

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ

БЕЗУГЛЕРОДНЫЙ МИР: ВОЗМОЖНО ЛИ ДОСТИЖЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ¹

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

^aНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1, 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

^dИнститут географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, Москва, 119017 Россия

*e-mail: nilgpe@mpei.ru

Поступила в редакцию 24.07.2024 г.

После доработки 13.08.2024 г.

Принята к публикации 29.08.2024 г.

Исследованы перспективы достижения углеродной нейтральности экономически развитыми странами, входящими в Организацию экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), и прочими странами. Выполнен анализ структуры энергетики и землепользования в этих странах. Разработаны сценарные оценки динамики изменения углеродных показателей экономик исследуемых стран, проведено сопоставление с прогнозами ведущих мировых энергетических агентств. Показано, что при существующих темпах декарбонизации и развития индустрии улавливания и хранения углерода (CCS – от англ. carbon capture and storage) в странах обеих групп невозможно выполнить принятые ими обязательства по достижению климатической нейтральности в 2050–2070 гг. — эта цель не может быть достигнута ранее конца текущего столетия. Центральной проблемой в достижении климатической нейтральности становится быстрое и масштабное внедрение технологий CCS во всех их возможных проявлениях. С использованием комплекса моделей глобальной климатической системы выполнены расчеты среднеглобальной температуры (СГТ) для предложенных сценариев, проведено сравнение их результатов с другими работами. Несмотря на то что изменения климата занимают едва ли не лидирующее место в мировой повестке, действительные результаты усилий в этой области далеки от декларируемых и сдержать потепление в пределах 1.5°C сейчас уже невозможно. Ключевой задачей становится максимальное сокращение времени пребывания глобальной климатической системы в опасной запредельной зоне (выше 1.5°C), что потребует создания мировой экономики с отрицательной эмиссией парниковых газов (ПГ).

Ключевые слова: мировая энергетика, эмиссия и поглощение парниковых газов, углеродная нейтральность, сценарии, модельные расчеты, среднеглобальная температура, универсальная климатическая модель, землепользование, лесное хозяйство

DOI: 10.56304/S0040363624700528

Самым теплым за период инструментальных наблюдений оказался 2023 г. Он завершился установлением нового рекорда СГТ, превысившей (по данным CRU²) доиндустриальный (1850–1900 гг.) уровень на 1.46°C. При этом прежний рекорд 2016 г.

был превзойден сразу на 0.17°C, что является беспрецедентным событием за всю историю инструментальных наблюдений и вызывает серьезную тревогу мировой научной общественности [1]. В 2024 г. каскад рекордов продолжился, и к настоящему времени зафиксирована уникальная 13-месячная серия (июнь 2023 г. — июнь 2024 г.) ежегодных максимумов. В итоге средняя температура некалендарного года (июль 2023 г. — июнь 2024 г.) оказалась выше доиндустриального уровня на 1.59°C, преодолев тем самым первый критический рубеж, обозначенный Парижским соглашением. И хотя пока это лишь температура одного года, произошедшее событие является важным

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в ИНЭИ РАН (проект 21-79-30013) в части исследования проблем декарбонизации энергетики России, в НИУ МЭИ (проект № 20-19-00721-П) в части энергетических исследований и в НИТУ МИСиС (проект № 23-19-00398) в части исследования улавливания, захоронения и поглощения парниковых газов.

² CRU (Climate Research Unit) — Центр климатических исследований Университета Восточной Англии.

сигналом и тревожным посланием мировому сообществу, что опасный уровень потепления находится совсем рядом. Климатически значимая средняя за десятилетие (2015–2024 гг.) аномалия СГТ составит, по предварительным данным, 1.25°C , и, таким образом, мир окажется в шаге от достижения рубежа в 1.5°C , что однозначно рассматривается мировым сообществом как крайне нежелательное событие [2]. При сохранении достигнутых в последние 30 лет скоростей потепления примерно на 0.2°C за декаду следует ожидать, что критический рубеж будет преодолен уже в середине 2030-х годов. В сложившейся ситуации оптимальным и все еще возможным выглядит сценарий временного превышения (the overshoot) рубежа в 1.5°C , достижения пика потепления и последующего снижения СГТ в результате последовательного осуществления инициатив, выдвинутых на саммитах в Глазго (2021 г.) и Дубае (2023 г.) [3], либо реализации низких демографических сценариев [4]. Превышение указанного рубежа представляет собой значительную угрозу для стабильности глобальной климатической системы, и мировое сообщество уже сейчас ставит перед собой задачу максимального сокращения времени пребывания в зоне повышенных температур.

