

Применение CGE-моделей в качестве инструмента оценки климатической политики: библиометрический анализ

*Ю. А. Дзюба^{1,2} *, И. К. Бакалова¹*

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Российская Федерация

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: Dzyuba_YA@mail.ru

Аннотация. В настоящем исследовании мы проводим комплексный библиометрический анализ, направленный на структурирование существующей научной литературы, использующей в качестве инструментария вычислительные модели совокупного равновесия (Computable General Equilibrium (CGE) models), с целью последующего выявления ключевых тенденций, кластеризации по смысловым блокам и описанию основных исследовательских направлений. Посредством авторской методики была всесторонне проанализирована выборка из 3760 отечественных и зарубежных работ по CGE-тематике, опубликованных в 759 научных журналах в период с 1995 по 2021 гг. Поставленные исследовательские вопросы заключаются, по большей мере, в применимости анализируемого модельного аппарата для решения важных эколого-экономических задач и в сохранении его актуальности в современных реалиях. Проведенное исследование демонстрирует потенциал использования данной методологии для анализа климатической политики в России.

Ключевые слова: CGE-модель, климатическая политика, библиометрический анализ

Application of CGE Models as a Climate Policy Assessment Tool: Bibliometric Analysis

Yu. A. Dzyuba^{1, 2}, I. K. Bakalova¹*

¹ National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: Dzyuba_YA@mail.ru

Abstract. In this study, we conduct a comprehensive bibliometric analysis aimed at structuring the existing economic literature that employs Computable General Equilibrium (CGE) models, and identifying key trends and main research areas. Using the authors' methodology, we analyze the sample of 3760 domestic and foreign papers on CGE models published in 759 scientific journals in the period from 1995 to 2021. The main research questions are the applicability of the analyzed models for solving current environmental and economic issues and its relevance in modern realities. We show the potential of CGE models in the analysis of climate policy in Russia.

Keywords: CGE-model, climate policy, bibliometric analysis

Введение

Широко обсуждаемый глобальный экологический кризис, бесспорно, является одним из наиболее важных вызовов нашего времени. На сегодняшний день достигнут научный консенсус относительно антропогенной природы климатиче-

ских изменений: согласно результатам фундаментальных исследований [1–3] и отчетам межправительственной группы экспертов по изменению климата (далее – МГЭИК), наблюдаемое приращение объема эмиссии парниковых газов в атмосфере, спровоцировавшее рост средних значений температуры поверхности планеты с 1880 по 2012 гг. на 0,85 °С, вызвано деятельностью человека и обусловлено функционированием техногенных систем [4]. Продолжительный период времени решение экологических задач отодвигалось на второй план, однако появление научно обоснованных доказательств взаимосвязи деструктивного взаимодействия общества с природой и возникновением ряда негативных социально-экономических шоков, заставило большинство мировых держав прийти к определенному консенсусу об экологической повестке и признать серьезность нарастающего кризиса. Именно поэтому с середины прошлого десятилетия большинством развитых и развивающихся стран стали приниматься амбициозные технологические и экономико-политические меры, необходимые для смягчения негативных последствий климатических изменений.

В контексте большинства современных макроэкономических исследований в области анализа эффектов от проводимых климатических политик наиболее важно изучить последствия применения характерного фискального инструментария или дальнейшего игнорирования надвигающейся экологической катастрофы, провоцирующей возникновение ряда негативных шоков. Однако решение климатических задач с точки зрения классической экономической теории по-прежнему остается нетривиальным исследовательским вопросом.

С одной стороны, глобальное потепление приводит к таким негативным социально-экономическим последствиям, как снижение урожайности [5–7], увеличение смертности населения [8, 9] и рост природных катаклизмов [10, 11]. По оценке экспертов, общий экономический ущерб от изменения климата с 1980-х гг. составил более 5 трлн долл. США, а в перспективе ежегодные потери будут колебаться в диапазоне от 2 до 10 % мирового ВВП [12]. С другой, ужесточение климатической политики обуславливает кратко- и среднесрочные негативные последствия для ряда крупнейших экономик, вытекающие впоследствии в сокращение экономического роста. Как известно, повсеместное уменьшение выбросов предполагает тотальное реформирование ряда стратегически важных для экономического развития большинства стран отраслей, связанное с декарбонизацией энергетического, транспортного сектора, с увеличением доли альтернативных энергоносителей в топливно-энергетическом балансе, а также с постепенным отказом от использования традиционных источников энергии. И если меры, связанные с повышением энергоэффективности и политикой «нулевых выбросов» для перечня отраслей являются экономически обоснованными, то частичный или полный уход от ископаемых энергоносителей в текущих реалиях выглядит недостижимым.

