

DOI: <https://doi.org/10.17323/j.jcfr.2073-0438.19.3.2025.42-54>

JEL classification: G30, O30, O25



Как цифровая экономика способствует снижению выбросов углерода: вклад цифровой трансформации в углеродную нейтральность китайских предприятий

Джиаки Янь

Аспирант, Факультет экономических наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия,

jyan@hse.ru, [ORCID](#)

Аннотация

В последнее время в условиях быстрого развития сферы технологий и ИКТ предприятия и государства ускоряют процесс цифровизации. Однако на фоне достижений технического прогресса климатические изменения становятся проблемой мирового масштаба. В качестве основного участника экономической деятельности предприятия играют важную роль в стимулировании экономического развития, применяя цифровую трансформацию и одновременно снижая выбросы углерода. Тем не менее остаются открытыми следующие вопросы. Может ли цифровая трансформация далее способствовать сокращению предприятиями выбросов углерода, содействуя осуществлению Китаем «двойной углеродной цели»? Существует ли разница между различными типами предприятий? В настоящем исследовании для проведения всестороннего анализа данных вопросов применяется модель с фиксированными эффектами, в которую включены данные по котирующимся на бирже компаниям, государственным предприятиям и крупным локальным частным предприятиям Китая за последние десять лет. Результаты исследования указывают на то, что цифровая трансформация предприятий может существенно снизить количество углеродсодержащих выбросов. Дальнейшее изучение свидетельствует о том, что цифровая трансформация способствует развитию регионов, предполагающему низкий уровень выбросов углекислого газа, путем стимулирования инноваций. Кроме того, анализ на гетерогенность показывает, что наиболее значимое влияние цифровой трансформации наблюдается у традиционных предприятий с высокими энергозатратами. Инновационность и вклад настоящей работы заключаются в исследовании воздействия цифровой трансформации предприятий на энергосбережение в регионе и сокращение выбросов с точки зрения цифровых технологий. Оно доказывает, что в дополнение к переходу на экологически чистую энергию ускорение цифровой трансформации предприятий является еще одним способом достижения углеродной нейтральности. Исследование также пополняет копилку результатов научных исследований в области цифровой экономики, энергоэкономики и сокращения выбросов.

Ключевые слова: цифровая экономика; интенсивность выбросов углерода; цифровизация компаний; технологии; инновации; пример Китая.

Для цитирования: Yan J. (2025) Digital Economy Empowers Carbon Emission Reduction: The Contribution of Digital Transformation to Carbon Neutrality for Chinese Enterprises. *Journal of Corporate Finance Research*. 19(3): 42-54. <https://doi.org/10.17323/j.jcfr.2073-0438.19.3.2025.42-54>

Введение

В последнее время цифровая экономика стала основной движущей силой глобального экономического роста. Согласно статистике Международного валютного фонда (МВФ), в 2023 г. на мировую цифровую экономику приходилось более 40% от всей экономики [1]. По данным Всемирного банка, в 2023 г. общий глобальный объем цифровой торговли достиг 7.13 трлн долл., что составляет 22.5% от всей международной торговли [2]. Имея преимущество в области цифровых технологий, в 2022 г. США расширили свою экономику до 17.2 трлн долл., что составляет более 65% ВВП [3]. ЕС также достиг ощутимых результатов в управлении цифровой экономикой, способствуя ее устойчивому развитию [4].

Китай довольно быстро осуществил расширение цифровой экономики до масштабов, которые на 2022 г. превышали 50 трлн юаней, что составило 41.5% от ВВП [5]. К 2023 г. эта цифра выросла до 53.9 трлн юаней, обеспечив 42.8% ВВП и годовой прирост ВВП на 66.45% [5]. Инновации в цифровые технологии, включая большие данные, облачные вычисления и искусственный интеллект, сыграли ключевую роль в поддержании данной траектории роста [6].

В то время как цифровые технологии, такие как большие данные, облачные вычисления и искусственный интеллект, способствуют росту производительности и инноваций, их влияние на окружающую среду остается предметом споров [7]. Предыдущие исследования тщательно изучили экономические преимущества цифровизации [3–5], однако не предоставили систематических доказательств ее роли в смягчении последствий изменения климата, особенно путем сокращения выбросов углерода компаниями. Этот пробел необходимо закрыть, поскольку цифровая трансформация может способствовать либо ускорению декарбонизации благодаря росту эффективности, либо увеличению выбросов из-за повышения спроса на энергию.

Как у самой крупной страны, загрязняющей окружающую среду углеродом, в 2022 г. выбросы Китая достигли 11 млрд метрических тонн (Мт) CO₂, что составляет 28.87% мировых выбросов [8]. Китай поставил амбициозную «двойную углеродную цель» (достичь пика углеродных выбросов к 2030 г. и выйти на углеродную нейтральность к 2060 г. [9]). В то время как цифровая экономика Китая бурно растет, существующие исследования в основном анализируют ее воздействие на макроуровне, упуская из виду влияние цифровизации на уровне предприятия на интенсивность выбросов в регионе, что является ключевой детерминантой эффективности климатической политики.

Настоящее исследование закрывает три серьезных пробела в литературе. Во-первых, предыдущие работы анализируют экономические результаты цифровизации [3; 6], а мы предоставляем подробные данные о ее влиянии на окружающую среду, обнаружив связь цифровой трансформации компаний с величиной выбросов углерода в регионе. Во-вторых, существующие метрики цифровизации (например, количество патентов или уровень распространения широкополосного интернета) не отражают инвестиции, характерные для конкретной компании. Мы предлагаем новый показатель на основе финансовой отчетности, предоставляющий количественное выражение цифровых активов (программное обеспечение, инфраструктура ИТ и интеллектуальная собственность), чтобы отобразить реальную степень их внедрения. В-третьих, мы

определяем гетерогенность по отраслям, выявляя отрасли, получающие наибольшие преимущества от потенциала цифровизации в области декарбонизации. Этот результат играет ключевую роль в определении целенаправленной политики.

Наши выводы предоставляют своевременные аналитические наработки представителям государственных органов и компаний, которые стремятся установить баланс между цифровым ростом и устойчивым развитием. Показывая, каким образом цифровизация предприятий может снизить интенсивность выбросов, наше исследование доносит информацию о стратегии Китая касательно «двойной углеродной цели» и одновременно предоставляет воспроизводимую модель для других экономик, которые занимаются вопросом связи цифровых технологий и проблем климата.

Обзор литературы

Исследование взаимосвязи между цифровой экономикой и углеродсодержащими выбросами

Влияние цифровой экономики, сокращающее выбросы углерода

Многие исследователи считают, что цифровая экономика способствует сокращению выбросов углерода, в основном достигая этого эффекта путем оптимизации распределения ресурсов, поощрения инноваций в области зеленых технологий и стимулирования модернизации производственных структур.

