



Банк России



СЦЕНАРИИ ЭНЕРГОПЕРЕХОДА В РОССИИ: ЭФФЕКТЫ В МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЩЕГО РАВНОВЕСИЯ С РАЦИОНАЛЬНЫМИ ОЖИДАНИЯМИ

Серия докладов об экономических исследованиях

№ 122 / январь 2024

М. Андреев
А. Нелюбина

Андреев Михаил

Банк России, Департамент исследований и прогнозирования

E-mail: andreevmyu@cbr.ru**Нелюбина Алена**

Банк России, Департамент исследований и прогнозирования

E-mail: NelyubinaAS1@cbr.ru

Авторы благодарят участников семинаров Департамента исследований и прогнозирования Банка России, а также Дмитрия Козловского, Андрея Полбина, Владимира Поташникова, Марка Сидоровского, Андрея Синякова, Константина Стырина за полезные комментарии и предложения.

Серия докладов об экономических исследованиях Банка России проходит процедуру анонимного рецензирования членами Консультационного совета Банка России и внешними рецензентами.

Содержание настоящего доклада по экономическим исследованиям отражает личную позицию авторов. Результаты исследования являются предварительными и публикуются с целью стимулировать обсуждение и получить комментарии для возможной дальнейшей доработки материалов. Содержание и результаты исследования не следует рассматривать, в том числе цитировать в каких-либо изданиях, как официальную позицию Банка России или указание на официальную политику или решения регулятора. Любые ошибки в данном материале являются исключительно авторскими.

Все права защищены. Воспроизведение представленных материалов допускается только с разрешения авторов.

Фото на обложке: Shutterstock/FOTODOM

107016, Москва, ул. Неглинная, 12, к. В
Тел.: +7 (495) 771-91-00, +7 (495) 621-64-65 (fax)
Официальный сайт Банка России: www.cbr.ru

Оглавление

Аннотация	4
1. Введение.....	5
2. «Зеленая» энергетика: пределы развития и границы сценариев	7
3. Обзор литературы	8
4. Общее описание модели	12
5. Механизмы действия шоков	16
5.1. Общие положения для моделирования действия шоков.....	16
5.2. Перманентный шок внешней цены на «коричневую» энергию	18
5.3. Перманентный шок внутреннего налога на «коричневую» энергию.....	20
5.4. Рост производительности в «зеленом» секторе.....	23
6. Сценарии роста сектора выработки «зеленой» энергии.....	25
6.1. Описание сценариев	25
6.2. Сценарий 1: снижение экспортной цены на «коричневую» энергию	27
6.3. Сценарии 2a, 2b: введение внутреннего налога на «коричневую» энергию.....	28
6.4. Сценарий 3: рост производительности в секторе «зеленой» энергетике без моделирования причин роста	31
6.5. Сценарий 3: рост производительности в секторе «зеленой» энергетике с учетом инвестиций в производительность	32
6.6. Сравнение показателей сценариев	35
7. Чувствительность результатов. Роль отдельных экономических механизмов	37
7.1. Влияние инерционности ДКП и степени открытости финансового счета платежного баланса	38
7.2. Влияние степени взаимозаменяемости «коричневой» и «зеленой» энергии	38
7.3. Роль эластичности трансформации экспорта.....	41
7.4. Роль производства неэнергетического экспортного товара.....	44
8. Влияние ожиданий (новостей) на энергопереход	47
9. Заключение	51
10. Список литературы	54
11. Приложение: математическая постановка модели	58
11.1. Домохозяйства.....	58
11.2. Производитель «зеленой» энергии	61
11.3. Производитель «коричневой» энергии.....	62
11.4. Агрегирование «зеленой» и «коричневой» энергии.....	63
11.5. Производитель промежуточного внутреннего и конечного товара	64
11.6. Посредники на рынке промежуточного внутреннего продукта (жесткость внутренних цен)	66
11.7. Денежно кредитная политика	67
11.8. Условия равновесия.....	67
11.9. Шоки.....	68
11.10. Уравнения модели и расчеты	69
11.11. Калибровка модели.....	69

Аннотация

В данной работе на основе модели общего равновесия (DSGE) для богатой углеводородами страны рассматриваются экономические инструменты, побуждающие экономику к энергопереходу – существенному смещению от «коричневых» к «зеленым» источникам энергии в структуре энергопотребления. Среди рассматриваемых инструментов-сценариев – 1) введение импортерами сырья налогов на «коричневую» энергию, приводящее к снижению экспортной выручки страны-экспортера; 2) введение внутренних налогов на «коричневое» производство; 3) стимулирование производительности в «зеленом» секторе. Показано, что снижение экспортной выручки от продажи «коричневой» энергии является наименее предпочтительным сценарием для энергоперехода. Во-первых, это вызывает наибольшее снижение общественного благосостояния, а во-вторых, при активной переориентации «коричневого» экспорта на внутренний рынок и вовсе препятствует энергопереходу. Сценарий повышения налогов на «коричневую» энергию приводит к гораздо меньшему снижению общественного благосостояния. В работе утверждается, что вариант повышения налогов на используемую внутри страны «коричневую» энергию, при котором «зеленое» производство получает субсидии (что соответствует сложившейся практике в рамках ЕЭС России), приводит к меньшему снижению общественного благосостояния и к более быстрому энергопереходу, чем в случае передачи домохозяйствам налогов, взимаемых со всей производимой «коричневой» энергии, в том числе поставляемой за рубеж. Наконец, наиболее благоприятным сценарием, приводящим к наименьшим потерям общественного благосостояния и долгосрочному росту выпуска и потребления, является стимулирование производительности в секторе производства «зеленой» энергии.

В работе также проанализировано влияние предположений относительно технологических возможностей экономики и разных вариантов финансовой политики на реализуемость сценариев энергоперехода. Делается вывод, что степень инерционности денежно-кредитной политики и степень открытости финансового счета слабо влияют на результаты. В то же время энергопереход принципиальным образом зависит от технологической возможности замещения «коричневой» энергии «зеленой»: если замещение затруднено в силу, например, неравномерности выработки «зеленой» энергии и невозможности ее хранения, то все рассматриваемые инструменты не способны реализовать энергопереход.

Модельные расчеты свидетельствуют в пользу того, что одни лишь ожидания экономических агентов от реализации в будущем инструментов энергоперехода не могут запустить процесс энергоперехода: экономика начинает существенно реагировать на инструменты лишь в момент их применения. Как и в *Fried et al., 2022*, при появлении ожиданий реализации климатической политики инвестиции становятся чище. Агенты заблаговременно наращивают «зеленый» производственный капитал, но при этом крайне слабо наращивают «зеленое» производство. Предложенную модель отличают от схожих по тематике моделей ЕЦБ *Coenen et al., 2023* и ФРС США *Fried et al., 2022* относительная простота, широта и прозрачность набора рассматриваемых сценариев, а также описание экспортно ориентированной экономики, какой является экономика России.

Ключевые слова: динамические модели, общее равновесие, рациональные ожидания, «зеленая» энергетика, энергопереход, климатическая политика, трансграничный налог, денежно-кредитная политика.

Коды JEL: D58, E47, E62, E63.

1. Введение

Под энергопереходом в данной работе понимается значительное смещение в структуре потребления энергии от источников с высокими выбросами углерода к безуглеродным, «зеленым» источникам энергии. Энергопереход является одним из элементов набирающего обороты мирового процесса декарбонизации, который помимо самого энергоперехода включает вопросы повышения энергоэффективности, улавливания и хранения углеводорода, эффективного пользования почвой и лесами. Необходимость декарбонизации и энергоперехода обусловлена вероятностью глобального потепления и его значимыми последствиями для населения планеты. В соответствии с докладами экспертов¹ разумной целью декарбонизации является ограничение роста температуры на 1,5°C по сравнению с доиндустриальной эпохой, иначе, как отмечается, планету ждут катастрофические последствия: появление экстремальных погодных условий, повышение уровня моря, сокращение арктического морского льда, уменьшение популяции кораллов и потеря экосистем. При этом рост на 1°C уже произошел, а недопущение роста средней температуры более чем на оставшиеся 0,5°C требует снижения выброса CO₂ на 45% к 2030 году по сравнению с уровнем 2010 года, а также достижения углеродной нейтральности к 2050 году.

Некоторые страны могут быть не заинтересованы в декарбонизации, например, из-за ориентации на экспорт ископаемого топлива или выгод от глобального потепления (*Kotlikoff et al., 2021*). Однако декарбонизация и энергетический переход могут стать их единственной альтернативой, так как большинство стран могут применить внешнее экономическое давление, чтобы стимулировать декарбонизацию. В этом исследовании мы рассматриваем страну, богатую углеводородным топливом. Строится модель общего равновесия (DSGE) с целью анализа чистых, то есть не смешанных вариантов экономической политики, которые побуждают такую экономику двигаться к энергетическому переходу. Модель откалибрована для российской экономики.

В работе рассматриваются чистые экономические политики:

1) Импортёры ископаемого топлива повышают налоги на внутреннее производство «коричневого» топлива. В конечном итоге это приводит к снижению доходов экспортёра, поставляющего импортёру углеводородное топливо и при некоторых обстоятельствах может привести к энергетическому переходу в экономике-экспортёре.

2) Экспортёр увеличивает внутренние налоги на «коричневую» энергию, чтобы повысить конкурентоспособность отечественной «зеленой» энергии.

3) Экспортёр инвестирует в производительность сектора «зеленой» энергетики.

¹ [Доклад «Глобальное потепление на 1,5°C» \(Special Report on Global Warming of 1,5°C\) Межправительственной группы экспертов по изменению климата.](#)

Смешанные варианты политики, хотя и являются вероятными сценариями будущего энергоперехода, не рассматриваются в данном исследовании с целью акцентирования внимания на эффектах чистой политики.

Политика (1) является инструментом импортера. Повышая налоги на «коричневые» продукты, импортеры защищают свой внутренний рынок и разработанные ими «зеленые» технологии от экспортеров ископаемого топлива. Политика (2) является инструментом страны-экспортера. Политика (3) может иметь двойное происхождение: производительность может как расти за счет усилий только лишь экспортера, так и быть результатом копирования и установки экспортером технологий, разработанных страной-импортером ископаемого топлива.

В работе исследуется действие вариантов чистой политики (1)–(3) с точки зрения макроэкономики. Инструментами исследования являются построение функций импульсного отклика в стохастической модели, расчет траекторий сценариев в детерминированной постановке модели, а также вычисление долгосрочных равновесий, к которым приходит экономика в сценариях энергоперехода. В процессе анализа инструментов (1)–(3) выясняется, какие из сценариев и при каких условиях могут привести к энергопереходу. Анализируется, какими процессами сопровождаются сценарии, а также какие сценарии и при каких условиях являются предпочтительными в смысле изменения общественного благосостояния.

Настоящее исследование вносит следующий вклад в существующую литературу. Во-первых, здесь, в отличие от большей части зарубежных исследований, рассматривается экономика, ориентированная на экспорт углеводородов. Во-вторых, в отличие от подавляющего большинства моделей с результатами для России (см. раздел 3), здесь используется модель равновесия с рациональными ожиданиями, что позволяет учитывать как взаимное влияние всех переменных в отличие от моделей bottom-up (см. раздел 3), так и эффект ожиданий агентов в отличие от CGE-моделей и моделей bottom-up. В-третьих, вместо анализа способов и нюансов введения налога на выбросы углерода мы рассматриваем более широкий класс сценариев политики стимулирования энергоперехода; примеров сравнения сценариев энергоперехода широкого спектра действия для экспортирующей экономики на основе модели равновесия нами в литературе не найдено. В-четвертых, использование именно динамической модели равновесия дает возможность оценить эффект изменения общественного благосостояния при различных сценариях, что позволяет корректно ранжировать сценарии. В-пятых, в отличие от наиболее схожих по тематике и инструментарию в форме DSGE-модели исследований ФРС США (*Fried et al., 2022*) и ЕЦБ (*Coenen et al., 2023*), настоящее исследование отличается наличием чистых сценариев (то есть рассматривается воздействие на экономику инструментов по отдельности), а также относительной простотой модели. В-шестых, в работе проводится

проверка чувствительности результатов к изменению параметров и предпосылок модели в отличие от CGE-моделей и моделей bottom-up, характерных для российских исследований.

2. «Зеленая» энергетика: пределы развития и границы сценариев

Для реалистичности рассматриваемых сценариев энергоперехода, необходимо определить, с какого уровня и до каких пределов может расширяться «зеленая» энергетика.

Следует для начала отметить, что в российской литературе и источниках информации выделяется несколько групп источников энергии: СЭС и ВЭС – солнечные и ветряные электростанции; ВИЭ – возобновляемые источники энергии, включающие помимо СЭС и ВЭС малые гидроэлектростанции, геотермальные источники и биотопливо; безуглеродная электроэнергетика, включающая помимо ВИЭ атомные и гидроэлектростанции. Наибольший вклад в рост мировой мощности генерации в последнее десятилетие вносят именно СЭС и ВЭС (*IEA, 2023*), в связи с чем, говоря далее о сценариях роста «зеленой» энергетика, мы будем подразумевать развитие СЭС и ВЭС.

В России доля мощности ВИЭ во всей мощности генерации составляет 2,3% (5,7 ГВт (*см. Энергетика и промышленность России, 19.12.2022*)) из 245 ГВт (*см. Переток.ру, 13.10.2021*) при этом доля СЭС и ВЭС – 1,8% (4,3 ГВт). Однако доля фактически вырабатываемой энергии, приходящейся на СЭС и ВЭС, меньше 1,8% и составила всего 0,7% в 2022 году (*см. Энергетика и промышленность России, 19.12.2022*) и [0,8% в первом полугодии 2023 года](#). Это связано с тем, что коэффициент использования установленной мощности для СЭС и ВЭС низок: в зимние вечерние максимумы выработка СЭС равна нулю, а выработка ВЭС нерегулярна (*см. Переток.ру, 13.10.2021*).

Доля, которую может занять «зеленая» энергетика в России в ближайшие десятилетия, оценивается по-разному. Минэнерго России до начала СВО прогнозировало долю ВИЭ к 2050 году в 12,5% (*см. Минэнерго, 11.10.2021*), однако в 2023 году снизило прогноз до 9% (*см. ИА «Big Electric Power News», 16.06.2023*). Согласно мнению (*см. Переток.ру, 10.13.2021*) руководителя дирекции по развитию АО «Системный оператор Единой энергетической системы» А. Ильенко, доля ВИЭ в 13–25% «оказывает существенное влияние на режим работы энергосистемы», требуя создания «специальных механизмов привлечения генерации к «быстрому» регулированию», что связано с нерегулярной выработкой энергии СЭС и ВЭС. В Минэнерго отмечают (*см. Минэнерго, 11.10.2021*), что в будущем «нужно будет решать вопросы интеграции этих объемов [12,5% от общей генерации] ВИЭ, управления этими объемами с учетом их резко переменной динамики». Согласно отчету Международного энергетического агентства (*IEA, 2023*), проблема нерегулярности выработки ВИЭ стоит в мировом масштабе, и мировая энергетика пытается решать данную проблему путем

установки стационарных аккумуляторных систем, инсталляция которых демонстрирует взрывной рост в 2019–2022 годах. При этом агентство берется прогнозировать рост ВИЭ лишь на 3 года вперед, до 2025 года, когда мощность генерации ВИЭ должна достичь 35% от мировой.

Можно сделать вывод, что в настоящий момент времени возможность того, что возобновляемые источники энергии займут значительную долю рынка энергии является сомнительной и будет, очевидно, зависеть от развития технологий. Поэтому для целей данной работы адекватным будет рассмотрение пределов развития «зеленой» энергетики в 25% от доли энергетического рынка, при этом рост должен происходить с текущих 0,7% по выработке и 1,8% по объему установленной мощности. Кроме того, для дальнейшего изложения (см. подраздел 7.2) важным является то, что по мере роста доли «зеленой» энергетики будет нарастать проблема стабильности выработки энергии СЭС и ВЭС. Рост важности проблемы стабильности выработки СЭС и ВЭС означает, что в будущем СЭС и ВЭС могут перестать быть свободно заменяемыми другими источниками энергии, то есть «коричневые» источники энергии могут найти прочную технологическую нишу и помешать энергопереходу.

3. Обзор литературы

В моделировании экономики и энергетической системы выделяют два подхода: top-down и bottom-up (*International Panel on Climate Change, 1996*). Подход bottom-up ориентируется на моделирование физических процессов, типичным примером которых может служить закон сохранения энергии: сумма 1 кВт*ч энергии от одного источника и 1 кВт*ч от другого источника всегда равна 2 кВт*ч энергии. Для таких моделей характерно большое количество уравнений, описывающих энергетическую систему, а также постановка экономических задач в классе линейного программирования (минимизация затрат при технологических ограничениях). Решениями таких задач, как правило, являются краевые решения: оптимизирующие агенты вкладывают все средства в один ресурс-технологии, в то время как в другие инструменты не вкладывают ничего или установленный минимум. Модели bottom-up зачастую берут от экономической системы как данность стоимость инвестиций и процентные ставки (для целей дисконтирования финансовых потоков при расчете эффективности инвестиционных проектов), а обратное влияние изменений в энергетической системе на экономику не описывается.

Подход top-down, напротив, ориентирован на описание макроэкономики, что требует эластичных функций спроса и предложения в модели, а принцип сохранения энергии не выполняется, поскольку агрегаторы типов энергии нелинейны. Модели top-down, как правило, описывают взаимное влияние экономики и энергетической системы, однако сама

энергетическая система описывается поверхностно в силу вычислительных трудностей при включении задач линейного программирования в описание экономической системы. Поэтому недостатком такого типа моделей является низкая детализация описания энергетической системы.

Существует множество работ (*Rutherford, Böhringer, 2006; Tuladhar et al., 2009; Timilsina et al., 2021*), заявляющих об удачном интегрировании подходов bottom-up и top-down, однако принципиально проблема объединения подходов (а это позволило бы получать детальное описание энергетической системы и описание взаимного влияния с экономической системой) не решена.

Большинство работ по теме декарбонизации в России выполнены в соответствии с подходом bottom-up. В *Golub et al., 2019* отмечается, что Россия обладает значительным потенциалом для сокращения выбросов углерода, однако инвестиционные барьеры создают значительные риски для внедрения низкоуглеродных технологий. На основе модели bottom-up авторы показывают, что приведенная доходность инвестиционных проектов оказывается очень высокой, свидетельствуя о рисках инвестирования.

В *Potashnikov et al., 2022* рассматривается альтернативный подход к проблеме декарбонизации российской экономики, обычно решаемой в направлении увеличения энергоэффективности производства и принятия дорогостоящих мер улавливания и хранения углерода. Авторы анализируют сценарий декарбонизации путем активного развития солнечной и ветровой энергетики, предлагая решать проблему с перебоями поставок с помощью технологии «зеленого» водорода (Hydrogen). На мелкодетальном уровне с помощью модели показывается, что существует ряд возможных комбинаций ветровой и солнечной энергетики в сочетании с производством экологически чистого водорода для достижения 100%-ной декарбонизации российской экономики. На необходимость внедрения водородных технологий помимо создания резервирующих аккумулирующих мощностей указывают и авторы работы *Колпаков и др., 2022*. По их подсчетам, достижение углеродной нейтральности к 2050 году потребует повышения уровня затрат на энергию к ВВП. В связи с этим достижение углеродной нейтральности к середине века может оказаться неустойчивым сценарием, а «углеводороды по меньшей мере еще два десятилетия должны играть определяющую роль в процессах энергообеспечения». Придерживаться целого комплекса мер для достижения углеродной нейтральности к середине века предлагается и в работе *Салихов, 2022*. Одной из таких мер, по мнению автора, является установка налога на выбросы в размере 37 USD/т. Согласны с тем, что углеродная нейтральность достижима, и авторы *Сафонов и др., 2022*, однако необходима экологическая модернизация российской экономики, а потеря части экспортных доходов неизбежна.

В *Шварц и др., 2022* обращается внимание на мнение, что положительный углеродный баланс лесов России сможет снять необходимость для бизнеса принимать дорогостоящие

меры по снижению прямых выбросов углерода. Авторы отмечают, что меры по декарбонизации промышленности все равно придется проводить несмотря на положительный углеродный баланс лесов и предлагаемые эффективные меры по улучшению управления лесами. К последним авторы относят снижение горимости лесов, а также меры по лесовосстановлению.

К работам, заявляющим о расчете макроэкономических показателей в климатических сценариях, следует отнести *Порфирьев и др., 2022*, где предлагается соблюдать баланс между снижением эмиссии парниковых газов и рисками замедления роста ВВП, а также *Макаров и др., 2018*, где указывается на снижение темпов роста ВВП России на 0,2–0,5% вследствие мер по декарбонизации и на еще большие потери, если Россия не ратифицирует Парижское соглашение. Сеть по экологизации финансовой системы NGFS, объединяющая центральные банки и финансовые институты, рассматривает сценарии роста налога на выбросы углекислого газа до 135 долл. США за тонну к 2050 году (*NGFS, 2022*). Согласно расчетам, вне зависимости от начальной траектории налога введение и повышение налога приведут к дополнительному 15–16%-ному снижению ВВП России к 2050 году. При достижении углеродной нейтральности к середине века *Башмаков и др., 2022*², прогнозируют значительное замедление темпов роста ВВП России до 2050 года в случае слабого роста производительности. *Клепач и др., 2023*³, оценивают, что для достижения углеродной нейтральности потребуются «инвестиции в декарбонизацию» размером 0,46–0,73% ВВП ежегодно до середины столетия.

По-настоящему top-down моделью с описанием показателей российской экономики является лишь *Kotlikoff et al., 2021*, где на основе модели общего равновесия рассчитываются показатели 16 регионов, включая Россию. Как ни странно, но в базовом сценарии, характеризуемом продлением текущих тенденций (*business as usual*), Россия и Канада выигрывают от глобального потепления, которое предполагает рост средней температуры на 3,7°C к 2200 году. Выигрыш для России оценивается в 3,9% ВВП, что объясняется более оптимальными летними и зимними температурами. В то же время остальные 14 регионов проигрывают от потепления, теряя в среднем 20% ВВП. Авторы рассматривают глобальный механизм распределения налогов между странами, позволяющий выработать единую стратегию, которая увеличит мировое общественное благосостояние.

Отдельной темой, затрагиваемой в настоящей работе, являются ожидания будущих изменений в климатической политике и их влияние на настоящее. В работе *Fried et al., 2022* на основе модели равновесия авторы выяснили, что вероятность того, что в будущем в США будет реализована федеральная климатическая политика, уже сейчас делает инвестиции

² Bashmakov et al. (2022) Russia's carbon neutrality: pathways to 2060.

³ Окорочкова А., Тиньков Н. (2023). Достижение Российской Федерацией «углеродной нейтральности» не позднее 2060 года. Под редакцией А. Клепача.

фирм более чистыми. Согласно подсчетам, существование 75%-ной вероятности того, что налог на углерод будет принят в следующем десятилетии, эквивалентно эффекту от введения налога в размере 4,91 долл. США за тонну углерода. Данный результат вполне согласуется с исследованиями *Mertens, Ravn, 2012, Gomes et al., 2017, Андреев, Полбин, 2023*, которые разделяют влияние появления новостей: одна часть воздействия реализуется в момент появления новости, а другая – в момент возникновения события, лежащего в основе новости. Как будет показано ниже (см. раздел 8), в рассматриваемой здесь модели воздействие климатической политики локализуется в момент реализации политики. Как и в *Fried et al., 2022*, инвестиции становятся чище, но производство, как ни странно, чище не становится.

