

УДК 620.9

БЕЗУГЛЕРОДНАЯ РОССИЯ: ЕСТЬ ЛИ ШАНС ДОСТИЧЬ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ К 2060 ГОДУ?

© 2023 г. Академик РАН В. В. Клименко^{1,2,3,*},
академик РАН А. В. Клименко², А. Г. Терешин^{1,3}

Поступило 03.03.2023 г.
После доработки 19.05.2023 г.
Принято к публикации 22.05.2023 г.

Исследованы перспективы снижения углеродоемкости экономики России и возможности достижения климатической нейтральности народного хозяйства страны к 2060 г. На основе историко-экстраполяционного подхода к исследованию развития различных социотехнических систем путем сравнения с динамикой углеродных показателей экономик ведущих стран мира показано, что полная компенсация антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ) поглощением биосферой (в первую очередь, лесами) теоретически возможна при выполнении трудно реализуемых масштабных программ реформирования всех отраслей экономики страны – от энергетики до лесного хозяйства. Так, в оптимистическом сценарии темпы снижения удельных показателей эмиссии ПГ на душу населения должны составлять максимальные достигнутые в мире за последние 50 лет значения 1% в год, а управление лесами включать полную компенсацию растущих вырубок и 50%-ное сокращение потерь лесов от пожаров, в настоящее время являющихся вторым (после энергетики) источником выбросов ПГ в атмосферу. Наиболее вероятным видится сценарий со скоростью снижения удельных выбросов ПГ на душу населения в 0.5%/год и умеренным возрастанием поглощающей способности лесов, в основном за счет реализации лесоклиматических проектов и снижения пожарной эмиссии. При реализации последнего сценария нетто-эмиссия ПГ к 2060 г. может составить 0.7 Гт CO_{2экв}, что потребует для достижения климатической нейтральности экономики России создания национальной индустрии крупномасштабного улавливания и захоронения углерода.

Ключевые слова: Россия, экономика, энергетика, эмиссия и поглощение парниковых газов, климатическая нейтральность, историко-экстраполяционный подход, сценарии

DOI: 10.31857/S2686740023040065, **EDN:** VPFUXM

Несмотря на развивающуюся тенденцию к фрагментации мировой экономики, потерю авторитета различных международных организаций и эрозию заключенных ранее соглашений, идея предотвращения катастрофических изменений климата, впервые закреплённая в РКИК ООН в 1992 г., сохраняет свою актуальность и поддержку со стороны всех стран мира. Россия, в последние годы последовательно сокращая свое участие в различных межгосударственных программах, тем не менее, декларирует приверженность декарбонизации своей экономики. В принятой в октябре 2021 г. Стратегии низкоуглеродного развития [1]

поставлена цель достичь к 2060 г. углеродной нейтральности национальной экономики. В соответствии со Стратегией движение к углеродной нейтральности планируется осуществлять лишь после 2030 г. (рис. 1). Главная роль в этом движении отводится не мероприятиям в энергетической сфере, что было бы разумно предполагать, а более чем двукратному возрастанию фиксации углерода лесами страны в сфере землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ). Такая ставка, по мнению специалистов в области лесного хозяйства [2], не имеет достаточных обоснований и потому является весьма рискованной.

Подготовка низкоуглеродной стратегии и ее презентация на конференции сторон РКИК в Глазго (2021 г.) вызвали целый поток публикаций, исследующих различные аспекты декарбонизации отечественной экономики [2–9]. Настоящая работа призвана оценить реальность достижения поставленной цели с точки зрения мирового исто-

¹ Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, Россия

³ Институт энергетических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: nilgpe@mpei.ru

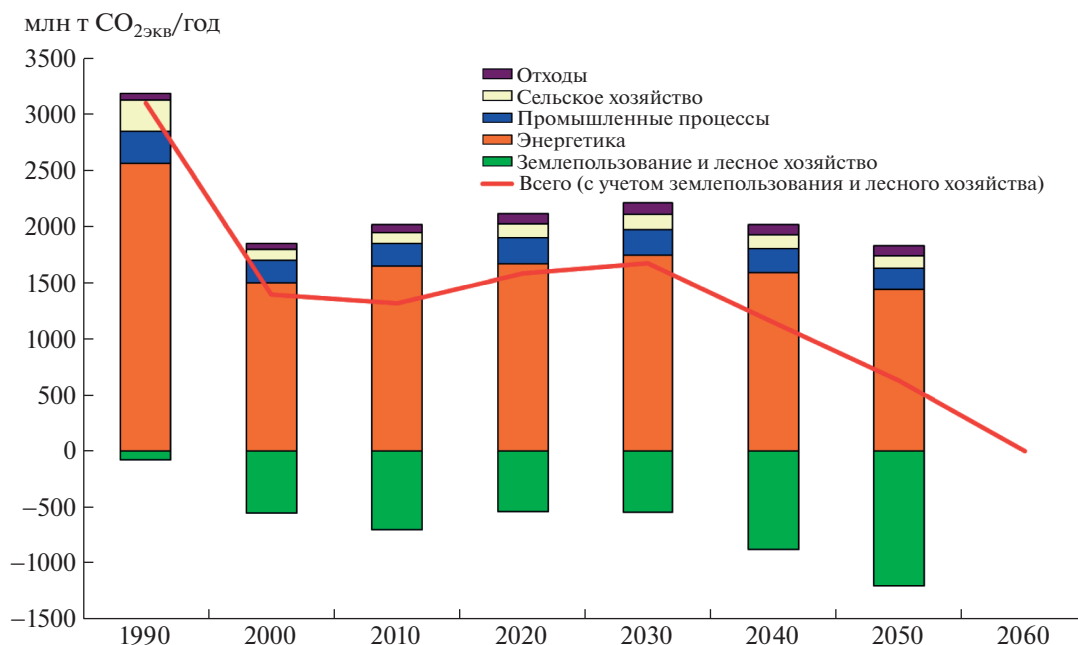


Рис. 1. Целевой сценарий Стратегии низкоуглеродного развития [1].

рического опыта и определить возможные пути решения данной задачи.

1. ДИНАМИКА ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И КАРБОНЕМОКСТИ ЭКОНОМИКИ В РОССИИ В 1990–2020 гг.

