

НА ПУТИ К КЛИМАТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ: ВЫСТОИТ ЛИ РУССКИЙ ЛЕС ПРОТИВ ЭНЕРГЕТИКИ?¹

© 2024 г. В. В. Клименко^{a, b, c, *}, А. В. Клименко^b, А. Г. Терешин^{a, c}

^aНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^bНациональный исследовательский технологический университет МИСиС,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049 Россия

^cИнститут энергетических исследований РАН, Нагорная ул., д. 31, корп. 2, Москва, 117186 Россия

*e-mail: nilgre@tpri.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Рассмотрены 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 и путем сравнения динамики углеродных показателей экономики России и ведущих стран мира показано, что полная компенсация антропогенных выбросов парниковых газов при поглощении их биосферой (в первую очередь, лесами) сегодня возможна скорее лишь теоретически. Условием этого является выполнение чрезвычайно амбициозных масштабных программ реформирования всех отраслей экономики России – от энергетики до лесного хозяйства. Так, в оптимистичном сценарии темпы снижения удельных показателей эмиссии парниковых газов на душу населения должны иметь максимальные, достигнутые в мире за последние 50 лет значения – 1%/год. В управление состоянием лесов необходимо включать полную компенсацию растущих вырубок и 50%-ное сокращение потерь лесов от пожаров, являющихся в настоящее время вторым (после энергетики) источником выбросов парниковых газов в атмосферу. Наиболее вероятным представляется сценарий, в котором скорость снижения удельных выбросов парниковых газов на душу населения составляет 0.5%/год и обеспечивается умеренное возрастание поглощающей способности лесов главным образом благодаря выполнению лесоклиматических проектов и снижению пожарной эмиссии. При реализации последнего сценария нетто-эмиссия парниковых газов может составить примерно 700 Мт CO₂ (экв.) к 2060 г., что потребует для достижения климатической нейтральности построения национальной индустрии улавливания и захоронения углерода в беспрецедентных масштабах.

Ключевые слова: экономика, энергетика, лесное хозяйство, эмиссия и поглощение парниковых газов, климатическая нейтральность, историко-экстраполяционный подход, сценарии, улавливание и захоронение углерода

DOI: 10.56304/S0040363624010053

В работе использованы данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат, <https://rosstat.gov.ru>), информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (Авиалесоохрана, https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml), Рамочной конвенции ООН по изменению климата (<https://unfccc.int/>), базы данных для глобальных исследований атмосферы Европейской комиссии (EDGAR, <https://edgar.jrc.ec.europa.eu>),

Организации ООН по лесному и сельскому хозяйству (FAO, <http://www.fao.org/faostat/en/#data>), Экономического прогноза Всемирного валютного фонда (МВФ, <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2022/October>), наблюдений за лесами мира Института мировых ресурсов (Global Forest Watch <https://www.globalforestwatch.org/>) и эмиссией от природных пожаров (GFED, https://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/fire_emissions_v4.html).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России в НИУ МЭИ в части энергетических исследований (проект № FSWF-2023-0017) и Российского научного фонда в НИТУ МИСиС в части исследований лесных ресурсов (проект № 22-29-00680).

Несмотря на усиливающуюся тенденцию к фрагментации мировой экономики, потерю авторитета различных международных организаций и нарушения заключенных ранее соглашений, идея предотвращения катастрофических изменений

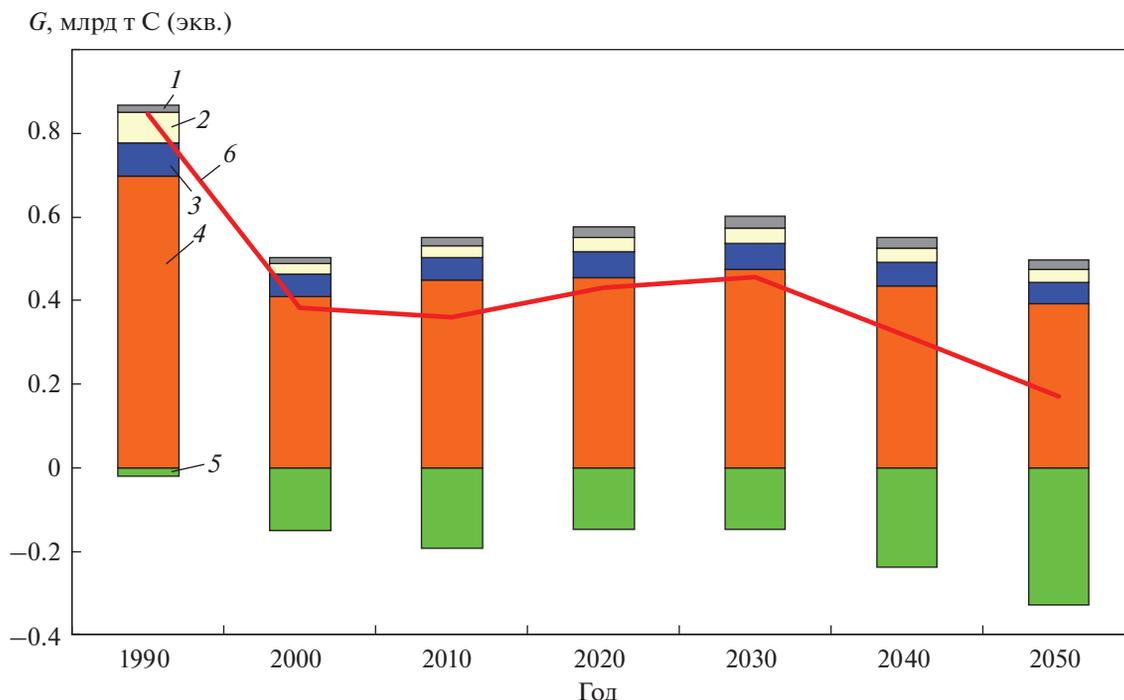


Рис. 1. Выбросы парниковых газов G по целевому сценарию Стратегии низкоуглеродного развития [1].
 1 – отходы; 2 – сельское хозяйство; 3 – промышленные процессы; 4 – энергетика; 5 – землепользование и лесное хозяйство; 6 – всего (с учетом землепользования и лесного хозяйства)

климата, впервые закрепленная в Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (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, постоянно декларирует приверженность к 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 эмиссию парниковых газов G планируется снижать 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 поглощения углерода лесами страны в сфере землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ). Такая ставка, по мнению специалистов в области лесного хозяйства [2, 3], покоится на довольно шатком фундаменте и потому является весьма рискованной.

Подготовка низкоуглеродной стратегии и ее презентация на конференции сторон РКИК в Глазго (2021 г.) вызвала появление публикаций, в которых исследуются различные аспекты декарбонизации отечественной экономики [4–11]. Настоящая работа призвана оценить реальность до-

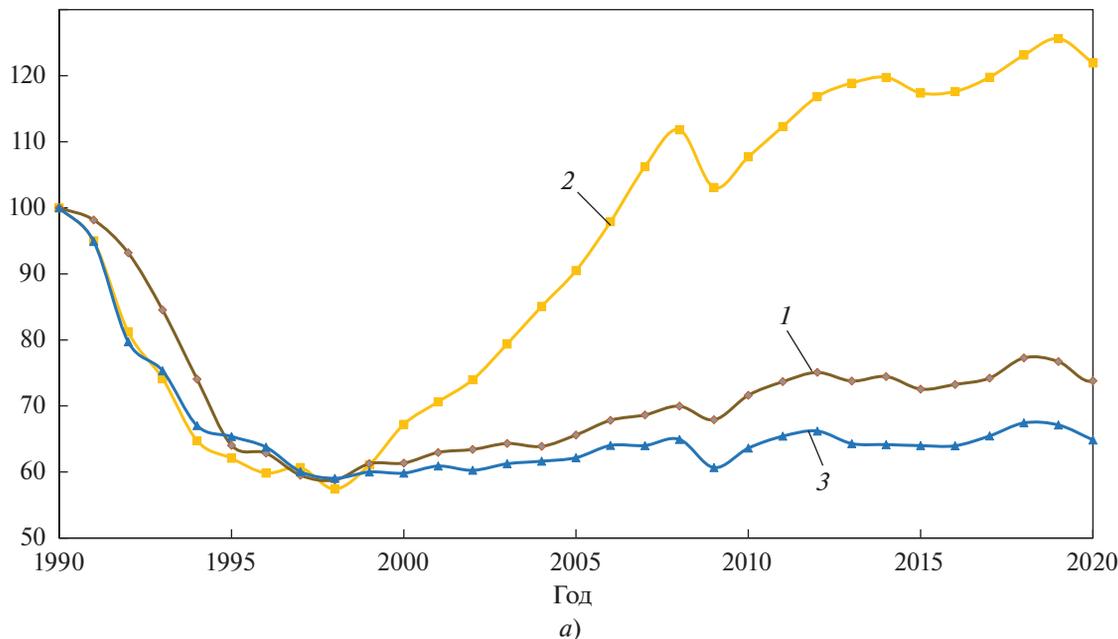
стижения поставленной цели с точки зрения мирового исторического опыта и определить возможные пути решения данной задачи.