Цифровая экономика может повысить точность и эффективность распределения ресурсов благодаря таким технологиям, как большие данные и облачные вычисления. Например, Й. Куанг и Я. Фэн [10] выяснили, что, анализируя крупные массивы данных, цифровая экономика может эффективно снижать асимметрию информации, обеспечивая поток и более рациональное распределение ресурсов между различными отраслями и предприятиями. Это позволяет избежать простоя и непроизводительного расходования ресурсов, а также сократить выбросы углерода, возникающие в результате нерационального производства.

С точки зрения инноваций в области зеленых технологий, цифровая экономика обеспечивает серьезную технологическую поддержку и инновационную среду. Юменг Сан [11] указывает на то, что цифровые технологии могут ускорять распространение и обмен знаниями, снижать затраты на инновации и стимулировать предприятия заниматься научными исследованиями и разработками зеленых технологий. Новые бизнес-форматы и модели, возникающие в рамках цифровой экономики, также предоставляют широкое поле деятельности на рынке для применения зеленых технологий, далее стимулируя их развитие и популяризацию.

Кроме того, развитие цифровой экономики может способствовать оптимизации и модернизации производственной структуры. Она стимулирует трансформацию традиционных отраслей в направлении цифровизации и применения интеллектуальных разработок. Доля отраслей с высокими энергозатратами и выбросами постепенно уменьшается, в то время как постоянно появляются отрасли с низким потреблением энергии и высокой добавленной стоимостью, таким образом повышая эффективность использования энергии и существенно снижая выбросы углерода [12].

Цифровая экономика также может вести к сокращению выбросов углерода в процессе энергопотребления, повышая эффективность использования энергии.

На основе вышесказанного мы выдвигаем гипотезу 1:

H1: Цифровая трансформация снижает выбросы углерода предприятий, таким образом существенно сокращая интенсивность углеродсодержащих выбросов на уровне региона.

Точка зрения о том, что цифровая экономика увеличивает углеродные выбросы

Однако в существующих исследованиях авторы не пришли к единому мнению касательно способности цифровой экономики существенно ограничивать выбросы углерода, а также касательно механизмов ее влияния и воздействия. Позиция некоторых исследователей заключается в том, что в ходе своего развития цифровая экономика может привести к повышению углеродсодержащих выбросов. Центры обработки данных – ключевая инфраструктура цифровой экономики – потребляют энергию в больших количествах. Статистика свидетельствует о ежегодном росте доли потребления электричества глобальными центрами обработки данных в общем мировом объеме потребления электричества, и нельзя закрывать глаза на возникающие в итоге углеродные выбросы. Некоторые исследования свидетельствуют о том, что стремительное развитие цифровой экономики привело к заметному росту спроса на хранение, обработку и передачу данных, а это влечет за собой крупномасштабное строительство центров обработки данных и, следовательно, увеличение углеродсодержащих выбросов [13–15].

Развитие цифровой экономики также стимулирует рост смежных отраслей, производящих серверы, оборудование средств связи и т.д. Процессы производства данного оборудования высокоэнергоёмкие и приводят к углеродсодержащим выбросам. На начальном этапе развития цифровой экономики в некоторых регионах могут не обратить внимания на энергоэффективность и защиту окружающей среды в погоне за скоростью, а это ведет к росту выбросов углерода.

В последнее время исследования все больше указывают на то, что взаимосвязь между цифровой экономикой и выбросами углерода носит нелинейный характер. Вэйхан Ду и Цинъюю Лю [16] показали эмпирически, что по мере развития цифровой экономики выбросы углерода можно отобразить в виде U-образной кривой. На начальной стадии развития цифровой экономики при ограниченном технологическом уровне и несовершенстве инфраструктуры может происходить увеличение выбросов углерода. Однако при достижении определенного уровня развития цифровой экономики постепенно начинают действовать ее функции оптимизации распределения ресурсов, стимулирования инноваций в области цифровых технологий и модернизации производственной структуры, которые приводят к снижению выбросов углерода.

На основании вышесказанного Чжан и Чи [17] представили пространственную эконометрическую модель и выявили, что цифровая экономика имеет значимую взаимосвязь в виде перевернутой U-образной кривой с местными выбросами углерода и связь в виде U-образной кривой «сначала снижения, затем стимулирования» с выбросами углерода в соседних регионах. Это говорит о том, что воздействие цифровой экономики на углеродсодержащие

выбросы существует не только на региональном уровне, но также влияет на соседние регионы посредством пространственного эффекта распространения последствий.

На основании сказанного выдвигаем гипотезу 2:

H2: Цифровая трансформация различных видов предприятий вносит разный вклад в снижение интенсивности выбросов углерода на региональном уровне.

Изучение воздействия цифровой экономики на выбросы углерода

Модернизация производственной структуры

Цифровая экономика с ее серьезными технологическими преимуществами и инновационными возможностями играет ключевую роль в стимулировании перехода производственной структуры к низким углеродным выбросам. В основном это отражается в двух аспектах: поддержка новых отраслей промышленности и трансформация традиционных отраслей [18].

Что касается первого аспекта, стремительное развитие цифровых технологий привело к появлению ряда высокоперспективных новых отраслей. Ярким примером служит отрасль больших данных. В условиях бурного роста объемов информации с каждым днем растет спрос на хранение, анализ и применение данных. В результате появилось множество компаний, занимающихся добычей, анализом, визуализацией данных и иными процессами. При помощи углубленного анализа массивов данных эти предприятия обеспечивают поддержку в области точного принятия решений в различных отраслях, оптимизируют распределение ресурсов и, таким образом, сокращают потребление энергии и углеродные выбросы в масштабах всего общества [19]. Отрасль облачных вычислений, обеспечивающая мощные ресурсы вычисления и хранения, позволяет предприятиям не строить крупные центры обработки данных. В результате сокращается потребление энергии и выбросы углерода от работы аппаратных устройств [20]. Отрасль искусственного интеллекта посредством производства и управления на основе искусственного интеллекта повышает эффективность производства, снижает издержки производства и направляет развитие отраслей на путь применения зеленых технологий и низких выбросов углерода [21; 22]. Под воздействием цифровых технологий отрасль автомобилей на новых источниках энергии достигла прорывов в области аккумуляторных батарей, технологий беспилотного вождения и т.д., что повлекло использование электричества в автомобильной промышленности и существенно снизило углеродные выбросы в транспортном секторе [23].

Что касается трансформации традиционных отраслей, цифровая экономика обеспечивает технологическую поддержку при переходе на цифровые технологии и применение искусственного интеллекта [24]. Традиционные отрасли производства внедрили интеллектуальный мониторинг и управление производственными процессами, применяя такие технологии, как промышленный интернет и интернет вещей. Промышленное оборудование может собирать данные в режиме реального времени и посредством анализа данных оптимизировать производственный процесс, повышать эффективность производства и сокращать потребление энергии [25; 26]. Цифровая экономика привела к сервитизации традиционных отраслей. Производственные предприятия перешли от простого выпуска продукции к предоставлению системных решений, включающих

продукты и услуги, повышая добавленную стоимость и сокращая углеродные выбросы в процессе производства [27]. В области сельского хозяйства благодаря цифровым технологиям возникло точное земледелие. На основании мониторинга в реальном времени и анализа таких данных, как состояние почвы, климат и рост культур, осуществляется точное внесение удобрений и орошение. Это повышает эффективность сельского хозяйства и снижает рассредоточенное загрязнение, а также потребление энергии в сельском хозяйстве [28].