За последние три десятилетия в динамике выбросов парниковых газов (ПГ) в России выделяются два периода – резкое снижение в 1990-е годы и постепенный рост в 2000–2020 гг. (рис. 1). Минимум нетто-эмиссии (с учетом поглощения CO₂ биотой) пришелся на 2010 г., что было вызвано увеличением поглощающей способности лесов за счет сокращения заготовки древесины и застарения брошенных сельхозугодий.

Если падение выбросов в 1990–2000 гг. затронуло практически пропорционально все отрасли национальной экономики и отразилось на выбросах всех ПГ (диоксид углерода, метан, закись азота, хлорфторуглероды и др.), то последовавшее затем частичное восстановление объемов эмиссии пришлось в основном на энергетику и в меньшей степени – на промышленные процессы, где выросли выбросы углекислого газа (рис. 1).

Основными причинами этих изменений стала глубокая перестройка экономики страны (рис. 2, 3).

Резкое падение объема валового внутреннего продукта (ВВП) в 1990-е годы сопровождалось и структурной перестройкой экономики – снижением доли промышленного производства и ростом услуг (рис. 3а), причем этот процесс продолжался вплоть до экономического кризиса 2008 г.,

что привело к существенному снижению энергоёмкости ВВП (рис. 2а).

Эти же экономические драйверы обеспечили в 1990–2010 гг. практически двукратное снижение карбоноёмкости экономики России (рис. 2б), чему способствовали также переход на менее углеродоемкий природный газ и новый импульс в строительстве и вводе АЭС в отечественной энергетике (рис. 3б).

Однако наметившаяся с 2014 г. тенденция к опережающему развитию добывающей и обрабатывающей промышленности (рис. 3а) вместе с замедлением темпов газификации (рис. 3б) отечественной экономики привели практически к стагнации энергоёмкости ВВП России и, соответственно, к прекращению снижения карбоноёмкости энергопотребления (рис. 2б).

Уникальной особенностью России, оказывающей значительное влияние на углеродный баланс не только самой страны, но и планеты в целом, являются масштабные лесные пожары (рис. 4). Эта особенность приобрела в последние десятилетия характер национального бедствия и потребовала вмешательства Президента страны [11], в императивной форме потребовавшего 50%-ного сокращения объема выгораний к 2030 г. относительно уровня 2021 г. (заметим, рекордного за всю историю наиболее полных спутниковых наблюдений). Пока же данные дистанционного зондирования Земли (как отечественные [12–16] и Авиалесоохраны, так и зарубежные базы данных GFED, Global Forest Watch) свидетельствуют о росте лесных площадей, пройденных огнем, и

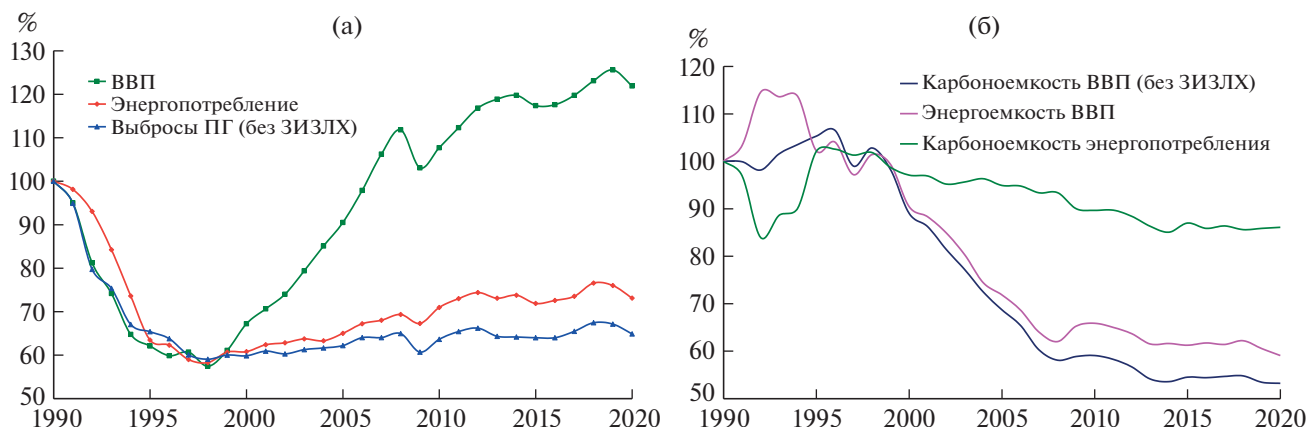


Рис. 2. Энергопотребление, физический объем ВВП и выбросы ПГ (в пересчете на $CO_{2экв}$) относительно уровня 1990 г. (а) и энергоемкость и карбономкость ВВП и карбономкость энергопотребления (б) России по данным Росстата и [10].

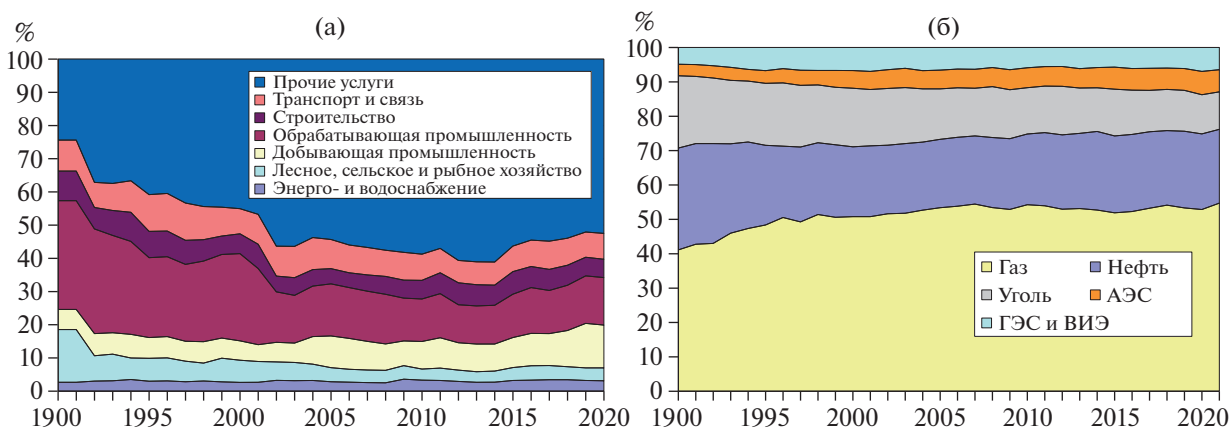


Рис. 3. Структура ВВП (а) и энергопотребления (б) в России по данным Росстата и [10].