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

За последние три десятилетия в динамике выбросов парниковых газов в России выделяются два периода – резкое снижение в 1990-е годы и постепенный рост в 2000–2020 гг. (см. рис. 1). Минимум нетто-эмиссии (с учетом поглощения CO₂ биотой) пришелся на 2010 г., что было вызвано увеличением поглощающей способности лесов благодаря сокращению заготовок древесины и зарастанию брошенных сельхозугодий. Если падение выбросов в 1990–2000 гг. затронуло практически пропорционально все отрасли национальной экономики и отразилось на выбросах всех парниковых газов (диоксида углерода, метана, закиси азота, хлорфторуглеродов и др.), то последовавшее затем частичное восстановление объемов эмиссии пришлось главным образом на энергетiku и в меньшей степени на промышленные процессы, где выросли выбросы углекислого газа (см. рис. 1). Основными причинами этих изменений стала глубокая перестройка экономики страны (рис. 2, 3).

Резкое падение объема валового внутреннего продукта в 1990-е годы сопровождалось и струк-

E , ВВП, G , % к 1990 г.



$E_{\text{ВВП}}$, $C_{\text{ВВП}}$, C_E , % к 1990 г.

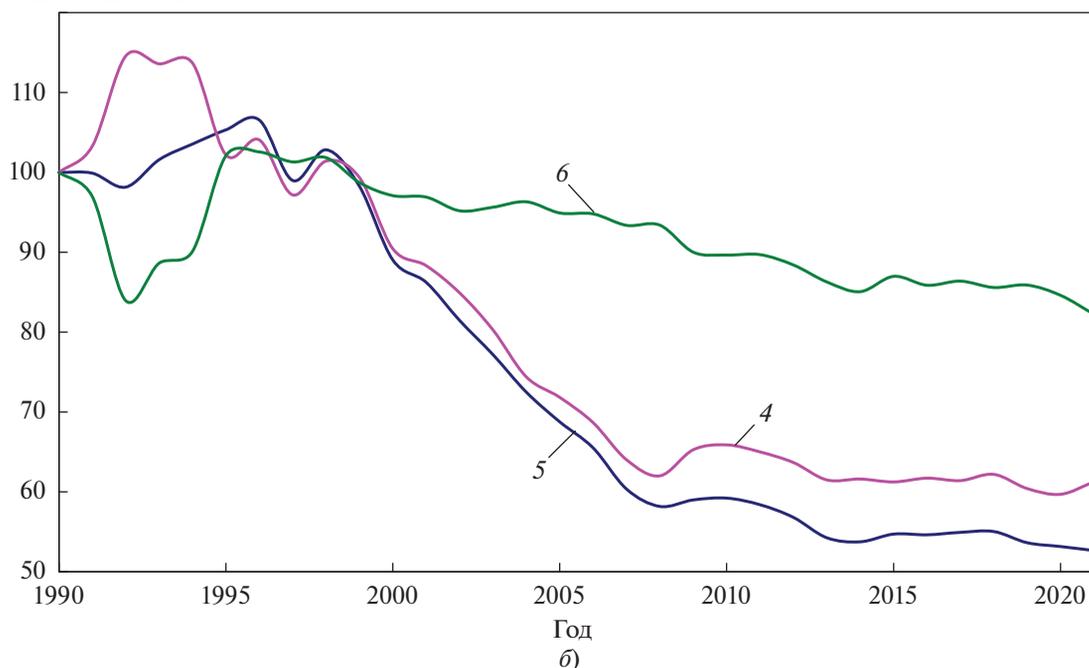


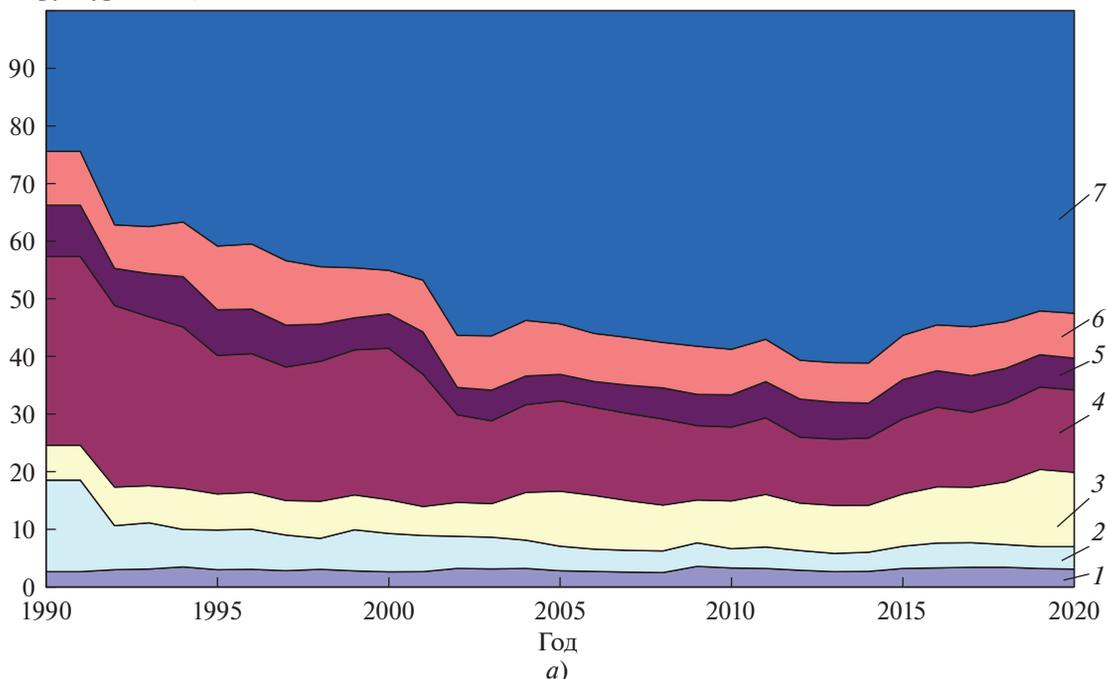
Рис. 2. Энергопотребление E (1), физический объем валового внутреннего продукта (ВВП) (2) и выбросы парниковых газов G (3) без ЗИЗЛХ [в пересчете на CO_2 (экв.)] относительно уровня 1990 г. (а), энергоёмкость $E_{\text{ВВП}}$ (4), карбоноёмкость $C_{\text{ВВП}}$ ВВП (5) и карбоноёмкость энергопотребления C_E (6) (б) в России по данным Росстата и [12]

турной перестройкой экономики — снижением доли промышленного производства и ростом услуг (см. рис. 3, а), причем этот процесс продолжался вплоть до экономического кризиса 2008 г., что привело к существенному снижению энергоёмкости ВВП (см. рис. 2, б). Эти же экономические драйверы обеспечили в 1990–2010 гг. практически двукратное снижение карбоноёмкости

экономики России (см. рис. 2, б), чему способствовали также переход на использование менее углеродоемкого природного газа и новый импульс в строительстве и вводе в эксплуатацию АЭС в отечественной энергетике (см. рис. 3, б).

Однако наметившаяся с 2014 г. тенденция к опережающему развитию добывающей и обрабатывающей промышленности (см. рис. 3, а) вместе

Структура ВВП, %



Структура E, %

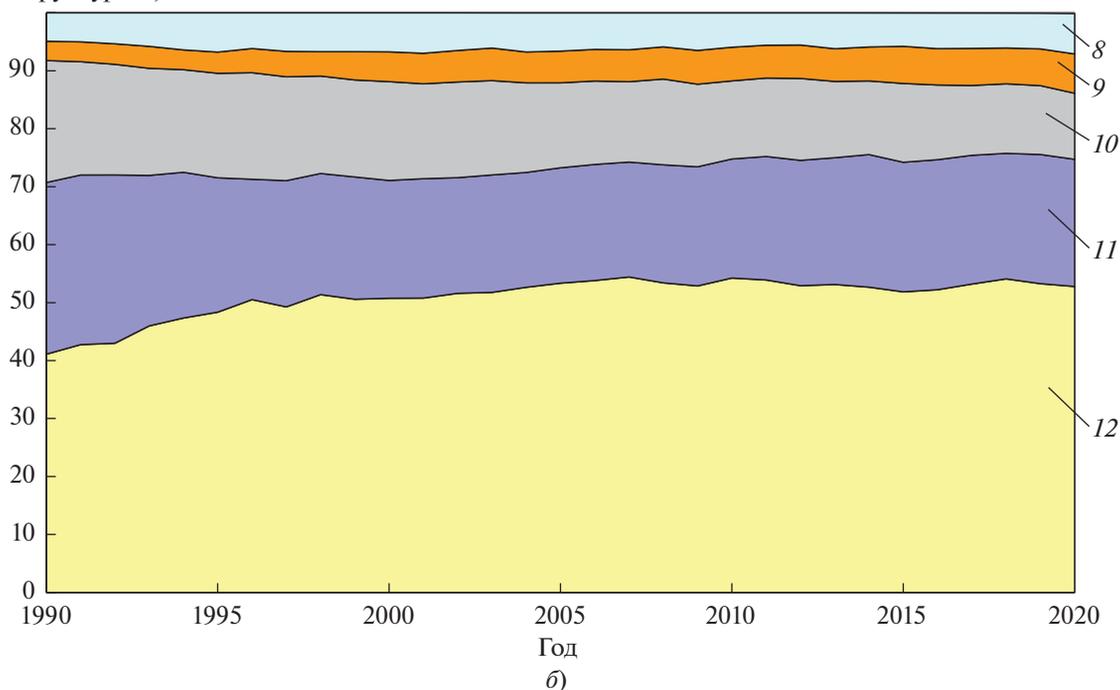


Рис. 3. Структура ВВП (а) и энергопотребления E (б) в России по данным Росстата и [12].