Среди работ, не касающихся России, наше исследование наиболее близко по методам и тематике к исследованию ЕЦБ *Coenen et al., 2023*, где с точки зрения макроэкономики рассматривается влияние повышения налога на «коричневую» энергию. В отличие от этой работы, наша модель, во-первых, вместо страны-импортера сырья рассматривает экспортно ориентированную экономику, в которой «коричневая» энергия может поставляться как на внутренний рынок, так и за границу. Во-вторых, мы рассматриваем чистые сценарии, то есть воздействие на экономику инструментов по отдельности, тогда как в *Coenen et al., 2023* рассматриваются лишь смешанные сценарии.

Набор анализируемых в настоящей работе сценариев энергоперехода частично пересекается с рассматриваемыми в зарубежной литературе. Большая часть зарубежных работ посвящена сценариям налогообложения, приводящим к снижению выбросов. Так, *Antosiewicz et al., 2016* анализируют две альтернативы для сокращения количества ископаемого топлива в странах еврозоны: налоги на материальные затраты или налоги на выпуск промышленных, строительных, транспортных секторов. Авторы пришли к выводу, что первый вид политики стимулирует инвестиции в технологии, повышая эффективность производства, и приводят к росту долгосрочного ВВП и занятости на 15–20% относительно альтернативного сценария. В исследовании *Gupta et al., 2022* сравниваются режимы отсутствия налогов, налога на использование углерода, налога на производство, налога на потребление. В работе учитываются предпочтения домохозяйств относительно качества окружающей среды. Авторы обнаружили, что вне зависимости от того, предпочитают ли потребители чистый климат или нет, налог на использование углерода является наиболее эффективным инструментом.

Помимо формирования фискальных стимулов, в научной литературе уделяется внимание альтернативным методам, способным снизить уровень загрязнения. Например, *Li, Peng, 2020* сравнивает налоги с субсидиями, стимулирующими сокращение загрязнения. Государство выплачивает субсидии фирмам, если они уменьшают выбросы. Авторы показали, что и налоги, и субсидии приводят к улучшению качества окружающей среды.

Однако налог снижает такие макропоказатели, как выпуск, потребление, труд. Субсидии, напротив, увеличивают их. В работе *Guo, Xiao, 2023* авторы также сравнивают два альтернативных сценария: налог на выбросы углерода и введение потолка выбросов плюс торговля квотами на выбросы углерода в детерминированном и в стохастическом вариантах DSGE-модели. В детерминированной постановке модели сокращение выбросов CO₂ на 1% приводит к потере производства на 0,12%, снижению спроса на ископаемое топливо на 0,5% и увеличению спроса на возобновляемые источники энергии на 0,05%. В стохастическом варианте эффекты этих двух вариантов политики различны: налоги на выбросы не являются решением проблемы – сценарий близок к отсутствию политики по снижению загрязнения. Политика торговли квотами при определенных условиях может быть более эффективна с этой точки зрения.

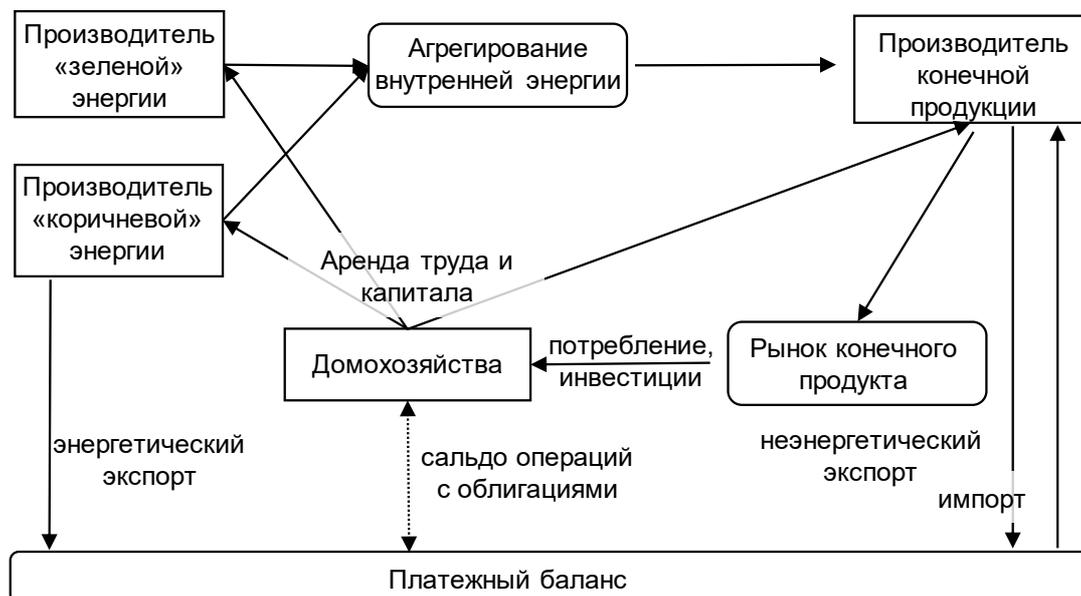
Вопрос влияния различных сценариев политики декарбонизации на экономику страны, ориентированной на экспорт энергоресурсов, недостаточно изучен на текущий момент. К небольшому числу работ по данной тематике относится, например, *Blazquez et al., 2021*. Здесь исследуются эффективность НДС, политика, направленная на изменение цен энергоносителей на внутреннем рынке (сближение с экспортными ценами), а также внедрение возобновляемых источников энергии для сокращения выбросов внутри страны и увеличения экспорта нефти и газа. Сочетание всех видов мер приводит к снижению выпуска, не связанного с нефтегазовой отраслью. Однако совокупный ВВП растет за счет значительного увеличения экспортной нефтегазовой выручки за счет перенаправления нефти и газа за рубеж.

Наконец, представляемая нами работа заполняет пробел в исследованиях Банка России макроэкономических последствий климатической политики, в то время как уже проведенные исследования сфокусированы на проблеме финансовой устойчивости отраслей и предприятий (*Морозов и др. 2020; Penikas, 2022; Burova et al., 2023*).

4. Общее описание модели

Рассматриваемая модель общего равновесия описывает малую открытую экономику, сильно зависящую от экспорта (углеводородов). Особенностью модели является наличие двух секторов – «зеленого» и «коричневого», конкурирующих между собой за поставку фактора производства «энергия» третьему сектору экономики, выпускающему конечный продукт (Рисунок 1).

Рисунок 1. Схема продуктовых потоков модели, трудовых потоков и некоторых финансовых потоков (точечные стрелки)



Сектор производства «зеленой» энергии в данной работе ассоциируется с выпуском, сопровождающимся низкими выбросами углерода, а сектор производства «коричневой» энергии – с высокими выбросами углерода. Под «энергией» в работе в зависимости от рассматриваемого сценария может пониматься как собственно энергия, так и в более широком смысле – продукция отраслей электроэнергетики, нефтедобычи, нефтепереработки, газовой промышленности, угольной промышленности, прочей топливной промышленности (добыча горючих сланцев и торфа).

Основными сценариями, рассматриваемыми в работе, являются сценарии перехода «зеленой» отрасли от уровня выпуска, близкого к нулевому, к уровню, сравнимому с выпуском «коричневой» отрасли. Предметом интереса являются экономические процессы, сопровождающие такой переход.

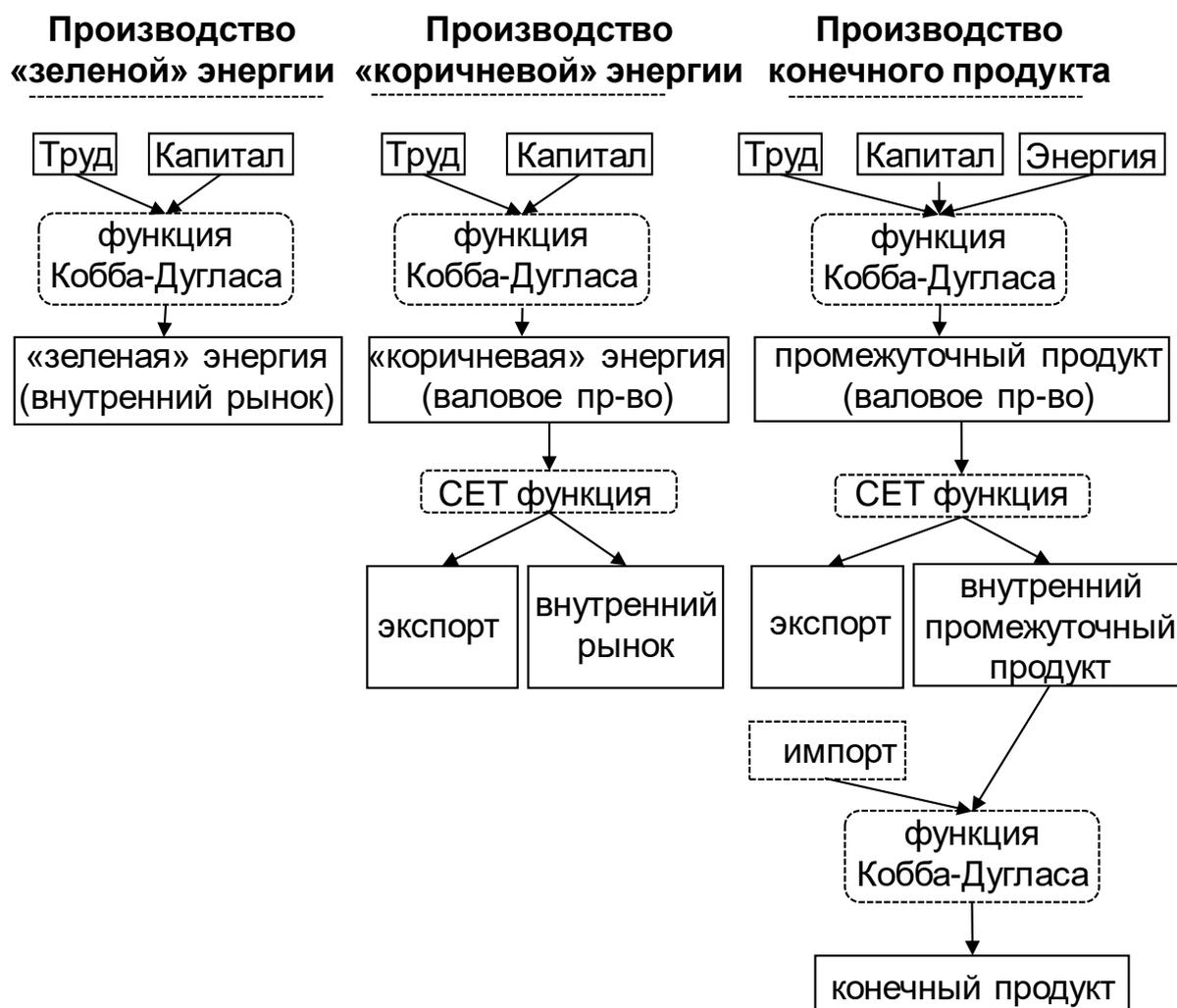
Несмотря на то что два конкурирующих сектора выработки энергии – «зеленый» и «коричневый» – ассоциируются в работе с низкими и высокими выбросами углерода, в явном виде привязка к уровню выбросов не происходит. Поэтому в самом общем случае можно сказать, что исследуются макроэкономические аспекты развития некоторой конкурентной отрасли – с нуля до значимого уровня в структуре экономики.

В модели присутствуют три сектора экономики, структура производства в которых является стандартной для моделей равновесия (см., например, *Lofgren et al., 2002*). Все три сектора производства на начальном этапе производства используют труд и капитал, которые они арендуют у домохозяйств (Рисунок 2). Сектор производства конечного продукта

использует также третий фактор – энергию, выпускаемый другими отраслями, а также импорт на конечном этапе производства.

Сектор производства «зеленой» энергии, комбинируя труд и капитал, получает выпуск, который целиком используется на внутреннем рынке. Данное модельное предположение связано с тем, что на данный момент инфраструктуры для транспортировки «зеленой» энергии не существует, в отличие от инфраструктуры производства «коричневой» энергии. И именно поэтому в секторе производства «коричневой» энергии валовой выпуск, получаемый с помощью труда и капитала, дезагрегируется на две составляющие: энергетический «коричневый» экспорт и внутренний компонент.

Рисунок 2. Схема моделирования производства «зеленой» и «коричневой» энергии и конечного продукта



Внутренний компонент выпуска «коричневой» энергии и вся вырабатываемая «зеленая» энергия агрегируются с помощью CES-функции в общую энергию. Использование CES-функции для агрегирования двух видов энергии означает, что рынок энергии, с одной

стороны, является конкурентным: распределение спроса на «зеленую» и «коричневую» энергию зависит от соотношения цен на эти два вида энергии. То есть чем выше цена одного типа энергии, тем ниже спрос на этот тип. С другой стороны, внутренний рынок энергии не является абсолютно конкурентным: даже при очень высоких ценах, например, на «зеленую» энергию, выпуск данного типа энергии не будет нулевым. Данное предположение является стандартным для top-down и не соответствует моделям bottom-up, которые предполагают, что 1 кВт*ч, выработанный «зеленой» энергетикой, и 1 кВт*ч, выработанный «коричневой» энергетикой абсолютно взаимозаменяемы в энергетическом плане. Сделанное здесь предположение об отсутствии полной взаимозаменяемости двух типов энергии мотивируется тем, что здесь рассматривается макроэкономическая модель, описывающая экономику целой страны. Это значит, что важны такие аспекты, как транспортировка энергии и неравномерность покрытия территории источниками энергии. В России существуют регионы, в которых наделенность «коричневой» энергией низкая и которые, наоборот, обладают лучшими условиями для производства «зеленой» энергии. Это значит, что в масштабах страны каждый тип энергии будет иметь преимущества в отдельных регионах, а значит, предположение о полной взаимозаменяемости типов энергий неуместно. Примером того, что оптимальная выработка «зеленой» энергии предрасположена к концентрации в определенных регионах, служит работа *Potashnikov et al., 2022*.

Отрасль производства конечного продукта на первом этапе агрегирует труд, капитал и энергию (Рисунок 2). Полученный валовый продукт на основе СЕТ-функции дезагрегируется на неэнергетический экспорт и внутренний промежуточный продукт. Далее внутренний промежуточный продукт агрегируется с импортом, что в итоге приводит к выпуску конечного продукта, который расходуется на потребление и инвестиции.

Домохозяйства в модели описаны стандартно. Они предоставляют производителям в аренду труд и капитал, могут сберегать средства в иностранных облигациях⁴, тратят средства на потребление, а также принимают решения относительно уровня инвестиций в производственный капитал⁵ исходя из сложившихся доходностей капитала и цен на инвестиции.

Считается, что капитал для секторов производства не является взаимозаменяемым, в то время как труд арендуется производителями на общем рынке.

⁴ «Сбережения в иностранных облигациях» домохозяйствами – это метод моделирования финансовых трансграничных потоков в DSGE-моделях. Стандартно владение домохозяйствами данной переменной объясняется тем, что в модели отсутствует разделение населения России на истинных владельцев крупного финансового капитала и остальную часть населения, которое не способно осуществлять трансграничные операции.

⁵ Управление домохозяйствами инвестициями в производственный капитал объясняется отсутствием разделения модельных домохозяйств на истинных владельцев производства и всех остальных. Модельный агент домохозяйства исполняет несколько экономических ролей: и роль собственника, и роль наемного работника, предоставляющего в аренду труд.

В данной модели стандартно в рамках новокейнсианского подхода описывается ряд несовершенств: жесткость номинальных внутренних цен и номинальных заработных плат, издержки на вложения домохозяйств во внешние облигации, а также издержки на инвестиции. Уровень издержек на вложения во внешние облигации характеризует степень закрытости счета финансовых операций.

Целью денежно-кредитной политики (ДКП) является таргетирование инфляции путем следования правилу Тейлора. ДКП предполагается высокоинерционной. Бюджетная политика в модели не описана.

Подробная постановка модели приведена в Приложении.

5. Механизмы действия шоков

5.1. Общие положения для моделирования действия шоков

В разделе 5 анализируется действие разовых шоков, имеющих продолжительное (перманентное) действие. Анализ действия шоков, во-первых, интересен сам по себе, поскольку раскрывает макроэкономические механизмы распространения шоков на всю экономику. Эти же механизмы действуют и в сценариях из раздела 6, когда рассматривается влияние серии шоков в детерминированной концепции. Во-вторых, демонстрация экономически логичного действия шоков является одной из проверок корректности модели.

Рассматриваемые в данном разделе шоки формулируются в стохастической концепции: агенты воспринимают окружающую среду как подверженную случайным воздействиям. Шок в первый период времени является для агентов неожиданным.

На рисунках в подразделах 5.2–5.4 представлены функции импульсного отклика для трех состояний экономики: 1) инерционная ДКП при открытом финансовом счете; 2) неинерционная ДКП при открытом финансовом счете; 3) инерционная ДКП при закрытом финансовом счете. Закрытый финансовый счет возникает в модели при высоких издержках на вложения в иностранные облигации и соответствует нулевым вложениям в иностранные облигации. Анализ различий в функциях импульсного отклика представлен в подразделе 7.1.

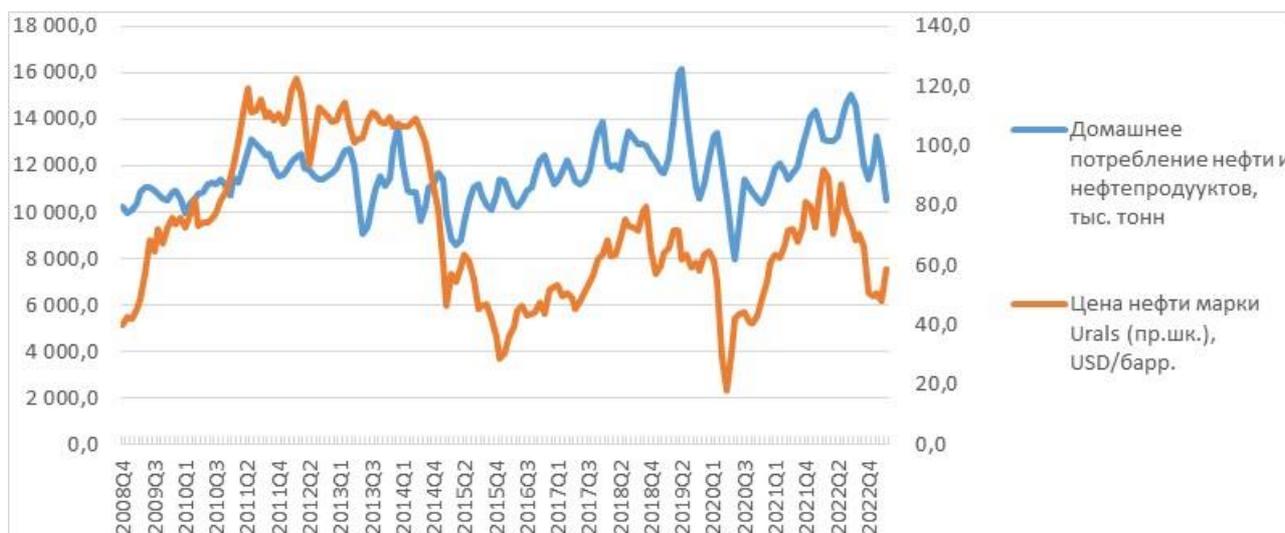
В качестве долгосрочного равновесия, при котором рассчитываются шоки, выбрано равновесие с низкой долей «зеленого» сектора – 2%. Этим может объясняться «слишком низкий» или «слишком высокий» масштаб реакции переменных, относящихся к производству «зеленой» энергии.

Действие шоков на «коричневую» и «зеленую» энергетику, как следует из приведенного ниже анализа, сильно зависит от предположений относительно производства «коричневой» энергии (уравнение (26)). А именно – при проведении расчетов мы предположили, что

параметр φ_b СЕТ-функций (26), дезагрегирующей выпуск «коричневой» энергии на домашний и экспортный компоненты, составляет $\varphi_b = 3$, что соответствует низкой эластичности трансформации $\sigma_b = 0,5$.

При выбранной низкой эластичности трансформации «коричневой» энергии поведение «коричневого» сектора оказывается таким, что в ответ на снижение внешней цены на экспортируемую энергию производитель снижает не только экспортную составляющую, но и внутреннюю. Такая реакция может показаться контринтуитивной: если на одном рынке сбыта – экспортном – спрос или цена на товар падают, то производитель мог бы перенаправить товар на другой рынок сбыта – внутренний. Таким образом, можно было бы ожидать отрицательной связи между внутренним потреблением и внешней ценой. Однако, как показывает статистика (Рисунок 3), между внутренним потреблением и внешней ценой присутствует положительная связь.

Рисунок 3. Потребление нефти и нефтепродуктов в России (с устранением сезонного компонента) и цена нефти марки Urals (правая шкала)



Второй причиной выбора низкой эластичности трансформации экспорта является масштаб реакции экспорта на изменение внешней цены экспорта. Как показано в подразделе 7.3 (Рисунок 15), при снижении внешней цены экспорта на 10% при низкой эластичности трансформации экспорт снижается менее чем на 10%, что соответствует действительности, а при высокой эластичности трансформации он снижается более чем на 10%.

Тем не менее мы рассмотрели реакцию экономики при альтернативной высокой эластичности трансформации экспорта в подразделе 7.3. Отметим, что при высокой эластичности трансформации экспорта все сценарии, кроме сценария снижения внешней цены на «коричневую» энергию, имеют примерно такие же параметры достижения цели энергетического перехода (см. далее таблицу 3).

С экономической точки зрения мы интерпретируем низкую эластичность трансформации экспорта как такое устройство экономики, при котором повышение внешней цены на экспортный «коричневый» продукт приводит к снижению его предложения на внутреннем рынке, а высокую эластичность – как переориентацию экспортного продукта на внутренний рынок при снижении внешней цены.

5.2. Перманентный шок внешней цены на «коричневую» энергию

В данном подразделе рассматривается перманентное снижение внешней цены на экспортируемую «коричневую» энергию на 10% (Рисунок 7). Данный шок аналогичен отрицательному шоку цены на нефть, рассматриваемому в работах (*Андреев, Полбин, 2019; Крепцев, Селезнев, 2018; Полбин, 2014*).

Снижение цены на «коричневую» энергию на мировых рынках сокращает экспортную выручку и, соответственно, предложение «коричневой» энергии. Производитель «коричневой» энергии принимает решение об объеме ее совокупного выпуска такой энергии, а также его распределении между внутренним и внешним рынком. СЕТ-функция дезагрегирования «коричневой» энергии (26) такова, что при выбранной низкой эластичности трансформации экспорта в ситуации снижения объемов одного из компонентов, фирма будет сокращать предложение на обоих рынках, поэтому выпуск домашнего компонента «коричневой» энергии также снижается. Поскольку предложение «коричневой» энергии на внутреннем рынке сокращается, то при существующем спросе цены на данный вид энергии внутри страны растут.