увеличению соответствующей эмиссии CO_2 , которая составляет в среднем около 40% от выбросов при сжигании топлива, но в отдельные годы достигая 75% (рис. 4б). Увеличение площади лесных пожаров со временем обусловлено, помимо антропогенных факторов, таких как развал лесоохраны в 1990-х гг., потеплением климата, которое на территории России почти повсеместно приводит к увеличению горимости древостоя и продолжительности пожароопасного периода на срок до 1–3 нед в течение текущего столетия. Это обстоятельство является дополнительным серьезным препятствием на пути осуществления планов по увеличению фиксации углерода лесами.

2. МЕЖДУНАРОДНЫЕ СРАВНЕНИЯ

Для оценки возможностей достижения углеродной нейтральности выполнен сравнительный анализ процессов, происходящих в экономике, и,

прежде всего, в энергетике ряда стран – как лидеров декарбонизации (ЕС, Япония, США и Канада), так и крупнейших развивающихся экономик, находящихся только в начале пути к заявленной ими углеродной нейтральности (Китай, Индия, Турция).

В сфере энергетики для стран-лидеров характерна смена периода стабилизации удельного (на душу населения) энергопотребления на его умеренное снижение (рис. 5а), в то время как в развивающихся экономиках (куда входит и Россия) продолжается рост этого показателя.

При анализе карбономкости энергопотребления (рис. 5б) такого же явного разделения не наблюдается. У большинства стран (ЕС, США, Япония, Китай, Турция) на протяжении последних 50 лет сохраняется тенденция снижения удельных выбросов в энергетике (с трехлетней паузой в Японии, связанной с массовой остановкой АЭС после аварии на Фукусиме в 2011 г.), в

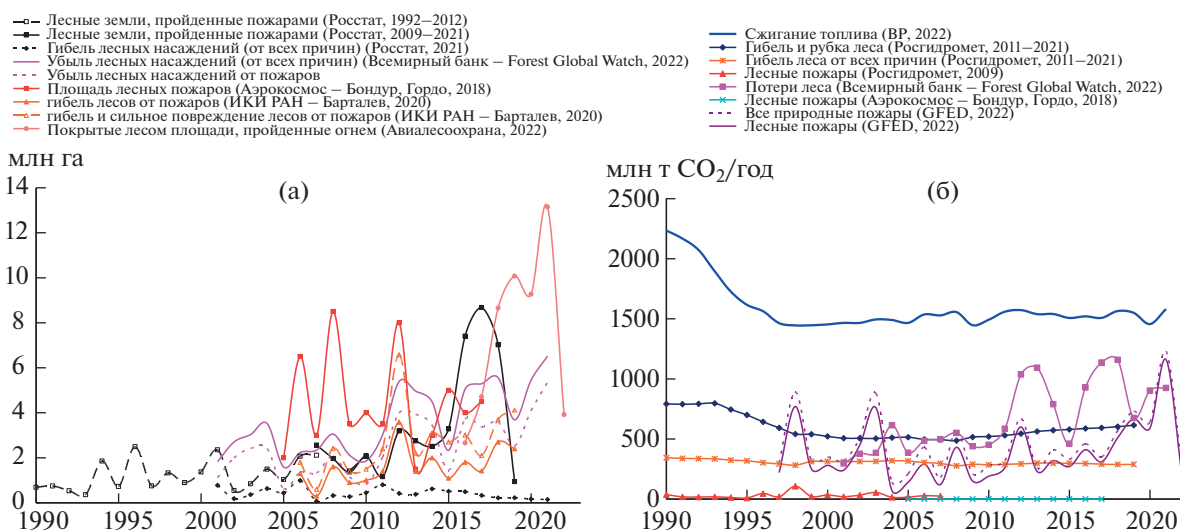


Рис. 4. Лесные площади, пройденные огнем, и гибель лесов от пожаров (а), и выбросы углекислого газа от потерь лесов в сравнении с эмиссией при сжигании топлива (б) в России (по данным [12–16], Авилесоохраны, GFED и Global Forest Watch).

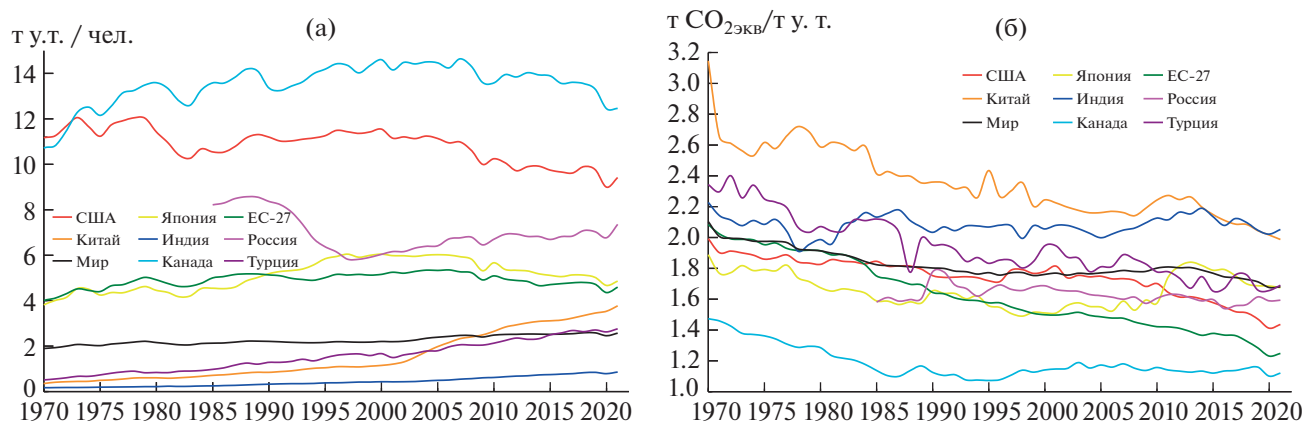


Рис. 5. Удельное энергопотребление (а) и углеродная интенсивность энергопотребления (б) по данным [17, 18] и EDGAR.