1 – энерго- и водоснабжение; 2 – лесное, сельское и рыбное хозяйство; 3 – добывающая промышленность; 4 – обрабатывающая промышленность; 5 – строительство; 6 – транспорт и связь; 7 – прочие услуги; 8 – ГЭС и возобновляемые источники энергии; 9 – АЭС; 10 – уголь; 11 – нефть; 12 – газ

с замедлением темпов газификации отечественной экономики (см. рис. 3, б) привели практически к стагнации энергоемкости ВВП России и прекращению снижения карбооемкости энергопотребления (см. рис. 2, б). Уникальная осо-

бенность России, оказывающая значительное влияние на углеродный баланс не только самой страны, но и планеты в целом, – масштабные лесные пожары (рис. 4). Эта особенность приобрела в последние десятилетия характер национального

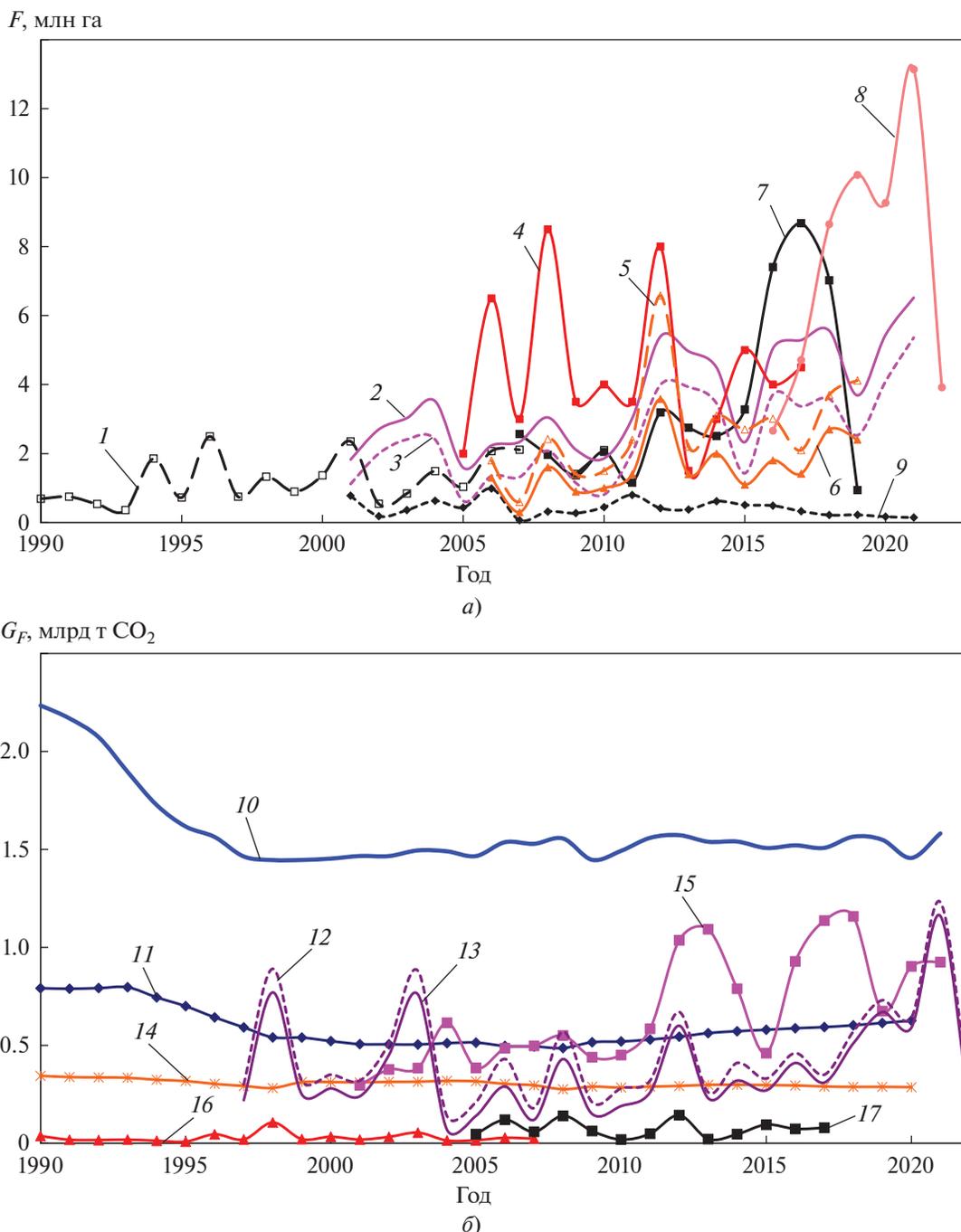


Рис. 4. Лесные площади F , пройденные огнем, и гибель лесов от пожаров (а) и выбросы углекислого газа G_F при потере лесов в сравнении с эмиссией при сжигании топлива (б) в России.

1 – лесные земли, пройденные пожарами (Росстат, 1992–2012 гг.); 2 – убыль лесных насаждений от всех причин (Global Forest Watch, 2022 г.); 3 – убыль лесных насаждений от пожаров (Global Forest Watch, 2022 г.); 4 – площадь лесных пожаров [14]; 5 – гибель и сильное повреждение лесов от пожаров [18]; 6 – гибель лесов от пожаров [18]; 7 – лесные земли, пройденные пожарами (Росстат, 2009–2021 гг.); 8 – покрытые лесом площади, пройденные огнем (Авиалесоохрана, 2022 г.); 9 – гибель лесных насаждений от всех причин (Росстат, 2021 г.); 10 – сжигание топлива; 11 – гибель и рубка леса (Росгидромет, 2011–2021 гг.); 12 – все природные пожары (GFED, 2022 г.); 13 – лесные пожары (GFED, 2022 г.); 14 – гибель леса от всех причин (Росгидромет, 2011–2021 гг.); 15 – потери леса (Global Forest Watch, 2022 г.); 16 – лесные пожары (Росгидромет, 2009 г.); 17 – лесные пожары [14]

бедствия и потребовала вмешательства Президента страны [13], в императивной форме потребовавшего сокращения объема выгораний к 2030 г.

на 50% относительно уровня 2021 г. (рекордного за всю историю наиболее полных спутниковых наблюдений). Пока данные дистанционного зон-

дирования Земли (как отечественные [14–18] и Авиалесоохраны, так и зарубежные GFED, Global Forest Watch) свидетельствуют о росте лесных площадей, пройденных огнем, и увеличении соответствующей эмиссии CO₂, которая составляет в среднем около 40% выбросов при сжигании топлива, достигая в отдельные годы 75%. Увеличение площади лесных пожаров со временем обусловлено, помимо антропогенных факторов, таких как развал лесоохраны в 1990-х годах, потеплением климата, которое на территории России почти повсеместно приводит к повышению горимости древостоя и продолжительности пожароопасного периода на срок от одной до трех недель в течение текущего столетия. Различные модельные [19] и статистические [20] оценки показывают, что к концу столетия площадь лесных пожаров может возрасти более чем в 1.5 раза даже при реализации умеренных сценариев потепления. Эти обстоятельства являются дополнительным серьезным препятствием на пути осуществления планов по увеличению поглощения углерода лесами.

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СРАВНЕНИЯ

Для оценки возможностей достичь углеродной нейтральности выполнен сравнительный анализ процессов, происходящих в экономике и, прежде всего, в энергетике ряда стран – как лидеров декарбонизации (страны 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 [в тоннах условного топлива (у.т.) на душу населения] энергопотребления его умеренным снижением (рис. 5, а), в то время как в развивающихся

экономиках (куда входит и Россия) продолжается рост этого показателя.

При анализе карбоноёмкости энергопотребления (см. рис. 5, б) такое же явное разделение не наблюдается. У большинства стран (страны 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 Канаде они стабилизировались еще 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 чуть 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. 6, а), 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 карбоноёмкости энергопотребления и энергоёмкости ВВП – ожидаемо привело к существенному уменьшению карбоноёмкости экономик всех рассмотренных стран (см. рис. 6, б), но с разными темпами (см. таблицу).