Таким образом, глобальное потепление расширяет список фундаментальных экономико-политических задач, решение которых предполагает использование теоретически обоснованного математического аппарата. В поисках всеобъемлющего подхода исследователями были созданы модели комплексной оценки

(англ. Integrated assesment model, далее – IAM) – метод изучения как социально-экономических, так и физических последствий изменения климата. IAM предоставили полезный инструмент для исследования воздействия изменения климата с момента создания МГЭИК и ее 1-го оценочного отчета 1990 г. Отчет положил начало первому поколению IAM, таким, как DICE [13], RICE [14] и FUND [15]. Экономические аспекты многих моделей комплексной оценки представляют собой вычисляемые модели общего равновесия (англ. computable general equilibrium, далее – CGE), которые учитывают межсекторальные эффекты проводимой климатической политики на уровне страны. Примерами таких моделей являются: MESSAGE [16], EPPA и Imaclim-R [17], REMIND [18].

Актуальность настоящей работы обусловлена возрастающим спросом на методы точного макроэкономического анализа, необходимого для выбора приоритетных направлений трансформации как ряда стратегически важных отраслей, так и экономической системы в целом. Немаловажен и теоретический аспект выбора оптимальной климатической политики, особенно в контексте целей и задач Российской Федерации по Парижскому соглашению: так, для достижения основных пунктов по сокращению выбросов углерода, необходимо использовать корректное сочетание инструментов климатической политики, а его, в свою очередь, можно определить при помощи CGE-подхода, по которому в рамках настоящего исследования и будет представлен подробный библиометрический анализ, демонстрирующий актуальность данного экономико-математического инструментария.

Методы и материалы

Посредством авторской методики мы анализируем большой объем данных, содержащий информацию о публикациях по CGE-тематике в период с 1995 по 2021 гг. включительно. Основная цель подобного анализа состоит в поиске ответов на ряд исследовательских вопросов, сформулированных ниже:

- Отвечают ли CGE-модели требованиям современных макроэкономических исследований?
- Какие основные направления исследований существуют в области применения CGE-подхода?
- Насколько актуальны CGE-модели для исследования климатической повестки и политики смягчения последствий глобального потепления?
- Эффективно ли применение CGE-моделей для ресурсоориентированных экономик, для развивающихся стран?

Все исследования, посвященные применению CGE-подхода, были выявлены посредством двух международных электронных баз индексации научных публикаций – Web of Science (далее – WoS) и Scopus – с использованием следующих ключевых слов: «computable general equilibrium», «computable general equilibrium model», «CGE» и «CGE model». Поиск осуществлялся по таким переменным, как «название статьи», «краткое описание» и «ключевые слова». Затем нами была произведена первичная фильтрация выявленных системой научных работ по годам (с 1995 по 2021 гг. включительно), по стадии публикации

(«final»), по типу документа («article» и «review»), по типу источника («journal»), а также по соответствующим отраслям знаний.

Финальная выборка составила 3760 публикаций различного уровня цитирования и содержала следующую информацию: имена авторов, название статьи, ключевые слова авторов, ключевые слова системы индексирования, год публикации, название научного журнала, цифровой идентификатор объекта (англ. digital object identifier, далее – DOI), аффилиацию и суммарное число цитирований. Кроме того, мы добавили сведения о квантиле журнала и о его предметной области, используя данные, публикуемые порталом «SCImago Journal and Country Rank». Так как рейтинг журнала является динамическим показателем, который ежегодно пересматривается, то в изучаемой выборке предполагается изменение данной переменной для каждого журнала в течение анализируемого временного периода.

Полученная выборка была использована для проведения библиометрического анализа, который включает в себя несколько ключевых этапов. На первом этапе мы проанализировали общую динамику публикаций по тематике CGE-моделирования в разрезе уровня цитируемости. На втором – провели страновой анализ и определили, для экономик каких стран построено наибольшее число вычисляемых моделей совокупного равновесия. Третий этап состоял в кластеризации научных трудов на экологические и неэкологические тематики посредством программного инструмента для построения и визуализации библиометрических сетей VOSviewer, опирающегося на анализ взаимосвязей ключевых слов. Таким образом, мы разбили исходные выборки на две подвыборки, несущие информацию об экологических и неэкологических исследованиях соответственно. На четвертом этапе мы также при помощи программы VOSviewer отдельно кластеризовали каждую выборку подтематки, рассмотрели динамику интереса к ним и их развитие.

Результаты и обсуждение

Мы провели первичный анализ выборки, состоящей из 3760 уникальных исследований, опубликованных в 759 различных научных журналах. Описали общую тенденцию, которая прослеживалась в период с 1995 по 2021 гг., выявили основные закономерности и определили степень актуальности описываемого инструментария в современных реалиях.