Движущая сила технологических инноваций

Цифровая экономика обеспечивает всестороннюю поддержку в области исследования, разработки, применения и распространения технологий, существенно стимулируя сокращение выбросов углерода [29].

На этапе научных исследований и разработок при помощи таких технологий, как большие данные и облачные вычисления, цифровая экономика предоставляет для исследования и разработки зеленых технологий обширные источники данных и мощные вычислительные возможности. При помощи анализа больших данных предприятия могут интегрировать и анализировать информацию о результатах мировых научных достижений в области зеленых технологий, потребностях рынка и политической направленности, быстро выявлять прогресс в исследованиях и разработках в области зеленых технологий, избегать проведения дублирующих исследований и повышать эффективность исследований и разработок [30]. Технология облачных вычислений предоставляет мощную вычислительную платформу для комплексного моделирования и экспериментов в области зеленых технологий, снижая расходы на научные исследования и разработки [31]. Цифровая экономика также способствует расширению сотрудничества между промышленностью и университетскими исследованиями. Создавая цифровые инновационные платформы, она разрушает барьеры между университетами, научно-исследовательскими учреждениями и предприятиями, ускоряя поток и интеграцию факторов инноваций в области зеленых технологий [32; 33].

На этапе применения цифровая экономика стимулирует широкое использование зеленых технологий в различных отраслях [34]. При помощи интеллектуального управления энергосистемой технология интеллектуальных энергосистем осуществляет эффективную передачу и распределение электроэнергии, сокращая ее потери [35; 36]. В системах энергоуправления применяются цифровые технологии для контроля и анализа потребления энергии предприятиями в режиме реального времени. Это помогает им разрабатывать научно обоснованные стратегии управления энергопотреблением [37]. Модели экономики совместного пользования излишками, созданные цифровой экономикой, такие как каршеринг и совместная аренда помещений, повышают эффективность использования ресурсов, снижая их расточительное потребление и выбросы углерода [38; 39].

На этапе распространения сетевой эффект и платформенные преимущества цифровой экономики приводят к ускорению распространения зеленых технологий. Цифровые платформы предоставляют удобные каналы связи и заключения сделок и поставщикам, и потребителям зеленых технологий, снижая расходы и риски при передаче технологий. Предприятия могут в короткие сроки получить необходимые зеленые технологии посредством платформы,

таким образом ускоряя применение и продвижение технологий [40; 41]. Такие цифровые каналы, как социальные сети и онлайн-форумы, также обеспечивают новые способы продвижения и популяризации зеленых технологий, что способствует распространению и обмену знаниями о зеленых технологиях [42; 43].

Другие факторы, оказывающие влияние

Инвестиции играют решающую роль во влиянии цифровой экономики на выбросы углерода [44]. Венчурные инвестиции в предприятия, занимающиеся инновациями в области зеленых технологий, ускоряют исследования, разработки и перевод в промышленное производство зеленых технологий, способствуя снижению выбросов углерода [45]. Благодаря притоку в цифровую экономику значительных потоков капитала произошло стимулирование строительства цифровой инфраструктуры, а также научных исследований и разработок в сфере цифровых технологий. Инвестиции в мобильную связь поколения 5G обеспечивают высокоскоростную и стабильную поддержку сети с целью развития цифровой экономики, что способствует применению цифровых технологий в различных отраслях и, таким образом, косвенно влияет на выбросы углерода [46].

Корректировка структуры потребления энергии – важная составляющая стремления цифровой экономики к сокращению выбросов углерода [47]. Развитие цифровой экономики способствовало переходу потребления энергии на экологически чистые источники. Применение технологий интеллектуальных энергосистем повышает способность к освоению экологически чистых источников, позволяя более стабильно подключать к сетям ветро-солнечные источники и снижая зависимость от традиционного ископаемого топлива, и таким образом, сокращая выбросы углерода [48]. Цифровые технологии также могут повышать эффективность энергии и снижать ее потери путем оптимизации системы управления энергией [49].

Действия государства оказывают важное направляющее и регулирующее воздействие на взаимосвязь между цифровой экономикой и выбросами углерода [50]. Осуществляя соответствующую политику в области промышленности, налогов и предоставления субсидий, государство способствует развитию цифровой экономики и достижению целей по снижению выбросов углерода. Оно реализует промышленную политику для стимулирования развития цифровой экономики, направляя ресурсы в эту сферу и поощряя инновации и применение цифровых технологий [51]. Политика с предоставлением налоговых льгот предприятиям цифровой экономики снижает операционные расходы компаний и повышает их конкурентоспособность [52]. Выработывая строгие экологические нормы и стандарты для выбросов углерода, государство ограничивает деятельность предприятий, связанную с углеродсодержащими выбросами, поощряя увеличение инвестиций в исследования, разработку и применение зеленых технологий, чтобы повысить энергосбережение и сократить выбросы [53]. Кроме того, при помощи такой политики, как зеленые закупки и зеленая модернизация отраслей, государство может также управлять рыночным спросом, стимулируя интерес к зеленой продукции и услугам [54; 55]. Это приводит нас к гипотезе 3.

H3: Цифровая экономика стимулирует развитие предприятий в направлении низких выбросов углерода, расширяя инвестиции в зеленые инновации.

Данные и методология

Источники данных

В настоящем исследовании применены панельные данные по котирующимся на бирже компаниям из различных провинций Китая за последние десять лет, включая государственные предприятия, предприятия с централизованным управлением и крупные частные компании. В набор данных в основном вошла статистика по цифровой экономике Китая и выбросам углерода. Для метрик цифровой экономики основные данные взяты из Белой книги по развитию цифровой экономики Китая (опубликованной Китайской академией информационных и коммуникационных технологий (CAICT)), в которой приведена всеобъемлющая статистика о масштабах цифровой экономики, производственной структуре и тенденциях роста. Дополнительные показатели, такие как объемы выпуска продукции с добавленной стоимостью и данные по занятости в секторах, связанных цифровой экономикой (например, передача данных, программное обеспечение и услуги на основе ИТ), взяты из Статистического ежегодника Китая [56].

Данные по выбросам углерода получены из Отчетов и наборов данных Китая о выбросах (CEAD) – многоплановой базы данных отчетности по выбросам углерода, описывающей региональные и промышленные выбросы [57]. Мы также применили Кадастр вредных выбросов Китая с различным разрешением, разработанный Университетом Цинхуа, чтобы повысить разрешение в пространстве и времени [58].

Для контроля искажающих факторов из Статистического ежегодника Китая [56] и базы данных Международного энергетического агентства (IEA) [59] взяты вспомогательные переменные, включая производственную структуру, ВВП, численность населения и структуру энергопотребле-

ния. Проблема пропущенных показателей решена при помощи линейной интерполяции.