Характер изменений удельных выбросов парниковых газов на душу населения (рис. 7), как и следовало ожидать, в точности соответствует ди-

Темпы изменения удельных выбросов парниковых газов (расчеты авторов по данным [22], МВФ и EDGAR)

Годы	США	Канада	Япония	Страны ЕС	Россия	Турция	Китай	Индия
Карбоноёмкость ВВП, т CO ₂ (эquiv.)/1000 дол.								
1980–2020	–5.0	–4.0	–3.9	–5.3	–	–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 парниковых газов на душу населения, т CO ₂ (эquiv.)/чел.								
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

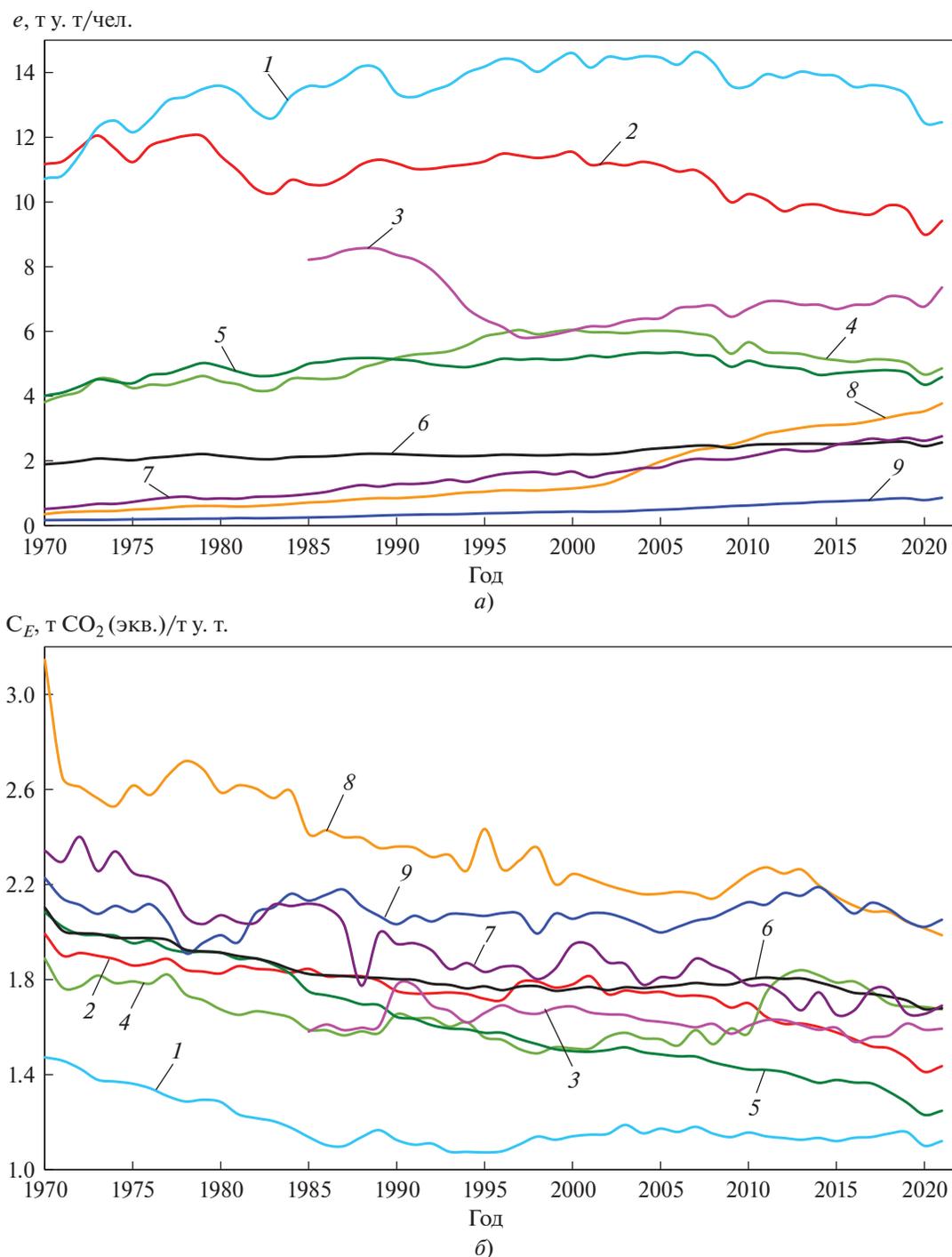


Рис. 5. Удельное энергопотребление e (а) и карбоємкость энергопотребления C_E (б) по данным [21, 22] и EDGAR. 1 – Канада; 2 – США; 3 – Россия; 4 – Япония; 5 – страны ЕС; 6 – мир; 7 – Турция; 8 – Китай; 9 – Индия

намике душевого потребления энергии – их основного источника, но в зависимости от страны их выбросы могут как уменьшаться, так и увеличиваться.

Климатическая нейтральность достигается в том случае, когда антропогенная эмиссия парниковых газов 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 парниковых газов из антропогенных источников [12]. Важно отметить, что

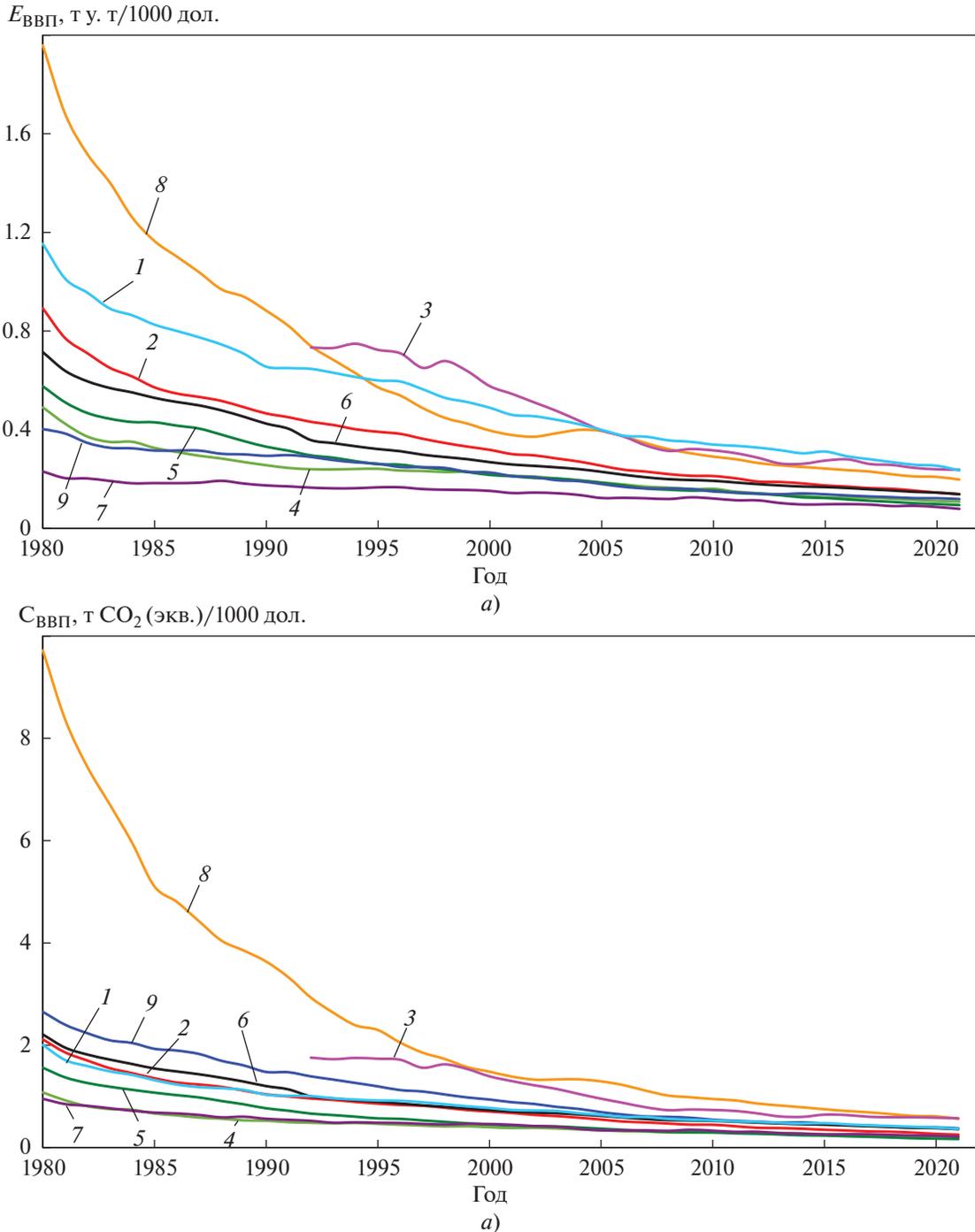


Рис. 6. Энергоемкость $E_{\text{ВВП}}$ (а) и карбоноемкость $C_{\text{ВВП}}$ (без ЗИЗЛХ) (б) ВВП по паритету покупательной способности по данным [19], EDGAR и МВФ. Обозначения см. рис. 5

огромное преимущество в этой сфере, которым сейчас располагает Россия, является не постоянным, а временным и может быть утрачено еще до середины нынешнего столетия в результате фундаментальной трансформации национального лесного резервуара углерода. Дело в том, что нынешние исключительно высокие значения био-

сферного стока, пик которых, кстати, уже давно остался позади, обусловлены кратным сокращением рубок леса в 1990-х годах и зарастанием брошенных тогда же сельскохозяйственных земель [3]. Растущий молодой лес активно поглощал углерод атмосферы в течение нескольких десятилетий, но по мере его перехода в категорию воз-

г, т CO₂ (экв.)/чел.