Мировое сообщество в последние 30 лет прилагает значительные усилия для борьбы с опасным потеплением, и центральное место в них занимают мероприятия по сокращению эмиссии парниковых газов, целью которых является достижение так называемой климатической нейтральности, когда эмиссия ПГ уравнивается их стоком в естественные или антропогенные резервуары [5, 6].

В своих недавних публикациях [7–10] авторы настоящей работы исследовали возможности решения ведущими экономиками мира (США, ЕС, Канада, Австралия, Япония, Норвегия), а также крупнейшими представителями развивающихся стран (Китай, Индия, Индонезия, Бразилия, Иран, Саудовская Аравия) и Россией поставленных задач в области охраны климата – достижения к 2050–2060 гг. углеродной нейтральности национальных экономик. Авторами данного исследования было показано, что, несмотря на существенный потенциал снижения выбросов парниковых газов в различных отраслях экономики и прилагаемые значительные усилия, все эти страны сталкиваются с серьезными затруднениями в решении поставленных задач. Вместе с тем, различия в структурах энергетики и уровнях благосостояния этих государств определяют особенности траекторий их движения к углеродной нейтральности.

Авторы настоящей работы попытались обобщить результаты ранее выполненных исследова-

ний для мира в целом, сделав акцент на различиях в путях декарбонизации двух принципиально различающихся групп стран – экономически развитых, входящих в Организацию экономического сотрудничества и развития (стран с высокими доходами по классификации Всемирного банка, или условный “золотой миллиард”), и всех остальных.

ЭНЕРГЕТИКА И ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Последние десятилетия ознаменовались радикальными изменениями в географической структуре мирового энергопотребления (рис. 1). Если в 1990 г. страны ОЭСР потребляли около 60% мировых энергетических ресурсов, то к 2023 г. их доля снизилась до 37%, причем в последние 20 лет валовое энергопотребление экономически развитых стран стабилизировалось на уровне примерно 8 млрд т у.т., а развивающихся – росло со средними ежегодными темпами 3%.

Еще более заметны различия в удельном энергопотреблении. С 2000 г. потребление первичной энергии на душу населения в странах ОЭСР снизилось на 15%, в то время как в прочих странах

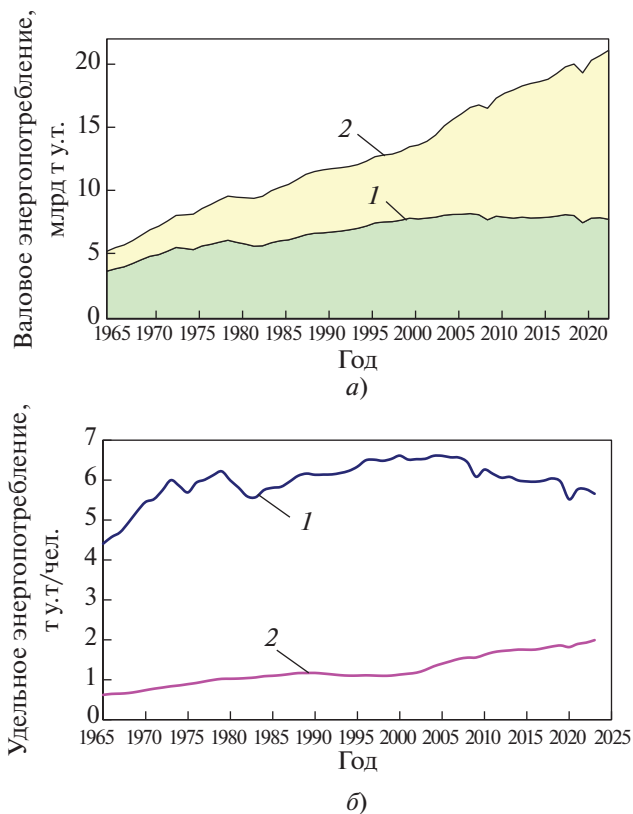


Рис. 1. Валовое (а) и удельное (б) энергопотребление в экономически развитых (1) и прочих (2) странах по данным [11]