Другие вспомогательные данные взяты из Статистического ежегодника Китая по науке и технологиям, статистических ежегодников провинций, базы данных CSMAR и платформы EPS Data Platform [60; 61].

Итоговый набор данных состоит из 6583 компаний выборки и сводится к 330 наблюдениям. Для эмпирического анализа в настоящей работе применяется программное обеспечение Stata 18.0.

Описание переменных

Зависимая переменная. В качестве зависимой переменной взята интенсивность выбросов углерода CO_{2s} , рассчитываемая как общие выбросы углерода, разделенные на региональный ВВП для провинции i в год t . В отличие от исследований, изучающих совокупные выбросы [62], данная метрика описывает динамику выбросов согласно руководству МГЭИК по анализу разрушения связи между экономической выгодой и вредом для окружающей среды. В рамках эмпирического анализа интенсивность выбросов углерода рассчитана посредством логарифмирования, чтобы принять во внимание порядок величины этого показателя.

Независимая переменная. В качестве независимой переменной принят уровень цифровизации компании $Digt$.

В настоящее время многочисленные исследования оценивают уровень цифровизации, анализируя частоту употребления ключевых слов, связанных с цифровизацией, в годовых отчетах компаний. Этот метод широко применяют для оценки степени цифровизации компании [63]. Однако частота использования ключевых слов отражает лишь внимание руководства к цифровизации, но не указывает на реальный уровень цифрового развития компании. Напро-

Таблица 1. Определение переменной

Вид переменной	Наименование переменной	Обозначение переменной	Описание переменной
Зависимая переменная	Интенсивность выбросов углерода	CO_{2s}	Выбросы углерода на единицу ВВП выражены в количественной форме и преобразованы логарифмически для сглаживания смещенного распределения
Объясняющая переменная	Уровень цифровизации	$Digt$	Отношение цифровых активов к общим активам компаний из выборки
Промежуточная переменная	Техническая	$Tech$	Количество выданных патентов за год на одно предприятие
	Доля третичного сектора	Pti	Доля третичного сектора в экономике страны
	Доля занятости	Emp	Доля занятого населения в общем показателе трудоспособного населения
	Уровень урбанизации	Urb	Доля городского населения в общем показателе населения
	Прямые иностранные инвестиции (FDI)	$InFDI$	Прямые инвестиции иностранных инвесторов в отечественные предприятия преобразованы логарифмически для сглаживания смещенного распределения
Контрольная переменная	Инвестиции в основные средства	$InFix$	Инвестиции для покупки основных средств преобразованы логарифмически для сглаживания смещенного распределения

Таблица 2. Описательная статистика

ПЕРЕМЕННАЯ	Набл.	Среднее значение	Ст. отклон.	Мин. значение	Макс. значение
InCO _{2s}	330	2.697	0.797	0.509	4.800
Digt	330	0.466	0.316	0.210	0.712
Tech	330	0.016	0.043	0.000	0.556
Pti	330	0.477	0.097	0.297	0.839
Emp	330	0.855	0.874	0.815	0.954
Urb	330	0.596	0.121	0.350	0.896
lnFDI	330	12.808	1.749	6.995	15.09
InFix	330	18.733	0.871	15.847	20.251

тив, оценка цифровых активов более практична и измеряет непосредственно инвестиции компании в цифровизацию. Поэтому в настоящем исследовании принята методология оценки уровня цифровизации компании при помощи расчета доли цифровых активов [64], таких как программное обеспечение, облачные технологии, серверы и большие данные, информация о которых раскрыта в годовой финансовой отчетности. В частности, отношение цифровых активов к нематериальным активам на конец года служит прокси для измерения степени цифровизации. Кроме того, мы сгруппировали данные по компаниям из одной и той же провинции, чтобы отразить уровень цифровизации региона.

Промежуточная переменная. Технологические инновации $Tech_{it}$ представлены годовым количеством выданных патентов на одну компанию. Данные о патентах взяты из базы данных Национального управления интеллектуальной собственностью Китая (CNIPA). При этом исключены промышленные образцы и патенты на промышленный образец, чтобы сконцентрироваться на основных инновациях.

Контрольная переменная. Чтобы определить, может ли цифровая трансформация предприятия стимулировать развитие зеленых технологий и производство с низкими выбросами углерода, необходимо добавить контрольные переменные. В настоящей работе мы обращаемся к научным исследованиям по нашей теме, чтобы выбрать следующие контрольные переменные: отношение добавленной стоимости третичного сектора к ВВП (Pti), доля занятости (Emp), уровень урбанизации (Urb), прямые иностранные инвестиции (FDI) и инвестиции государства в основные средства (Fix). Принимая во внимание порядок показателей, мы логарифмируем FDI и Fix.

Построение моделей

Для изучения взаимосвязи между цифровой экономикой и интенсивностью выбросов углерода в настоящем исследовании построен ряд эконометрических моделей. Специфические и ненаблюдаемые индивидуальные характеристики региона оказывают существенное влияние на интенсивность углеродсодержащих выбросов [65]. В данной работе применяется регрессия двунаправленной модели с фиксированными эффектами. Данная модель может эффективно смягчать воздействие ненаблюдаемых переменных, связанных с годом и индивидуальными характеристиками,

снизить отклонение оценок и повысить статистическую надежность результатов [66].

Базовая модель регрессии выглядит следующим образом:

$$\ln CO_{2sit} = a_0 + a_1 \text{Digt}_{it} + a_2 \text{Control}_{it} + \mu_t + a_i + \sigma_{it}. \quad (1)$$

Чтобы проверить роль технологических инноваций как внутреннего механизма стимулирования развития в направлении низких выбросов углерода в рамках цифровой экономики, в данной работе построена следующая модель посреднического эффекта:

$$\text{Tech}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{Digt}_{it} + \beta_2 \text{Control}_{it} + \mu_t + a_i + \sigma_{it}; \quad (2)$$

Таблица 3. Результаты базовой регрессии

	(1) InCO _{2s}	(2) InCO _{2s}
Digt	-0.0565*** (-5.47)	-0.0329*** (-4.98)
Pti		-0.0401** (-2.45)
Emp		0.0531 (1.13)
Urb		0.212*** (2.82)
lnFDI		0.512*** (2.77)
InFix		0.689*** (4.76)
_cons	3.626*** (8.37)	2.146*** (4.11)
Year FE (ФЭ года)	Да	Да
Firm FE (ФЭ компании)	Да	Да
N	330	330
Скоррект. R ²	0.698	0.657

Примечание: Т-статистика приведена в скобках; *, ** и *** означают уровни значимости 10%, 5% и 1% соответственно.

$$\ln\text{CO}_{2\text{sit}} = \varphi_0 + \varphi_1 \text{Dig}_{it} + \varphi_2 \text{Tech}_{it} + \varphi_3 \text{Control}_{it} + \mu_t + \alpha_i + \sigma_{it}. \quad (3)$$

где $\ln\text{CO}_{2\text{sit}}$ – интенсивность выбросов углерода в регионе i в период t ; Dig_{it} – показатель цифровой экономики предприятия i в период t ; Control_{it} – набор контрольных переменных для региона i в период t ; σ_{it} – величина случайной погрешности; μ_t – индивидуальный специфический фиксированный эффект; α_i – время специфического фиксированного эффекта; Tech_{it} – показатель технологической инновации предприятия i в период t . Уравнения (2) и (3) используются, чтобы проверить, играет ли технологическая инновация Tech_{it} роль посредника во взаимосвязи между цифровой экономикой Dig_{it} и интенсивностью выбросов углерода $\ln\text{CO}_{2\text{sit}}$.