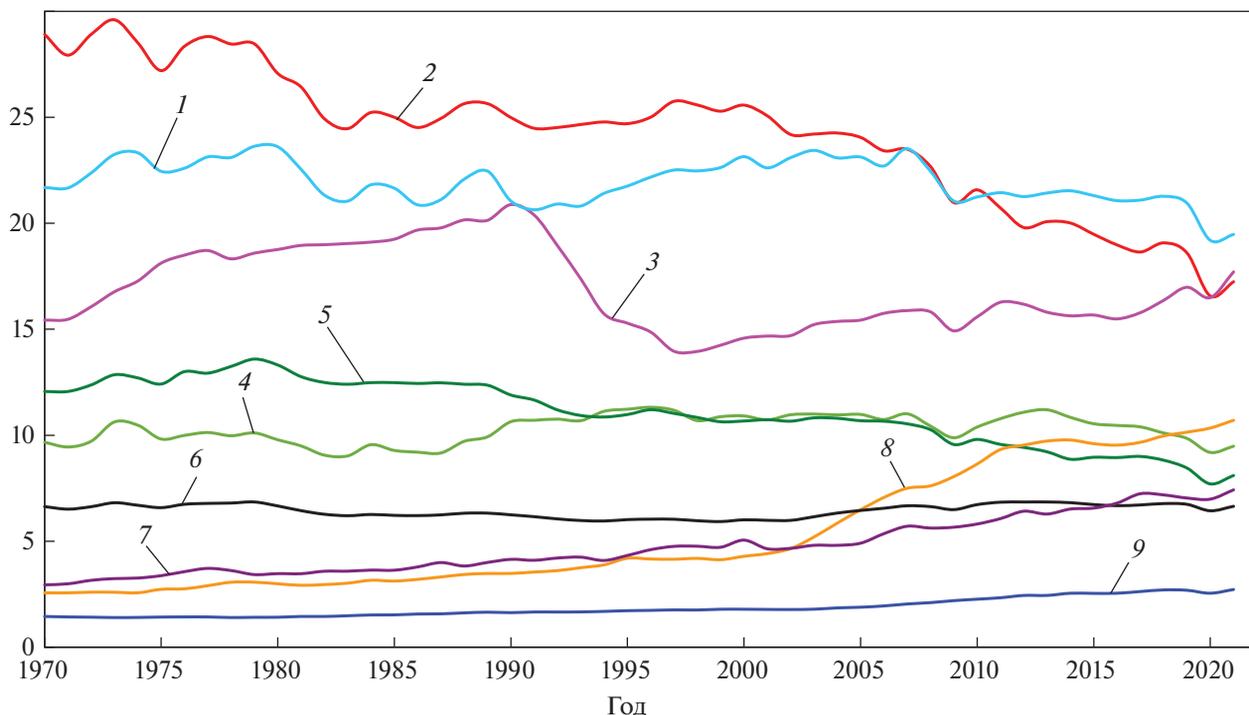


Рис. 7. Удельные выбросы парниковых газов на душу населения g (без ЗИЗЛХ) по данным [22] и EDGAR. Обозначения см. рис. 5

$\delta g_F, \%$

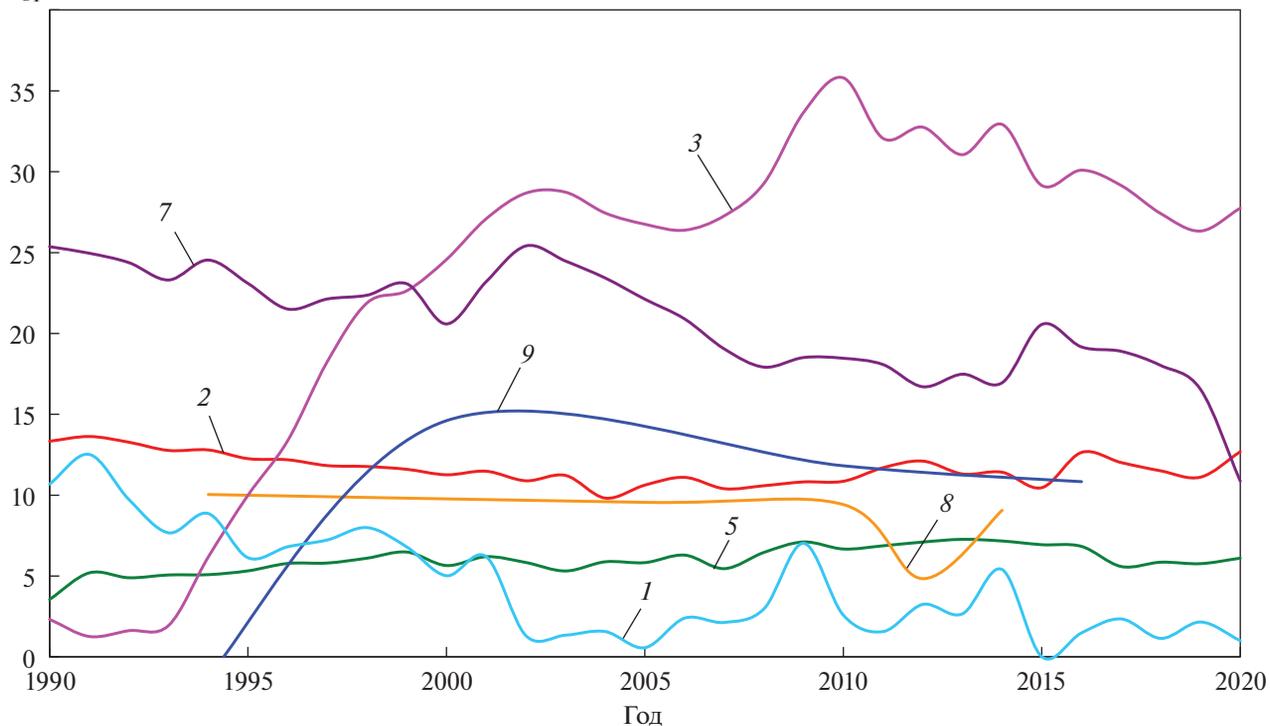


Рис. 8. Нетто-сток парниковых газов δg_F за счет ЗИЗЛХ (относительно суммарной эмиссии из остальных источников) по данным РКИК. Обозначения см. рис. 5

растных он утрачивает эту способность вплоть до перехода в стационарную фазу практического равновесия с близким к нулю нетто-потоком углерода – примерно так, как это происходит теперь в зрелых управляемых лесах Европы или Канады, согласно данным инвентаризаций РКИК.

СЦЕНАРИИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В РОССИИ ДО 2060 г.

События последних двух лет разом перечеркнули все существовавшие ранее прогнозы экономического развития не только России, но и многих других государств. Именно поэтому для исследования, в котором ставится задача выполнить весьма рискованную экстраполяцию интенсивности осуществления политики по сдерживанию эмиссии парниковых газов на несколько десятилетий вперед, авторы статьи избрали историко-экстраполяционный метод в противовес традиционному, основанному на детальных предположениях о развитии экономики. В том, что историческая экстраполяция способна давать полезные результаты, в чем убеждает опыт авторов построения дальних прогнозов развития мировой энергетики, когда выполненные, например, в 1990 г. прогнозы [23] продемонстрировали совпадение с действительными значениями потребления энергии в мире в пределах 2% на горизонте свыше 30 лет [24]. Тем не менее, учитывая необычайно высокую зависимость конечного результата от политических решений, авторы сочли необходимым рассмотреть в данной статье два крайних сценария движения России к климатической нейтральности: оптимистичный и реальный, учитывающий в том числе и турбулентные текущие события. В качестве демографического сценария в обоих вариантах избран медианный сценарий ООН [22], предполагающий постепенное снижение численности населения страны до 128 млн к 2060 г. Следует особо отметить, что природные источники парниковых газов (особенно метана, естественная эмиссия которого на территории России в настоящее время достигает 30% антропогенной [25]), учет которых необходим в климатических расчетах, в настоящей работе не рассматриваются, за исключением лесного резервуара углерода.

Оптимистичный сценарий основан на предположении, что идеи борьбы за сохранение климата приобретут в российском обществе значительно большее влияние, соизмеримое с тем, которое возобладавало в развитых странах мира в последние три десятилетия. В этом случае Россия может рассчитывать на развитие скоростей декарбонизации на уровне лучших мировых стандартов (см. таблицу). В целом параметры оптимистичного сценария декарбонизации выглядят следующим образом:

темпы снижения удельных (на душу населения) антропогенных выбросов парниковых газов

составляют 1%/год (что соответствует среднему значению для развитых стран мира в 1990–2020 гг.);

показатели лесопользования определены Лесной стратегией-2030 (2021 г.) [26], при этом предполагается полное лесовосстановление после всех сплошных рубок; динамика поглощения углерода лесами соответствует высоким национальным оценкам, которые сегодня заметно расходятся с международными рекомендациями;

учтены дополнительное поглощение углерода лесами при изменении климатических факторов (температуры и количества осадков) [27, 28], а также эффект фертилизации в результате обогащения атмосферы углекислым газом [27];

реализовано 50%-ное сокращение площади лесных пожаров (согласно [13]) к 2030 г. с сохранением этого показателя в дальнейшем.

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

темпы снижения удельных (на душу населения) антропогенных выбросов парниковых газов соответствуют умеренным значениям, достигнутым в 1990–2020 гг. в Японии и Канаде, и составляют 0.5%/год, что заметно лучше современных российских показателей;

показатели лесопользования соответствуют актуальным международным рекомендациям и основаны на результатах официальной инвентаризации лесов [4, 12] и Лесной стратегии-2030 [26] с учетом реальных перспектив развития лесного комплекса и динамики поглощающей способности лесной биоты, согласно которым нетто-сток углерода обнаруживает тенденцию к небольшому росту. 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.

На рис. 9 приведены зависимости, полученные при расчетах антропогенных выбросов и биотического нетто-стока парниковых газов в рамках этих двух сценариев декарбонизации вместе с оценками других авторов. Здесь следует особо подчеркнуть, что все имеющиеся сценарии повышения нетто-стока ЗИЗЛХ суть результаты моделирования, не связанные с данными Национального кадастра парниковых газов [12] и Стратегией развития лесного комплекса России [26]. Они также противоречат доказанным тенденциям нарастания лесопожарной эмиссии в условиях продолжающегося потепления.