Канаде они стабилизировались в 1985 г. на беспрецедентно низком уровне в результате широкого использования гидро- и атомной энергии. В России стагнация этого показателя наблюдается с 2008 г. на уровне едва ниже среднемирового, а энергетика Индии на всем 50-летнем интервале отличается удивительным постоянством в результате устойчивого преобладания угля в национальном энергетическом балансе.

Все исследуемые страны за последние 40 лет значительно сократили энергоёмкость своих экономик (рис. ба), причем если в 1980 г. различие между довольно неожиданным лидером – Турцией и понятным аутсайдером – Китаем, – составляло один порядок, то в настоящее время границы диапазона различаются всего в 3 раза, причем

максимальные значения зафиксированы в странах с наиболее холодным климатом – России и Канаде.

Сочетание этих двух тенденций – снижения углеродоемкости энергопотребления и энергоёмкости ВВП ожидаемо привели к существенному уменьшению углеродоемкости экономик всех рассмотренных стран (рис. бб), но с разными темпами (см. табл. 1).

Характер изменений удельных выбросов ПГ на душу населения (рис. 7), как и следовало ожидать, в точности соответствует динамике душевого потребления энергии, основного источника ПГ, но в зависимости от страны выбросы ПГ могут как уменьшаться, так и увеличиваться.

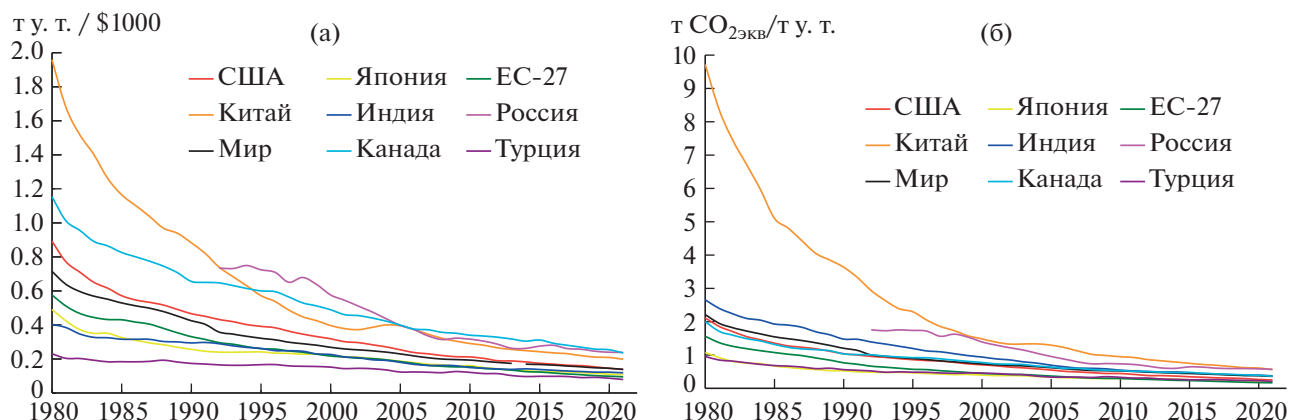


Рис. 6. Энергоемкость (а) и углеродоемкость (без ЗИЗЛХ) (б) ВВП по ППС по данным [17], EDGAR и МВФ.

Средние годовые темпы изменения удельных показателей выбросов ПГ за последние 50 лет приведены в табл. 1.

Климатическая нейтральность достигается в том случае, когда антропогенная эмиссия ПГ уравнивается биосферными стоками, поэтому таким важным является соотношение этих величин. Среди больших стран Россия по этому параметру сегодня является безусловным лидером (рис. 8), поскольку в последнее десятилетие леса поглощали около трети объема выбросов ПГ из антропогенных источников [10]. Важно отметить, что огромное преимущество в этой сфере, которым сейчас располагает Россия, является не постоянным, а временным, и неизбежно будет утрачено еще до середины нынешнего столетия в результате фундаментальной трансформации национального лесного резервуара углерода. Дело в том, что нынешние исключительно высокие значения биосферного стока, пик которых, кстати, уже давно остался позади, обусловлены кратным сокращением рубок в 1990-х гг. и зарастанием брошенных

тогда же сельскохозяйственных земель. Выросший на этих площадях молодой лес активно поглощал углерод атмосферы в течение нескольких десятилетий, но по мере его перехода в категорию возрастных он утрачивает эту способность вплоть до перехода в стационарную фазу практического равновесия с близким к нулю нетто-поток углерода – примерно так, как это происходит теперь в зрелых и управляемых лесах Европы или Канады, согласно данным инвентаризаций РКИК.

3. СЦЕНАРИИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В РОССИИ ДО 2060 г.

События последнего года разом перечеркнули все существовавшие ранее прогнозы экономического развития не только России, но и многих других государств. Именно поэтому для целей нашего исследования, когда ставится задача выполнить весьма рискованную экстраполяцию интенсивности осуществления политики по сдерживанию эмиссии ПГ на несколько десятилетий

Таблица 1. Темпы изменения удельных выбросов ПГ (расчеты авторов по данным [18], МВФ и EDGAR), %

	США	Канада	Япония	ЕС-27	Россия	Турция	Китай	Индия
Углеродоемкость ВВП, т у.т./\$1000								
1980–2020	–5.0	–4.0	–3.9	–5.3	–3.8	–3.5	–6.7	–4.6
1990–2020	–4.3	–3.5	–2.8	–5.0	–3.8	–3.2	–5.8	–4.3
2000–2020	–4.5	–3.9	–3.0	–4.9	–4.4	–3.6	–4.3	–4.2
2010–2020	–4.7	–3.6	–2.8	–5.5	–2.8	–4.1	–4.3	–3.2
Выбросы ПГ на душу населения								
1970–2020	–1.1	–0.2	–0.1	–0.9	0.1	1.7	2.8	1.1
1980–2020	–1.2	–0.5	–0.2	–1.4	–0.3	1.8	3.1	1.5
1990–2020	–1.3	–0.6	–0.4	–1.6	–1.4	1.4	3.7	1.5
2000–2020	–1.9	–1.4	–0.8	–1.8	0.4	1.4	4.5	1.8
2010–2020	–2.3	–1.6	–1.0	–2.7	0.0	1.3	1.8	1.2