В условиях сжатия предложения «коричневой» энергии, экономика вынуждена переключиться на потребление «зеленой». При этом расширение «зеленого» производства сопровождается ростом цен. Отметим, что именно этот процесс обеспечивает возможность энергоперехода в сценарии, описанном в подразделе 6.2. В противном случае энергопереход невозможен, как отмечается в подразделе 7.3.

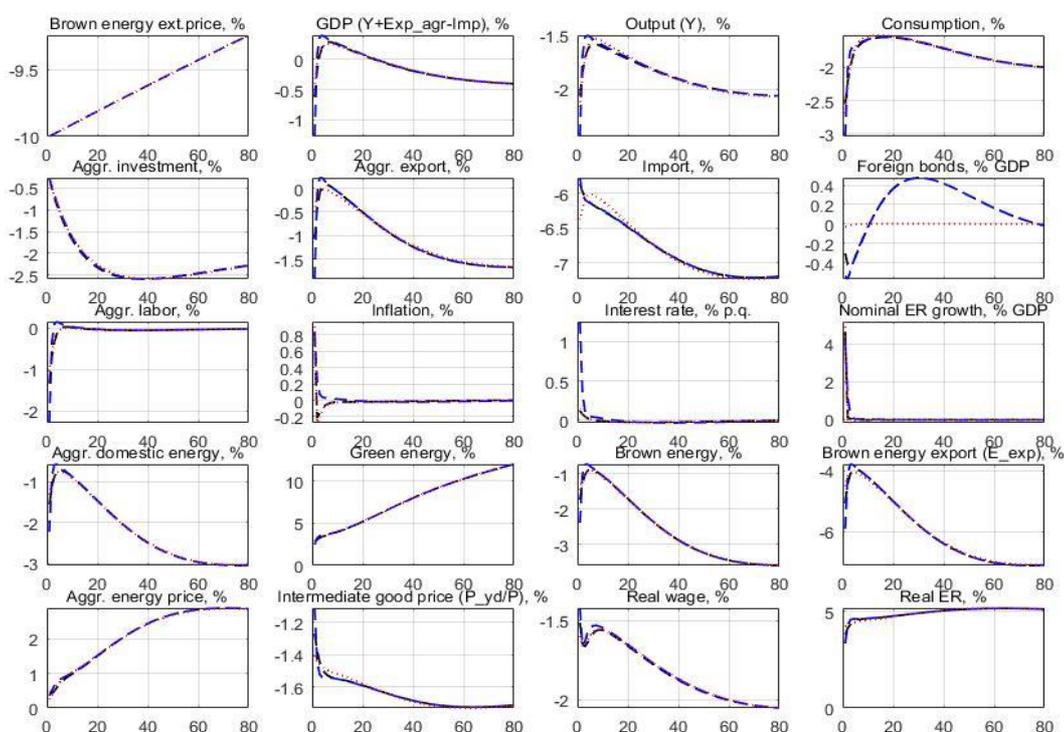
Снижение доходов экономики приводит к тому, что потребление снижается, а вместе с ним и выпуск, агрегированные инвестиции, импорт. В условиях снижения спроса на конечный продукт уменьшаются спрос и объемы факторов производства – агрегированной энергии, агрегированного труда и агрегированного капитала. Рост демонстрирует лишь труд в секторе производства «зеленой» энергии, что объясняется удешевлением данного фактора, его мобильностью и позитивной динамикой выпуска в «зеленом» секторе.

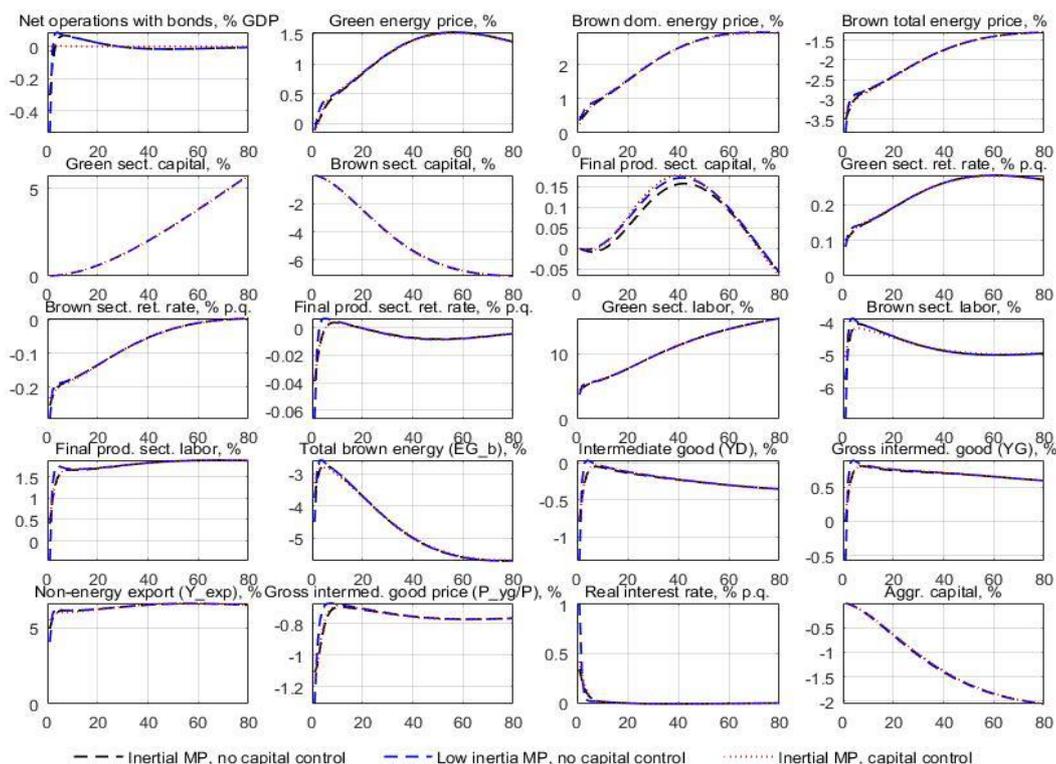
Значительное сжатие энергетического экспорта в краткосрочном периоде является причиной обесценения национальной валюты. Ослабление национальной валюты приводит к тому, что неэнергетический экспорт расширяется. Агрегированный экспорт падает

краткосрочно за счет снижения продажи за рубеж энергетических товаров, однако затем он незначительно увеличивается ввиду преобладания эффекта от роста неэнергетического экспорта.

Ослабление национальной валюты создает проинфляционное давление. Монетарная политика в соответствии с правилом Тейлора реагирует на отклонение инфляции от устойчивого значения, в результате чего происходит повышение ставки. Повышение ставки и снижение заработных плат приводят к сокращению потребления домашних хозяйств, выпуска и импорта.

Рисунок 4. Функции импульсного отклика переменных модели на перманентное 10%-ное снижение экспортной цены на «коричневую» энергию





5.3. Перманентный шок внутреннего налога на «коричневую» энергию

Далее рассматривается влияние перманентного введения внутреннего налога на производство «коричневой» энергии, равного 10% (Рисунок 8). Налогом облагается как «коричневая» энергия, поступающая на внутренний рынок, так и энергия, продаваемая за границу, а полученный налог передается домохозяйствам.

Рост налога транслируется в повышение цен «коричневой» энергии. Спрос на «коричневую» энергию сокращается, что приводит к снижению ее выпуска. Как следствие, появляются стимулы для перехода экономики к «зеленой» энергетике: ее производство устойчиво увеличивается. Вместе с тем, поскольку данные товары являются субститутами и спрос достаточно легко перемещается в «зеленый» сектор, производственные мощности в этом секторе наращиваются не так быстро, что приводит к увеличению цен «зеленой» энергии.

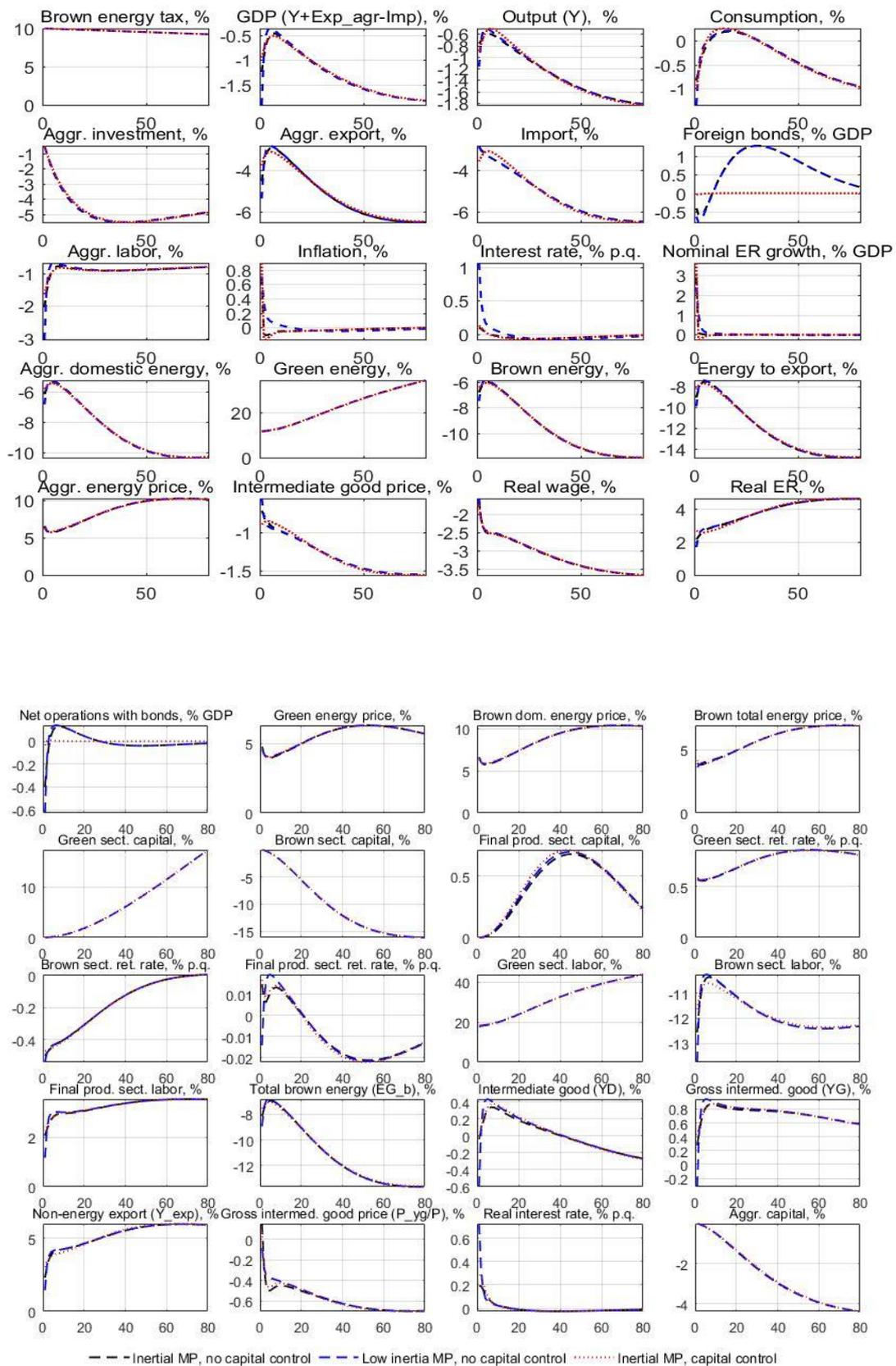
Снижение производства «коричневой» энергии для внутреннего рынка приводит также и к снижению предложения «коричневой» энергии на экспортном рынке. Это объясняется выбором производственной функции и ее параметров, обоснованным в подразделе 5.1: при негативном воздействии на любой из рынков – внутренний или экспортный – производство «коричневой» энергии снижается на обоих рынках.

Действие налога носит искажающий характер и смещает производство в сторону менее эффективного⁶ распределения благ в экономике. Это отражается не только в отмеченном снижении выпуска «коричневой» энергии и росте стоимости агрегированной энергии, но и в общем снижении потребления, выпуска, инвестиций и импорта в экономике. Влияние агрегированных факторов производства – труда, капитала, энергии – также снижается. В секторальном разрезе позитивная динамика труда и капитала наблюдается в «зеленом» секторе и секторе производства конечного продукта, что обусловлено ростом неэнергетического экспорта на фоне ослабления национальной валюты.

Инфляция растет краткосрочно: эффект от ослабления национальной валюты превалирует над снижающимися на фоне снижения производства внутренними ценами. ДКП за счет повышения ставки позволяет быстро привести темпы роста цен к целевому значению, ставка возвращается к своему нейтральному уровню.

⁶ В работе не учитывается положительный эффект от энергоперехода, заключающийся в устранении угрозы глобального потепления. Поэтому в рассматриваемом сценарии мы говорим о движении в сторону менее эффективного равновесия

Рисунок 5. Функции импульсного отклика переменных модели на перманентный 10%-ный шок внутреннего налога на «коричневую» энергию



5.4. Рост производительности в «зеленом» секторе

В данном подразделе рассматривается перманентный рост совокупной факторной производительности (см. уравнение (20)) в секторе «зеленой» энергии на 10% (Рисунок 9). Содержательно не описывается, за счет чего увеличивается производительность: это именно случайное событие, причина которого для наших расчетов неважна.

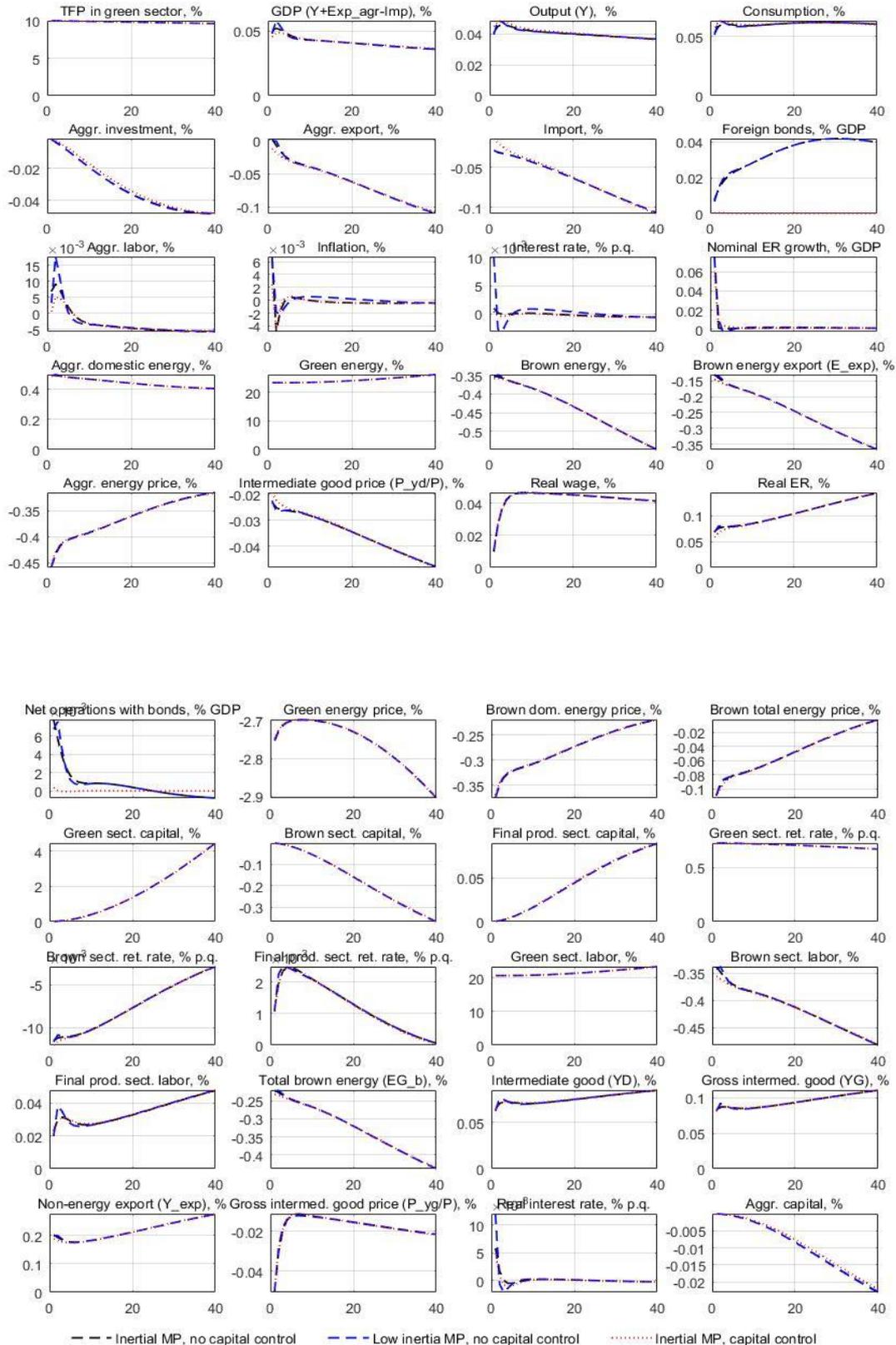
Повышение производительности приводит к увеличению выпуска «зеленой» энергии и снижению ее цены. «Коричневая» энергия становится менее конкурентоспособной, и ее выпуск снижается. При этом сокращаются как ее внутреннее потребление, так и продажи за границу. Цена «коричневой» энергии также снижается: производители вынуждены пересматривать цены вниз для того, чтобы иметь возможность частично сохранить долю рынка на фоне увеличения конкурентоспособности «зеленой» энергии.

Снижение цены на один из факторов производства промежуточного внутреннего товара – энергию – приводит к росту выпуска промежуточного товара, росту конечного выпуска, потребления, ВВП и неэнергетического экспорта. Совокупный экспорт снижается из-за сокращения продаж «коричневой» энергии за границу, в то время как рост неэнергетического экспорта частично смягчает падение совокупного экспорта, а экспорт «зеленой» энергии не осуществляется, как предполагается в модели, из-за отсутствия инфраструктуры для экспорта. Национальная валюта обесценивается. Расширение экономической активности может порождать дополнительный спрос на импорт, однако понижающее давление со стороны ослабления обменного курса превалирует, поэтому импорт также сокращается.

Труд и капитал перемещаются из «коричневого» сектора в «зеленый» и сектор конечного производства.

Специально следует отметить, что реакции некоторых переменных в ответ на 10%-ный рост эффективности производительности в «зеленом» секторе малы, поскольку, как предполагается, «зеленый» сектор занимает лишь 2% энергетического сектора.

Рисунок 6. Функции импульсного отклика переменных модели на перманентный 10%-ный шок роста совокупной факторной производительности в секторе производства «зеленой» энергии



6. Сценарии роста сектора выработки «зеленой» энергии

6.1. Описание сценариев

В разделе 6 рассматриваются сценарии действия макроэкономических инструментов, которые гипотетически могут привести к энергетическому переходу в стране-экспортере углеводородов. Под энергетическим переходом будем понимать рост доли «зеленого» сектора с 1% доли энергетического рынка до 25% (в соответствии с рассуждениями в разделе 2). Предполагается, что инструменты действуют равномерно на протяжении 10 лет (40 кварталов), после чего прекращают свое действие. Достижение цели в 25% доли рынка происходит в долгосрочном равновесии. То есть по истечении 40 кварталов «зеленая» энергетика может еще не выйти на показатель 25%, но выйдет на него по истечении более продолжительного времени в результате воздействия, осуществленного в первые 40 кварталов.

Вычисление сценариев в стохастической концепции, когда все шоки являются неожиданными для агентов, требует разложения уравнений модели вокруг первоначального положения равновесия, соответствующего доле «зеленой» энергетика в 1%. Данное разложение структурно значительно отличается от состояния экономики при 25%-ной доле «зеленой» энергетика. В связи с этим вычисления сценариев по линеаризованным моделям и даже по разложениям более высокого порядка дают нереалистичные результаты.

В связи с этим требуется точное решение уравнений модели. Это возможно в детерминированной концепции: агенты заранее знают сценарии изменения воздействующих переменных. Как показано в разделе 8, реакции наиболее важных переменных модели не отличаются принципиально в случаях точного знания агентами будущих сценариев и незнания их. Это оправдывает расчет сценариев в рамках детерминированной конструкции.

Рассматриваются следующие сценарии (см. подразделы 6.2–6.5).

Сценарий 1. Снижение внешней цены на экспортируемую «коричневую» энергию. Первопричиной этого процесса считается повышение технологичными странами – импортерами углеводородов налога на продукцию, использующую углеводородное топливо. Речь может идти как о трансграничном углеродном налоге, так и о других видах налогов. Когда потребитель импортирующей страны сталкивается с повышением стоимости одного из продуктов по причине роста налога, то он потребляет данный продукт в меньшей мере, а цена на продукт за вычетом величины налога снижается. Таким образом, экспортер сталкивается со снижением спроса на цену. В построенной модели страна-экспортер (Россия) считается малой страной. То есть предполагается, что все влияние на российский экспорт отражено лишь в ценах: продается столько экспорта, сколько выгодно России при сложившихся ценах.

Сценарий 2. Введение (повышение) внутреннего налога на «коричневую» энергию. Этот сценарий уже осуществляется в определенной мере в рамках Единой энергетической системы России (ЕЭС). А именно – на внутреннем энергетическом рынке работает «двухпродуктовая модель»: владельцы мощностей получают два вида платежей. Первый – плата за выработанную энергию, которая определяется из равенства спроса и предложения и одинакова в расчете за 1 кВт*ч для всех производителей. Второй – плата за установленную мощность. Плата за единицу установленной мощности различается по производителям, и у СЭС и ВЭС она выше за счет надбавок в рамках «зеленой» политики. Поэтому можно говорить о том, что сложившаяся ситуация эквивалентна существованию налога внутри ЕЭС в пользу «зеленой» энергетики и в ущерб «коричневой».

В то же время в Евросоюзе предприятия энергетики и крупные промышленные предприятия облагаются налогом на выброс углерода. Собранный налог не обязательно должен направляться на поддержку «зеленой» энергетики.

Таким образом, существуют два способа налогообложения «коричневого» производства: 1) внутри всей страны без передачи средств «зеленой» энергетике; 2) внутри энергетической системы с передачей собранных средств «зеленой» энергетике. Эти два способа мы опишем в сценарии, разделяя его на две части.

Сценарий 2a: налогом облагается стоимость всей «коричневой» энергии, в том числе идущей за рубеж (величина $P_t^{bs} E G_t^b$, см. уравнение (26)). Налог передается домохозяйствам.

Сценарий 2b: налогом облагается лишь стоимость «коричневой» энергии, остающейся внутри страны (величина $P_t^b E_t^b$, см. уравнение (26)). Налог передается производителю «зеленой» энергии.