Эмпирический анализ

Базовый регрессионный анализ

Для системного исследования влияния цифровой трансформации предприятия на развитие региона в направлении низких выбросов углерода в настоящей работе приме-

няется методология модели с фиксированными эффектами (Таблица 3). Эмпирические результаты показывают, что в базовой модели без контрольных переменных (столбец 1) коэффициент регрессии цифровой экономики (Dig) составляет 0.0565 ($p < 0.01$). Это указывает на статистически значимое отрицательное подавляющее воздействие цифровизации предприятия на интенсивность выбросов углерода в регионе.

В столбце 2, где представлены все контрольные переменные, коэффициент регрессии цифровой экономики (Dig) составляет -0.0329 ($p < 0.01$). Это говорит о статистически значимом отрицательном подавляющем воздействии цифровизации предприятия на интенсивность выбросов углерода в регионе. Важно отметить, что доля третичного сектора указывает на существенную отрицательную корреляцию с интенсивностью выбросов углерода в регионе ($\beta = -0.0401$, $p < 0.05$), а это согласуется с теорией эволюции производственной структуры. По сравнению с энергоемкими вторичными отраслями третичный сектор – в основном включающий сферу услуг – характеризуется по своей природе низкими выбросами углерода, что является еще одним подтверждением пользы от модернизации производственной структуры в направлении снижения вы-

Таблица 4. Результаты проверки на устойчивость

	(1) Заменяющая переменная $\ln\text{AvgCO}_{2s}$	(2) Исключающий тест $\ln\text{CO}_{2s}$	(3) Случайные эффекты $\ln\text{CO}_{2s}$	(4) Совместные фиксированные эффекты провинции и года $\ln\text{CO}_{2s}$
Digt	-0.0350^{***} (-4.87)	-0.0298^{***} (-3.95)	-0.0479^{***} (-5.21)	-0.0311^{***} (-4.32)
Pti	-0.0381^{***} (-3.61)	-0.0522^{**} (-2.41)	-0.0478^{***} (-2.88)	-0.0332^{**} (-2.39)
Emp	0.0631 (1.67)	0.0831* (1.78)	0.0617 (1.51)	0.0511 (1.01)
Urb	0.298*** (2.96)	0.317*** (3.96)	0.261*** (2.97)	0.201*** (2.61)
lnFDI	0.673*** (3.85)	0.902*** (5.31)	0.549*** (3.11)	0.477*** (2.61)
lnFix	0.711*** (4.32)	0.982*** (6.63)	0.837*** (4.99)	0.621*** (3.93)
_cons	3.37*** (5.57)	5.651*** (7.68)	2.763*** (4.78)	1.911*** (4.11)
Year FE (ФЭ года)	Да	Да	Нет	Да
Firm FE (ФЭ компании)	Да	Да	Нет	Да
Province*year (провинция*год)	Нет	Нет	Нет	Да
N	330	286	330	330
Скоррект. R²	0.563	0.452	0.661	0.537

Примечание: Т-статистика приведена в скобках; *, ** и *** означают уровни значимости 10%, 5% и 1% соответственно.

бросов углерода. Из остальных контрольных переменных уровень урбанизации ($\beta = 0.212$), прямые иностранные инвестиции ($\beta = 0.512$) и инвестиции в основные средства ($\beta = 0.689$) показывают значимую положительную корреляцию с интенсивностью выбросов углерода ($p < 0.01$). Это можно истолковать с точки зрения экономики: иностранный капитал и инвестиции государства в основном ориентированы на сектора с высоким энергопотреблением, такие как производство и строительство, в то время как агломерация населения под воздействием урбанизации систематически повышает спрос на транспортную и энергетическую инфраструктуру, таким образом создавая масштабный эффект для выбросов углерода. Переменная доли занятости также статистически незначима ($p > 0.1$), а это означает, что в рамках данного подхода к анализу, возможно, необходимо дальнейшее изучение динамики рынка труда, чтобы объяснить ее влияние на выбросы углерода.

Данный результат подтверждает гипотезу 1. Лежащий в основе механизм можно объяснить тем, что цифровые технологии оптимизируют производственные процессы, повышают эффективность распределения ресурсов и эффективно снижают интенсивность потребления энергии при сохранении объемов производства, тем самым создавая предельное снижающее воздействие на выбросы углерода.

Таблица 5. Результаты проверки механизма

	(1) Tech	(2) InCO _{2s}
Digt	0.0210*** (4.67)	-0.0291*** (-3.88)
Tech		-1.527*** (-5.28)
Pti	0.131 (1.51)	-0.0411*** (-2.71)
Emp	0.096 (0.96)	0.0589 (1.09)
Urb	0.216*** (2.11)	0.238*** (2.97)
lnFDI	0.728*** (4.57)	0.509*** (2.66)
lnFix	0.523*** (3.37)	0.712*** (4.33)
_cons	1.87*** (7.37)	2.550*** (6.46)
Year FE (ФЭ года)	Да	Да
Individual FE (Индивидуальные ФЭ)	Да	Да
N	330	330
Скоррект. R ²	0.527	0.565

Примечание: Т-статистика приведена в скобках; *, ** и *** означают уровни значимости 10%, 5% и 1% соответственно.

Проверка на устойчивость

Для повышения достоверности выводов исследования в данной работе проведена проверка на устойчивость на основе результатов базовой регрессии при помощи различных методов.

Замена объясняемой переменной. Исходя из метода измерения Шао Шуай с соавт. (2019), в настоящем исследовании объясняемая переменная заменяется натуральным логарифмом интенсивности выбросов углерода на душу населения ($\ln \text{AvgCO}_2s$), и производится повторная оценка модели. В столбце (1) Таблицы 4 показано, что коэффициент регрессии переменной цифровой экономики согласуется с коэффициентом базовой регрессии с точки зрения направления и степени значимости, а это говорит о том, что метод измерения переменных не влияет на основной вывод.

Тест на исключение подвыборки. Учитывая систематические различия в административном уровне, обеспеченности ресурсами и цифровой инфраструктуре между муниципалитетами, подчиняющимися непосредственно центральному правительству, из настоящего исследования исключены выборки с наблюдениями по четырем муниципалитетам, подчиняющимся непосредственно центральному правительству, а именно по Пекину, Тяньцзину, Шанхаю и Чунцину, и проведена повторная регрессия. Как показано в столбце (2) Таблицы 4, рассчитанный коэффициент переменной цифровой экономики, прошел тест на уровень значимости. Это доказывает, что вывод исследования универсален с географической точки зрения.