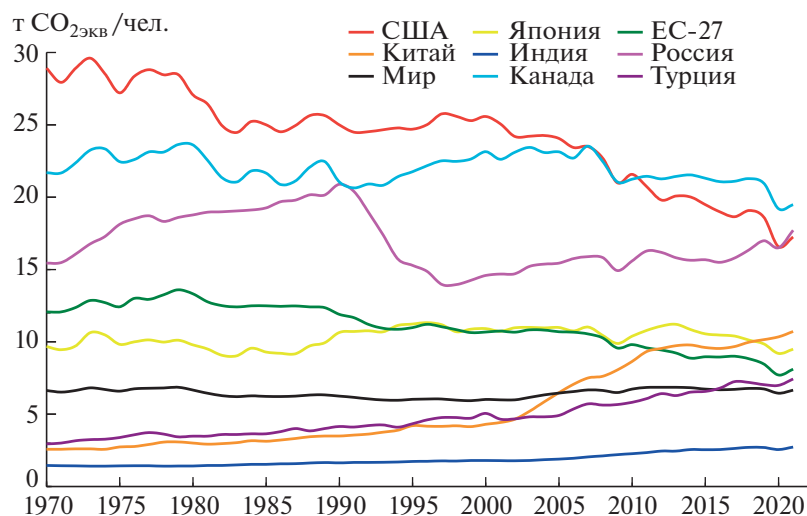


Рис. 7. Удельные выбросы ПГ на душу населения (без ЗИЗЛХ) по данным [18] и EDGAR.

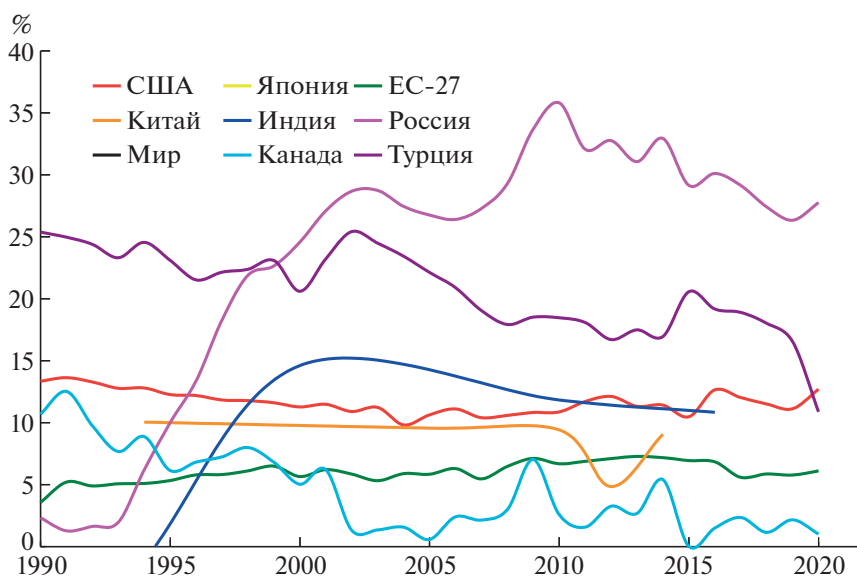


Рис. 8. Нетто-сток ПГ за счет ЗИЗЛХ (относительно суммарной эмиссии из остальных источников) по данным РКИК.

вперед, был избран историко-экстраполяционный метод в противовес традиционному, основанному на детальных предположениях о развитии экономики. В том, что историческая экстраполяция способна давать полезные результаты, убеждает наш собственный опыт построения дальних прогнозов развития мировой энергетики, когда выполненные, например, в 1990 г. прогнозы продемонстрировали совпадение с действительными значениями потребления энергии в мире в пределах 2% на горизонте свыше 30 лет [19, 20]. Тем не менее, учитывая необычайно высокую зависимость конечного результата от политических решений, мы сочли необходимым

здесь рассмотреть два крайних сценария движения России к климатической нейтральности: оптимистический и реальный, учитывающий, в том числе, и текущие события. В качестве демографического сценария в обоих вариантах избран медианный сценарий ООН [18], предполагающий снижение численности населения страны до 128 млн к 2060 г.

Оптимистический сценарий основан на предположении, что идеи борьбы за сохранение климата приобретут в российском обществе значительно большее влияние, соизмеримое с тем, которое возобладаало в развитых странах мира в последние три десятилетия. В этом случае Россия

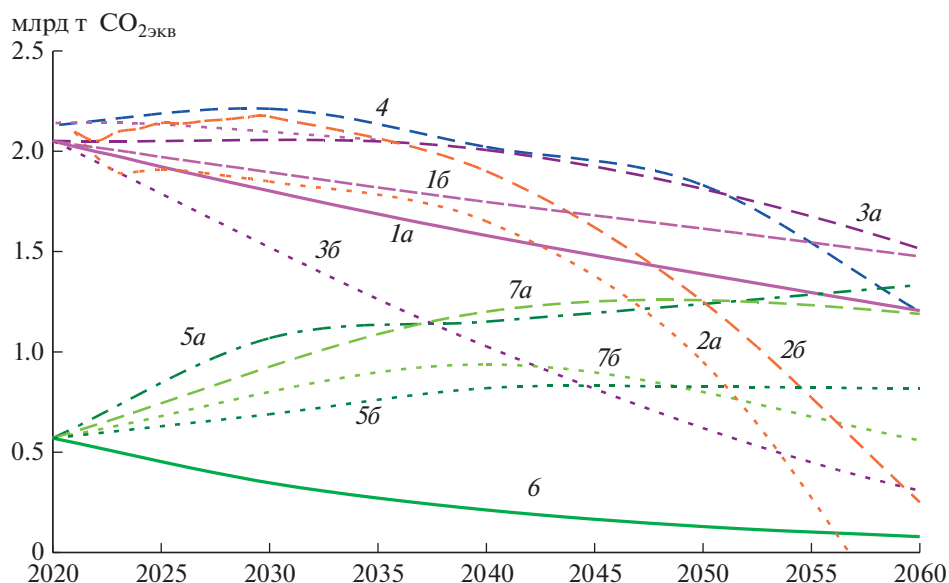


Рис. 9. Сценарии: суммарной эмиссии ПГ (без ЗИЗЛХ) – оптимистический (1a) и реальный (1b) настоящей работы, базовый (2a) и исходный (2b) [9], гср4.5 (3a) и гср2.6 (3b) [24] и целевой (4) [1]; нетто-стока ЗИЗЛХ – оптимистический (5a) и реальный (5b) настоящей работы, базовый (6) [2], гср4.5 (7a) и гср2.6 (7b) [24].

