. *The Atlas of Economic Complexity: Mapping Paths to Prosperity*. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2013.
- Korovkin V., Makarin A. Conflict and Intergroup Trade: Evidence from the 2014 Russia-Ukraine Crisis. *American Economic Review*. 2023. Vol. 113. No. 1. P. 34–70.
- Liu E., Tsyvinski A. Dynamical Structure and Spectral Properties of Input-Output Networks. NBER Working Paper. 2020. Dec. No. 28178.
- Long J.B., Plosser C.I. Real Business Cycles. *Journal of Political Economy*. 1983. Vol. 91. No. 1. P. 39–69.