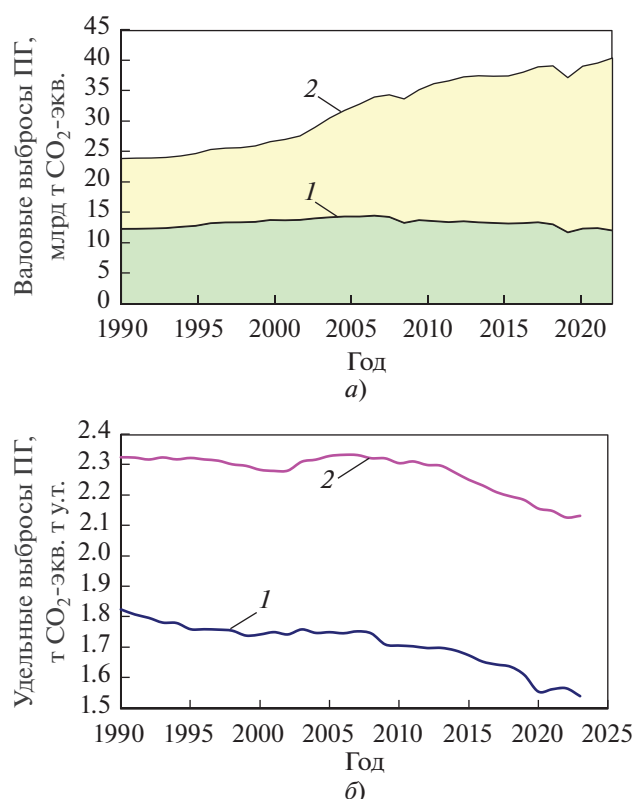


Рис. 2. Валовые (а) и удельные (б) энергетические выбросы ПГ в экономически развитых (1) и прочих (2) странах по данным [11]

этот показатель вырос на 75%. Тем не менее, на одного жителя экономически развитых стран и теперь в среднем приходится почти в 3 раза больше энергии, чем на жителя развивающихся стран.

Схожая картина наблюдается и в сфере энергетических выбросов парниковых газов (при сжигании топлива, добыче и транспортировке нефтегазового сырья) (рис. 2). В 1990 г. выбросы ПГ в энергетике распределялись примерно поровну между представителями ОЭСР и прочими странами (см. рис. 2, а). С тех пор уровень эмиссии ПГ в энергетике экономически развитых стран остается на уровне 12 млрд т CO₂-экв., в то время как развивающиеся страны увеличили энергетические выбросы почти в 2.5 раза — с 11.5 до 28.4 млрд т CO₂-экв., повысив свою долю в суммарном мировом объеме до 70%. Таким образом, все еще широко эксплуатируемый тезис о том, что развивающиеся страны страдают от изменений климата, вызванных действиями развитых стран, более не соответствует действительности.

Стоит отметить синхронную динамику изменения удельных выбросов ПГ, приходящихся на единицу потребления энергии (см. рис. 2, б). После весьма умеренного снижения этого показателя в развивающихся странах и стабильности в странах ОЭСР в 1990–2008 гг. последующий период характеризуется резким снижением удельных выбросов в энергетике со среднегодовыми темпами 0.8% в развитых и 0.6% в развивающихся