Большинство из проанализированных нами работ были опубликованы в журналах Energy Economics (4,3 %), Economic Modelling (4,0 %), Energy Policy (3,9 %), Journal of Policy Modeling (3,4 %). На первом этапе уже можно увидеть, что большая часть научно-исследовательских работ публикуется в журналах с уклоном в сторону энергетической и климатической проблематики.

Как можно заметить из рисунка 1, интерес к CGE-моделям возрастает с течением времени: количество ежегодно публикуемых работ выросло примерно в 5 раз (с 53 научных публикаций в 1995 г. до 255 в 2021 г.). Это, в первую очередь, связано с активным развитием анализируемого класса моделей, их повсеместным применением в области оценки эффектов от проводимых экономиче-

ских политик по всему миру, а также с ростом вычислительных мощностей, которые позволяют проводить ранее недоступные расчеты. Помимо общего числа публикаций, растет доля высоко ($x > 20$) и умеренно цитируемых ($x \in (0; 20]$) работ, что показано на рисунке 1.

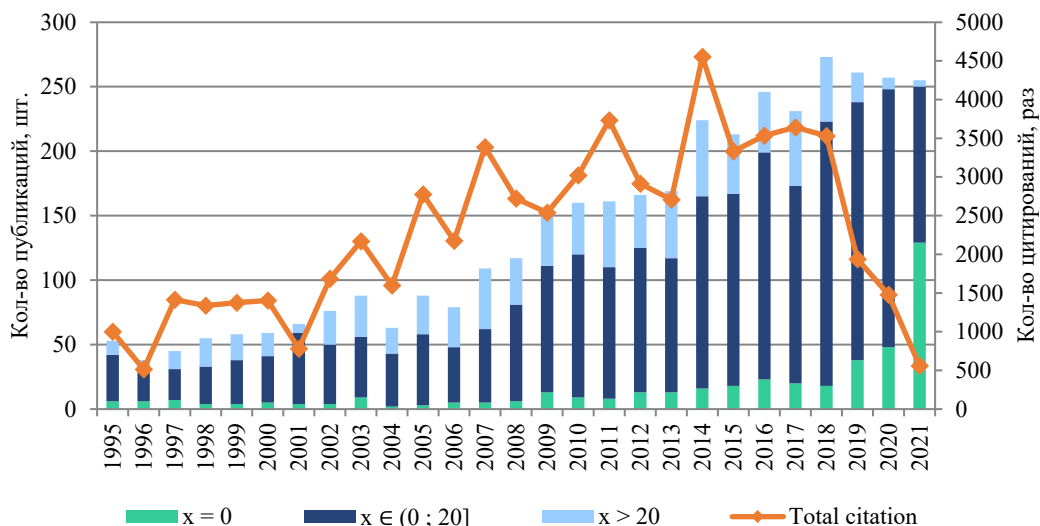


Рис. 1. Динамика количества публикаций по CGE-тематике и их совокупной цитируемости

Интересен и тот факт, что доля работ с «нулевой» цитируемостью составила всего лишь 11,6 % от общей выборки (с учетом работ, которые не были процитированы из-за существования определенного лага между выходом публикации и ссылкой на нее в последующих исследованиях).

В качестве дополнительного драйвера развития CGE-аппарата необходимо отметить его активное применение в области изучения как социально-экономических, так и физических последствий изменения климата, что в дальнейшем обусловило развитие IAM-моделей. Как мы сможем убедиться далее, современные эколого-экономические исследования тесно связаны с CGE-моделированием, что, например, подтверждается характерной динамикой цитируемости и роста публикационной активности в период с 2009 по 2021 гг. включительно (Рис. 2). В частности, прослеживается определенная взаимосвязь между основными событиями в сфере климатического регулирования и ростом публикационной активности по климатической тематике.

Чтобы убедиться в этом, мы разбили график динамики публикаций и их совокупной цитируемости на три условных периода и связали их с ключевыми событиями в области климатической политики. Например, умеренный рост интереса и последующая стагнация в период с 1995 по 2001 гг. могут быть объяснены выпуском первого отчета МГЭИК и появлением Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Начиная с 2001 г. мы можем наблюдать более активный рост заинтересованности к исследуемому экономико-математическому аппарату: с 2001 по 2008 гг. включительно отмечался восходящий тренд для переменных

«количество публикаций» и «совокупная цитируемость», что можно связать с растущими в тот период возможностями вычислительных технологий [19] и, на наш взгляд, отложенным влиянием подписанного в 1997 г. Киотского протокола, который вступил в полную силу лишь в 2005 г. В качестве еще одного важного фактора, обусловившего положительную динамику публикаций, необходимо отметить появление соответствующего программного обеспечения (например, GAMS), позволяющего в значительной мере упростить процесс моделирования и анализа динамики воссоздаваемой макросистемы, а также готовность ведущих экспертов создавать учебные курсы и делиться собственными модельными наработками в открытом доступе [20].