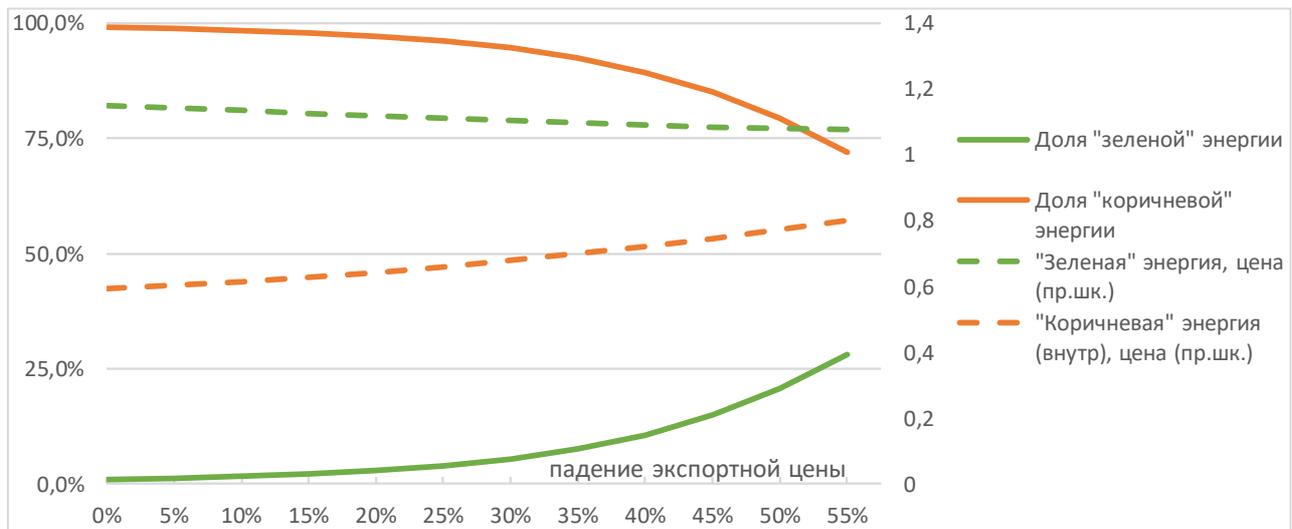
Сценарий 3. Рост совокупной факторной производительности в секторе «зеленой» энергетики. В данном сценарии растет производительность (в соответствии с уравнением (19)). Сначала мы рассматриваем случай, когда причины роста производительности не прописываются (см. подраздел 6.4), а затем рассчитываем этот же сценарий в случае, когда причиной роста производительности являются инвестиции (см. подраздел 6.5). Для этого мы вводим коэффициенты трансформации инвестиций в производительность на основе сравнения со сценарием 2a. Введение инвестиций как причины роста производительности помимо реалистичности также позволяет интерпретировать сценарий двумя способами: производительность может расти как результат самостоятельных действий страны-экспортера по развитию эффективности производства, так и как результат копирования страны-экспортером импортных технологий. При этом цена «копирования» технологий является параметром модели.

6.2. Сценарий 1: снижение экспортной цены на «коричневую» энергию

В сценарии предполагается, что экспортная цена на «коричневую» энергию $P_t^{b,exp}$ снижается с постоянным темпом в течение 40 кварталов, после чего остается неизменной.

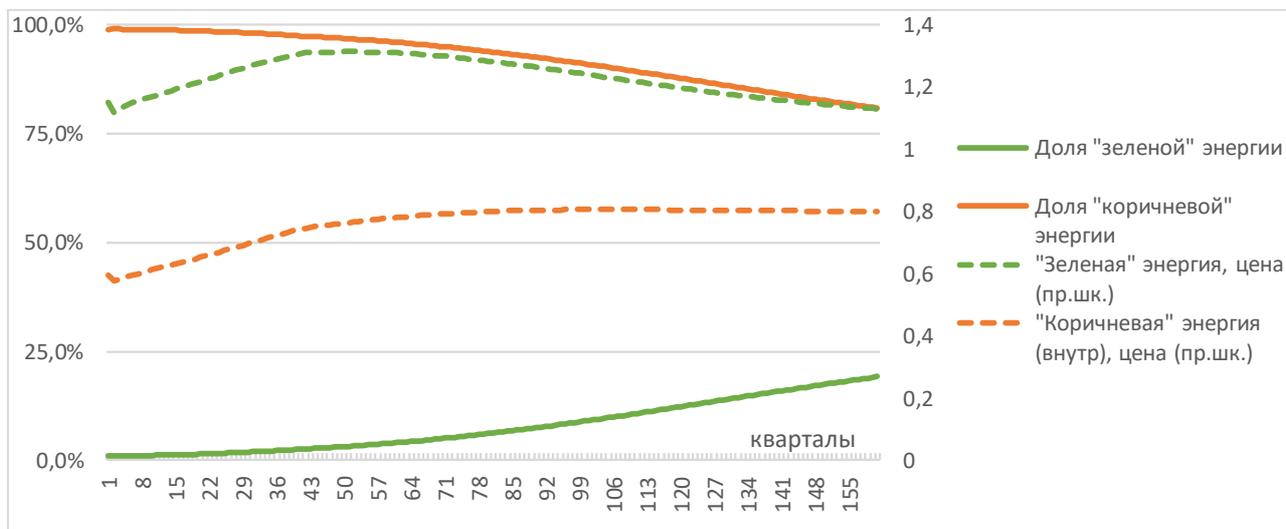
На рисунке 7 приведена зависимость долгосрочных значений объемов и цен энергии от величины снижения экспортной цены. Если снижение экспортной цены составляет порядка 53%, то «зеленая» энергетика достигает доли 25% рынка.

Рисунок 7. Объемы и цены энергии в долгосрочном равновесии в зависимости от уровня снижения цены на экспортируемую «коричневую» энергию в течение 40 кварталов



Как показывает расчет квартальной динамики энергии в сценарии снижения внешней цены (Рисунок 8), объем «коричневой» энергии неуклонно снижается, а объем «зеленой» – неуклонно растет. Показатели приближаются к значениям долгосрочного равновесия по истечении порядка 70 лет. По истечении первых 10 лет, по окончании процесса снижения внешней цены, «зеленый» сектор занимает долю 2,6%, то есть в 10 раз ниже значения в долгосрочном равновесии. Это указывает на высокую инерционность сценария. Инерционность связана с медленной подстройкой производственного капитала под сложившиеся условия. Другие переменные изменяются в направлении, указанном в подразделе 5.2.

Рисунок 8. Динамика объемов и цен энергии при падении внешней цены на экспортируемую «коричневую» энергию на 55% в течение 40 кварталов



Отметим, что результат данного сценария неустойчив по отношению к предположению об эластичности трансформации φ_b (см. подраздел 7.3, а также уравнение (26)) в секторе «коричневой» энергии. А именно – при более высокой эластичности трансформации производитель в ответ на снижение экспортной цены начинает не сокращать продажи на внутреннем рынке, а увеличивать. Это не дает возможности «зеленому» сектору занять значительную долю рынка, и цель сценария не достигается.

Таким образом, можно сказать, что достижение цели сценария зависит от того, насколько агрессивно производитель «коричневой» энергии будет переориентировать продукцию на внутренний рынок при снижении внешней цены.

6.3. Сценарии 2а, 2б: введение внутреннего налога на «коричневую» энергию

В сценариях 2а, 2б на протяжении 40 кварталов с одинаковым темпом повышается налог со стоимости «коричневой» энергии. В сценарии 2а налог взимается со всей произведенной коричневой энергии и передается домохозяйствам, а в сценарии 2б налог взимается только с внутреннего «коричневого» производства и передается производителям «зеленой» энергии.

В обоих сценариях цель достигается (Рисунок 9): в сценарии 2а при ставке 25%⁷, в сценарии 2б – 17%. В сценарии 2б собранный налог примерно в два раза ниже, чем в сценарии 2а, поскольку взимается со стоимости, которая примерно в два раза ниже, чем в

⁷ Повышение тарифа электроэнергии на 25% соответствует плате за выбросы 10 долл. США за 1 тонну CO₂ для источников, использующих уголь, и 25 долл. США для источников, использующих газ (при параметрах расчета 8 руб. за 1 кВт*ч, 80 руб. за 1 долл. США и углеродоемкости электричества 1 кг CO₂ / кВт*ч для угля и 0,4 кг CO₂ / кВт*ч для газа).

сценарии 2a. Однако в сценарии 2b весь собранный налог поступает производителю «зеленой» энергии, а не домохозяйствам. То, что в сценарии 2b необходимый уровень налога оказывается ниже, указывает на то, что процесс стимулирования «зеленых» производителей надбавками оказывается более эффективной мерой, чем искусственное ухудшение показателей «коричневого» сектора с помощью налогов.

Рисунок 9. Объемы и цены энергии в долгосрочном равновесии в зависимости от уровня роста внутреннего налога на всю «коричневую» энергию (сценарий 2a) в течение 40 кварталов

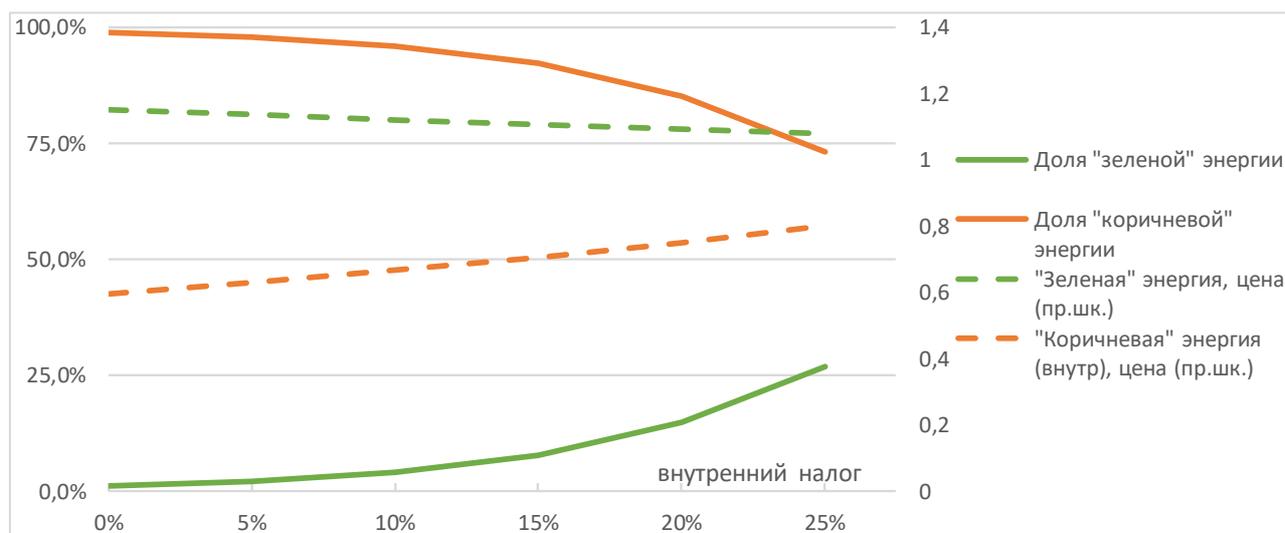
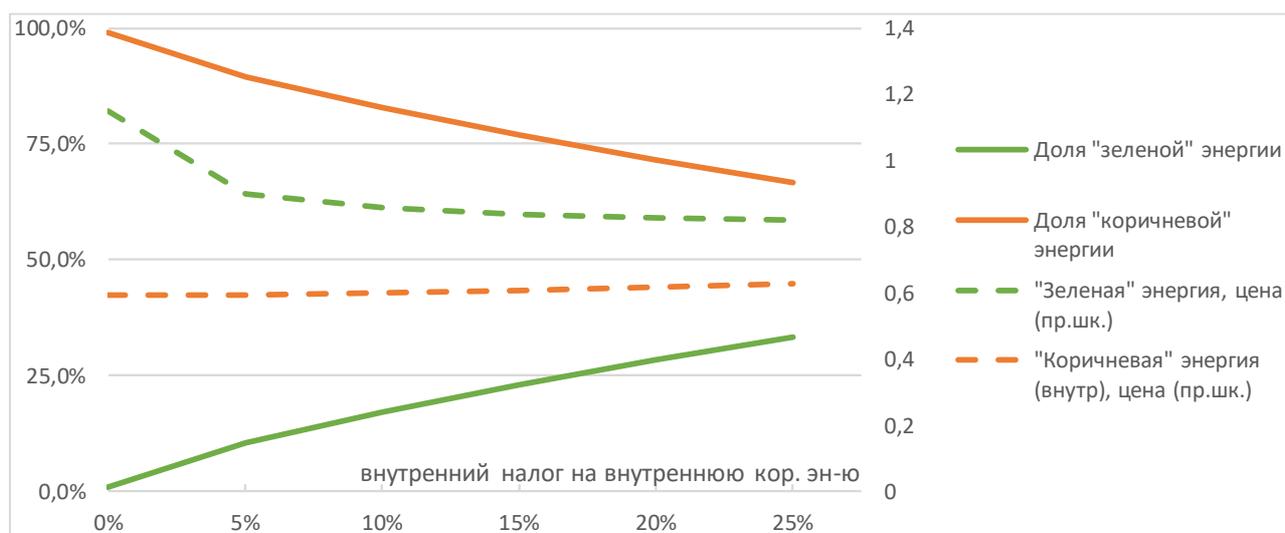


Рисунок 10. Объемы и цены энергии в долгосрочном равновесии в зависимости от уровня роста внутреннего налога на внутреннюю «коричневую» энергию (сценарий 2b) в течение 40 кварталов



Также в сценарии 2b долгосрочный эффект от введения небольшого налога выше, чем в сценарии 2a. В обоих сценариях цена «коричневой» энергии растет с ростом ставки, а

«зеленой» – уменьшается, поскольку производители коричневой энергии в большей степени перекладывают рост налога в цены, а «зеленые» – снижают цены за счет поступлений.

Динамика объемов и цен энергии (Рисунок 12) показывает, что в сценарии 2b процесс энергоперехода происходит более активно: уже на горизонте порядка 100 кварталов «зеленая» энергетика близка к достижению целевого показателя, в то время как в сценарии 2a аналогичные показатели достигаются на периоде более 160 кварталов. Более интенсивная динамика в сценарии 2b объясняется тем, что стимулирование «зеленого» сектора происходит не только косвенно через снижение спроса на конкурирующую «коричневую» энергию, но и напрямую через надбавки. Также стоимость энергии в сценарии 2b ниже, чем в 2a: производители «зеленой» энергии в силу надбавок имеют возможность более активно снижать цены, а производители «коричневой» энергии в таких условиях дополнительно затруднены в повышении цен.

Подводя итог, оказывается, что в случае низкой заменяемости «зеленой» и «коричневой» энергии цели энергоперехода не достижимы, а в случае высокой – достижимы. При этом сценарий 2b оказывается более предпочтительным из-за большей интенсивности процесса энергоперехода и меньшего роста цен на энергию. Повторим (см. подраздел 6.1), что сценарий 2b с надбавками для «зеленого» сектора соответствует сложившейся ситуации в рамках ЕЭС России.

Рисунок 11. Динамика объемов и цен энергии при росте внутреннего налога на всю «коричневую» энергию на 25% (сценарий 2a) в течение 40 кварталов

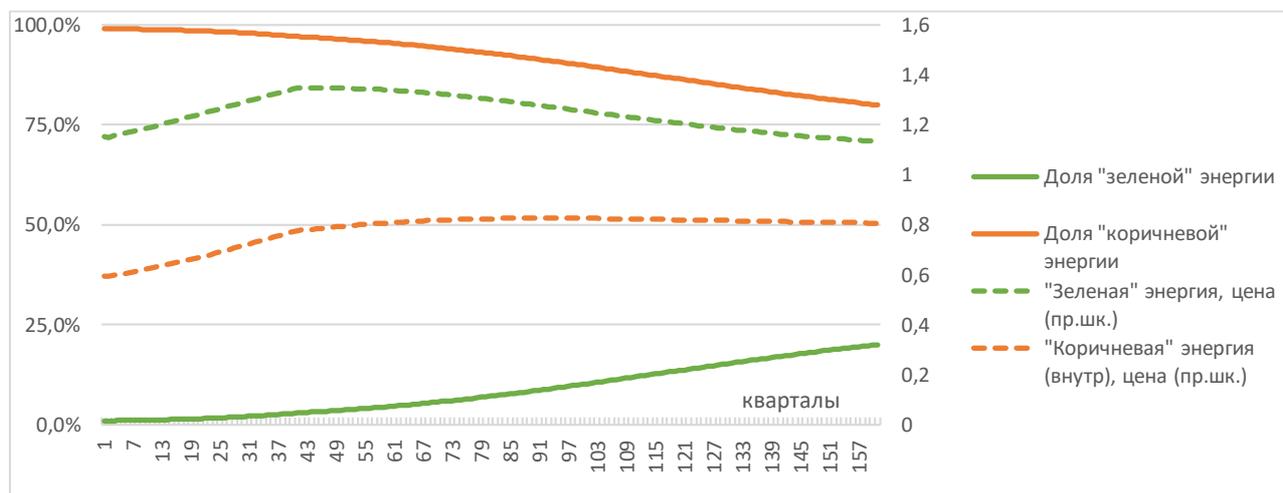
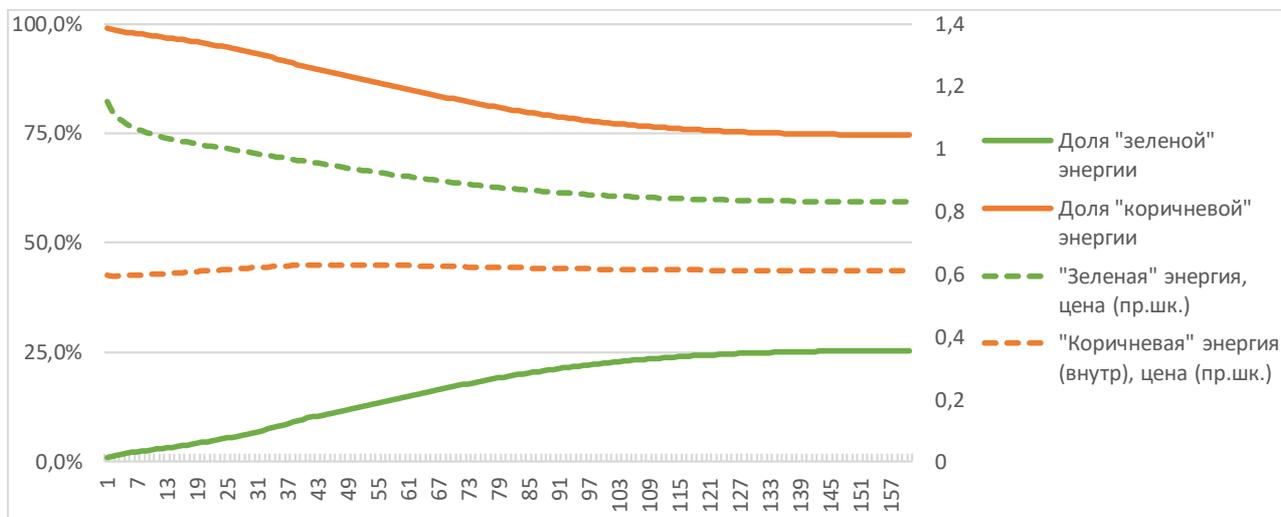


Рисунок 12. Динамика объемов и цен энергии при росте внутреннего налога на внутреннюю «коричневую» энергию на 17% (сценарий 2b) в течение 40 кварталов



6.4. Сценарий 3: рост производительности в секторе «зеленой» энергетики без моделирования причин роста

В данном сценарии на протяжении 40 кварталов происходит рост эффективности производства в «зеленом» секторе постоянным темпом, после чего эффективность производства остается одинаковой на достигнутом уровне. В расчете, представленном в данном подразделе, не моделируется причина роста производительности (см. подраздел 6.5). Это происходит потому, что результаты сценария используются лишь справочно – как ориентация на максимально высокое значение общественного благосостояния, которое можно получить при энергопереходе за счет роста производительности. Подобные сценарии в научной литературе обосновываются подходом *learning by doing* (см., например, *Thompson, 2010*) – феноменом роста производительности, связанным с накоплением фирмой производственного опыта.

В сценарии роста производительности цель энергоперехода также осуществима (Рисунок 13): при 55%-ном росте производительности в долгосрочном равновесии «зеленая» энергетика достигает требуемой доли рынка.

Динамика процесса (Рисунок 14) демонстрирует снижение стоимости «зеленой» энергии в силу роста производительности, а также вытеснение «коричневой» энергии дешевеющей «зеленой» энергией. Отметим, что в данном сценарии, как и в большинстве предыдущих, изменения в экономике происходят гораздо дольше, чем в период воздействия 40 кварталов: необходима подстройка уровня производственного капитала «зеленого» и «коричневого» секторов под изменившиеся обстоятельства.

Рисунок 13. Объемы и цены энергии в долгосрочном равновесии в зависимости от роста производительности

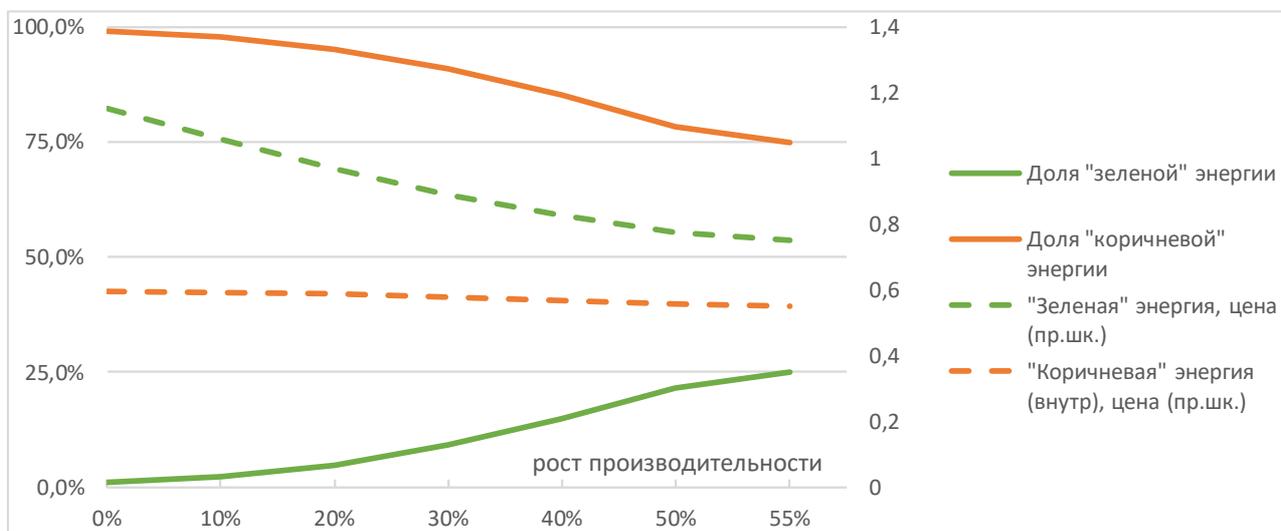
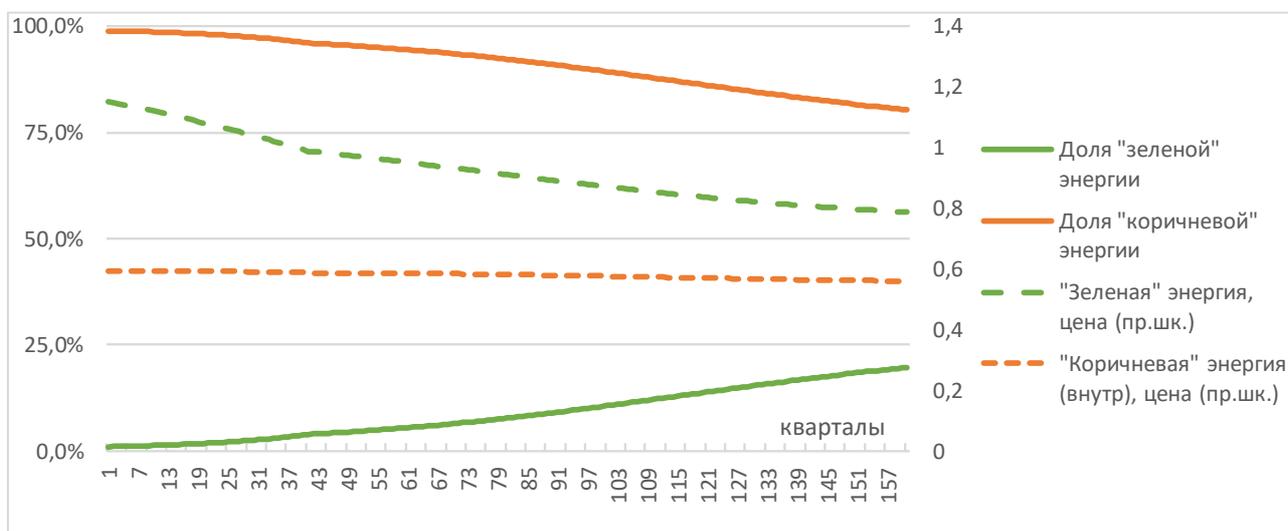


Рисунок 14. Динамика объемов и цен энергии при росте производительности на 55% за 40 кварталов



6.5. Сценарий 3: рост производительности в секторе «зеленой» энергетики с учетом инвестиций в производительность

В соответствии с результатами предыдущих подразделов, энергопереход возможен во всех сценариях (хотя в сценарии снижения внешней экспортной цены результат неустойчив к предположениям модели). В сценарии роста производительности не описывалось, за счет

чего может вырасти производительность. По этой причине описанные сценарии не сравнимы друг с другом.