Оптимистичный сценарий предполагает немедленный старт мероприятий по декарбонизации экономики России и способен снизить выбросы

G, G_F , млрд т CO_2 (экв.)

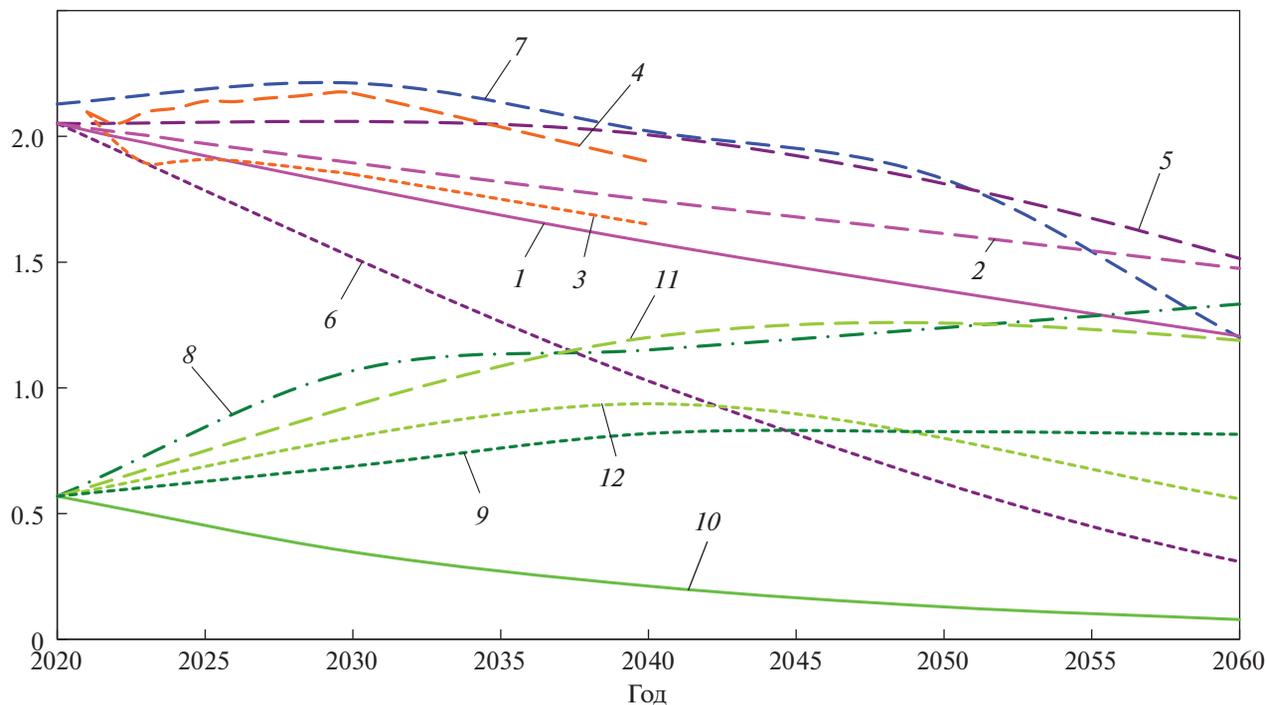


Рис. 9. Суммарная эмиссия парниковых газов без ЗИЗЛХ G (1–7) и нетто-сток ЗИЗЛХ G_F (8–12) в 2020–2060 гг. при вариантах максимального (гср2.6) и умеренного (гср4.5) сдерживания потепления климата. Сценарий: 1, 8 – оптимистичный настоящей работы; 2, 9 – реальный настоящей работы; 3 – базовый [11]; 10 – базовый [2]; 4 – исходный [11]; 5, 11 – гср4.5 [25]; 6, 12 – гср2.6 [25]; 7 – целевой [1]

парниковых газов с современных 2.0 млрд т CO_2 (экв.) до примерно 1.3 млрд т CO_2 (экв.) к 2060 г. Последнее значение соответствует рассчитанному по национальной методике и удвоенному по сравнению с современной поглотительной способностью лесов страны при условии полной компенсации сплошных рубок, двукратного сокращения площадей лесных пожаров и увеличения биопродуктивности лесов.

Реализация как “нижнего”, так и “верхнего” сценария не так давно утвержденной Энергетической стратегии России на период до 2035 г. (рис. 10) отодвигает начало декарбонизации и повышает к 2060 г. выбросы парниковых газов до 1.5–1.6 млрд т CO_2 (экв.) (рис. 11).

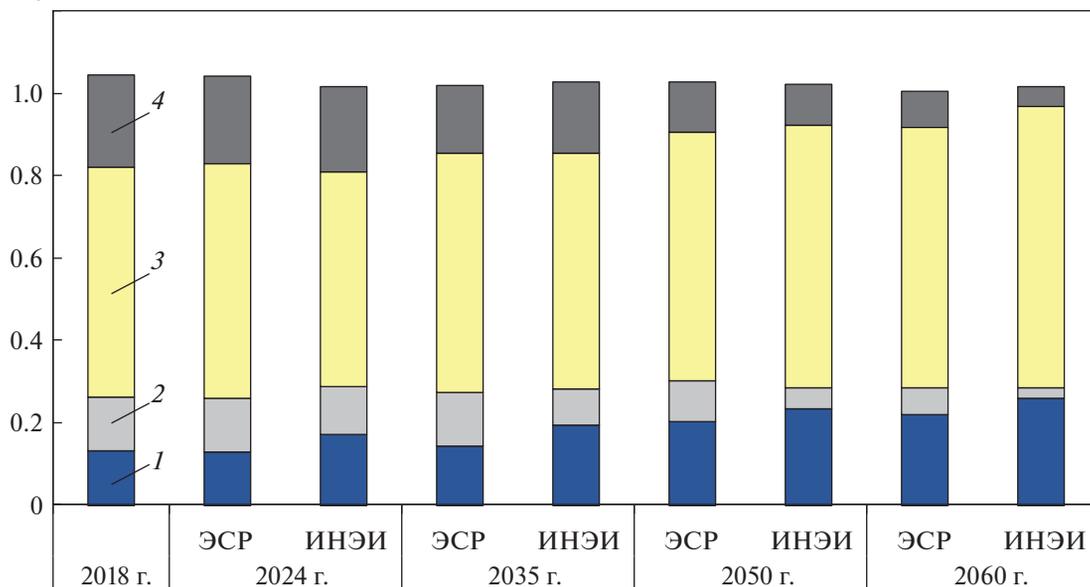
События последнего года, согласно обновленному базовому сценарию ИНЭИ РАН [11], на десятилетия снижают добычу и экспорт энергоресурсов, а с ними и объем эмиссии, который весьма близок к реальному сценарию настоящей работы на горизонте до 2040 г.

При сравнении полученных в настоящей работе оценок с представленными в [25] сценариями эмиссии парниковых газов в России на период до 2100 г. видно, что оптимистичный сценарий декарбонизации лежит между вариантами макси-

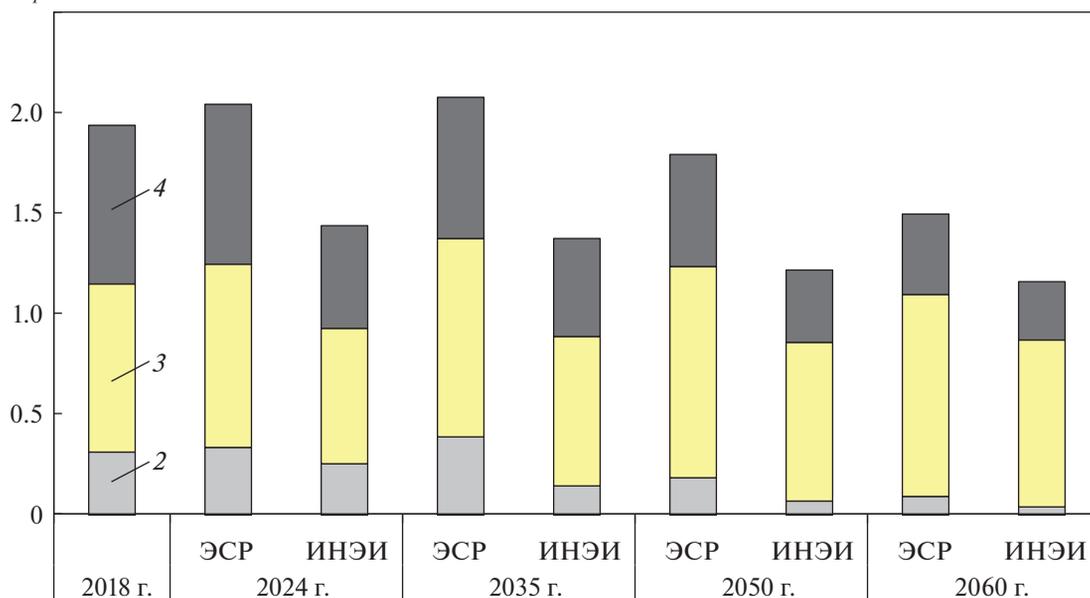
мального гср2.6 и умеренного гср4.5 сдерживания потепления, ближе к последнему. Что касается результатов расчетов авторов биотического нетто-стока, то с учетом климатически обусловленного увеличения биопродуктивности лесов они близки к варианту гср4.5 [25], а без этого увеличения – к варианту гср2.6 той же работы.