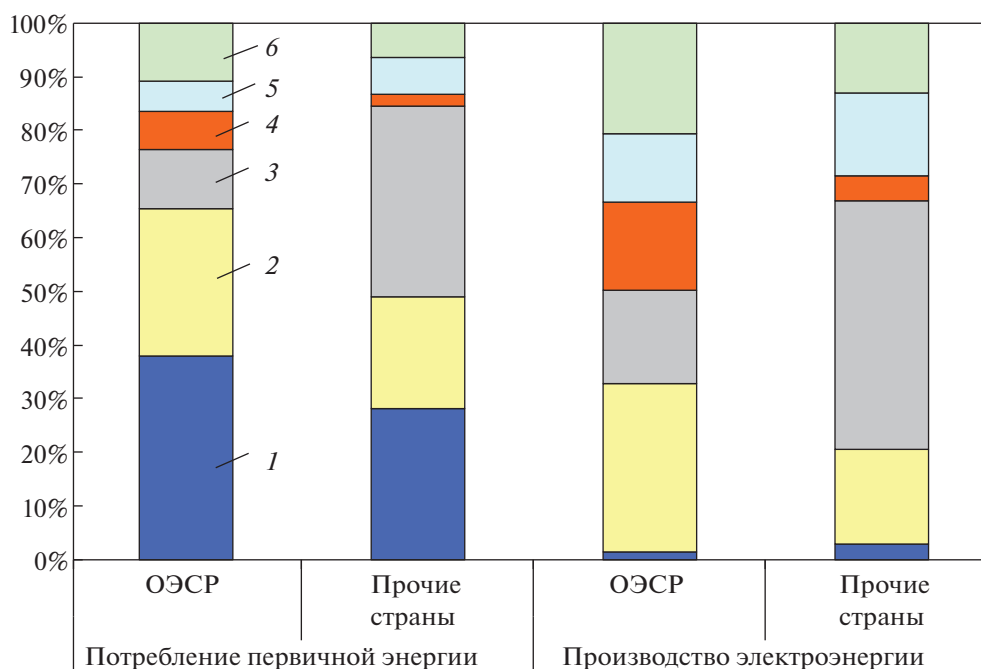


Рис. 3. Структура потребления первичной энергии и производства электроэнергии в развитых (ОЭСР) и прочих странах в 2023 г. по данным [11].

Источник: 1 — нефть; 2 — природный газ; 3 — уголь; 4 — ядерная энергия; 5 — гидроэнергия; 6 — другие виды ВИЭ

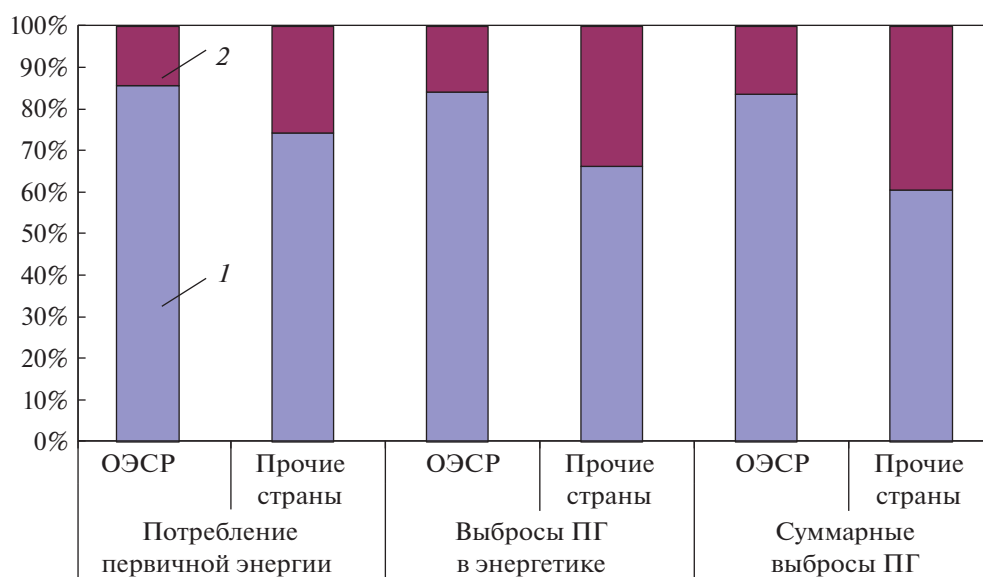


Рис. 4. Доля исследованных в [7–10] стран в общих объемах энергопотребления, энергетических и суммарных выбросах ПГ развитых (ОЭСР) и прочих стран в 2023 г.
Страны: 1 – исследованные; 2 – остальные

странах. Однако в последних, энергетика которых базируется главным образом на угле (рис. 3), этот показатель на 30–40% выше и разрыв со странами ОЭСР постепенно увеличивается.