Сравнить сценарии можно, описав причину роста производительности в сценарии 3. Будем предполагать, что производство «зеленой» энергии описывается уравнением:

$$E_t^g = a^g \left(\frac{TFP_{t-1}}{TFP_{ss}} \right)^{\alpha^g} (K_{t-1}^g)^{\alpha^g} (L_t^g)^{1-\alpha^g}, \quad (1)$$

где динамика величина TFP_t описывается соотношением

$$TFP_t = TFP_{t-1} + P_{TFP} I_{TFP}. \quad (2)$$

Величина TFP_t характеризует совокупную производительность двух факторов – труда и капитала. Динамика производительности схожа с динамикой производственного капитала K_{t-1}^g (см. уравнение (5)). Отличие заключается в том, что, во-первых, в отличие от капитала производительность не подвержена амортизации, а во-вторых, инвестиции I_{TFP} могут увеличивать производительность только с некоторым коэффициентом трансформации инвестиций P_{TFP} .

Будем предполагать, что государство за счет собранных налогов на протяжении 40 кварталов вкладывает постоянный объем реальных инвестиций I_{TFP} , которые покупаются на рынке конечного продукта, в показатель производительности TFP_t . Проблема заключается в отсутствии знания о величине коэффициента трансформации инвестиций P_{TFP} . В связи с этим сравнение сценариев возможно только в следующей постановке: величина инвестиций I_{TFP} и коэффициент трансформации P_{TFP} подбираются такими, чтобы сценарии роста внутреннего налога (2а) и роста производительности (3) были эквивалентны. Эквивалентность сценариев подразумевает:

- 1) рост «зеленого» сектора в долгосрочном равновесии до 25% рынка в обоих сценариях;
- 2) одинаковое изменение (снижение) общественного благосостояния, выраженного соотношением (4), в обоих сценариях.

Оказывается, что для эквивалентности сценариев 2а и 3 необходимо, чтобы коэффициент трансформации составлял $P_{TFP} = 0,021$, а величина ежеквартальных инвестиций $I_{TFP} = 0,057$, т.е. 5,7% от первоначального уровня ВВП.

Величина инвестиций в 5,7% ВВП в сектор, производящий изначально всего 1% энергии, указывает на то, что сценарий роста производительности более предпочтителен: только при слишком высоких инвестициях этот сценарий становится таким же неэффективным, как сценарий роста внутреннего налога. Однако для сравнения сценариев более корректно охарактеризовать коэффициент трансформации $P_{TFP} = 0,021$ с точки зрения инвестора. Предположим, что производитель-инвестор выбирает между тем, чтобы вложить малую величину инвестиций δI в производительность TFP_t или в производственный капитал K_t^s . Оба способа вложения ведут к росту выпуска «зеленой» энергии. Однако, оказывается, что при $P_{TFP} = 0,021$ приведенное суммарное изменение выпуска при вложении δI в производительность в 13 раз меньше, чем при вложении δI в производственный капитал. Столь значительная кратность указывает на нереалистично низкое значение коэффициента трансформации P_{TFP} . Это опять же означает, что сценарий роста производительности 3 более предпочтителен, чем сценарий 2а: только при нереалистично низком значении коэффициента P_{TFP} сценарий роста производительности становится таким же неэффективным, как и сценарий роста внутреннего налога. Данные рассуждения решают вопрос ранжирования сценариев.

Для оценки показателей сценария роста производительности с учетом причины роста производительности – инвестиций, будем считать, что в сценарии государственные инвестиции в TFP_t всего в четыре раза (вместо 13) менее эффективны, чем частные инвестиции в производство. Такое предположение обосновывается тем, что научно-исследовательские проекты стандартно считаются рискованными для бизнеса и финансируются, как правило, государством.

Предположению, что государственные инвестиции менее производительны, чем частные, в четыре раза, соответствует $P_{TFP} = 0,0667$. При данном параметре оказывается, что для достижения доли «зеленой» энергетики 25% достаточно инвестиций в размере 1,8% ВВП ежеквартально на протяжении 40 кварталов. В этом случае динамика цен и объемов энергии схожа со сценарием без инвестиций в производительность (Рисунок 14). Совокупная

факторная производительность $\left(\frac{TFP_{t-1}}{TFP_{ss}}\right)^{\alpha^s}$ за 40 кварталов вырастает на 55%. Другие параметры сценария указаны в подразделе ниже.

6.6. Сравнение показателей сценариев

В 1 для различных сценариев приведено изменение долгосрочных значений переменных и указано изменение общественного благосостояния. В последнем столбце справочно приведены показатели сценария с ростом производительности без моделирования ее причин.

Таблица 1. Основные характеристики сценариев достижения сектором «зеленой» энергетики доли рынка в 25%. Значения новых долгосрочных равновесий в % от первоначального долгосрочного равновесия, кроме «общественного благосостояния» – в терминах потребительской эквивалентности⁸

	1	2a	2b	3	3 С	3 Без
Ключевая характеристика сценария	Снижение внешней цены на «коричневую» энергию на 55%	Рост налога на всю «коричневую» энергию на 25%	Рост налога на внутреннюю «коричневую» энергию на 17%	Рост производительности в «зеленом» секторе на 55% за счет инвестиций размером 1,8% ВВП	инвестиции ми	инвестиций (справочно)
Общественное благосостояние, %	-7,95	-1,92	-1,26	-0,26		0,49
Выпуск (Y), %	-9,8	-6,1	-1,4	1,4		1,5
Потребление (C), %	-9,8	-4,9	-1,4	1,4		1,5
Агр. инвестиции, %	-9,8	-10,5	-1,4	1,5		1,5
Агр. труд (L), %	0,0	-1,4	0,0	0,0		0,0
Импорт (Imp), %	-32,3	-20,9	-8,6	-4,6		-4,6
Реальный обменный курс, %	33,3	18,7	7,8	6,3		6,4
Внутренняя энергия (E), %	-18,8	-21,2	3,0	16,7		16,9
Относительная цена внутренней энергии (P _e /P), %	28,8	28,7	-1,4	-11,0		-11,1
«Зеленая» энергия (E _g), %	1 891	1 764	2 200	2 497		2 526
Относительная цена «зеленой» энергии (P _g /P), %	-6,5	-6,2	-27,7	-34,7		-34,8

⁸ Долгосрочное равновесие – значения переменных модели, устанавливаемые в далеком будущем при условии отсутствия шоков в экономике. В данной таблице, в отличие от долгосрочного равновесия, показатель «общественное благосостояние» в соответствии с формулой (4) отражает изменение потребления и труда, входящих в функцию полезности домохозяйств, не только в далеком будущем, но и на конечном промежутке времени.

«Коричневая» внутренняя энергия , %	-47,9	-48,5	-30,7	-21,4	-21,6
Относительная цена «коричневой» внутренней энергии (P_b/P), %	34,6	34,3	2,6	-7,4	-7,4
Энергетический экспорт (E_{exp}), %	-65,2	-51,5	-22,1	-15,8	-16,0
Неэнергетический экспорт (Y_{exp}), %	45,6	25,0	11,7	12,3	12,4
ВВП ($Y+Y_{exp}+E_{exp}-Imp$), %	-6,4	-6,1	-1,4	1,4	1,5
Отношение снижения «коричневой» энергии к снижению общественного благосостояния	7,1	26,2	20,1	69,1	-
Устойчивость результата сценария к предположению об эластичности трансформации экспорта коричневой энергии φ_b	нет	да	да	да	да

Все рассматриваемые сценарии, помимо достижения цели энергоперехода, снижают уровень общественного благосостояния. При это следует отметить, что в данных расчетах не учитывается положительный эффект от энергоперехода, заключающийся в устранении угрозы глобального потепления. Данный положительный эффект, при возможности его расчета, мог бы внести положительный вклад в изменение благосостояния.

Наибольшее снижение общественного благосостояния происходит в сценарии снижения внешней цены на «коричневую» энергию (сценарий 1): экономика недополучает экспортный доход, а рост неэнергетического экспорта лишь смягчает, но не компенсирует снижение. Менее обременительным для экономики являются сценарии роста внутреннего налога (сценарии 2a, 2b). Негативный эффект на общественное благосостояние возникает из-за смещения от эффективного производства в сторону неэффективного, что отражается в тенденции к росту цены энергии и снижению ее общего объема. В сценарии роста налога, взимаемого только с внутреннего производства «коричневой» энергии (сценарий 2b), показатели снижаются сильнее за счет стимулирования выпуска «зеленого» сектора с помощью надбавок. Наименьшие потери общественного благосостояния дает сценарий роста производительности за счет инвестиций (сценарий 3), в котором предполагается, что государственные инвестиции в производительность в четыре раза менее эффективны, чем частные инвестиции в производственный капитал. В данном сценарии снижение общественного благосостояния объясняется именно инвестиционными затратами, в то время как рост производительности имеет положительное значение на эффективность

экономики, что отражается в росте долгосрочного выпуска, потребления и производства энергии.

Поскольку во всех сценариях производство «коричневой» энергии либо подвергается негативному влиянию, либо постепенно проигрывает в конкурентных параметрах производству «зеленой» энергии, то во всех сценариях долгосрочное производство «коричневой» энергии снижается – как для внутреннего потребления страны, так и на экспорт. Как следствие, во всех сценариях происходит ослабление национальной валюты, снижение импорта и рост неэнергетического экспорта.

Рост сектора «зеленой» энергии в зависимости от сценария составляет от 1891 до 2497%, при этом доля «зеленой» энергии растет с 1 до 25%. Это объясняется тем, что «коричневая» энергия во всех сценариях долгосрочно снижается, что позволяет «зеленой» энергии расти менее чем в 25 раз, чтоб занять 25% рынка.

Для целей декарбонизации важным является показатель «стоимости» снижения выпуска «коричневой» энергии, что может быть оценено как отношение снижения выпуска к снижению общественного благосостояния. По данному показателю ранжирование сценариев оказывается прежним, за исключением смены мест сценариев 2a и 2b: сценарий 2a оказывается более предпочтительным за счет большего снижения «коричневого» экспорта.

7. Чувствительность результатов. Роль отдельных экономических механизмов

В данном разделе мы рассматриваем предпосылки модели, от которых зависят результаты исследования. В подразделе 7.1 констатируется, что вид ДКП и степень закрытости финансового счета не влияют на результаты исследования. В подразделе 7.2 отмечается, что предположение о степени взаимозаменяемости «коричневой» и «зеленой» энергии является крайне важным, и при низкой заменяемости цель энергоперехода не достижима ни в одном сценарии. В подразделе 7.3 показано, что предположение об эластичности трансформации экспортного продукта, что характеризует степень переориентации внешних экспортных потоков на внутренний рынок при снижении внешнего спроса, может приводить к тому, что энергопереход в сценарии снижения внешних экспортных цен нереализуем. Наконец, в подразделе 7.4 отмечается влияние предпосылки о гибкости производства неэнергетического экспорта на масштаб отклика переменных.

7.1. Влияние инерционности ДКП и степени открытости финансового счета платежного баланса

Функции импульсного отклика для случаев, когда ДКП является инерционной или неинерционной, а также для случаев открытого и закрытого финансового счета приведены в разделе 5.

Действие инерционной ДКП отличается тем, что масштаб реакции процентной ставки на шоки значительно меньше, чем при неинерционной ДКП. При инерционной ДКП регулятор в ответ на шок обещает удерживать реакцию ставки продолжительное время. Рациональные агенты, принимая это во внимание, учитывают будущие действия регулятора, изменяя цены в меньшем масштабе. В итоге действие инерционной и неинерционной ДКП схоже между собой по форме и масштабу откликов.

Степень закрытости финансового счета также имеет слабое влияние на функции импульсного отклика и, соответственно, результаты сценариев. При закрытом финансовом счете агенты не имеют возможности вкладывать средства во внешние финансовые инструменты. В результате незначительно искажается реакция переменных, относящихся к платежному балансу: импорта, экспорта.

7.2. Влияние степени взаимозаменяемости «коричневой» и «зеленой» энергии

Оказывается, что сценарные результаты принципиальным образом зависят от того, насколько два вида энергии – «зеленая» и «коричневая» – взаимозаменяемы. Как отмечалось в разделе 2, существуют аргументы в пользу того, что по мере роста доли «зеленой» энергии на энергетическом рынке заменяемость двух видов энергии будет падать. Это может происходить из-за неравномерной выработки «зеленой» энергии и трудностей хранения энергии.

В модели взаимозаменяемость «зеленой» и «коричневой» энергии моделируется с помощью агрегирующей CES-функции (32):

$$E_t = a^e \left(\alpha^e (E_t^g)^{\varphi_e} + (1 - \alpha^e) (E_t^b)^{\varphi_e} \right)^{\frac{1}{\varphi_e}} \quad (3)$$

Нетрудно увидеть, что при $\varphi_e = 1$ два вида энергии являются совершенными субститутами: один вид энергии свободно заменяется на другой в постоянной пропорции. Такое выражение отражает закон сохранения энергии и характерно для моделей bottom-up. Так как мы используем подход top-down, эластичность замещения должна быть конечной, то есть $\varphi_e < 1$. В наших базовых расчетах мы предполагали, что как минимум на начальном

этапе развития энергетического рынка два вида энергии будут заменяемы, поэтому максимально приблизили вид CES-функции (3) к случаю совершенных субститутов, установив $\varphi_e = 0,9$. При этом предполагалось, что параметр α^e принимает значение 0,55. Высокое значение данного коэффициента означает, что технология (3) не запрещает рынку использовать «зеленую» энергию в существенном объеме, а текущее значение доли «зеленой» энергетики в 1% рынка является лишь следствием того, что цена «зеленой» энергии в 1,9 раза выше, чем цена «коричневой» энергии. При такой высокой разности цен и высокой степени конкуренции между «коричневой» и «зеленой» энергией, отражаемой параметром $\varphi_e = 0,9$, производитель не желает в значительной мере использовать «зеленый» товар.

Данное предположение базовой версии модели может быть пересмотрено радикально или умеренно. При умеренном пересмотре можно предположить, что «зеленую» и «коричневую» энергию объединяют такие же технологии, как и любые две произвольные отрасли. Тогда по аналогии с существующими работами (например, *Klump et al., 2007; Le'on-Ledesma et al., 2010*), коэффициент φ_e должен принимать значение порядка $-0,5$. При данном значении параметра рынок двух видов энергии становится менее конкурентным, а агрегирующая технология (3) менее восприимчива к существующей разности цен между «зеленой» и «коричневой» энергией. В таком случае разницу цен в 1,9 раза между «зеленой» и «коричневой» энергией и долю рынка «зеленой» энергии в 1% можно объяснить только низким значением параметра $\alpha^e = 0,01$. Низкое значение параметра α^e означает, что агрегатор двух видов энергии по каким-то причинам не может использовать значительный объем «зеленой» энергии в производстве. То есть «зеленая» и «коричневая» энергия являются плохо заменяемыми. Показатели сценариев при значении параметров $\varphi_e = -0,2$, $\alpha^e = 0,01$ представлены в 2.

Таблица 2. Показатели сценариев: изменение долгосрочных равновесий по отношению к первоначальному долгосрочному равновесию. При альтернативных значениях параметров агрегирующей CES-функции ($\varphi_e = -0,2$, $\alpha^e = 0,01$), интерпретируемых как низкая взаимозаменяемость «коричневой» и «зеленой» энергии

Номер сценария	1	2а	3 без инвестиций
Ключевая характеристика сценария	Снижение внешней цены на «коричневую» энергию на ...	Рост налога на всю «коричневую» энергию на ...	Рост производительности в «зеленом» секторе на ...

Величина изменения ключевой характеристики, %	25	50	25	50	200	1 000
Выпуск (Y), %	-5,4	-9,9	-6,2	-15,3	0,3	0,9
Потребление (C), %	-5,4	-9,9	-4,6	-12,9	0,3	0,9
Агр. инвестиции, %	-5,4	-9,9	-12,1	-24,0	0,3	0,9
Агр. труд (L), %	0,0	0,0	-1,9	-3,1	0,0	0,0
Импорт (Imp), %	-17,2	-29,5	-16,7	-32,4	0,2	0,6
Реальный обменный курс, %	14,3	27,7	12,5	25,3	0,1	0,2
Внутренняя энергия (E), %	-9,8	-21,6	-29,2	-58,0	1,6	4,7
Относительная цена внутренней энергии (P_e/P), %	11,2	29,5	39,3	124,4	-1,2	-3,6
«Зеленая» энергия (E_g), %	1,5	2,9	-1,0	-6,0	78,8	588,8
Относительная цена «зеленой» энергии (P_g/P), %	-3,5	-6,6	-6,9	-14,6	-49,9	-89,9
«Коричневая» внутренняя энергия, %	-10,1	-22,2	-29,8	-58,8	0,2	0,7
Относительная цена «коричневой» внутренней энергии (P_b/P), %	11,5	30,6	40,6	129,5	0,4	1,1
Энергетический экспорт (E_exp), %	-21,2	-45,6	-37,2	-69,5	0,1	0,2
Неэнергетический экспорт (Y_exp), %	18,3	35,4	14,2	23,3	0,4	1,3
ВВП (Y+Y_exp+E_exp-Imp), %	-1,8	-5,0	-6,2	-15,3	0,3	0,9

В сценариях снижения внешней цены на «коричневую» энергию (сценарий 1) и в сценарии роста налога (сценарий 2а) сектор «коричневой» энергии подвергается негативному воздействию и снижает производство на внутреннем рынке. Однако «зеленая» энергия не занимает освободившийся рынок: низкое значение производственного параметра $\alpha^e = 0,01$ означает, что в технологическом смысле «зеленая» энергия рынку не нужна. В сценарии роста производительности «зеленого» сектора даже немислимое 10-кратное увеличение производительности, влекущее в том числе 10-кратное падение цены «зеленой» энергии, приводит лишь к 6-кратному росту объемов «зеленой» энергетики, что ниже установленной цели энергоперехода.

Радикальный пересмотр предположения о высокой взаимозаменяемости «зеленой» и «коричневой» энергии заключается в предположении, что вместо почти совершенных субститутов два вида энергии становятся совершенными комплементариями. Это произойдет, если «зеленый» сектор расширится, а проблема с нерегулярностью выработки «зеленой» энергии не будет решена. Тогда расширение «зеленой» энергетики возможно только с расширением общего спроса, и два сектора будут расти в одинаковой пропорции. Моделирование данной ситуации возможно посредством замены производственной CES-функции (3) функцией Леонтьева. Однако, численный эксперимент, на наш взгляд, здесь не требуется: очевидно, что, раз во всех сценариях сектор «коричневой» энергии сокращается (Таблица 1), то при пропорциональном изменении объемов выпуска двух секторов сектор «зеленой» энергетики вместо роста будет падать вместе с сектором «коричневой» энергии.

В итоге можно заключить, что если на определенном этапе развития «зеленой» энергетики «зеленая» энергия и «коричневая» энергия станут плохо заменяемыми друг другом, то любые меры «зеленой» политики перестанут работать.

7.3. Роль эластичности трансформации экспорта

Эластичность трансформации экспорта – энергетического и неэнергетического – влияет на модельную экономику через выражения (26) и (41):

$$EG_t^b = a^{bg} \left(\alpha^{bg} (E_t^b)^{\varphi_b} + (1 - \alpha^{bg}) (E_t^{b,exp})^{\varphi_b} \right)^{\frac{1}{\varphi_b}}$$

$$YG_t = a^{yd} \left(\alpha^{yd} (YD_t)^{\varphi_{yd}} + (1 - \alpha^{yd}) (Y_t^{exp})^{\varphi_{yd}} \right)^{\frac{1}{\varphi_{yd}}}$$

Первое выражение отражает преобразование всей произведенной внутри страны «коричневой» энергии EG_t^b на внутренний компонент E_t^b и экспортный $E_t^{b,exp}$. Второе выражение отражает преобразование валового промежуточного продукта YG_t на внутренний промежуточный продукт YD_t и на неэнергетический экспорт Y_t^{exp} .

Эластичность трансформации экспорта представлена параметрами $\sigma_b = \frac{1}{\varphi_b - 1}$,

$\sigma_{yd} = \frac{1}{\varphi_{yd} - 1}$, при $\varphi_b = 3$, $\varphi_{yd} = 2$, принимающими значения $\sigma_b = 0,5$, $\sigma_{yd} = 1$. В

исследованиях эластичность трансформации обычно берется в пределах от 0 до 5, существенно различаясь по регионам исследования и отраслям промышленности.

Значения эластичности трансформации указывают, в частности, на то, в какой степени экспорт будет реагировать снижением на снижение его цены, а также на реакцию второго, неэкспортного, компонента на снижение цены экспорта. При низких значениях эластичности трансформации снижение цены экспорта ведет к меньшему снижению экспорта, а также к реакции неэкспортного компонента в сторону отрицательных значений. Это демонстрируется на Рисунок 15, где сравниваются функции импульсного отклика для случая низкой эластичности $\sigma_b = 0,5$, $\sigma_{yd} = 1$, взятой для базовых расчетов разделов 5 и 6, а также для высокой эластичности $\sigma_b = \sigma_{yd} = 5$.

При низкой эластичности трансформации в ответ на перманентный шок снижения экспортной цены «коричневой» энергии объем внутренней «коричневой» энергии снижается. При высокой эластичности объем внутренней «коричневой» энергии, наоборот, растет. Данное различие в реакции зависит именно от эластичности трансформации и может быть объяснено с помощью выражений (30), (31), характеризующих спрос на «коричневую» энергию.