Следует отметить, что оценки современного баланса углерода в лесах России и динамики его изменения в ближайшие десятилетия серьезно различаются [2, 3, 12, 30–33], причем расхождения в оценках даже современного нетто-потока, выполненных в разных институтах, достигают четырехкратного значения. Далее, существуют диаметрально противоположные представления о дальнейшем изменении нетто-стока – от его драматического сокращения более чем в 5 раз [3] до двукратного увеличения к середине столетия (последняя концепция заложена в Стратегии низкоуглеродного развития [1]).

В последние два-три года наметилась тенденция к примирению столь противоположных точек зрения, что привело к появлению более взвешенных оценок, основанных не на целевых установках, а на всестороннем научном подходе, учитывающем влияние не только чисто экологических, но и экономических, политических и правовых

E_c , млрд т у. т.

а)

 E_p , млрд т у. т.

б)

Рис. 10. Потребление E_c (а) и добыча E_p (б) энергоресурсов согласно консервативному сценарию Энергетической стратегии России до 2035 г. [29] (ЭСР) и базовому сценарию ИНЭИ РАН [11] (ИНЭИ) с экстраполяцией до 2060 г. 1 – ГЭС + АЭС + ВИЭ; 2 – уголь; 3 – газ; 4 – нефть

факторов. В рамках такого подхода оказывается, что реально достижимое повышение поглощения углерода лесами России, а именно суммарный потенциал в результате совершенствования методики государственного учета лесов, выполнения лесоклиматических проектов, снижения лесопожарной опасности, может в целом составить примерно 380 млн т CO_2 (экв.) к 2060 г. [4]. Однако

даже эта сдержанная оценка, по мнению авторов, является весьма оптимистичной, поскольку не учитывает планируемое возрастание объема рубок [26, 33] и предполагает решительное сокращение лесопожарной эмиссии в масштабах, которые до сих пор не достигнуты ни в одной стране мира, располагающей обширными массивами бореальных лесов (Канаде, США, Швеции).

G, G_F , млрд т CO_2 (экв.)

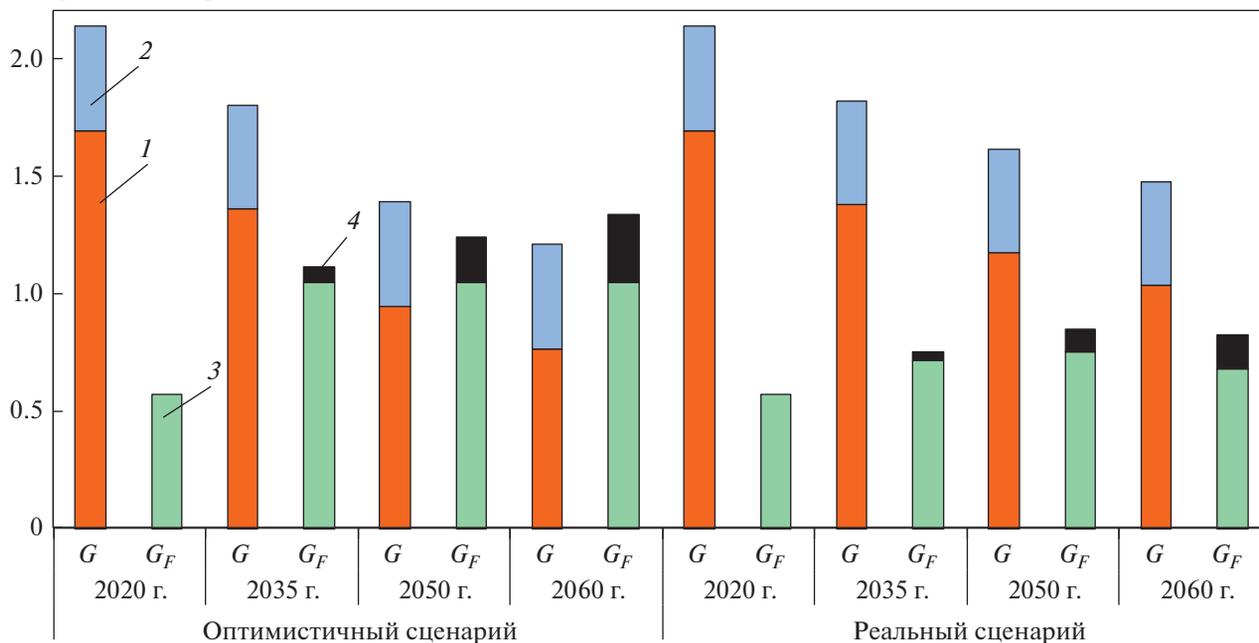


Рис. 11. Эмиссия парниковых газов G (без ЗИЗЛХ) и нетто-сток ЗИЗЛХ G_F для оптимистичного и реального сценариев настоящей работы.
 G : 1 – энергетика; 2 – прочие; G_F : 3 – леса; 4 – климат и CO_2

Поэтому в рамках данного исследования было принято целесообразным в качестве реальной использовать центральную оценку между вариантом сохранения статус-кво сегодняшнего дня и упомянутой оценкой из [4], т.е. увеличение нетто-стока на 190 млн т CO_2 (экв.) к 2060 г. Такому варианту соответствует рост нетто-стока на 0.7%/год, что вполне согласуется с независимыми оценками как для недавних [30, 34], так и для предстоящих нескольких десятилетий [25, 34]. Тогда при развитии событий по реальному сценарию небаланс эмиссии и стока падает более чем вдвое от современных 1.47 до 0.71 млрд т CO_2 (экв.) к 2060 г. (см. рис. 9, 11), но перспектива достижения климатической нейтральности отодвигается в неопределенное будущее.

Снижение столь значительных остаточных выбросов за короткий исторический срок оказывается невозможным без построения национальной индустрии улавливания и хранения углерода (CCS), мощность которой превосходит мощность современной отечественной газовой промышленности (500 Мт природного газа). Это означает необходимость ввода установок CCS мощностью 18–20 Мт CO_2 ежегодно на протяжении четырех ближайших десятилетий, при том что по данным Глобального института улавливания и хранения углерода располагаемая мощность всех установок CCS в мире составляет сегодня 42 Мт CO_2 (экв.), а Россия в настоящее время не располагает ни од-

ной установкой CCS промышленного масштаба, и до 2030 г. их ввод не планируется [35].

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ: РУССКИЙ ЛЕС – НАДЕЖДА, КОТОРАЯ НИКОГДА НЕ УМИРАЕТ

Вполне вероятно, что действительный нетто-поток углерода в леса России значительно выше того, что указывается в ежегодных национальных сообщениях. Все актуализированные оценки нетто-потока, выполненные в последние годы, и аналитические обзоры дают существенно бóльшие значения (в 1.5–3.0 раза) в диапазоне от 0.73 до 1.80 млрд т CO_2 (экв.) [30–32, 34, 36, 37]. Разумеется, использование оценок из верхней части диапазона самым серьезным образом может повлиять на выводы настоящей работы. Проблема заключается в том, что при составлении национальной отчетности по бюджету парниковых газов требуется не только информация из разных научных изданий, но и строгое соблюдение протокола, изложенного в руководствах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [38]. Согласно этому протоколу, оценки баланса углерода выполняются на основе данных официальной инвентаризации лесов с применением вполне определенного набора уравнений, коэффициенты которых могут быть определены по имеющимся национальным дан-

ным. Эти данные подвергаются регулярной проверке экспертами РКИК, и, таким образом, ни одна страна не может произвольно изменять коэффициенты уравнений, описывающих поглощение углерода различными категориями лесов.

Из всех отечественных и международных оценок рекомендациям МГЭИК в полной мере следует только разработанная Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН система РОБУЛ (Региональная оценка бюджета углерода лесов), которая используется с 2010 г. в Национальном кадастре парниковых газов [12]. Актуализированная система РОБУЛ [39] использует данные Государственного лесного реестра, введенного Лесным кодексом РФ в 2007 г., и, кроме динамики наземных биотических резервуаров углерода, учитывает потери углерода почвой покрытых лесом земель. Следует отметить, что инвентаризация лесов в мире — очень длительный процесс, занимающий иногда десятки лет. Так, в настоящее время в России завершен первый цикл инвентаризации лесов на основе пробных площадей в рамках Государственного лесного реестра, продолжавшийся с 2007 по 2020 г.

Процесс модификации методик подсчета баланса углерода, следующий за накоплением данных наблюдений, очевидно, протекает еще медленнее. В этой связи трудно рассчитывать, что в ближайшие одно-два десятилетия международно признанные оценки стока углерода в леса России будут претерпевать радикальные изменения. Авторы полагают, что в лучшем случае реально можно рассчитывать на коррекцию в рамках той же системы РОБУЛ, в соответствии с актуализированной версией которой с учетом баланса почвенного углерода лесов нетто-сток составляет 0.98 ± 0.37 млрд т CO_2 для 2018 г., что на 60% выше указанного в [12]. Тем не менее использование этой оценки не меняет принципиально выводов настоящей работы, но лишь существенно уменьшает масштаб перспективной национальной системы улавливания и хранения углерода.

ВЫВОДЫ

1. Вследствие падения добычи, потребления и экспорта энергоносителей, связанного с ограничениями геополитического характера, значительно ускоряется процесс декарбонизации, но при этом не обеспечивается достижение климатической нейтральности.