может рассчитывать на развитие скоростей декарбонизации на уровне лучших мировых стандартов (см. табл. 1). В целом параметры оптимистического сценария декарбонизации выглядят следующим образом:

1) темпы снижения удельных (на душу населения) антропогенных выбросов ПГ составляют 1% в год (среднее значение для развитых стран мира в 1990–2020 гг.);

2) показатели лесопользования следуют Стратегии-2030 (2021 г.) и предполагают полное лесовосстановление после всех сплошных рубок; динамика поглощения углерода лесами следует максимальным национальным оценкам, которые, подчеркнем, сегодня заметно расходятся с международными рекомендациями;

3) учтена дополнительная фиксация углерода лесами с учетом изменения климатических факторов (температуры и количества осадков), а также эффекта фертилизации в результате обогащения атмосферы углекислым газом [21];

4) реализовано 50%-ное сокращение площади лесных пожаров (согласно Указу Президента России [11]) к 2030 г. с сохранением этого показателя в дальнейшем.

Реальный сценарий декарбонизации учитывает те трудности, которые связаны с радикальной перестройкой всех отраслей экономики – от энергетики до лесопользования, и характеризуется следующими параметрами:

1) темпы снижения удельных (на душу населения) антропогенных выбросов ПГ соответствуют умеренным показателям, достигнутому в 1990–

2020 гг. в Японии и Канаде и составляют 0.5% в год, что заметно лучше современных российских показателей (см. табл. 1);

2) показатели лесопользования следуют международным рекомендациям и основаны на результатах официальной инвентаризации лесов [2] и Лесной стратегии-2030 [22] с учетом реальных перспектив развития лесного комплекса и динамики поглощающей способности лесной биоты, согласно которым нетто-сток углерода обнаруживает тенденцию к небольшому росту [23]. В этом варианте стареющие леса теряют свою биопродуктивность, но одновременно в лесном хозяйстве реализуются технически и экономически возможные лесоклиматические проекты, а борьба с лесными пожарами имеет ограниченный успех.

Расчеты антропогенных выбросов и биотического нетто-стока ПГ в рамках этих двух сценариев декарбонизации приведены на рис. 9 вместе с оценками других авторов. Здесь следует особо подчеркнуть, что все имеющиеся сценарии кратного повышения нетто-стока ЗИЗЛХ – суть результаты моделирования, никак не связанные ни с данными Национального кадастра ПГ [10], ни со Стратегией развития лесного комплекса России [22].

Немедленный старт мероприятий по декарбонизации экономики России способен снизить выбросы ПГ с современных 2 млрд т $\text{CO}_{2\text{экв}}$ до примерно 1.3 млрд т $\text{CO}_{2\text{экв}}$ к 2060 г., что соответствует рассчитанной по национальной методике и удвоенной по сравнению с современной поглотительной способностью лесов страны, при усло-

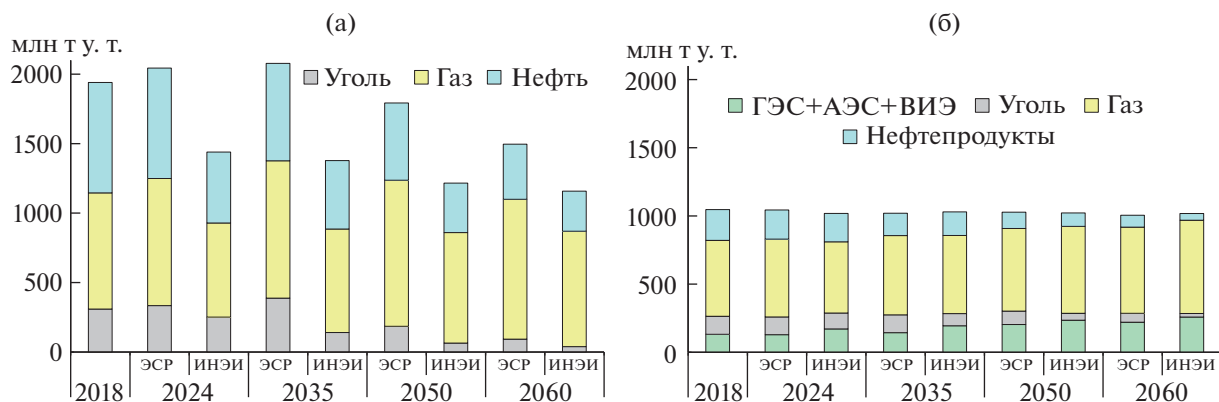


Рис. 10. Оценки добычи (а) и потребления (б) энергоресурсов согласно низкому сценарию Энергетической стратегии России [25] (ЭСР) и базовому сценарию ИНЭИ РАН [9] (ИНЭИ) с экстраполяцией до 2060 г.