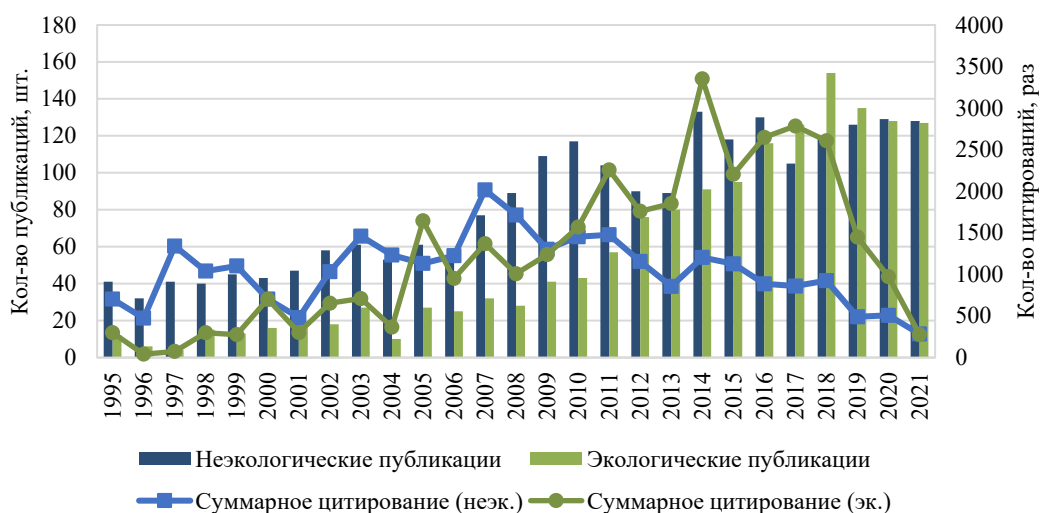


Рис. 2. Динамика публикаций по CGE-тематике и их совокупной цитируемости в разрезе экологических и неэкологических тематик

В подтверждение особой важности климатической тематики в области CGE-моделирования можно привести и тот факт, что примерно 40,5 % от совокупного числа исследований относятся именно к экологической тематике. Причем, как мы можем видеть на рисунке 2, тенденция к замещению «неэкологической тематики» началась лишь с 2010 г., что позволяет нам судить о том факте, что последние высокоцитируемые работы относятся, по большей мере, именно к экологической проблематике.

Все существующие CGE-модели можно разделить на три условных подкласса: статические, динамические и гибридные. Первый класс подразумевает использование сравнительной статики для выявления реакции экономической системы на изменение предпосылок, обуславливающих ее функционирование. В большинстве случаев подобный подвид анализируемого модельного аппарата применяется для изучения краткосрочных эффектов от макроэкономических шоков (ценовых, технологических, торговых и др.) и политических решений (применение различных инструментов фискальной и монетарной политики), т. к. отсутствует динамическая оптимизация поведения экономических агентов. Публи-

кации, основывающие свое исследование на статических моделях, в данный момент представляют собой абсолютное большинство. Однако, наблюдается рост применения динамических и гибридных моделей.

Динамические и рекурсивные CGE-модели необходимы для анализа долгосрочных последствий изменений конъюнктуры рынка или реакции макроэкономической системы на различные экономико-политические решения. В то же время, введение динамики предполагает значительное структурное упрощение модельной экономики, связанное с возникновением определенных сложностей в ходе моделирования [19]. Именно по этой причине доля динамического инструментария значительно меньше, чем доля статического – всего 11,9 % научных работ.

Гибридные модели, в свою очередь, предполагают или комбинацию различных CGE-подходов к моделированию макроэкономической системы (например, «bottom-up» и «top-down»), или определенный симбиоз стандартного CGE-подхода с эконометрическим, агентноориентированным, нейросетевым и др. С точки зрения моделирования, данный подход является достаточно трудозатратным и обуславливает возникновение нового направления в прикладной экономике (первые гибридные модели, согласно нашим наблюдениям, появились только в 2008 г. [21] и достигли пика в 2018 г. в составе 4 научных работ [22, 23]). Именно поэтому на долю подобных моделей пришлось лишь 0,5 % от совокупной выборки.