В суммарном потреблении первичной энергии на безуглеродные источники (ядерная и гидро-энергия, возобновляемые источники) в настоящее время в странах ОЭСР приходится почти 25%, а в прочих странах – немногим более 15%. При этом доля угля в энергобалансе составляет 11 и 36% соответственно.

Электроэнергетика стран ОЭСР к настоящему времени наполовину основана на безуглеродной генерации (ГЭС, АЭС и ВИЭ), а доля выработки угольных ТЭС составляет всего 17% и продолжает неуклонно снижаться. В прочих странах картина прямо противоположная – только треть вырабатываемой электроэнергии приходится на безуглеродные источники, а вот доля угольной генерации составляет 46%.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ

В статьях [7–10] авторы настоящей работы исследовали закономерности декарбонизации энергетики и экономики в целом ключевых представителей ОЭСР (США, ЕС, Канада, Австралия, Япония, Норвегия) и прочих стран (Россия, Китай, Индия, Индонезия, Бразилия, Иран, Саудовская Аравия). По итогам анализа современных тенденций образования выбросов парниковых газов для этих стран разработаны сценарии на период до 2100 г. Доля исследованных стран в своих группах (ОЭСР и прочие страны) в потреб-

лении первичной энергии, энергетических и суммарных выбросах ПГ составляет 60–85% (рис. 4), что дает основание распространить полученные оценки и на оставшиеся страны этих групп.

Общий подход к оценке будущих выбросов состоит в экстраполяции удельных (на душу населения) показателей и расчете валовой эмиссии ПГ на базе среднего сценария численности населения по данным ООН [12].

Для стран ОЭСР экстраполяция выполнялась с темпами снижения удельных выбросов ПГ, характерных для последних двух десятилетий [9] (рис. 5, а). В результате этот показатель в развитых странах к концу столетия должен снизиться практически в 5 раз – с 10 т CO₂-экв/чел. до 2 т CO₂-экв/чел., что при незначительных изменениях численности населения этих стран даст примерно такое же снижение валовых выбросов (рис. 5, б).

Для прочих стран использована другая методика. На основе выполненных в [10] исследований была установлена зависимость темпов снижения национальных удельных выбросов ПГ от уровня экономического развития, определяемого значением номинального ВВП на душу населения. Полученные для репрезентативных семи стран (Россия, Китай, Индия, Индонезия, Бразилия, Иран и Саудовская Аравия) закономерности были применены для всей группы развивающихся стран и положены в основу сценария NetZero Historical (см. рис. 5). Также для Китая и Индии, ответственных суммарно за 40% эмиссии ПГ в мире, были разработаны альтернативные сценарии.