Для рассматриваемых в данном исследовании сценариев различие в реакции внутренней «коричневой» энергии в зависимости от эластичности имеет принципиальное значение. При высокой эластичности в ответ на снижение экспортной цены внутренняя «коричневая» энергия растет. Это приводит к более высокой реакции агрегированной внутренней энергии и более низким ценам на внутреннюю энергию. Как следствие, «зеленая» энергия не может захватить значительную долю рынка: переориентация потоков «коричневой» энергии с экспорта на использование внутри страны не позволяет этого сделать. В итоге в сценарии снижения экспортной цены на «коричневую» энергию энергопереход не достигим.

В других сценариях эластичность трансформации играет незначительную роль. Отличия результатов сценариев приведены ниже в таблице.

Рисунок 15. Функции импульсного отклика переменных модели на перманентный 10%-ный шок снижения внешней цены «коричневой» энергии. Для случаев низкой эластичности трансформации экспорта ($\sigma_b = 0,5$, $\sigma_{yd} = 1$) и высокой ($\sigma_b = \sigma_{yd} = 5$)

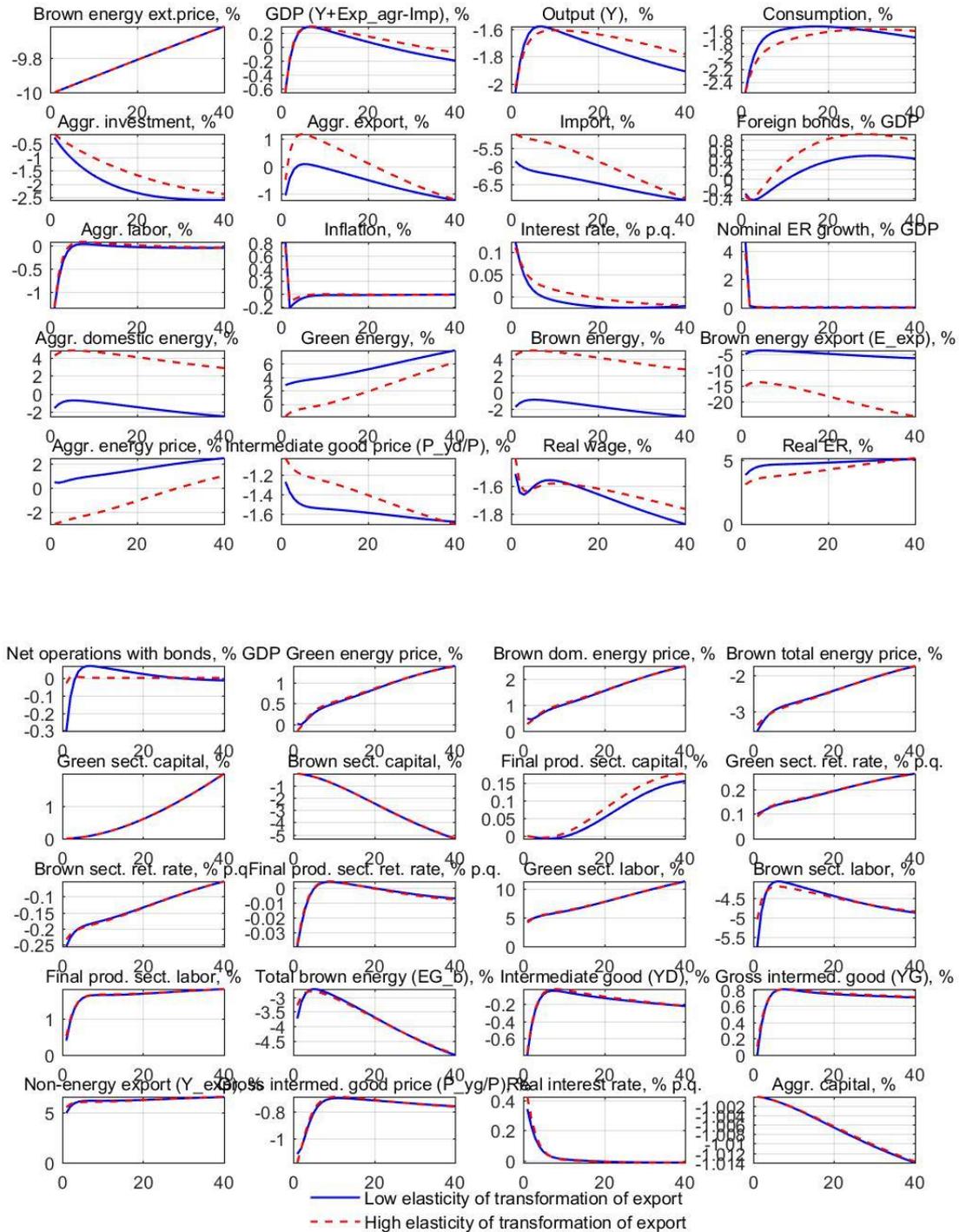


Таблица 3. Условия реализуемости сценариев энергоперехода в зависимости от уровня эластичности трансформации экспорта

Сценарии и их ключевые условия для энергоперехода	Низкая эластичность ($\sigma_b = 0,5, \sigma_{yd} = 1$)	Высокая эластичность ($\sigma_b = \sigma_{yd} = 5$)
Сценарий 1: снижение внешней цены на «коричневую» энергию на...	55%	Цель энергоперехода не достижима ⁹
Сценарий 2а: рост налога на всю «коричневую» энергию на...	25%	25%
Сценарий 2б: рост налога на внутреннюю «коричневую» энергию на...	17%	25%
Сценарий 3: рост производительности в секторе «зеленой» энергии на...	55%	55%

В заключение отметим, что параметры эластичности трансформации $\sigma_b = 0,5, \sigma_{yd} = 1$ были выбраны в базовых расчетах низкими в связи с тем, что российская статистика демонстрирует слабый отклик объемов внутреннего использования нефти, газа и нефтепродуктов в ответ на изменение внешних цен, чего и требуют функции импульсного отклика при низкой эластичности.

7.4. Роль производства неэнергетического экспортного товара

В рассмотренных выше сценариях неэнергетический экспорт активно реагировал на изменение обменного курса. В действительности же внешний спрос на неэнергетический экспорт может оказаться ограниченным, поэтому величина реакции неэнергетического экспорта может быть иной. Другими словами, предположение о том, что рассматриваемая экономика является малой и не может влиять на величину предложения, может оказаться значимым для результатов. Чтобы проверить, насколько критично предположение модели о свободном изменении неэнергетического экспорта под влиянием цен, рассчитывается следующий сценарий.

В данном сценарии аналогично сценарию в подразделе 5.2 предполагается перманентное снижение внешней цены на «коричневую» энергию на 10% (Рисунок 16). Сравнивается реакция экономики в двух случаях: 1) неэнергетический экспорт Y_t^{exp} может

⁹ При падении внешней цены на «коричневую» энергию на 50% и более «зеленый» сектор достигает размера 4–5% энергетического рынка

реагировать свободно на изменения в экономике, 2) неэнергетический экспорт фиксирован:

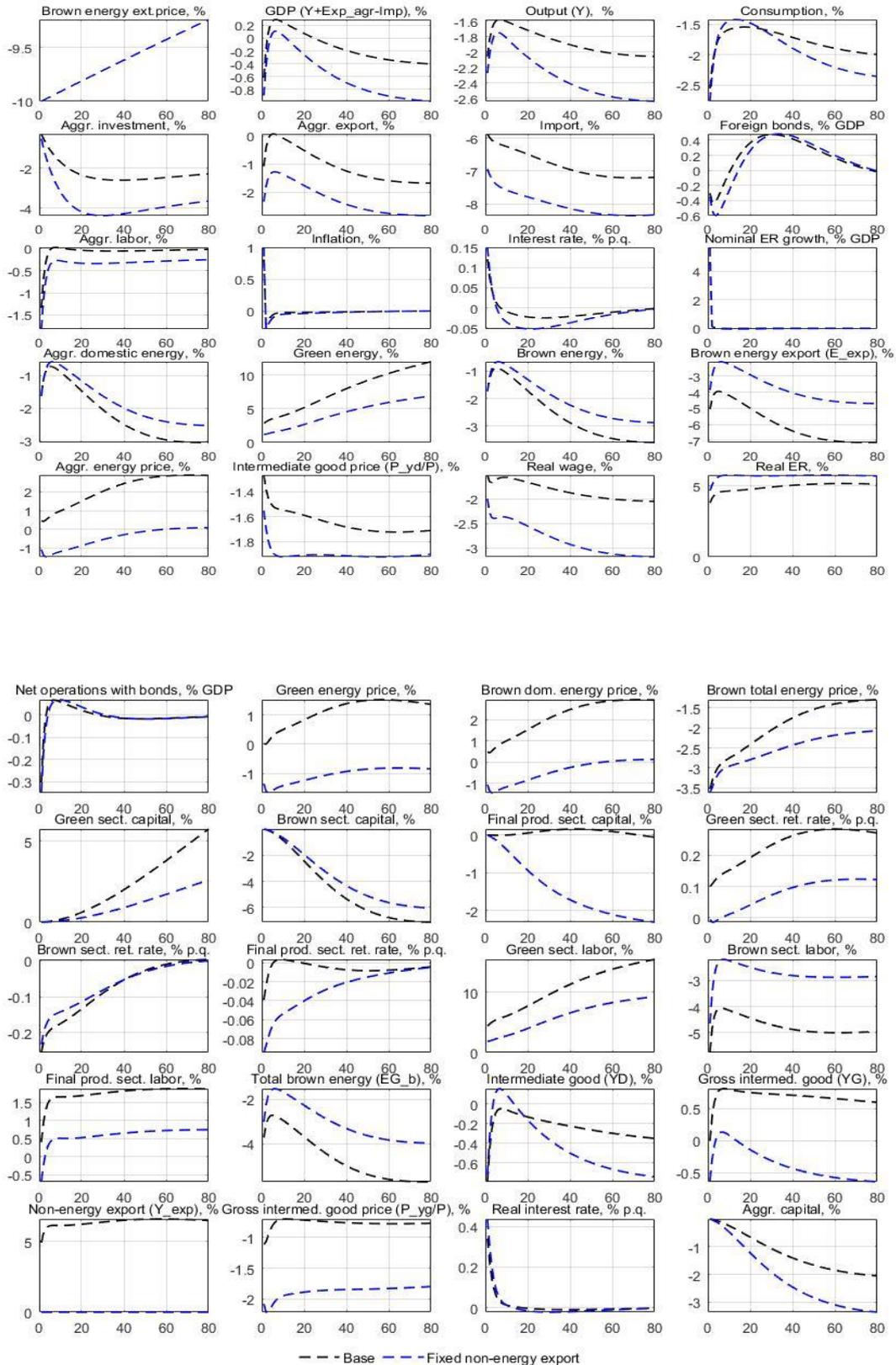
$$Y_t^{\text{exp}} = \text{const}.$$

В обоих случаях направление реакции (рост, снижение) подавляющего большинства переменных остается прежним. Присутствуют количественные различия между случаями. В случае, когда неэнергетический экспорт фиксированный, агрегированный экспорт падает ниже и, как следствие, сильнее реакция импорта, национальная валюта обесценивается в большей степени. Так как неэнергетический экспорт перестает смягчать негативное воздействие шока, то реакция переменных модели, характеризующих внутреннюю экономику, становится более негативной. Наиболее существенные изменения касаются переменных капитала и его цены в секторе производства конечного продукта (реакция становится отрицательной вместо околонулевой): изменение реакции объясняется отсутствием роста спроса со стороны неэнергетического экспорта.

Кроме того, цены на энергию внутри страны на рассматриваемом горизонте поменяли знак на противоположный. Такой результат объясняется тем, что спрос со стороны внутренней экономики на энергию снизился сильнее, чем производство энергии.

Таким образом, при шоке внешней цены на «коричневую» энергию предположение о неизменности неэнергетического экспорта может влиять на реакцию некоторых переменных, в целом изменяя масштаб реакции. Для других шоков – шока производительности и шока внутреннего налога на «коричневую» энергию – различия в реакции переменных еще меньше.

Рисунок 16. Функции импульсного отклика переменных модели на перманентный 10%-ный шок снижения внешней цены на «коричневую» энергию. Для случаев постоянного и переменного выпуска неэнергетического экспорта



8. Влияние ожиданий (новостей) на энергопереход

В данном разделе рассматривается шок ожиданий (новостей). Предполагается, что в настоящий момент событие, лежащее в основе новости, еще не случилось, но агенты получили достоверную информацию о том, что событие наверняка случится. Если более конкретно, то мы будем предполагать, что экономические агенты в настоящий момент узнают о планируемом повышении внутреннего налога на «коричневое» производство на 10% через 12 кварталов.

По тематике новостей и их влиянию существует множество работ (см., например, *Mertens, Ravn, 2012; Gomes et al., 2017; Андреев, Полбин, 2023*). Известно, что в моделях рациональных ожиданий эффект от появления новости может локализоваться в двух промежутках времени. Первое воздействие на экономику может наблюдаться в момент появления новости, второе – в период времени, близкий к реализации события, лежащего в основе новости. Два воздействия могут отличаться по величине и даже по направлению в зависимости от рассматриваемой модели. По тематике декарбонизации существует результат работы *Fried et al., 2022*, в соответствии с которым существование вероятности того, что в стране будет реализована климатическая политика, уже в настоящий момент делает инвестиции фирм более чистыми. Таким образом, агенты реагируют на новость еще до реализации самого события.

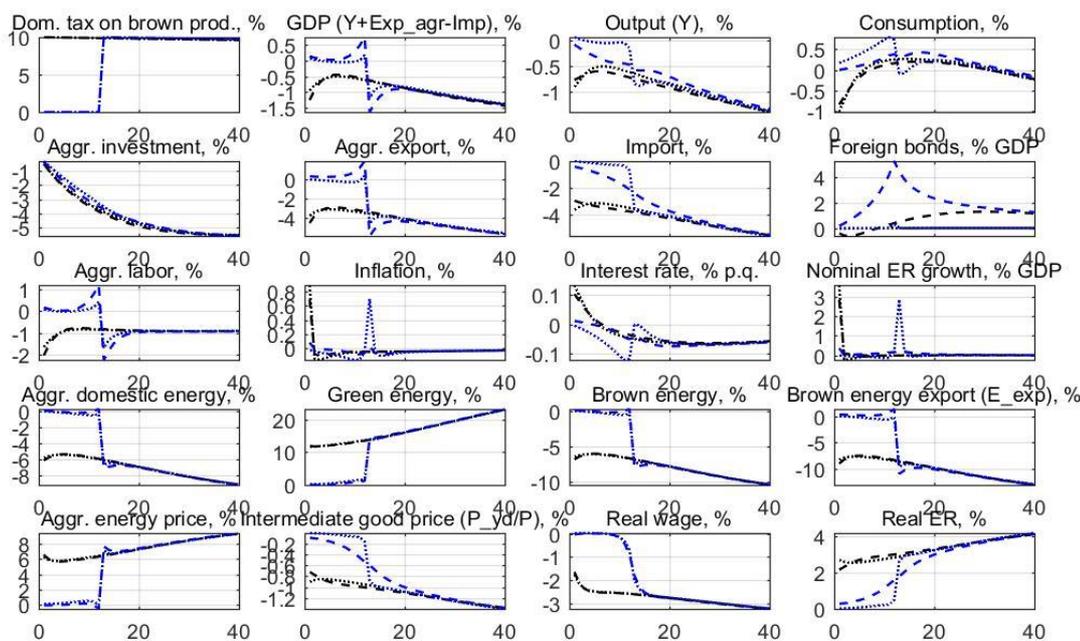
Как показано ниже (Рисунок 17), новость о повышении налога на «коричневую» энергию через 12 кварталов оказывает слабое воздействие на переменные производства в момент возникновения новости. Основное воздействие шока локализуется вблизи момента реализации новости – через 12 кварталов. Заблаговременно реагируют лишь переменные, относящиеся к домохозяйствам: потребление, иностранные облигации. Домохозяйства, зная о снижении потребления в будущем, пытаются сгладить собственное потребление. Для этого они накапливают финансовые средства за границей, если счет финансовых операций предполагается открытым. В момент негативного события – введения налога и начала снижения показателей экономики – они постепенно изымают иностранные облигации. Операции с иностранными облигациями влияют на динамику импорта и обменного курса, заблаговременно сглаживая их. Если же предполагается, что финансовый счет закрыт, то у домохозяйств нет финансового актива для сбережения средств, поэтому реакция потребления, выпуска, импорта, обменного курса также оказывается сконцентрированной в момент реализации события.

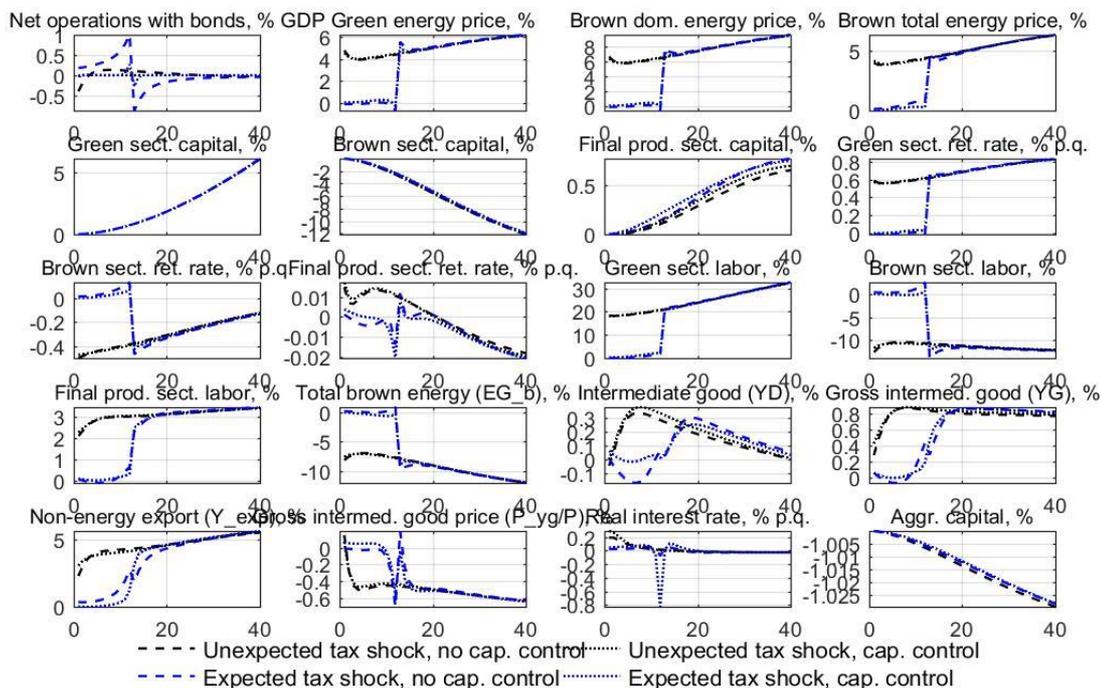
Другой группой переменных, реагирующей на появление новости, являются инвестиции и капитал. По сути, капитал – это единственный (после иностранных облигаций, которые могут оказаться недоступны) инструмент в модели, который позволяет перераспределять благосостояние во времени. Информация о введении налога заранее отражается в

изменениях объемов накопления капитала между отраслями экономики. Оказывается, что независимо от того, ввели ли налог в текущий момент времени или только сообщили о намерениях это сделать в будущем, информация немедленно и в полной мере отражается на рынке капитала. Инвестиции в «коричневый» сектор сокращаются, в «зеленый» – растут. При этом труд в «зеленом» и «коричневом» секторах не растут заблаговременно. Это значит, что производство увеличивается только лишь за счет изменения капитала: оказывается, невыгодно заблаговременно повышать фактор производства «труд», который можно резко поднять в момент реализации события.

Что касается инфляции и процентной ставки, то Центральный банк еще до реализации события, лежащего в основе новости, ожидает, что будут преобладать дефляционные риски, связанные со снижением цен товаров внутреннего потребления. Кроме того, поскольку в сценарии с ожидаемым шоком налога курс национальной валюты не обесценивается, этот проинфляционный эффект исчезает, и, соответственно, экономике не требуется краткосрочного ужесточения денежно-кредитной политики в отличие от сценария с неожиданным шоком. Процентная ставка в рассматриваемом случае снижается сильнее и раньше, что среднесрочно приводит к некоторому росту потребления.

Рисунок 17. Функции импульсного отклика переменных модели на перманентный 10%-ный шок налога на производство «коричневой» энергии. Случаи ожидаемого (через 12 кварталов) и неожиданного шоков при открытом и закрытом счете финансовых операций.





В соответствии с данным экспериментом выводы таковы. Во-первых, как и в *Fried et al., 2022*, в момент появления новости о будущих мерах декарбонизации, действительно, инвестиции становятся более «зелеными»: «зеленые» инвестиции растут, коричневые падают. Однако, как это ни парадоксально, экономика не становится «зеленее»: выпуск «коричневой» энергии снижается незначительно. Данная ситуация объясняется наличием двух факторов. С одной стороны, производителям нет смысла изменять уровень производства до тех пор, пока налог или другая мера политики не будут введены – производство оптимально на текущий момент. С другой стороны, производители осознают, что в будущем будет выгодно переориентировать производство с «коричневой» энергии на «зеленую». Если в будущем случится резкий рост инвестиций, то это приведет к удорожанию инвестиций и избыточным расходам, что в настоящий момент стимулирует агентов к заблаговременным «зеленым» инвестициям и накоплению «зеленого» капитала. Что касается другого фактора – труда, то его невыгодно «озеленять» заблаговременно, поскольку это отклонит производство от текущего оптимального уровня, пока еще не измененного действием мер политики.

Во-вторых, несмотря на присутствующую реакцию некоторых переменных на появление новости, можно констатировать, что переменные, лежащие в фокусе исследования (объемы и цены энергии), почти не реагируют на новости.

Оба вывода верны и в случае других рассматриваемых в работе шоков.

В-третьих, второй вывод означает, что траектории переменных в экспериментах с последовательностью шоков будут как минимум качественно совпадать независимо от того,

предполагается ли для агентов стохастическая среда или детерминированная. В детерминированной среде агенты обладают рациональными ожиданиями в форме полного предвидения. Однако, как показывает эксперимент, их предвидение не значительно влияет на реакцию переменных. Это оправдывает использование детерминированного подхода в разделе 6.

9. Заключение

В проведенном исследовании построена модель общего равновесия для страны, экспортирующей углеводороды. В модели два сектора производства – «коричневый» и «зеленый» – поставляют фактор производства «энергия» на внутренний рынок, а «коричневый» сектор – еще и за рубеж. Было рассмотрено действие ряда макроэкономических инструментов, способных привести к энергетическому переходу – значительному росту доли «зеленой» энергии на внутреннем энергетическом рынке.

Полученные результаты показали, что такой инструмент, как повышение импортерами углеводородов налога на «коричневое» производство, снижает выручку экспортера, но может привести к энергопереходу в стране-экспортере лишь при определенном условии. Это условие – снижение предложения на внутреннем рынке производителем «коричневой» энергии при снижении внешних экспортных цен, что является результатом моделирования «коричневого» производства с помощью CES-функции при стандартных параметрах. Данный сценарий характеризуется значительным и наибольшим снижением общественного благосостояния¹⁰ среди всех рассмотренных сценариев. Более того, мы показали, что если при снижении экспортной цены производитель «коричневой» энергии не снижает предложение, а наоборот, активно перенаправляет «коричневое» производство на внутренний рынок, то это препятствует расширению сектора «зеленой» энергетики, и энергоперехода не происходит.