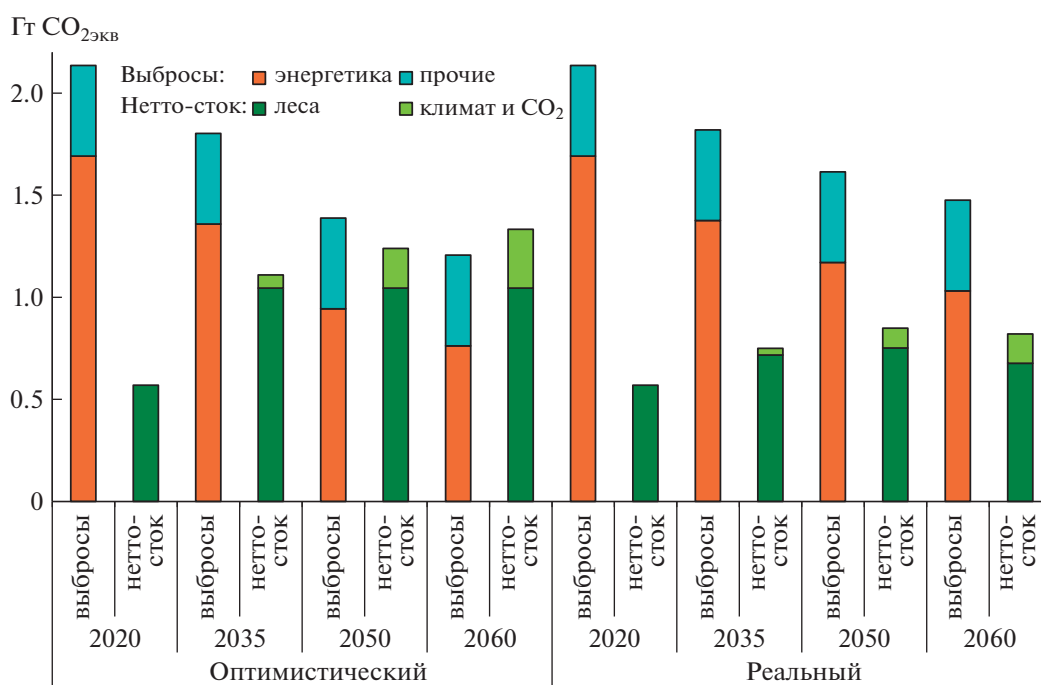


Рис. 11. Оценки суммарной эмиссии ПГ (без ЗИЗЛХ) и нетто-стока ЗИЗЛХ для оптимистического и реального сценариев.

вии полной компенсации сплошных рубок, двукратного сокращения площадей лесных пожаров и увеличению биопродуктивности лесов.

Реализация как низкого, так и высокого сценариев не так давно утвержденной Энергетической стратегии России на период до 2035 г. [25] (рис. 10) отодвигает начало декарбонизации и увеличивает к 2060 г. выбросы до 1.5–1.6 млрд т CO₂ экв (рис. 11).

События последнего года согласно обновленному “базовому” сценарию ИНЭИ РАН [9] на десятилетия снижают добычу и экспорт энергоресурсов, а с ними и объем эмиссии, который следует

весьма близко к реальному сценарию настоящей работы на горизонте до 2040 г.

Сравнение полученных в настоящей работе оценок с представленными в [24] сценариями эмиссии ПГ в России на период до 2100 г. показывает, что оптимистический сценарий декарбонизации лежит между вариантами максимального гер2.6 и умеренного сдерживания потепления гер4.5, ближе к последнему.

Что касается наших расчетов биотического нетто-стока, то с учетом климатически обусловленного увеличения биопродуктивности лесов

они близки к варианту гср4.5 [24], а без этого увеличения – к варианту гср2.6 той же работы.

Отдельно следует остановиться на результатах расчетов лесного нетто-стока ПГ, недавно выполненного специалистами в области лесного хозяйства [2]. Анализируя показатели новой Стратегии развития лесного комплекса России на период до 2030 г. [22] и современное состояние лесной отрасли, они делают вывод о невозможности роста поглощения CO_2 лесами, ожидая двукратного снижения этого показателя уже к 2030 г., а в более отдаленной перспективе и вовсе снижения его до уровня 1990 г. Актуализированная оценка той же научной группы [23] допускает, что в результате совершенствования методики государственного учета лесов, выполнения лесоклиматических проектов, а также снижения лесопожарной опасности реально достижимое увеличение стока углерода в леса может в целом составить примерно 380 млн т $\text{CO}_{2\text{экв}}$ к 2060 г. Однако на наш взгляд эта величина должна быть вдвое снижена за счет возрастания объема рубок [22] и ограниченной эффективности борьбы с лесными пожарами, характерной для стран, обладающих обширными массивами бореальных лесов (Канаде, США, Швеции). Таким образом, при развитии событий по реальному сценарию оказывается, что небаланс эмиссии и стока сокращается более чем в два раза – с современных 1.5 до 0.7 Гт $\text{CO}_{2\text{экв}}$ к 2060 г. (рис. 9). Тем не менее удаление столь значительной остаточной эмиссии за короткий исторический срок не оставляет альтернативы построению национальной индустрии улавливания и захоронения углерода (CCS) с мощностью, превосходящей мощность современной газовой промышленности (500 Мт природного газа). Это означает необходимость ввода установок CCS мощностью 18–20 Мт $\text{CO}_{2\text{экв}}$ ежегодно на протяжении четырех ближайших десятилетий при том, что располагаемая мощность всех установок CCS в мире, по данным *GCCSI*, составляет сегодня 42.5 Мт $\text{CO}_{2\text{экв}}$ /год. К этому следует добавить, что Россия в настоящее время не располагает ни одной установкой CCS промышленного масштаба, и до 2030 г. их ввод не планируется [25].

ВЫВОДЫ

1. Падение добычи, потребления и экспорта энергоносителей, связанное с ограничениями геополитического характера, значительно ускоряет процесс декарбонизации, но само по себе не обеспечивает достижение климатической нейтральности.

2. Необходимыми, но недостаточными условиями для достижения углеродной нейтральности являются многолетнее снижение удельных (на душу населения) антропогенных выбросов

ПГ со скоростью 1% в год, полная компенсация лесных вырубок за счет лесовосстановления с одновременным сокращением площадей лесных пожаров не менее чем на 50%.

3. Для покрытия перспективного небаланса необходимо либо удвоение (по сравнению с современным значением) нетто-стока в ЗИЗЛХ, что выглядит сомнительным, либо развитие национальных технологий CCS в масштабах, которые превосходят современные глобальные мощности примерно в 15 раз.