Корректировка спецификации модели. В данном исследовании для проверки чувствительности модель с фиксированными эффектами заменена на модель со случайными эффектами. В столбце (3) Таблицы 4 коэффициент переменной цифровой экономики также значим и отрицателен. В столбце (4) Таблицы 4 мы применяем совместные фиксированные эффекты провинции и года, чтобы показать, что основные выводы устойчивы. Это подтверждает достоверность выводов.

Анализ механизма

Исходя из теоретической основы, данное исследование представляет технологические инновации как промежуточную переменную для изучения механизма влияния цифровой экономики на выбросы углерода. Чтобы проверить, сокращает ли цифровая экономика выбросы углерода путем стимулирования технологических инноваций, применен метод пошаговой регрессии.

Из столбцов (1) и (2) Таблицы 5 видно, что цифровая экономика оказывает существенное стимулирующее воздействие на технологические инновации. При введении технологических инноваций в базовую регрессию промежуточная переменная показывает значительное подавляющее воздействие на выбросы углерода. При этом сохраняется отрицательная корреляция между цифровой экономикой и выбросами. Это подтверждает наличие частичного промежуточного эффекта, указывая на то, что цифровая экономика сокращает выбросы углерода путем стимулирования технологических инноваций. Данный вывод подтверждает гипотезу 3.

Приведенные выводы согласуются с теоретическим утверждением о том, что цифровые технологии повышают эффективность научных исследований и разработок, основанных на данных, и ускоряют распространение ин-

Таблица 6. Результаты проверки на гетерогенность

	(1) Первичный сектор InCO _{2s}	(2) Вторичный сектор InCO _{2s}	(3) Третичный сектор InCO _{2s}
Digt	0.0210 (1.29)	-0.0302*** (-5.32)	-0.0298*** (-3.98)
Pti	-0.0123** (-2.43)	-0.0201*** (-3.89)	-0.0320** (-1.98)
Emp	0.0226 (1.32)	0.1026 (1.61)	0.1531 (1.83)
Urb	0.349* (1.87)	0.536*** (2.98)	0.322*** (3.31)
InFDI	0.277 (1.53)	0.677*** (3.56)	0.378*** (2.99)
InFix	0.335** (2.35)	0.876*** (5.05)	0.323** (2.31)
Control	Да	Да	Да
Year FE (ФЭ года)	Да	Да	Да
Individual FE (Индивидуальные ФЭ)	Да	Да	Да
N	33	146	151
Скоррект. R²	0.601	0.662	0.677

Примечание: Т-статистика приведена в скобках; *, ** и *** означают уровни значимости 10%, 5% и 1% соответственно.

новаций, направленных на достижение низких углерод-содержащих выбросов, таким образом формируя причинно-следственную цепочку «цифровая инфраструктура – зеленые инновации – сокращение выбросов».

Анализ гетерогенности

Чтобы изучить характерную для промышленности гетерогенность влияния цифровой трансформации предприятия на выбросы углерода в регионе, в настоящем исследовании компании из выборки распределены по секторам: первичный (сельское хозяйство), вторичный (промышленность) и третичный (сфера услуг), на основании стандарта Экономической классификации Китая по отраслям, а также проведено сравнение по отраслям при помощи сгруппированных моделей регрессии (столбцы (2)–(3) Таблицы 6). Эмпирические результаты выявили существенные расхождения по секторам в воздействии цифровой трансформации (Digt), которое снижает выбросы углерода. Коэффициенты регрессии по вторичному и третичному секторам указывают на то, что подавляющее влияние цифровизации на выбросы значительно сильнее для вторичного сектора. Следует отметить, что коэффициент для первичного сектора статистически незначим, что можно объяснить низкой энергоемкостью и недостаточным применением цифровых технологий в сельскохозяйственном секторе.

Вторичный сектор, включающий производство, добывающую отрасль и строительство, служит основой региональных экономик, но обладает высокой энергоемкостью. Его цифровая трансформация повышает гибкость предельного снижения выбросов при помощи реструктуризации интеллектуальных производственных систем (например, использование промышленного интернета вещей (IoT)) и замены технологий на экологически чистые технологии (например, оптимизация процессов на основе ИИ). Данные выводы согласуются с теорией «смещенного технологиями сокращения выбросов», предложенной Асемоглу с соавт. (2022). Данный результат подтверждает гипотезу 2.

Несмотря на то что третичный сектор, включая финансы, логистику и услуги в области ИТ, работает по модели с минимальными первичными капиталовложениями, его пути декарбонизации в основном полагаются на цифровые технологии, ориентированные на оказание услуг.

Заключение и практические выводы

Настоящее исследование изучает влияние цифровой трансформации компании на снижение выбросов углерода и цели по достижению углеродной нейтральности на основе данных по котирующимся на бирже компаниям,

государственным предприятиям, предприятиям с централизованным управлением и крупным локальным частным предприятиям Китая за десять лет. Результаты свидетельствуют о том, что цифровая трансформация существенно снижает интенсивность выбросов углерода по регионам, стимулируя технологические инновации, повышая эффективность производства и улучшая использование энергии, таким образом, содействуя снижению выбросов углерода.

Гетерогенность характерных для компаний эффектов. Эффекты цифровой трансформации по снижению выбросов углерода показывают значительную гетерогенность по предприятиям, при этом воздействие более ярко выражено в традиционных, высокоэнергоемких отраслях. Это подчеркивает определяющую роль цифровизации в переходе углеродоемких секторов к низкоуглеродной экономике. Например, такие цифровые технологии, как умные системы контроля в тяжелой промышленности, оптимизируют производственные процессы и снижают потребление энергии. Это подтверждает гипотезу 1. Эти результаты согласуются с данными существующей литературы, подчеркивая существование потенциала у цифровой экономики для оптимизации распределения ресурсов, стимулирования зеленых инноваций и модернизации производственных структур.

Механизм технологических инноваций. Наше исследование подтверждает гипотезу 2, указывая на то, что технологические инновации выступают в роли важного посредника во взаимосвязи между цифровизацией и экологическим развитием. На этапе научных исследований и разработок цифровые технологии предоставляют надежные источники информации и вычислительные возможности, в то время как цифровые платформы ускоряют распространение зеленых технологий. Например, облачные вычисления помогают осуществлять комплексное моделирование экологически чистых технологий, подчеркивая необходимость способствовать созданию интегрированной экосистемы, которая объединяет эффект цифровых инноваций с прогрессом в области зеленых технологий.

Значимость для высокоэнергоемких отраслей. Анализ на гетерогенность подтверждает гипотезу 3, указывая на то, что целенаправленная политика по ускорению цифровой трансформации в секторах с высокими выбросами, таких как умные системы управления энергией в производстве, может помочь выработать стратегии декарбонизации. Данный ценный вывод в особенности важен для достижения Китаем «двойной углеродной цели», учитывая масштаб и пространственное разнообразие его промышленной базы.