Более приемлемым в терминах снижения общественного благосостояния является сценарий повышения внутренних налогов на «коричневое» производство. В исследовании было рассмотрено два сценария энергоперехода в результате роста налогов: налогообложение всего «коричневого» производства с перенаправлением средств домохозяйствам и налогообложение только внутреннего «коричневого» производства с перенаправлением средств в «зеленую» энергетику. Наиболее предпочтительным оказался сценарий с перенаправлением средств производителям «зеленой» энергии. В этом случае снижение общественного благосостояния ниже, энергопереход происходит быстрее, а рост цен на энергию также ниже. Предпочтительный сценарий соответствует сложившейся практике надбавок в пользу ВИЭ в рамках ЕЭС России. Данный результат, на наш взгляд, делает актуальным вопрос налоговой стратегии в климатической политике, который мы оставляем для будущих исследований.

Наиболее предпочтительным оказался сценарий стимулирования эффективности производства в секторе «зеленой» энергетики. Хотя объективная оценка сценария упирается в (не)знание степени трансформации инвестиций в эффективность производства, мы

¹⁰ В работе во всех сценариях не учитывается положительный эффект от энергоперехода, заключающийся в устранении угрозы глобального потепления

оценили, что данный сценарий доставляет наименьшее снижение общественного благосостояния. Более того, в отличие от других сценариев, в данном случае происходит долгосрочный рост выпуска, потребления, производства энергии внутри страны, а «коричневый» сектор испытывает наименьший уровень снижения. Предпочтительность данного сценария объясняется его положительным влиянием на расширение производственных возможностей, тогда как налоговый подход – структурный сдвиг в сторону неэффективного производства.

Таким образом, согласно расчетам, энергопереход возможен и устойчив к предпосылкам относительно устройства экономики, если страна-экспортер применяет собственные инструменты стимулирования: повышает внутренний налог на «коричневое» производство или стимулирует производительность в «зеленом» секторе, а не констатирует внешнее воздействие в форме снижения экспортной выручки.

Оказалось, что полученные результаты в разной степени чувствительны к предпосылкам модели. С одной стороны, степень инерционности ДКП или степень открытости финансового счета имеют минимальное влияние на результаты.

С другой стороны, принципиально влияет на результат предположение о технологии замещения «коричневой» энергии «зеленой». До тех пор, пока «зеленая» энергия свободно замещает «коричневую», энергопереход возможен. Если замещение затруднено в силу, например, неравномерности выработки «зеленой» энергии и невозможности ее хранения, то все рассматриваемые инструменты не способны реализовать энергопереход. Данный результат объясняется тем, что во всех сценариях энергоперехода сектор «коричневой» энергии испытывает снижение, а низкая степень замещения «зеленой» и «коричневой» энергии означает, что эти два вида энергии становятся компонентами вместо субституты. Поэтому меры, приводящие к снижению «коричневого» сектора, будут приводить и к снижению «зеленого» сектора. Мы отмечаем, что проблема технологического замещения «коричневой» энергии «зеленой» поднимается в Минэнерго, ЕЭС России, Международном энергетическом агентстве и ряде исследований. Предлагаемым решением является развитие способов хранения «зеленой» энергии: аккумуляторные системы и водород.

Проведенное исследование влияния предпосылок относительно экономики на результаты демонстрирует гибкость DSGE-модели в отношении выбора наиболее корректных экономических механизмов.

Использование модели с рациональными ожиданиями позволило нам не только рассчитать реакцию инфляции и ДКП на процессы, связанные с климатической политикой, но и исследовать влияние на настоящее ожиданий от введения климатической политики в будущем. Согласно расчетам, одни лишь ожидания экономических агентов от реализации в будущем инструментов энергоперехода не могут запустить процесс энергоперехода. Объясняется это тем, что, сталкиваясь с новостью о будущих мерах климатической политики,

производители, с одной стороны, стремятся сохранить текущий оптимальный уровень производства как можно дольше до введения мер политики. А с другой стороны, производители заинтересованы заблаговременно «озеленить» производственный капитал, поскольку иначе в будущем резкий и локализованный рост инвестиционных процессов приведет к удорожанию инвестиций и излишним расходам. Эти два фактора приводят к тому, что новости о будущих климатических мерах приводят к «озеленению» инвестиций и капитала, но производство становится «зеленее» лишь в незначительной степени. Чтобы значительно «озеленить» производство, необходимо именно вводить меры климатической политики, а не обещать их.

Полученные результаты могут помочь органам власти в определении приоритетов при разработке мер климатической политики, а также расширить понимание экономических процессов, сопровождающих введение мер климатической политики.

Дальнейшим направлением исследований на основе примененного подхода может быть, во-первых, моделирование сценариев резкого снижения стоимости «коричневых» производств, вызванного мерами климатической политики, и сопутствующих рисков; во-вторых, изучение более подробных схем налогового стимулирования энергетического перехода и налоговой политики в целом; в-третьих, более детализированное описание структуры российского производства.

10. Список литературы

Ведомости. (26.05.2020). [«Зеленая» энергия в России вскоре может стать дешевле традиционной.](#)

Минэнерго. (10.11.2020). [Установленная мощность возобновляемых источников энергии в России к 2050 году может достичь 97,4 ГВт.](#)

Переток.ру. (13.10.2021). [Ограничение выработки СЭС и ВЭС является нормальной практикой.](#)

Энергетика и промышленность России. (19.12.2022). [Общая мощность объектов ВИЭ в России на 1 декабря составила 5,68 ГВт.](#)

ИА «Big Electric Power News». (16.06.2023). [Минэнерго понизило прогноз доли ВИЭ в энергобалансе РФ до 3% к 2035 г. и 2050 г. к 9%.](#)

Андреев М.Ю., Полбин А.В. (2019). Исследование эффекта финансового акселератора в DSGE-модели с описанием производства экспортного продукта. Журнал Новой экономической ассоциации. № 4 (44). С. 12–49.

Андреев М.Ю., Полбин А.В. (2023). Оценка макроэкономических эффектов от ожидаемого сокращения нефтегазовых доходов // Вопросы экономики. № 4. С. 5–28.

Дробышевский С.М., Полбин А.В. (2015). Декомпозиция динамики макроэкономических показателей РФ на основе DSGE-модели // Экономическая политика. Т. 10. № 2. С. 20–42.

Иващенко С.М. (2013). Динамическая стохастическая модель общего экономического равновесия с банковским сектором и эндогенными дефолтами фирм // Журнал Новой экономической ассоциации. № 3. С. 27–51.

Колпаков А.Ю., Янтовский А.А., Галингер А.А. (2022). Цена достижения нулевых эмиссий CO₂ к середине века: метод и оценка для крупнейших экономик мира // Журнал Новой экономической ассоциации. № 3 (55). С. 139–154.

Крепцев Д.А., Селезнев С.М. (2018). Прогнозирование российской экономики с использованием DSGE-моделей с малым количеством уравнений // Деньги и кредит. № 2. С. 51–67.

Макаров И.А., Чен Х., Пальцев С.В. (2018). Последствия Парижского климатического соглашения для экономики России // Вопросы экономики. № 4. С. 76–94.

Морозов М., Данилова Е., Логинова В., Юдина Т. (2020). Трансграничный углеродный налог в ЕС: вызов российской экономике. Econs.online. <https://econs.online/articles/opinions/transgranichnyy-uglerodnyy-nalog-v-es-vyzov-rossiyskoy-economike/>

Полбин А.В. (2014). Эконометрическая оценка структурной макроэкономической модели российской экономики // Прикладная эконометрика. № 1 (33). С. 3–29.

Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Единак Е.А. (2022). Возможности и риски политики климатического регулирования в России // Вопросы экономики. № 1. С. 72–89.

Салихов М.Р. (2022). Сценарии трансформации: декарбонизация российской экономики // Журнал Новой экономической ассоциации. № 4 (56). С. 213–219. DOI: 10.31737/2221-2264-2022-56-4-12

Сафонов Г.В., Поташников В.Ю., Сафонов М.Г. и др. (2022). Перспективы экологической модернизации экономики России // Журнал Новой экономической ассоциации. № 4 (56). С. 195–201.

Шварц Е., Кокорин А., Птичников А., Кренке А. (2022). Трансграничное углеродное регулирование и леса России: от ожиданий и мифов к реализации интересов // Экономическая политика. Том 17, № 5. С. 54–77.

Шульгин А.Г. (2014). Сколько правил монетарной политики необходимо при оценке DSGE-модели для России? // Прикладная эконометрика. № 4. С. 3–31.

Andreyev M., Polbin A. (2022). Monetary Policy for a Resource-Rich Economy and the Zero Lower Bound. *Ekonomicheskaya politika*, Vol. 17, No. 3., pp. 44–73.

Antosiewicz M., Lewandowski P., Witajewski-Baltvilks J. (2016). Input vs. Output Taxation – A DSGE Approach to Modelling Resource Decoupling. *Sustainability*. No 8 (4). <https://doi.org/10.3390/su8040352>

Bernanke B.S., Gertler M., Gilchrist S. (1999). The financial accelerator in a quantitative business cycle framework. In *Handbook of macroeconomics*, vol. 1. The Netherlands: North-Holland. 1341-1393.

Blazquez J., Galeotti M., Manzano B., Pierru A., Pradhan S. (2021). Effects of Saudi Arabia's Economic Reforms: Insights from a DSGE Model. *Economic Modelling*, No 95, pp. 145-169.

Burova A., Deryugina E., Ivanova N., Morozov M., Turdyeva N. (2023). Transmission to a low-carbon economy and its implications for financial stability in Russia. *Bank of Russia Working Papers*, No. 109.

Christiano L., Eichenbaum M., Evans C. (2005). Nominal rigidities and the dynamic effects of a shock to monetary policy. *Journal of Political Economy*, Vol. 113, No. 1, pp. 1–45.

Coenen G., Lozej M., Priftis R. (2023). Macroeconomic effects of carbon transition policies: an assessment based on the ECB's New Area-Wide Model with a disaggregated energy sector. *European Central Bank Working Paper Series*, No. 2819.

Fried S., Novan K., Peterman W. (2022). Climate policy transition risk and the macroeconomy. *European Economic Review*, Vol. 147(C).

Golub A., Lugovoy O., Potashnikov V. (2019). Quantifying barriers to decarbonization of the Russian economy: real options analysis of investment risks in low-carbon technologies. *Climate Policy*, Vol. 19, No. 6, pp. 716-724.

- Gomes S., Iskrev N., Mendicino C. (2017). Monetary policy shocks: We got news! *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 74(C), pp. 108–128.
- Guo X., Xiao B. (2023). Effects of China's low-carbon policy under stochastic shocks—a multi-agent DSGE model analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 30, pp. 65177–65191.
- Gupta S., Thakkar P. (2022). Optimal tax policy to reduce emissions: A DSGE approach. Indira Gandhi Institute of Development Research, Mumbai.
- IEA (2023). Electricity Market Report 2023. International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/255e9cba-da84-4681-8c1f-458ca1a3d9ca/ElectricityMarketReport2023.pdf>
- International Panel on Climate Change (IPCC) (1996). Economic and Social Dimensions of Climate Change – Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge.
- Kiyotaki N., Moore, J. (1997). Credit cycles. *Journal of political economy*, Vol. 105, No. 2, pp. 211-248.
- Klump R., McAdam P., Willman A. (2007). The Long-Term SucCESs of the Neo-Classical Growth Model. *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 23, No. 1, pp. 94–114.
- Kotlikoff L.J., Kubler F., Polbin A., Scheidegger S. (2021). Can Today's and Tomorrow's World Uniformly Gain from Carbon Taxation? NBER Working Papers No. 29224.
- Le'on-Ledesma M.A., McAdam P., Willman A. (2010). Identifying the Elasticity of Substitution with Biased Technical Change. *American Economic Review*, Vol. 100, No. 4, pp. 1330–1357.
- Li H., Peng W. (2020). Carbon Tax, Subsidy, and Emission Reduction: Analysis Based on DSGE Model. *Complexity*. No 6.
- Lofgren H. et al. A Standard Computable General Equilibrium (CGE) Model in GAMS // *Microcomputers in Policy Research*. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute, 2002. 79 p.
- Martyanova E, Polbin A. (2023). General equilibrium model with the entrepreneurial sector for the Russian economy. *Russian Journal of Economics*, Vol. 2, No. 9, pp. 109-133.
- Medina J. P., Soto C. (2007). Copper price, fiscal policy and business cycle in Chile. *Central Bank of Chile Working Papers*, No. 458.
- Mertens K., Ravn M. O. (2012). Empirical evidence on the aggregate effects of anticipated and unanticipated US tax policy shocks. *American Economic Journal: Economic Policy*, Vol. 4, No. 2, pp. 145–181.
- NGFS (2022). Running the NGFS Scenarios in G-Cubed: A Tale of Two Modelling Frameworks.
URL:https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/running_the_ngfs_scenarios_in_g-cubed_a_tale_of_two_modelling_frameworks.pdf

Penikas H. (2022). The Interrelationship of Credit and Climate Risks. Bank of Russia Working Papers, No. 100.

Potashnikov V.; Golub A., Brody M., Lugovoy O. (2022) Decarbonizing Russia: Leapfrogging from Fossil Fuel to Hydrogen. *Energies*, Vol. 15, No. 3.

Rotemberg J.J. (1982). Sticky prices in the United States. *Journal of Political Economy*, Vol. 90, No. 6, pp. 1187–1211.

Rutherford T.F., Bohringer C. (2006). Combining Top-Down and Bottom-up in Energy Policy Analysis: A Decomposition Approach. ZEW Discussion Papers 06-007.

Smets F., Wouters R. (2003). An Estimated Dynamic Stochastic General Equilibrium Model of the Euro Area. *Journal of the European Economic Association*, Vol. 1, No 5, pp. 1123–1175.

Thompson P. (2010). "Learning by Doing," *Handbook of the Economics of Innovation*, in: Bronwyn H. Hall & Nathan Rosenberg (ed.), *Handbook of the Economics of Innovation* volume 1, chapter 10, pages 429-476, Elsevier.

Timilsina G.R., Pang J., Xi Y. (2021). Enhancing the quality of climate policy analysis in China: Linking bottom-up and top-down models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 151(C).

Tuladhar S., Yuan M., Bernstein P., Montgomery D., Smith A. (2009). A top–down bottom–up modeling approach to climate change policy analysis. *Energy Economics*, Vol. 31, Suppl. 2, pp. S223-S234.

11. Приложение: математическая постановка модели

11.1. Домохозяйства

Каждое домохозяйство i из континуума домохозяйств стремится максимизировать полезность от потребления C_t^i и минимизировать неудовольствие от труда L_t^i :

$$U_{t_0}^i = E_{t_0} \sum_{t=t_0}^{+\infty} \beta^{t-t_0} \left(\ln C_t^i - \frac{\sigma_L}{1+e} (L_t^i)^{1+e} \right) \rightarrow \max \quad (4)$$

Здесь оператор E_{t_0} означает математическое ожидание по всем будущим событиям, начиная с момента времени $t_0 + 1$.

Каждое домохозяйство i предоставляет труд L_t^i абсолютно конкурентному посреднику на рынке труда по индивидуальной цене W_t^i . Предполагается, что домохозяйства обладают монопольной властью на рынке трудовых услуг. В результате формируется спрос на труд

отдельного домохозяйства $L_t^i = \left(\frac{W_t^i}{W_t} \right)^{-\eta} L_t$, где L_t – агрегированный труд, W_t – стоимость

агрегированного труда. Вид функции спроса на труд домохозяйства учитывают при принятии решений. При выборе индивидуального уровня заработной платы W_t^i домохозяйства в соответствии с подходом Ротемберга (*Rotemberg* (1982)) несут издержки на изменение уровня

заработной платы $\frac{k^w}{2} \left(\frac{W_t^i}{W_{t-1}^i} - 1 \right)^2 W_t L_t$.

Помимо труда и потребления, домохозяйства выбирают объем иностранных облигаций $D_t^{i,f}$, приносящих доход по фиксированной внешней ставке r^f . При этом домохозяйства

несут реальные издержки $\Psi_t^D = \frac{1}{2} d_s (D_t^{i,f} S_t / P_t Y_t)^2 Y_t S_t \frac{P^f}{P_t}$, выплачиваемые за границу, где

S_t – валютный курс, P^f – внешняя фиксированная цена на импорт. Издержки Ψ_t^D определяются отношением стоимости накоплений или заимствований $D_t^{i,f} S_t$ к номинальному внутреннему выпуску $P_t Y_t$. Коэффициент d_s отражает степень затруднений при использовании внешнего долгового рынка: чем выше данный параметр, тем менее охотно домохозяйства реагируют на изменения в экономике с помощью подстройки уровня вложений в иностранные облигации.

Домохозяйства, по аналогии с работой *Smets, Wouters, 2003*, также участвуют в рынке взаимного кредитования, предоставляя друг другу кредиты D_t^i по ставке R_t . В равновесии в предположении однородности домохозяйств агрегированные кредиты считаются нулевыми. Ставка R_t на внутреннем денежном рынке является инструментом ДКП.

Домохозяйства выбирают объем производственного капитала $K_t^{i,g}, K_t^{i,b}, K_t^{i,f}$. Объемы капитала $K_{t-1}^{i,g}, K_{t-1}^{i,b}, K_{t-1}^{i,f}$ предоставляются производителям по арендным ставкам R_t^g, R_t^b, R_t^f . Также домохозяйства выбирают объемы инвестиций в новый капитал $I_t^{i,g}, I_t^{i,b}, I_t^{i,f}$, приобретаемые по цене P_t на рынке конечного товара. При изменении объема инвестиций домохозяйство несет номинальные издержки в размере

$$\frac{1}{2}k^g \left(\frac{I_t^{i,g}}{I_{t-1}^{i,g}} - 1 \right)^2 P_t Y_t, \frac{1}{2}k^b \left(\frac{I_t^{i,b}}{I_{t-1}^{i,b}} - 1 \right)^2 P_t Y_t, \frac{1}{2}k^f \left(\frac{I_t^{i,f}}{I_{t-1}^{i,f}} - 1 \right)^2 P_t Y_t.$$

Инвестиции и динамика капитала связаны соотношениями:

$$K_t^{i,g} = (1 - \delta) K_{t-1}^{i,g} + I_t^{i,g} \quad (5)$$

$$K_t^{i,b} = (1 - \delta) K_{t-1}^{i,b} + I_t^{i,b} \quad (6)$$

$$K_t^{i,f} = (1 - \delta) K_{t-1}^{i,f} + I_t^{i,f} \quad (7)$$

Каждое домохозяйство стеснено бюджетным ограничением:

$$C_t^i + I_t^{i,g} + I_t^{i,b} + I_t^{i,f} + \frac{D_t^{i,f} S_t}{P_t} = \frac{W_t^i L_t^i}{P_t} + r^f \frac{D_{t-1}^{i,f} S_t}{P_t} - \Psi_t^D + \frac{D_t^i}{P_t} - R_{t-1} \frac{D_{t-1}^i}{P_t} + \frac{R_t^g}{P_t} K_{t-1}^{i,g} + \frac{R_t^b}{P_t} K_{t-1}^{i,b} + \frac{R_t^f}{P_t} K_{t-1}^{i,f} + \frac{\Pi_t}{P_t} - \frac{1}{2}k^g \left(\frac{I_t^{i,g}}{I_{t-1}^{i,g}} - 1 \right)^2 Y_t - \frac{1}{2}k^b \left(\frac{I_t^{i,b}}{I_{t-1}^{i,b}} - 1 \right)^2 Y_t - \frac{1}{2}k^f \left(\frac{I_t^{i,f}}{I_{t-1}^{i,f}} - 1 \right)^2 Y_t - \frac{k^w}{2} \left(\frac{W_t^i}{W_{t-1}^i} - 1 \right)^2 \frac{W_t}{P_t} L_t \quad (8)$$

где Π_t – прибыль посредника на рынке промежуточного внутреннего товара.

Далее будем предполагать, что равновесие является симметричным: все домохозяйства неразличимы между собой, следовательно, индексы i отбрасываются. Обозначая множители Лагранжа при ограничениях (5)–(8) через $\beta^g \Phi_t^g, \beta^b \Phi_t^b, \beta^f \Phi_t^f, \beta^i \Lambda_t$,

, получим следующие условия оптимальности по потреблению, кредитам, труду, вложениям в иностранные облигации, инвестициям и капиталу:

$$\Lambda_t = \frac{1}{C_t} \quad (9)$$

$$\Lambda_t = \beta E_t \Lambda_{t+1} \frac{R_t}{\pi_t} \quad (10)$$

$$\sigma_L \eta \frac{(L_t)^e}{W_t/P_t} = (\eta - 1) \Lambda_t + k^w \Lambda_t \frac{W_t}{W_{t-1}} \left(\frac{W_t}{W_{t-1}} - 1 \right) - k^w \beta E_t \Lambda_{t+1} \frac{1}{\pi_{t+1}} \frac{L_{t+1}}{L_t} \left(\frac{W_{t+1}}{W_t} \right)^2 \left(\frac{W_{t+1}}{W_t} - 1 \right) \quad (11)$$

$$S_t = \beta r^f E_t \frac{\Lambda_{t+1}}{\Lambda_t} \frac{S_{t+1}}{\pi_{t+1}} - d_s \frac{S_t^2 D_t^f}{P_t^2 Y_t} \frac{S_t P^f}{P_t} \quad (12)$$

$$\Phi_t^g = \Lambda_t + k^g \Lambda_t \left(\frac{I_t^g}{I_{t-1}^g} - 1 \right) \frac{Y_t}{I_{t-1}^g} - k^g \beta E_t \Lambda_{t+1} \left(\frac{I_{t+1}^g}{I_t^g} - 1 \right) \frac{Y_{t+1} I_{t+1}^g}{(I_t^g)^2} \quad (13)$$

$$\Phi_t^b = \Lambda_t + k^b \Lambda_t \left(\frac{I_t^b}{I_{t-1}^b} - 1 \right) \frac{Y_t}{I_{t-1}^b} - k^b \beta E_t \Lambda_{t+1} \left(\frac{I_{t+1}^b}{I_t^b} - 1 \right) \frac{Y_{t+1} I_{t+1}^b}{(I_t^b)^2} \quad (14)$$

$$\Phi_t^f = \Lambda_t + k^f \Lambda_t \left(\frac{I_t^f}{I_{t-1}^f} - 1 \right) \frac{Y_t}{I_{t-1}^f} - k^f \beta E_t \Lambda_{t+1} \left(\frac{I_{t+1}^f}{I_t^f} - 1 \right) \frac{Y_{t+1} I_{t+1}^f}{(I_t^f)^2} \quad (15)$$

$$\Phi_t^g = \beta (1 - \delta) E_t \Phi_{t+1}^g + \beta E_t \Lambda_{t+1} R_{t+1}^g \quad (16)$$

$$\Phi_t^b = \beta (1 - \delta) E_t \Phi_{t+1}^b + \beta E_t \Lambda_{t+1} R_{t+1}^b \quad (17)$$

$$\Phi_t^f = \beta (1 - \delta) E_t \Phi_{t+1}^f + \beta E_t \Lambda_{t+1} R_{t+1}^f \quad (18)$$

где $\pi_t = P_t/P_{t-1}$ – инфляция.