Далее мы представим результаты межстранового анализа, определим, в каких макрорегионах модельный аппарат пользуется наибольшей популярностью, и экономику какого типа может применять анализируемый модельный аппарат. Как видно на рисунке 3, большинство CGE-моделей построено для исследования китайской (14,8 %), европейских (8,1 %) и американской (6,9 %) экономик. По большей мере это может быть связано с типом экономической системы страны (в основном – развитые экономики) и, следовательно, с особой важностью определенных исследовательских вопросов, анализируемых на территории данных стран, а также с наличием большого количества экспертов в области применения моделей совокупного равновесия. Немаловажен и фактор структурной составляющей анализируемых макроэкономических систем: в частности, можно заметить, что исследуемый модельный аппарат популяризирован в экономиках, для которых вопрос энергетической безопасности стоит в приоритете (Китай, США, Великобритания, Франция и др.). Прослеживается и высокая взаимосвязь между странами, ратифицировавшими Парижское соглашение, и странами, активно применяющими CGE-подход для анализа последствий проведения характерной климатической политики.

Распределение публикаций по карте позволяет сделать вывод о том, что анализируемый подход применяем к экономикам различного статуса развития. CGE-инструментарий подходит для анализа развивающихся экономик таких стран, как Россия, Китай, Индия, Египет, Бразилия и др., благодаря возможности детализирования производственных секторов и последующего анализа конъюнк-

турных сдвигов и решений о проведении стимулирующих экономических политик.

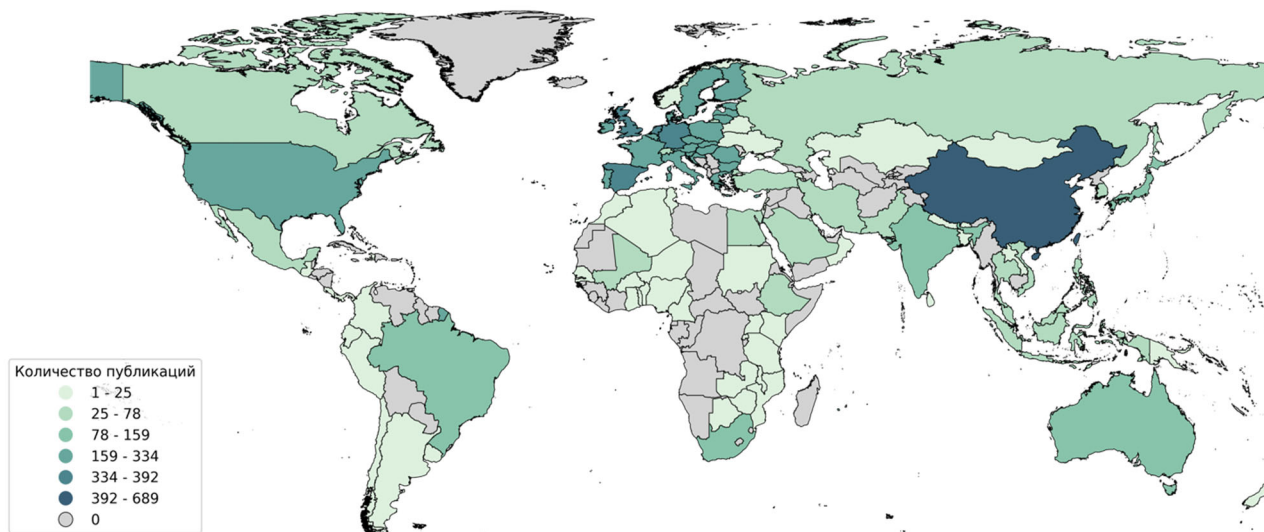


Рис. 3. Распределение CGE-моделей по странам

Далее мы подробнее рассмотрим основные темы, встречающиеся в работах как экологического, так и неэкологического характера. На рисунке 4 продемонстрирована динамика самых популярных тем из блока, не связанного с климатическими и экологическими вопросами. Исходя из анализа динамики публикаций и долей тематик в общей выборке, можно заключить, что CGE-инструментарий приспособлен больше для анализа последствий применения фискального инструментария, нежели монетарного. Низкую долю работ в области инноваций и инновационной политики можно объяснить малым числом динамических CGE-моделей, исследующих, по большей мере, именно долгосрочные эффекты от различных конъюнктурных шоков, например, технологических.

Одним из самых популярных направлений является международная торговля и международная торговая политика. В разрезе секторального анализа можно выделить две отрасли – это сельское хозяйство и энергетика.

Достаточно важное место занимают исследования в области социальной политики, активно анализирующие такие явления, как социальное неравенство, рост бедности и безработицы. Положительная динамика CGE-моделей в этой сфере говорит о том, что анализируемый модельный аппарат хорошо подходит для анализа и поиска решений в области социальной политики.