2. Необходимыми, но недостаточными условиями для достижения углеродной нейтральности являются многолетнее снижение удельных (на душу населения) антропогенных выбросов парниковых газов со скоростью 1%/год, полная компенсация лесных вырубок за счет лесовосста-

новления 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 сфере землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства, что является сомнительным, либо развитие технологий улавливания и хранения углерода в масштабах, которые превосходят современные глобальные мощности примерно в 15 раз.

4. Мировой исторический опыт противостояния глобальному потеплению показывает, что достижение углеродной нейтральности экономики России к 2060 г. вряд ли возможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стратегия** социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. Утв. распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р.
2. **О новой** Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. / Е.А. Шварц, А.Ю. Ярошенко, Д.Г. Замолодчиков, Н.М. Шматков // Устойчивое лесопользование. 2021. № 1 (65). С. 2–6.
https://doi.org/10.12345/2308-541X_2021_65_1_2
3. **Современное** сокращение стока углерода в леса России / Д.Г. Замолодчиков, В.И. Грабовский, П.П. Шуляк, О.В. Честных // Докл. РАН. 2017. Т. 476. № 6. С. 719–721.
4. **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.
5. **Башмаков И.А.** Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики // Вопросы экономики. 2020. № 7. С. 51–74.
6. **Башмаков И.А.** Сценарии движения России к углеродной нейтральности // Энергосбережение. 2023. № 1. С. 40–49.
7. **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 энерговедение. 2022. № 2. С. 29–39.
8. **Мастепанов А.М.** Россия на пути к углеродной нейтральности // Энергетическая политика. 2022. № 1 (167). С. 94–108.
9. **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.
10. **Филиппов С.П.** Перспективы развития российской энергетики // Газотурбинные технологии. 2022. № 3 (186). С. 2–6.

11. **Исследование** направлений и системы мер по управлению посткризисным восстановлением энергетики России. М.: ИНЭИ РАН, 2022.
12. **Национальный доклад** о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2020 гг. Ч. 1. М.: Росгидромет, 2022.
13. **Указ Президента РФ** от 15.06.2022 № 382 “О мерах по сокращению площади лесных пожаров в Российской Федерации”.
14. **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.
15. **Пространственно-временной анализ** многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным / В.Г. Бондур, О.С. Воронова, Е.В. Черепанова, М.Н. Цидилина, А.Л. Зима // *Исследование Земли из космоса*. 2020. № 4. С. 3–17.
16. **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.
17. **Спутниковый мониторинг** лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, И.Б. Балашов, Б.А. Егоров, Д.Б. Ершов, Д.А. Кобец, К.С. Сенько, Ф.Б. Стыщенко, И.Г. Сычугов // *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>
18. **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
19. **Елисеев А.В., Васильева А.В.** Природные пожары: данные наблюдений и моделирование // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020. Т. 3. С. 73–119.
20. **Грабовский В.И., Замолодчиков Д.Г.** Прогноз лесных пожаров РФ до конца столетия по сценариям изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 // *Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием “Научные основы устойчивого управления лесами”*, посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН. Москва, 25–29 апреля 2022 г. С. 260–262.
21. **BP Statistical Review of World Energy 2022**. L.: BP p.l.c., 2022.
22. **World Population Prospects 2022**. N.Y.: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022.
23. **Клименко В.В., Сныгин С.Ю., Федоров М.В.** Энергетика и предстоящее изменение климата в 1990–2020 гг. // *Теплоэнергетика*. 1990. № 6. С. 14–20.
24. **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** Опыт построения дальних прогнозов воздействия мировой энергетики на атмосферу Земли // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 2. С. 158–168. <https://doi.org/10.7868/S0002351515020078>
25. **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>
26. **Стратегия развития** лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. Утв. распоряжением Правительства РФ от 11.02.2021 № 312-р.
27. **Клименко В.В., Терешин А.Г., Микушина О.В.** Влияние изменений атмосферы и климата на энергетический потенциал лесов России // *Докл. РАН*. 2019. Т. 488. № 6. С. 612–618. <https://doi.org/10.31857/s0869-56524886612-618>
28. **Diagnosing destabilization risk in global land carbon sinks** / M. Fernández-Martínez, J. Peñuelas, F. Chevallier, P. Ciais, M. Obersteiner, C. Rödenbeck, J. Sardans, S. Vicca, H. Yang, S. Sitch, P. Friedlingstein, V.K. Arora, D.S. Goll, A.K. Jain, D.L. Lombardozzi, P.C. McGuire, I.A. Janssens // *Nat*. 2023. V. 615. P. 848–856. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05725-1>
29. **Энергетическая стратегия** Российской Федерации на период до 2035 г. Утв. распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р.
30. **Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported** / D. Schepaschenko, E. Moltchanova, S. Fedorov, V. Karminov, P. Ontikov, M. Santoro, L. See, V. Kositsyn, A. Shvidenko, A. Romanovskaya, V. Korotkov, M. Lesiv, S. Bartalev, S. Fritz, M. Shchepashchenko, F. Kraxner // *Sci. Rep*. 2021. No. 11. P. 12825. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>
31. **Аналитический обзор** методик учета выбросов и поглощения лесами парниковых газов атмосферы / А.В. Филипчук, Н.В. Малышева, Т.А. Золина, А.Н. Югов // *Лесохозяйственная информация*. 2016. № 3. С. 36–85.
32. **An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods** / A.J. Dolman, A. Shvidenko, D. Schepaschenko, P. Ciais, N. Tchebakova, T. Chen, M.K. van der Molen, L. Beilelli Marchesini, T.C. Maximov, S. Maksyutov, E.D. Schulze // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. No. 12. P. 5323–5340.
33. **Прогноз развития** лесного сектора Российской Федерации до 2030 г. / под ред. А. Петрова, М. Лобовикова. Продовольственная и сельскохозяйствен-

- ная организация Объединенных наций. Рим: FAO, 2012. <https://www.fao.org/3/i3020r/i3020r.pdf>
34. **Future** vegetation-climate interactions in Eastern Siberia: an assessment of the competing effects of CO₂ and secondary organic aerosols / A. Arneth, R. Makkone, S. Olin, P. Paasonen, T. Holst, M.K. Kajos, M. Kulmala, T. Maximov, P.A. Miller, G. Schurgers // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 5243–5262.
 35. **The global** status of carbon capture and storage 2022 / M. Steyn, J. Oglesby, G. Turan, A. Zapantis, R. Gebremedhin. Washington, DC, US: Global CCS Institute, 2022.
 36. **Global** maps of twenty-first century forest carbon fluxes / N.L. Harris, D.A. Gibbs, A. Baccini, R. Birdsey, S. de Bruin, M. Farina, L. Fatoyinbo, M.C. Hansen, M. Herold, R.A. Houghton, P.V. Potapov, D.R. Suarez, R.M. Roman-Cuesta, S.S. Saatchi, C.M. Slay, S. Turubanova, A. Tyukavina // *Nat. Clim. Change.* 2021. V. 11. P. 234–240.
 37. **Terrestrial** ecosystem carbon flux estimated using GOSAT and OCO-2X CO₂ retrievals / H. Wang, F. Ji-ang, J. Wang, W. Ju, J.M. Chen // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. No. 18. P. 12067–12082.
 38. **Руководящие** принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. В 5 т. / Х.С. Игглестон, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе / Подготовлено Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. Хаяма, Япония: ИГЕС, 2006.
 39. **Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Честных О.В.** Новая оценка баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Биоразнообразие и функционирование лесных экосистем. М.: ЦЭПЛ РАН, 2021. С. 153–173.

Towards Climate Neutrality: Will Russian Forest Stand Against Energy?

V. V. Klimenko^{a, b, c, *}, A. V. Klimenko^b, and A. G. Tereshin^{a, c}

^a National Research University Moscow Energy Institute, Moscow, 111250 Russia

^b National Research Technological University MISiS, Moscow, 119049 Russia

^c Energy Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117186 Russia

*e-mail: nilgpe@mpei.ru

Abstract—The prospects for reducing the carbon intensity of the Russian economy and the possibility of achieving climate neutrality of the country's national economy by 2060 are considered. Based on a historical-extrapolation approach to the study of the development of various socio-technical systems and by comparing the dynamics of carbon indicators of the economies of Russia and the leading countries of the world, it is shown that full compensation of anthropogenic greenhouse emissions gases when absorbed by the biosphere (primarily forests) is today rather only theoretically possible. The condition for this is the implementation of extremely ambitious large-scale reform programs in all sectors of the Russian economy, from energy to forestry. Thus, in an optimistic scenario, the rate of reduction in specific indicators of greenhouse gas emissions per capita should have the maximum values achieved in the world over the last 50 years: 1%/year. Forest management must include full compensation for increasing deforestation and a 50% reduction in forest losses from fires, which are currently the second (after energy) source of greenhouse gas emissions into the atmosphere. The most likely scenario is one in which the rate of reduction in specific greenhouse gas emissions per capita is 0.5%/year and a moderate increase in the absorption capacity of forests is ensured, mainly due to the implementation of forest climate projects and a reduction in fire emissions. If the latter scenario is implemented, net greenhouse gas emissions could amount to approximately 700 Mt CO₂(eq) by 2060, which will require the nation's carbon capture and storage industry on an unprecedented scale to achieve climate neutrality.

Keywords: economics, energy, forestry, greenhouse gas emissions and absorption, climate neutrality, historical extrapolation approach, scenarios, carbon capture and storage