4. С точки зрения мирового исторического опыта противостояния глобальному потеплению достижение углеродной нейтральности экономики России к 2060 г. вряд ли возможно.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат, <https://rossstat.gov.ru>), информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (Авиалесоохрана, https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml), Рамочная конвенция ООН по изменению климата (РКИК, <https://unfccc.int/>), базы данных для глобальных исследований атмосферы Европейской Комиссии EDGAR (<https://edgar.jrc.ec.europa.eu>), Всемирного института улавливания и захоронения углерода (GCCSI, <http://www.globalccsinstitute.com>), Организации ООН по лесному и сельскому хозяйству (FAO, <http://www.fao.org/faostat/en/#data>), базы данных Экономического прогноза Всемирного валютного фонда (МВФ, <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2022/October>), базы данных наблюдений лесов мира Института мировых ресурсов (Global Forest Watch <https://www.globalforestwatch.org/>), базы данных по природным пожарам (GFED, https://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/fire_emissions_v4.html).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в НИУ МЭИ в части энергетических исследований (проект № FSWF-2023-0017) и при поддержке Российского научного фонда в НИТУ МИСиС в части исследований лесных ресурсов (проект № 22-29-00680).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 г. № 3052-р).
2. Шварц Е.А., Ярошенко А.Ю., Замолотчиков Д.Г., Шматков Н.М. О новой Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года // Устойчивое лесопользование. 2021. № 1 (65). С. 2–6. https://doi.org/10.12345/2308-541X_2021_65_1_2

3. *Башмаков И.А.* Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики // Вопросы экономики. 2020. № 7. С. 51–74.
4. *Башмаков И.А.* Сценарии движения России к углеродной нейтральности // Энергосбережение. 2023. № 1. С. 40–49.
5. *Дегтярев К.С., Березкин М.Ю., Синюгин О.А.* Оценка инвестиционных затрат на переход к безуглеродной экономике в России к 2060 г. // Окружающая среда и энергосбережение. 2022. № 2. С. 29–39.
6. *Мастепанов А.М.* Россия на пути к углеродной нейтральности // Энергетическая политика. 2022. № 1 (167). С. 94–108.
7. *Ланьшина Т.А., Логинова А.Д., Стоянов Д.Е.* Переход крупнейших экономик мира к углеродной нейтральности – сферы потенциального сотрудничества с Россией // Вестник международных организаций. 2021. Т. 16. № 4. С. 98–125.
8. *Филиппов С.П.* Перспективы развития российской энергетики // Газотурбинные технологии. 2022. № 3 (186). С. 2–6.
9. Исследование направлений и системы мер по управлению посткризисным восстановлением энергетики России. Отчет о НИР. М.: ИНЭИ РАН, 2022.
10. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2021 гг. Ч. 1. М.: Росгидромет, 2023.
11. Указ Президента РФ от 15 июня 2022 г. № 382 “О мерах по сокращению площади лесных пожаров в Российской Федерации”.
12. *Бондур В.Г., Гордо К.А.* Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55.
13. *Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л.* Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С. 3–17.
14. *Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В.* Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. С. 13–32.
15. *Лузян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.Б., Егоров Б.А., Ершов Д.Б., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыщенко Ф.Б., Сычугов И.Г.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175>
16. *Барталев С.А.* Крупномасштабные изменения лесов России в XXI веке по данным спутниковых наблюдений // Лекции школы-конференции молодых ученых по проблемам дистанционного зондирования растительного покрова высокоширотных регионов в контексте изменения климата и других воздействий. 16–17 ноября 2020 г. М.: ИКИ РАН, 2020. http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/18/8465_Bartalev_YSS_2020_Eng.pdf
17. BP Statistical Review of World Energy 2022. London: BP p.l.c., 2022. 58 p.
18. World Population Prospects 2022. N.Y.: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022.
19. *Клименко В.В., Снытин С.Ю., Федоров М.В.* Энергетика и предстоящее изменение климата в 1990–2020 гг. // Теплоэнергетика. 1990. № 6. С. 14–20.
20. *Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.* Опыт построения дальних прогнозов воздействия мировой энергетики на атмосферу Земли // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 158–168. <https://doi.org/10.7868/S0002351515020078>
21. *Клименко В.В., Терешин А.Г., Микушина О.В.* Влияние изменений атмосферы и климата на энергетический потенциал лесов России // Доклады РАН. 2019. Т. 488. № 6. С. 612–618. <https://doi.org/10.31857/s0869-56524886612-618>
22. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 11 февраля 2021 г. № 312-р).
23. *Шварц Е.А., Птичников А.В.* Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // Научные труды Вольного экономического общества России. 2022. Т. 236. № 4. С. 399–426.
24. *Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Модельные оценки вклада в глобальные изменения климата в XXI в. естественных и антропогенных эмиссий CO₂ и CH₄ в атмосферу с территории России, Китая, Канады и США // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 18–32. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-10-18-32>
25. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р).

CARBON-FREE RUSSIA: IS THERE A CHANCE TO ACHIEVE CARBON NEUTRALITY BY 2060?

Academician of the RAS V. V. Klimenko^{a,b,c}, Academician of the RAS A. V. Klimenko^b, and A. G. Tereshin^{a,c}

^a National Research University "MPEI", Moscow, Russia

^b National Technological Research University "MISiS", Moscow, Russia

^c Energy Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The prospects for reducing the carbon intensity of the Russian economy and the possibility of achieving climate neutrality of the national economy by 2060 are studied. On the basis of a historical-extrapolation approach to the study of the development of various sociotechnical systems by comparing with the dynamics of carbon indicators of the economies of the leading countries of the world, it is shown that full compensation for anthropogenic emissions of greenhouse gases (GHGs) by absorption by the biosphere (primarily forests) is theoretically possible with implementation of difficult-to-implement large-scale reform programs in all sectors of the country's economy – from energy to forestry. Thus, in an optimistic scenario, the rate of decline in specific GHG emissions per capita should be the maximum value achieved in the world over the past 50 years at 1% per year, and forest management should include full compensation for growing deforestation and a 50% reduction in forest losses from fires, which are currently the second (after energy) sources of GHG emissions into the atmosphere. The most likely scenario is one with a rate of reduction in specific GHG emissions per capita of 0.5% / year, and a moderate increase of the absorbing capacity of forests mainly due to the implementation of forest-climate projects and fire emission reduction. Under the latter scenario, net GHG emissions by 2060 could reach 0.7 Gt CO_{2eq}, which would require the creation of a national industry for large-scale carbon capture and storage in order to achieve climate neutrality of the Russian economy.

Keywords: Russia, economy, energy, emission and absorption of greenhouse gases, climate neutrality, historical-extrapolation approach, scenarios