С 2019 г. стали появляться исследования по пандемийной и эпидемиологической тематике. Резкий прирост публикаций, использующих CGE-подход для исследования экономической системы в условиях коронавирусной инфекции, очевидно, можно проинтерпретировать как тот факт, что данный инструмент хорошо подходит для анализа резких непредвиденных шоков, сказывающихся на всех сферах экономической деятельности общества. Более того, можно

заклучить, что CGE-подход позволяет проанализировать шоки и последующую динамику макроэкономических показателей в виде реакции системы на возникновение определенного потрясения на различных уровнях (фирмы, государство, домашние хозяйства).

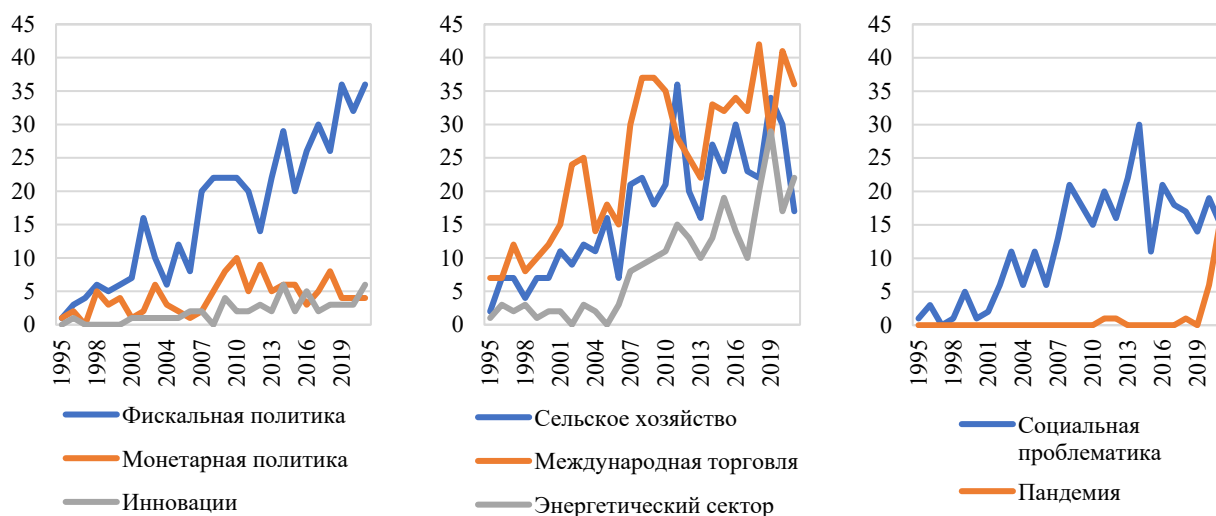


Рис. 4. Направления исследований по неэкологической тематике

На рисунке 5 продемонстрированы тематики, получившие наибольшее распространение в климатическом блоке CGE-моделей. Можно заметить, что самой популярной областью исследования является энергетическая сфера. Это, с одной стороны, можно связать с важностью для ряда стран вопроса энергетической безопасности, а с другой – с тем, что по данным за 2016 г., в структуре совокупных выбросов парниковых газов по миру около 73,2 % приходится на энергетический комплекс [24, 25]. Помимо этого, необходимо отметить, что повсеместное сокращение выбросов предполагает тотальное реформирование ряда стратегически важных для экономического развития большинства стран отраслей, связанное с декарбонизацией энергетического, транспортного сектора, с увеличением доли альтернативных энергоносителей в топливно-энергетическом балансе, а также с постепенным отказом от использования традиционных источников энергии. Этим во многом и обусловлено развитие CGE-аппарата в сторону моделирования энергетической отрасли и в дальнейшем – ее исследования.

Немаловажным исследовательским вопросом остается и изучение последствий глобального потепления на урожайности основных сельскохозяйственных культур в различных макрорегионах мира, а также влияние животноводства на генерацию дополнительного антропогенного углекислого газа. Именно по этим причинам исследование сельскохозяйственной отрасли в контексте CGE-моделирования имеет столь высокий вес.

Особое место в CGE-моделировании занимает блок «инструменты климатической политики». Как можно заметить на рисунке 5, экологические налоги оста-

ются самым популярным инструментом фискально-климатической политики, направленной на сокращение углекислого газа и других антропогенных выбросов, снижение которых стимулируется в контексте различных целей, подкрепленных международными климатическими соглашениями. Второе место среди инструментария, используемого для достижения целей по климатической политике, занимает торговля эмиссионными квотами. Резкий рост заинтересованности к использованию данного инструмента климатической политики в контексте CGE-моделирования можно связать с введением Европейским союзом в 2005 г. системы торговли выбросами в качестве ключевого элемента своей стратегии по сокращению выбросов углерода.