Ограничения и дальнейшие исследования

Данное исследование предоставляет эмпирические доказательства потенциала цифровой трансформации в области снижения выбросов углерода, однако у него существуют ограничения. Во-первых, применение совокупных данных на уровне региона и компании может скрыть динамику на микроуровне. В дальнейших исследованиях необходимо использовать детальные наборы данных, такие как портфели цифровых инвестиций, характерные для компании, и метрики учета выбросов углерода. Во-вторых, анализ сосредоточен на статическом воздействии. Необходимы динамические модели, описывающие долгосрочное взаимодействие между цифровизацией и тенденциями выбросов углерода. Наконец, такие внешние факторы, как изменения

в глобальных цепочках поставок и распространение последствий международной политики, требуют более глубокого исследования для совершенствования политических механизмов, обусловленных контекстом.

Рекомендации касательно политики. Стимулирование в секторе экономики. Для снижения затрат на переход необходимо ввести дифференцированные субсидии и налоговые льготы (например, ускоренная амортизация цифровой инфраструктуры в высокоэнергоемких отраслях).

Синергия цифровых и зеленых технологий. Следует создать инновационные центры, объединяющие облачные вычисления, ИИ и НИОКР в области зеленых технологий на основе предоставленных государством наборов данных для обучения алгоритмов.

Нормативная база. Необходимо ввести мониторинг выбросов углерода в режиме реального времени посредством цифровых систем на основе интернета вещей (IoT) и установить связь эффективности снижения выбросов углерода компаниями с рейтингами ESG и правом на получение финансирования. Целью данных мер является применение цифровой трансформации как стратегического инструмента для достижения углеродной нейтральности с получением ценных выводов, которые можно применить в развивающихся странах, стремящихся к устойчивому переходу промышленности.

Список литературы

1. International Monetary Fund. *World economic outlook: navigating global divergences*. Washington, DC: IMF; 2023. (accessed on 15.07.2025) URL: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2023/10/10/world-economic-outlook-october-2023>
2. World Bank. *World development report 2023: digital development*. Washington, DC: World Bank Publications; 2023. Report No.: WDR 2023.
3. U.S. Bureau of Economic Analysis. *Measuring the digital economy 2022*. Washington, DC: U.S. Bureau of Economic Analysis; 2022. No.: WP2022-4.
4. European Commission. *Digital economy and society index 2023*. Brussels: Publications Office of the European Union; 2023.
5. China Academy of Information and Communications Technology. *White paper on China's digital economy development (2022-2023)*. Beijing: China Academy of Information and Communications Technology; 2023.
6. Brynjolfsson E, McAfee A. *The second machine age: work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies*. New York: W.W. Norton & Company; 2014. 336 p.
7. Nishant R., Kennedy M., Corbett J. Artificial intelligence for sustainability: Challenges, opportunities, and a research agenda. *International journal of information management*. 2020;53:102104. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102104>
8. Global Carbon Project. *Supplemental data of global carbon budget 2022*. 2022 (accessed on 15.11.2023) URL: <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>
9. State Council of China. *Guiding opinions on comprehensively implementing new development concepts*

- and achieving carbon peaking and carbon neutrality. Gazette of the State Council of China. 2020.
10. Kuang Y., Fan Y., Bin J., et al. Impact of the digital economy on carbon dioxide emissions in resource-based cities. *Scientific Reports*. 2024;14:16514. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66005-0>
 11. Sun Y. Digital transformation and corporates' green technology innovation performance: the mediating role of knowledge sharing. *Finance Research Letters*. 2024;62(Pt A):105105. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.105105>
 12. Song Y., Zhang J., Song Y., et al. Can industry-university-research collaborative innovation efficiency reduce carbon emissions? *Technological Forecasting and Social Change*. 2020;157:120094. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120094>
 13. Malmodin J, Lundén D. The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010–2015. *Sustainability*. 2018;10(9):3027. <https://doi.org/10.3390/su10093027>
 14. Masanet E., Shehabi A., Lei N., et al. Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*. 2020;367(6481):984–986. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>
 15. Jones N. How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature*. 2018;561(7722):163–166. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06610-y>
 16. Du W., Liu X., Liu Y., et al. Digital economy and carbon emission efficiency in three major urban agglomerations of China: a U-shaped journey towards green development. *Journal of Environmental Management*. 2025;373:123571. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123571>
 17. Zhang H., Qi R., Liu Y., et al. The spatial impact of digital economy on carbon emissions reduction: evidence from 215 cities in China. *Frontiers in Environmental Science*. 2024;12:1370938. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1370938>
 18. Shen H., Qin M., Li T., et al. Digital finance and industrial structure upgrading: evidence from Chinese counties. *International Review of Financial Analysis*. 2024;95:103442. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2024.103442>
 19. Zhang Z, Li J. *Big data mining for climate change*. Elsevier; 2020. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00973-1>
 20. Cowls J., Tsamados A., Taddeo M., et al. The AI gambit: leveraging artificial intelligence to combat climate change – opportunities, challenges, and recommendations. *AI & SOCIETY*. 2023;38:283–307. <https://doi.org/10.1007/s00146-021-01294-x>
 21. Vinuesa R., Azizpour H., Leite I., et al. The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Communications*. 2020;11:233. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14108-y>
 22. Candelo E. Innovation and digital transformation in the automotive industry. In: *Marketing innovations in the automotive industry*. Cham: Springer; 2019:1–18. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15999-3_18
 23. Zhou J., Liu W. Carbon reduction effects of digital technology transformation: evidence from the listed manufacturing firms in China. *Technological Forecasting and Social Change* 2024;198:122999. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122999>
 24. Kagermann H., Helbig J., Hellinger A. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. National Academy of Science and Engineering; 2013. (accessed on 15.11.2024) URL: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>
 25. Lu Y. Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*. 2017;6:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
 26. Shen Y., Yang Z., Zhang X. Impact of digital technology on carbon emissions: evidence from Chinese cities. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2023;11:1166376. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1166376>
 27. Ji H., Bi W., Yan J., et al. ICTs-driven agriculture contributes to the mission of carbon reduction. In: *Interdisciplinary research in technology and management*. CRC Press; 2024. p. 453–462. <https://doi.org/10.1201/9781003430469-53>
 28. Li T., Wen J., Zeng D., et al. Has enterprise digital transformation improved the efficiency of enterprise technological innovation? A case study on Chinese listed companies. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2022;19(12):12632–12654. <https://doi.org/10.3934/mbe.2022590>
 29. Chen M., Mao S., Liu Y. Big data: a survey. *Mobile Networks and Applications*. 2014;19:171–209. <https://doi.org/10.1007/s11036-013-0489-0>
 30. Kumar S., Buyya R. Green cloud computing and environmental sustainability. In: Murugesan S., Gangadharan G.R., eds. *Harnessing green IT: principles and practices*. Wiley; 2012:315–339. <https://doi.org/10.1002/9781118305393.ch16>
 31. Nambisan S., Wright M., Feldman M. The digital transformation of innovation and entrepreneurship: progress, challenges and key themes. *Research Policy*. 2019;48(8):103773. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.03.018>
 32. Perkmann M., Tartari V., McKelvey M., et al. Academic engagement and commercialisation: a review of the literature on university–industry relations. *Research Policy*. 2013;42(2):423–442. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.09.007>
 33. Wang C., Liu T., Du D., et al. Impact of the digital economy on the green economy: evidence from China. *Sustainability*. 2024;16(21):9217. <https://doi.org/10.3390/su16219217>
 34. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Smart grid technologies and application in the sustainable energy transition: a review. *International Journal of Sustainable Energy*. 2023;42(1):685–758. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298>
 35. Sharma K.K., Monga H. Smart grid: future of electrical transmission and distribution. *International Journal of*