Соотношение (9) связывает предельное потребление и множитель Лагранжа при бюджетном ограничении. Соотношение Эйлера (10) означает, что реальная ставка в экономике в среднем равна обратному значению коэффициента предпочтения времени.

Уравнение (11) представляет соотношение между предельной полезностью потребления и предельным неудовольствием от труда. Через соотношение (11) реализуется механизм жесткости номинальных заработных плат: чем выше коэффициент k^w , тем менее активно заработные платы подстраиваются под изменения в экономике. Уравнения (10) и (12) вместе формируют условие паритета внутренней R_t и внешней r^f процентных ставок, скорректированное на темп роста валютного курса и издержки на операции с внешними облигациями. Соотношения (13)–(15) неявно связывают цену P_t на инвестиции I_t^g, I_t^b, I_t^f с теневыми ценами (не заданными явно, но выражаемыми через множители Лагранжа) на капитал. Например, если издержки на установку капитала нулевые ($k_t^g = k_t^b = k_t^f = 0$), то цена на инвестиции совпадает с ценами капитала. Выражения (16)–(18) связывают доходности капитала с ценами капитала и нормой выбытия капитала.

11.2. Производитель «зеленой» энергии

Производитель «зеленой» энергии комбинирует взятые в аренду труд L_t^g и капитал K_{t-1}^g , чтобы в соответствии с производственной функцией Кобба – Дугласа произвести «зеленую» энергию E_t^g , которая продается исключительно на внутреннем рынке агрегатору «зеленой» и «коричневой» энергии по цене P_t^g :

$$E_t^g = a^g (1 + s_t^g) (K_{t-1}^g)^{\alpha^g} (L_t^g)^{1-\alpha^g} \quad (19)$$

Здесь s_t^g – шок производительности «зеленой» энергии, имеющий нулевое значение в долгосрочном равновесии и следующий AR (1) процессу:

$$s_t^g = \rho^g s_{t-1}^g + \varepsilon_t^g, \quad (20)$$

где ε_t^g – случайная величина с нулевым средним, одинаково распределенная во все моменты времени.

Производитель «зеленой» энергии максимизирует прибыль, которая в равновесии оказывается нулевой:

$$P_t^g E_t^g - R_t^g K_{t-1}^g - W_t L_t^g = 0 \quad (21)$$

Условия оптимальности для задачи максимизации (21) при условии (19) имеют вид:

$$\alpha^g P_t^g E_t^g = R_t^g K_{t-1}^g \quad (22)$$

$$(1 - \alpha^g) P_t^g E_t^g = W_t L_t^g \quad (23)$$

11.3. Производитель «коричневой» энергии

Производитель «коричневой» энергии комбинирует труд L_t^b и капитал K_{t-1}^b , чтобы в соответствии с производственной функцией Кобба – Дугласа произвести валовый объем «коричневой» энергии EG_t^b :

$$EG_t^b = a^b (K_{t-1}^b)^{\alpha^b} (L_t^b)^{1-\alpha^b} \quad (24)$$

Произведенный валовый объем «коричневой» энергии учитывается производителем по цене P_t^{bg} .

Производство «коричневой» энергии облагается налогом τ_t^b , который в полном объеме передается домохозяйствам (в сценарии 2а). Производитель стремится максимизировать прибыль, оказывающуюся нулевой в оптимуме:

$$(1 - \tau_t^b) P_t^{bg} EG_t^b - W_t L_t^b - R_t^b K_{t-1}^b = 0 \quad (25)$$

После производства энергия EG_t^b дезагрегируется на две составляющие: домашнюю E_t^b и экспортную $E_t^{b,exp}$ в соответствии с СЕТ-функцией:

$$EG_t^b = a^{bg} \left(\alpha^{bg} (E_t^b)^{\varphi_b} + (1 - \alpha^{bg}) (E_t^{b,exp})^{\varphi_b} \right)^{\frac{1}{\varphi_b}}, \quad (26)$$

где $\varphi_b > 1$. Влияние параметра φ_b на результаты исследования анализируется в подразделе 7.3.

Домашний компонент «коричневой» энергии E_t^b продается агрегатору «зеленой» и «коричневой» энергии по цене P_t^b , а экспортная составляющая $E_t^{b,exp}$ реализуется на внешнем рынке по внешней цене $P_t^{b,exp}$. В сценарии 2b налог взимается со стоимости внутреннего компонента «коричневой» энергии $P_t^b E_t^b$ и передается производителю

«коричневой» энергии. Производитель максимизирует прибыль, оказывающуюся нулевой в оптимуме:

$$P_t^b E_t^b + S_t P_t^{b,\text{exp}} E_t^{b,\text{exp}} - P_t^{bg} E G_t^b = 0 \quad (27)$$

Условиями максимизации (25) и (27) по труду, капиталу и объемам энергии при условиях (24), (26) оказываются следующие выражения:

$$(1 - \tau_t^b) \alpha^b P_t^{bg} E G_t^b = R_t^b K_{t-1}^b \quad (28)$$

$$(1 - \tau_t^b) (1 - \alpha^b) P_t^{bg} E G_t^b = W_t L_t^b \quad (29)$$

$$P_t^b E_t^b = P_t^{bg} E G_t^b \frac{\alpha^{bg} (E_t^b)^{\varphi_b}}{\alpha^{bg} (E_t^b)^{\varphi_b} + (1 - \alpha^{bg}) (E_t^{b,\text{exp}})^{\varphi_b}} \quad (30)$$

$$S_t P_t^{b,\text{exp}} E_t^{b,\text{exp}} = P_t^{bg} E G_t^b \frac{(1 - \alpha^{bg}) (E_t^{b,\text{exp}})^{\varphi_b}}{\alpha^{bg} (E_t^b)^{\varphi_b} + (1 - \alpha^{bg}) (E_t^{b,\text{exp}})^{\varphi_b}} \quad (31)$$

11.4. Агрегирование «зеленой» и «коричневой» энергии

Предполагается, что «зеленая» и «коричневая» энергия агрегируются на внутреннем рынке в соответствии с CES-функцией:

$$E_t = a^e \left(\alpha^e (E_t^g)^{\varphi_e} + (1 - \alpha^e) (E_t^b)^{\varphi_e} \right)^{\frac{1}{\varphi_e}}, \quad (32)$$

где $\varphi_e < 1$. Влияние значения параметра φ_e на результаты исследования оговаривается дополнительно в подразделе 7.2.

Агрегированная энергия E_t продается производителю конечного продукта по цене P_t^e . Цель агрегатора энергии – максимизация прибыли, оказывающейся нулевой в оптимуме:

$$P_t^e E_t - P_t^g E_t^g - P_t^b E_t^b = 0 \quad (33)$$

Условиями максимизации прибыли (33) при технологическом ограничении (32) являются выражения:

$$P_t^s E_t^s = P_t^e E_t \frac{\alpha^e (E_t^s)^{\varphi_e}}{\alpha^e (E_t^s)^{\varphi_e} + (1 - \alpha^e) (E_t^b)^{\varphi_e}} \quad (34)$$

$$P_t^b E_t^b = P_t^e E_t \frac{(1 - \alpha^e) (E_t^b)^{\varphi_e}}{\alpha^e (E_t^s)^{\varphi_e} + (1 - \alpha^e) (E_t^b)^{\varphi_e}} \quad (35)$$

11.5. Производитель промежуточного внутреннего и конечного товара

Производство конечного продукта происходит в три этапа. Структура производства является стандартной для моделей общего равновесия (*Lofgren et al., 2002*). На первом этапе производитель комбинирует капитал K_{t-1}^f , энергию E_t и труд L_t^f для создания валового промежуточного продукта YG_t в соответствии с функцией Кобба – Дугласа (по аналогии с *Kotlikoff et al., 2021*):

$$YG_t = a^{yg} (K_{t-1}^f)^{\alpha^f} (E_t)^{\gamma^f} (L_t^f)^{1 - \alpha^f - \gamma^f} \quad (36)$$

На данном этапе производитель учитывает произведенный продукт YG_t по цене P_t^{yg} и стремится максимизировать прибыль этапа, оказывающуюся нулевой в равновесии:

$$P_t^{yg} YG_t - R_t^f K_{t-1}^f - P_t^e E_t - W_t L_t^f = 0 \quad (37)$$

Условиями оптимальности по капиталу, энергии и труду при максимизации прибыли (37) при ограничении (36) являются:

$$\alpha^f P_t^{yg} YG_t = R_t^f K_{t-1}^f \quad (38)$$

$$\gamma^f P_t^{yg} YG_t = P_t^e E_t \quad (39)$$

$$(1 - \alpha^f - \gamma^f) P_t^{yg} YG_t = W_t L_t^f \quad (40)$$

На втором этапе производитель дезагрегирует валовый промежуточный продукт YG_t на внутренний промежуточный продукт YD_t и на неэнергетический экспорт Y_t^{exp} в соответствии с CET-функцией (по аналогии с подходом CGE-моделей (*Lofgren et al., 2002*), а также некоторых DSGE-моделей (*Martyanova E, Polbin A., 2023*):

$$YG_t = a^{yd} \left(\alpha^{yd} (YD_t)^{\varphi_{yd}} + (1 - \alpha^{yd}) (Y_t^{\text{exp}})^{\varphi_{yd}} \right)^{\frac{1}{\varphi_{yd}}}, \quad (41)$$

где $\varphi_{yd} > 1$.

Неэнергетический экспорт продается на внешнем рынке по внешней цене P^{exp} , считающейся постоянной, а внутренний промежуточный продукт YD_t участвует в третьем этапе производства и учитывается по цене P_t^{yd} . Целью второго этапа является максимизация прибыли, оказывающейся нулевой в равновесии:

$$P_t^{yd} YD_t + S_t P^{\text{exp}} Y_t^{\text{exp}} - P_t^{yg} YG_t = 0 \quad (42)$$

Условиями первого порядка для задачи максимизации прибыли (42) при ограничении (41) являются:

$$P_t^{yd} YD_t = P_t^{yg} YG_t \frac{\alpha^{yd} (YD_t)^{\varphi_{yd}}}{\alpha^{yd} (YD_t)^{\varphi_{yd}} + (1 - \alpha^{yd}) (Y_t^{\text{exp}})^{\varphi_{yd}}} \quad (43)$$

$$S_t P^{\text{exp}} Y_t^{\text{exp}} = P_t^{yg} YG_t \frac{(1 - \alpha^{yd}) (Y_t^{\text{exp}})^{\varphi_{yd}}}{\alpha^{yd} (YD_t)^{\varphi_{yd}} + (1 - \alpha^{yd}) (Y_t^{\text{exp}})^{\varphi_{yd}}} \quad (44)$$

На третьем этапе производитель сначала продает внутренний промежуточный продукт YD_t посредникам (см. подраздел 11.6) по цене P_t^{yd} , а затем выкупает товар в этом же объеме по цене P_t^{rig} . Наличие посредника реализует механизм жесткости внутренних цен в модели.

Затем производитель комбинирует продукт YD_t с импортом Imp_t , покупаемым на внешнем рынке по постоянной цене P^{imp} , в соответствии с производственной функцией Кобба – Дугласа, в результате чего возникает конечный продукт экономики:

$$Y_t = a^y (YD_t)^\omega (Imp_t)^{1-\omega} \quad (45)$$

Конечный продукт Y_t торгуется на рынке по цене P_t . Целью третьего этапа является максимизация прибыли, оказывающейся нулевой в равновесии:

$$P_t Y_t - P_t^{rig} YD_t - P_t^{imp} S_t Imp_t = 0 \quad (46)$$

Условиями первого порядка в задаче максимизации прибыли (46) при ограничении (45) являются:

$$\omega P_t Y_t = P_t^{rig} YD_t \quad (47)$$

$$(1-\omega) P_t Y_t = P_t^{imp} S_t Imp_t \quad (48)$$

11.6. Посредники на рынке промежуточного внутреннего продукта (жесткость внутренних цен)

Каждый посредник j на рынке промежуточного внутреннего продукта покупает часть внутреннего продукта YD_t^j по общей для всех цене P_t^{yd} , затем продает этот же объем производителю конечного товара по номинальной индивидуальной цене $P_t^{rig,j}$, неся квадратичные издержки на изменение индивидуального уровня цен в размере $\frac{P_t^{rig}}{2} \left(\frac{P_t^{rig,j}}{P_t^{rig}} - 1 \right)^2 P_t^{rig} YD_t$. Здесь под P_t^{rig} понимается агрегированная по всем ценам посредников $P_t^{rig,j}$ цена. Предполагается, что посредники обладают монопольной властью и

знают функцию спроса на свой товар: $YD_t^j = YD_t \left(\frac{P_t^{rig,j}}{P_t^{rig}} \right)^{-\varepsilon^p}$.

Прибыль посредников определяется соотношением:

$$\Pi_t^j = P_t^{rig,j} YD_t^j - P_t^{yd} YD_t^j - \frac{P_t^{rig}}{2} \left(\frac{P_t^{rig,j}}{P_t^{rig}} - 1 \right)^2 P_t^{rig} YD_t .$$

Каждый посредник стремится максимизировать приведенную прибыль от деятельности:

$$E_{t_0} \sum_{t=t_0}^{+\infty} \beta^{t-t_0} \Lambda_t \frac{\Pi_t^j}{P_t}.$$

Предполагается симметричность равновесия, поэтому далее будем отбрасывать индивидуальные индексы j посредников. Тогда условие оптимальности по назначаемым посредниками ценам $P_t^{rig,j}$ будет иметь вид:

$$\left(\varepsilon^p - 1\right) = \varepsilon^p \frac{P_t^{yd}}{P_t^{rig}} - p^{rig} \frac{P_t^{rig}}{P_{t-1}^{rig}} \left(\frac{P_t^{rig}}{P_{t-1}^{rig}} - 1\right) + p^{rig} \beta E_t \frac{\Lambda_{t+1}}{\Lambda_t} \left(\frac{P_{t+1}^{rig}}{P_t^{rig}}\right)^2 \left(\frac{P_{t+1}^{rig}}{P_t^{rig}} - 1\right) \frac{YD_{t+1}}{YD_t} \frac{P_t}{P_{t+1}} \quad (49)$$

Условие (49) реализует механизм жесткости цен в соответствии с новокейнсианским подходом: чем выше значение параметра p^{rig} , тем менее гибко цены подстраиваются под изменения, происходящие в экономике. При нулевом значении параметра p^{rig} роль посредников сводится лишь к созданию наценки размером $\frac{1}{\varepsilon^p}$.

11.7. Денежно кредитная политика

Предполагается, что ДКП заключается в таргетировании инфляции. При установке номинальной ставки центральный банк следует правилу Тейлора:

$$R_t - R^{ss} = \rho_r (R_{t-1} - R^{ss}) + (1 - \rho_r) \rho_{inf} (\pi_t - \pi^{ss}) \quad , \quad (50)$$

где R^{ss} , π^{ss} – долгосрочные значения ставки и инфляции, а $\pi_t = \frac{P_t}{P_{t-1}}$ отражает инфляцию.

При $\rho_r > 0$ денежно-кредитная политика является инерционной: при установке ставки регулятор ориентируется не только на текущую инфляцию, но и на исторические значения ставки.

11.8. Условия равновесия

Условия равновесия на рынках труда, конечного товара, а также условие равновесия на валютном рынке имеют следующий вид:

$$L_t^d + L_t^s + L_t^f = L_t \quad (51)$$

$$Y_t = C_t + I_t^d + I_t^s + I_t^f + \frac{1}{2}k^g \left(\frac{I_t^g}{I_{t-1}^g} - 1 \right)^2 Y_t + \frac{1}{2}k^b \left(\frac{I_t^b}{I_{t-1}^b} - 1 \right)^2 Y_t + \frac{1}{2}k^f \left(\frac{I_t^f}{I_{t-1}^f} - 1 \right)^2 Y_t + \frac{k^w}{2} \left(\frac{W_t}{W_{t-1}} - 1 \right)^2 \frac{W_t}{P_t} L_t + \frac{P^{rig}}{2} \left(\frac{P_t^{rig,j}}{P_{t-1}^{rig,j}} - 1 \right)^2 \frac{P_t^{rig}}{P_t} YD_t \quad (52)$$

$$P_t^{b,exp} E_t^{b,exp} + P^{exp} Y_t^{exp} - P^{imp} Imp_t - D_t^f + r^f D_{t-1}^f - \Psi_t^D \frac{P_t}{S_t} = 0 \quad (53)$$

где реальные издержки на изменения вложения в иностранные облигации Ψ_t^D определены ранее (см. подраздел 11.1).

Условия (51)–(53) неявно определяют оплату труда W_t , цену P_t на конечный товар и номинальный обменный курс S_t .

11.9. Шоки

Экономическая динамика в рассматриваемой модели является результатом действия нескольких шоков. Это, во-первых, шок совокупной факторной производительности в производстве «зеленой» энергии, описываемый уравнением (20).

Во-вторых, это шок внутреннего налога на производство «коричневой» энергии τ_t^b (см. уравнение (25)). Будем считать, что динамика налога определяется выражением:

$$\tau_t^b = \rho^{\tau^b} \tau_{t-1}^b + \varepsilon_t^{\tau^b} \quad (54)$$

В-третьих, это шок внешней цены «коричневой» энергии

$$P_t^{b,exp} = P_{ss}^{b,exp} + \rho^{pb} (P_{t-1}^{b,exp} - P_{ss}^{b,exp}) + \varepsilon_t^{pb} \quad (55)$$

В выражениях (54), (55) $\varepsilon_t^{\tau^b}$, ε_t^{pb} – одинаково распределенные в разные периоды времени случайные величины с нулевым средним, а ρ^{τ^b} , ρ^{pb} – коэффициенты автокорреляции, близкие к единице, как и ρ^g в (20).

Так как коэффициенты автокорреляции близки к единице, а агенты обладают рациональными ожиданиями, то таким образом введенные шоки являются перманентными: агенты верят, что если случился шок, а новых шоков не произойдет, то на обозримом

горизонте производительность (20), налоговая ставка (54) или внешняя цена (55) останутся на неизменном уровне.

Введенный с помощью выражения (55) шок внешней цены на «коричневую» энергию эквивалентен перманентному шоку условий торговли, часто рассматриваемому в DSGE-моделях для экономики России (Андреев, Полбин, 2019; Иващенко, 2013; Крепцев, Селезнев, 2018; Полбин, 2014; Шульгин, 2014).

11.10. Уравнения модели и расчеты

Уравнениями модели, участвующими в расчетах, являются следующие: (5)–(7), (9)–(20), (22)–(24), (26), (28)–(32), (34)–(36), (38)–(41), (43)–(45), (47)–(55). Бюджетное ограничение домохозяйств (8) не участвует в расчетах, поскольку оказывается линейно зависимым с другими уравнениями в силу тождества Вальраса.

Перед вычислениями над рядом переменных модели производится перенормировка: выражения в номинальных величинах (например, кредиты D_t , прибыли Π_t , заработная плата, номинальные доходности) переводятся в реальные величины путем нормировки на цену конечной продукции P_t , а номинальные цены переводятся в относительные также путем деления на P_t .

Расчеты проводятся с помощью надстройки Dynare в программе Matlab.

11.11. Калибровка модели

При калибровке модели были выбраны следующие параметры. Коэффициент предпочтения времени потребителя был взят равным $\beta = 0.99$, что стандартно для динамических стохастических моделей равновесия (Bernanke et al., 1999; Kiyotaki, Moore, 1997; Smets, Wouters, 2003). Это соответствует реальной доходности активов 4% годовых. Параметр амортизации производственного капитала брался равным $\delta = 0,025$, что соответствует годовому выбытию 10% (Bernanke et al., 1999; Smets, Wouters, 2003). Параметр эластичности спроса на продукты посредников на рынке внутреннего промежуточного продукта взят равным $\varepsilon^p = 6$. Это означает, что наценка посредников составила в долгосрочном плане 1/6. Выбранное значение лежит в диапазоне значений данных параметров, встречающихся в литературе: от 5 (Christiano et al., 2005) до 11 (Medina, Soto, 2007) и близко к одной из работ для российской экономики (7 – в Дробышевский, Полбин, 2015). Параметр эластичности спроса на труд брался равным $\eta = 4$, а параметр функции полезности $e = 0,3$ (Андреев, Полбин, 2019). Параметры эластичности для производственных функций в секторах производства «зеленой» и «коричневой» энергии

были взяты в соответствии с работами *Bernanke et al., 1999, Полбин, 2014*: $\alpha^s = \alpha^b = 0,35$. Относительно параметров эластичности для производственной функции производства валового промежуточного продукта предполагалось, что затраты на факторы производства – труд и капитал – делятся в такой же пропорции, как в двух других отраслях: $\alpha^f / (1 - \alpha^f - \gamma^f) = 0,35/0,65$.

Параметр φ_e в CES-функции (32) агрегирования двух видов энергии брался равным 0,9, что соответствует высокой эластичности замещения $\sigma_e = 1/(1 - \varphi_e) = 10$. Выбор параметра для основных расчетов и альтернативных рассматривается в подразделе 7.2. Параметры дезагрегирующих CET-функций (26), (41) взяты равными $\varphi_b = 3, \varphi_{yd} = 2$, что соответствует низкой и средней эластичности трансформации $\sigma_b = 0,5, \sigma_{yd} = 1$. Уровень эластичности трансформации обсуждается в подразделе 7.3.

Параметры жесткостей были выбраны в соответствии с работами для российской экономики (*Полбин, 2014; Андреев, Полбин, 2019*): $p^{rig} = 24, k^w = 47, k^s = k^b = k^f = 4, d_s = 0,05$. Параметры правила Тейлора были взяты из работы *Andreyev, Polbin, 2022*, что является оценкой на российских данных за период 2010–2020 годов: $\rho_r = 0,9, \rho_{inf} = 1,5$. Таким образом рассматривалась высокоинерционная денежно-кредитная политика. Параметры автокорреляции для случайных процессов брались близкими к единице: $\rho^s = \rho^{\tau^b} = \rho^{pb} = 0,99999$.

Структурные параметры экономики калибровались следующим образом. Отношение импорта к ВВП бралось равным 0,25, что соответствует российской статистике. Агрегированный экспорт брался равным импорту в долгосрочном равновесии, а вложения в иностранные облигации – нулевыми. Предполагалось, что отношение «коричневого» энергетического экспорта к агрегированному экспорту составляет 0,6; таким же бралось отношение «коричневого» энергетического экспорта ко всей стоимости произведенной «коричневой» энергии (как идущей на экспорт, так и потребляемой внутри страны), что близко к российской статистике.

При выбранных параметрах модели отношение внутренних цен на «зеленую» и «коричневую» энергию P_t^s / P_t^b оказалось равным 1,9, что в отсутствие официальной статистики совпадает с информацией из СМИ (*Ведомости, 26.05.2020*). Существование разницы в ценах за 1 кВт*ч энергии на формально конкурентном рынке объясняется «двупродуктовой моделью» энергетического рынка. А именно – владельцы мощностей получают два вида платежей, первый из которых является одинаковой для всех платой за

единицу выработанной энергии, а второй – платой за установленную мощность, являющейся более высокой для «зеленой» энергетики¹¹.

¹¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 08.01.2009 № 1-р (ред. от 24.03.2022) «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года».