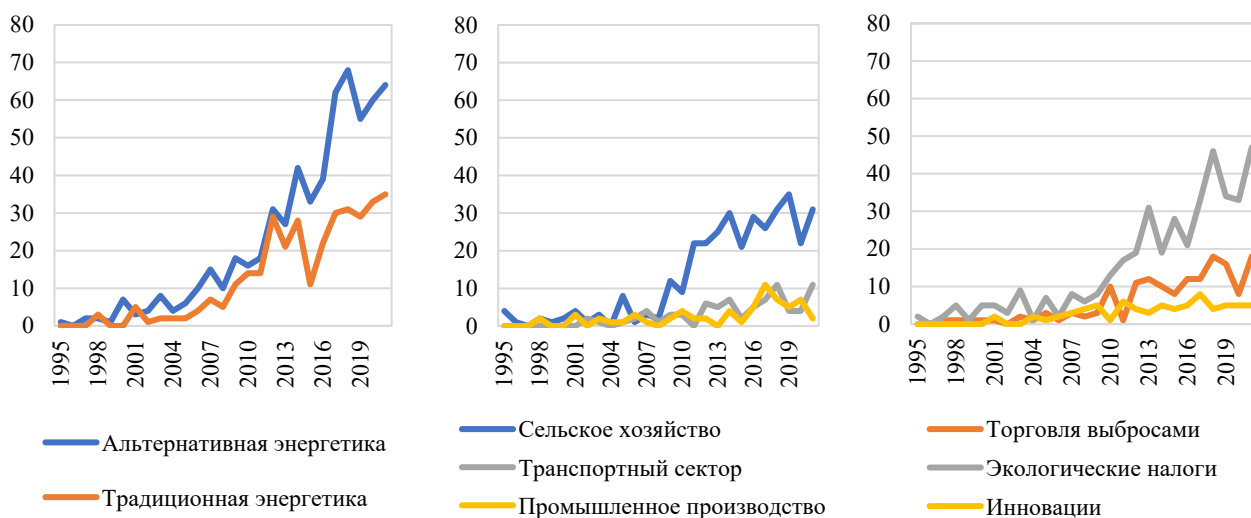


Рис. 5. Направления исследований по экологической тематике

Инновационная политика и инновации как таковые в области климатического регулирования также пользуются меньшей популярностью, что связано, во-первых, с малым количеством динамических CGE-моделей, а во-вторых – со сложностью оценки роли фактора технологического прогресса в существующей модельной парадигме.

Заключение

Исходя из проведенного библиометрического анализа, можно заключить, что востребованность CGE-моделей растет в контексте современных макроэкономических исследований. Более того, несмотря на существующую критику теории совокупного равновесия, отмечается уверенное развитие используемого модельного аппарата: количество опубликованных статей, выпускаемых ежегодно, выросло примерно в 5 раз с 1995 по 2021 гг. Это связано с активным развитием анализируемого класса моделей, их повсеместным применением в области оценки эффектов от проводимых экономических политик по всему миру, а также с ростом вычислительных мощностей, которые позволяют проводить ранее недоступные расчеты и оценивать параметры моделируемой системы. В качестве

дополнительного драйвера развития CGE-аппарата необходимо отметить его активное применение в области изучения как социально-экономических, так и физических последствий изменения климата.

Как основные направления исследований в области применения CGE-подхода можно отметить климатическую тематику и, в частности, анализ применимости таких инструментов климатической политики, как экологические налоги и торговля выбросами. В секторальном разрезе CGE-модели более популярны для моделирования и анализа энергетической отрасли и сельского хозяйства.

Кроме того, анализ показал, что CGE-подход применяем к экономикам различного статуса развития. Рассмотренный инструментарий подходит для анализа развивающихся экономик таких стран, как Россия, Китай, Индия, Египет, Бразилия и др., благодаря возможности детализирования производственных секторов и, следовательно, последующего анализа конъюнктурных сдвигов и решений о проведении экономических политик.