- Communications, Network and System Sciences*. 2020; 13(4):45-56. <https://doi.org/10.4236/ijcns.2020.134004>
36. Dat M.N., Trung K.D., Minh P.V., et al. Assessment of energy efficiency using an energy monitoring system: a case study of a major energy-consuming enterprise in Vietnam. *Energies*. 2023;16(13):5214. <https://doi.org/10.3390/en16135214>
 37. Zhu J., Lin N., Zhu H., et al. Role of sharing economy in energy transition and sustainable economic development in China. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2023;8(2):100314. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100314>
 38. Feng Y., Xu R. Advancing global sustainability: the role of the sharing economy, environmental patents, and energy efficiency in the Group of Seven's path to sustainable development. *Sustainability*. 2025;17(1):322. <https://doi.org/10.3390/su17010322>
 39. Agan B., Balcilar M. On the determinants of green technology diffusion: an empirical analysis of economic, social, political, and environmental factors. *Sustainability*. 2022;14(4):2008. <https://doi.org/10.3390/su14042008>
 40. Liang J., Qiao C. The impact of digital trade development on regional green innovation. *Sustainability*. 2024;16(22):10090. <https://doi.org/10.3390/su162210090>
 41. Rana S., Shafi F., Rasheed A., et al. Online environmental platforms service and green consumer behavior nexus: a multi-mediator study. *Future Business Journal*. 2024;10(1):3. <https://doi.org/10.1186/s43093-023-00283-4>
 42. Shin S., Jiang Z., Lim R.E., et al. Forecasting the spread of sustainability movement: computational analysis on social media messages promoting climate actions. *Journal of Current Issues & Research in Advertising* 2024;45(3):282-300. <https://doi.org/10.1080/10641734.2024.2366173>
 43. OECD. The digital economy, multinational enterprises and international investment policy. OECD Business and Finance Policy Papers. 2018;46:1-52. <https://doi.org/10.1787/0ba19bae-en>
 44. Niu C., Shui Y., Zhang X. The spatial effect of venture capital on green technology innovation: empirical research based on inter-provincial panel data. *Open Access Library Journal*. 2022;9(1):e8316. <https://doi.org/10.4236/oalib.1108316>
 45. Guo J., Wang L., Zhou W., et al. Powering green digitalization: evidence from 5G network infrastructure in China. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022;182:106286. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106286>
 46. Zhang Z., Chen L., Li J., et al. Digital economy development and carbon emission intensity: mechanisms and evidence from 72 countries. *Scientific Reports*. 2024;14:28459. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78831-3>
 47. Wang H., Yang G., Yue Z. Breaking through ingrained beliefs: revisiting the impact of the digital economy on carbon emissions. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2023;10:609. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02126-7>
 48. Wu H., Han M., Shen Y. Technology-driven energy revolution: the impact of digital technology on energy efficiency and its mechanism. *Frontiers in Energy Research*. 2023;11:1242580. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1242580>
 49. Wu L., Gui Y., Zhang Q., et al. Digital economy, environmental regulation, and carbon emissions: based on a dynamic panel threshold model. In: *Proceedings of the 2024 9th International Conference on Intelligent Information Processing*. ACM; 2024:169-178. <https://doi.org/10.1145/3696952.3696976>
 50. Sun J., Wu X. Digital economy, energy structure and carbon emissions: evidence from China. *Sage Open*. 2024;14(2):21582440241255756. <https://doi.org/10.1177/21582440241255756>
 51. Li T., Yang L. The effects of tax reduction and fee reduction policies on the digital economy. *Sustainability*. 2021;13(14):7611. <https://doi.org/10.3390/su13147611>
 52. He Y., Zhang X., Xie Q. Environmental regulation and carbon emission efficiency: evidence from pollution levy standards adjustment in China. *PLoS One*. 2024;19(2):e0296642. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296642>
 53. Betiol L.S., Uehara T.H.K., Laloe F.K., et al. *Sustainable procurement: the power of public and private consumption for an inclusive green economy*. Public Administration and Citizenship Program; 2015. 145 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2259.9767>
 54. Brammer S., Walker H. Sustainable procurement in the public sector: an international comparative study. *International Journal of Operations & Production Management*. 2011;31(4):452-476. <https://doi.org/10.1108/01443571111119551>
 55. National Bureau of Statistics of China. *China statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press; 2022.
 56. China Emission Accounts and Datasets. *China carbon emission database*. 2023. (accessed on 15.07.2024). URL: <http://www.ceads.net>
 57. Tsinghua University. *Multi-resolution Emission Inventory for China (MEIC)*. (accessed on 15.07.2024). URL: <http://meicmodel.org>
 58. International Energy Agency. *World energy statistics and balances*. (accessed on 15.07.2024). URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics>
 59. Ministry of Science and Technology of China. *China statistical yearbook on science and technology*. Beijing: China Statistics Press; 2022.
 60. CSMAR Solution. *China Stock Market & Accounting Research Database*. (accessed on 15.07.2024). URL: <https://www.gtarsc.com>
 61. EPS Data Platform. *China economic & industry data*. (accessed on 15.07.2024). URL: <https://www.epsnet.com.cn>
 62. Jiang, P., Gong, X., Yang, Y. et al. Research on spatial and temporal differences of carbon emissions and influencing factors in eight economic regions of China based on LMDI model. *Scientific Reports*. 2023;13:7965.

63. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35181-w>
64. Wang J., Liu Y., Wang W., et al. How does digital transformation drive green total factor productivity? Evidence from Chinese listed enterprises. *Journal of Cleaner Production*. 2023;406:136954.
65. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136954>
66. Jiang K., Du X., Chen Z. Firms' digitalization and stock price crash risk. *International review of financial analysis*. 2022;82:102196.
67. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2022.102196>
68. Hendricks K.B., Singhal V.R. Firm characteristics, total quality management, and financial performance. *Journal of operations management*. 2001;19(3):269-285.
69. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00049-8)
70. Adamopoulos T., Brandt L., Leight J., et al. Misallocation, selection, and productivity: A quantitative analysis with panel data from China. *Econometrica*, 2022;90(3):1261-1282.
71. <https://doi.org/10.3982/ECTA16598>