Благодарности

Работа осуществлена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2022 году. Дзюба Ю. А. также выражает благодарность за финансовую поддержку Совету по грантам Президента РФ в рамках стипендии СП-5871.2021.1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Keeling C. D. Is Carbon Dioxide from Fossil Fuel Changing Man's Environment? // Proceedings of the American Philosophical Society. – 1970. – Vol. 114. – №1. – P.10-17.
2. Fleming J. R. Historical Perspectives on Climate Change // Oxford University Press. – 1998. – 194 p.
3. Gillett N. P., Kirchmeier-Young M., Ribes A. Constraining human contributions to observed warming since the pre-industrial period // Nat. Clim. Chang. – 2021. – №11. – P. 207-212.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report [Электронный ресурс] // IPCC. – 2018. – Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/sr15/>, свободный. – (дата обращения: 01.04.22).
5. Vogel E., Donat M. G., Alexander L. V., Meinshausen M., Ray D. K., Karoly D. The effects of climate extremes on global agricultural yields // Environmental Research Letters. – 2019. – Vol.14. – No. 5.– P. 054010.
6. Chatzopoulos T., Domínguez I., Zampieri M., Toreti A. Climate extremes and agricultural commodity markets: A global economic analysis of regionally simulated events // Weather and Climate Extremes. – 2020. – Vol. 27. – P. 100193.
7. Zandalinas S. I., Fritschi F. B., Mittler R. Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster // Trends in Plant Science. – 2021. – Vol. 26. – №6. – P. 588-599.
8. De Blois J., Kjellstrom T., Agewall S., Ezekowitz J.A., Armstrong P.W., Atar D. The effects of climate change on cardiac health // Cardiology. – 2015. – Vol.131. – №4. – P. 209-217.
9. Ahmadalipour A., Moradkhani H. Escalating heat-stress mortality risk due to global warming in the Middle East and North Africa (MENA) // Environment International. – 2018. – Vol.117. – P. 215-225.
10. Van Aalst M. K. The impacts of climate change on the risk of natural disasters // Disasters. – 2006. – Vol.30. – №1. – P. 5-18.

11. Diaz J. H. The influence of global warming on natural disasters and their public health outcomes // *American journal of disaster medicine*. – 2007. – Vol.2. – P. 33-42.
12. Harris J. M., Roach B., Codur A. M. The economics of global climate change // *Global Development and Environment Institute*. – Tufts University. – 2017. – 70 p.
13. Nordhaus W. Managing the global commons: the economics of climate change // *Cambridge: MIT Press*. – 1994. – 213 p.
14. Nordhaus W. D., Yang Z. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies // *The American Economic Review*. – 1996. – Vol. 86. – № 4. – P. 741-65.
15. Tol R. S. J. On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND // *Environ Model Assess*. – 1997. – Vol.2. – №3. – P. 151-163.
16. Calvin K., Patel P., Fawcett A., Clarke L., Fisher-Vanden K., Edmonds J. The distribution and magnitude of emissions mitigation costs in climate stabilization under less than perfect international cooperation: sgm results // *Energy Economics*. – 2009. – Vol.31. – №2. – P. 187-197.
17. Sassi O., Crassous R., Hourcade J. C., Gitz V., Waisman H., Guivarch C. IMACLIM-R: A modelling framework to simulate sustainable development pathways // *International Journal of Global Environmental Issues*. – 2010. – Vol.10. – P. 5-24.
18. Luderer G., Pietzcker R. C., Bertram C., Kriegler E., Meinshausen M., Edenhofer O. Economic mitigation challenges: how further delay closes the door for achieving climate targets // *Environmental Research Letters*. – 2013. – Vol.8. – P. 034033.
19. Yang Z. A coupling algorithm for computing large-scale dynamic computable general equilibrium models // *Economic Modelling*. – 1999. – Vol.16. – №3. – P. 455-473.
20. Dixon P. B., Pearson K. R., Picton M. R., Rimmer M. T. Rational expectations for large CGE models: A practical algorithm and a policy application // *Economic Modelling*. – 2005. – Vol. 22. – №6. – P.1001-1019.
21. Wing S. I. The synthesis of bottom-up and top-down approaches to climate policy modeling: Electric power technology detail in a social accounting framework // *Energy Economics*. – 2008. – Vol.30. – P. 547-573.
22. Cohen S. M., Caron J. The economic impacts of high wind penetration scenarios in the United States // *Energy Economics*. – 2018. – Vol.76(C). – P. 558-573.
23. Helgesen P., Lind A., Ivanova O., Tomasgard A. Using a hybrid hard-linked model to analyze reduced climate gas emissions from transport // *Energy*. – 2018. – Vol.156. – P. 196-212.
24. Ritchie H., Roser M. CO₂ and greenhouse gas emissions [Электронный ресурс] // *Our World in Data*. – 2019. - Режим доступа: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>, свободный. – (дата обращения: 02.02.22).
25. Ritchie H. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? [Электронный ресурс] // *Our World in Data*. – 2020. – Режим доступа: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>, свободный. – (дата обращения: 02.02.22).

© Ю. А. Дзюба, И. К. Бакалова, 2022