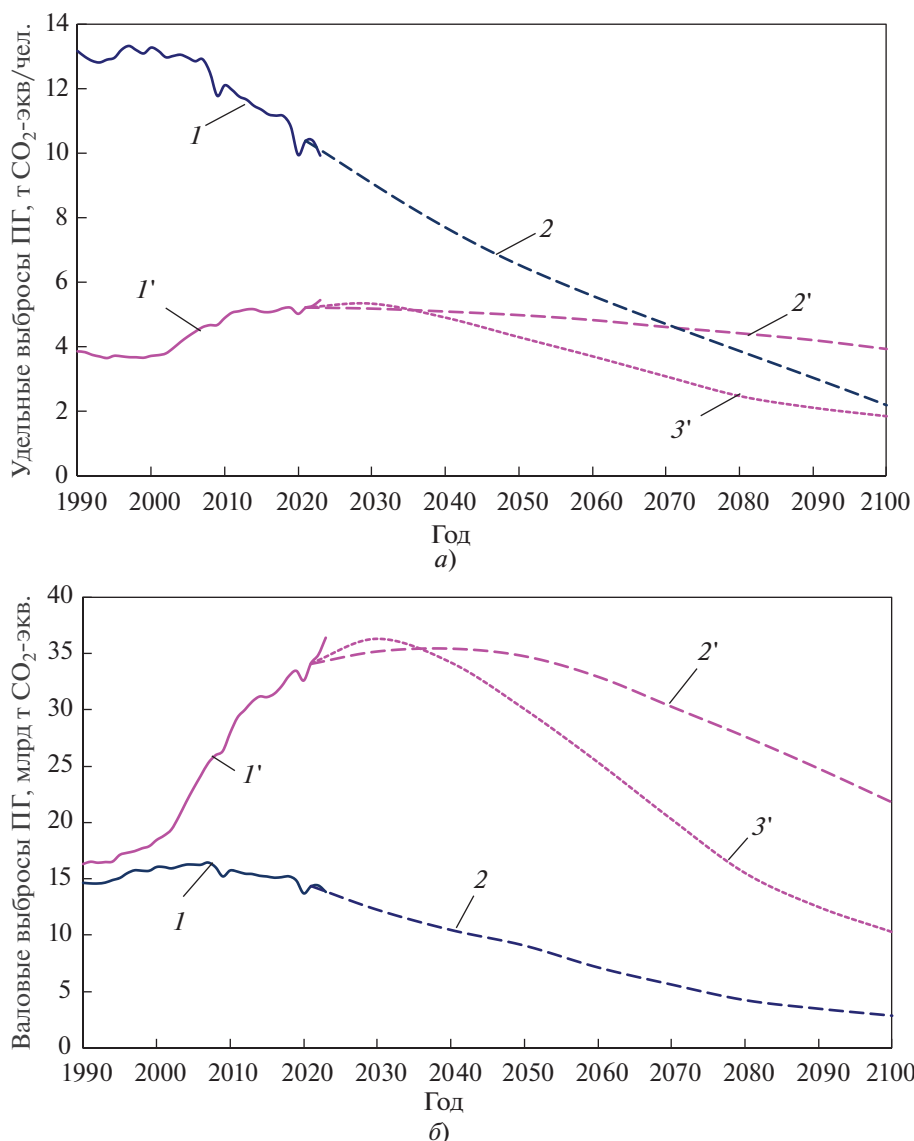


Рис. 5. Удельные (а) и валовые (б) суммарные выбросы ПГ (без ЗИЗЛХ³ и CCS) в экономически развитых (обозначение кривых без штриха) и прочих (обозначение кривых со штрихом) странах. 1, 1' – исторические данные WRI⁴ и ООН⁵; сценарии настоящей работы: 2, 2' – NetZero Historical; 3' – NetZero Intensive

рии ускоренной декарбонизации, базирующиеся на запланированных в этих странах мероприятиях по трансформации национальной энергетики, отраженных в сценарии STEPS⁶ Международного энергетического агентства (МЭА) [13] (табл. 1).

³ ЗИЗЛХ – землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство.

⁴ WRI (World Resources Institute) – Институт мировых ресурсов.

⁵ Демографическая служба Отделения социально-экономических исследований ООН.

⁶ STEPS (Stated Policies Scenario) – сценарий заявленной политики.

Для развивающихся стран они учтены в сценарии NetZero Intensive (см. рис. 5).

Для дальнейших расчетов используется понятие нетто-эмиссии ПГ, в которую включены и антропогенно обусловленные стоки диоксида углерода – в результате землепользования, изменений в землепользовании и лесном хозяйстве, а также технологии улавливания и захоронения углекислого газа.

Для оценки вклада сектора ЗИЗЛХ в эмиссию ПГ были проанализированы изменения структуры землепользования в странах исследуемых групп (рис. 6). В странах ОЭСР наблюдается по-

Таблица 1. Сторонние сценарии развития мировой энергетики и глобальной индустриальной эмиссии парниковых газов, используемые в настоящей работе

Сценарий	Источник	Описание
STEPS	МЭА [13]	Учитывает действующие и принятые к осуществлению мероприятия по охране климата
APS		Предполагает достижение национальных климатических целей согласно Парижскому соглашению своевременно и в полной мере
Current Trajectory	BP [14]	Сохраняет текущие тенденции развития энергетики и природоохранной политики
Net Zero		Предлагает пути достижения климатической нейтральности мировой энергетики соединенными усилиями всех стран уже в середине текущего столетия
SSP1-2.6	МГЭИК ⁷ [15–17]	Устойчивое развитие всех стран с концентрацией внимания на проблемах состояния окружающей среды, демографии и благосостояния. Потепление на 1.3–2.4°C (по сравнению с доиндустриальной эпохой)
SSP2-4.5		Неравномерное развитие различных групп стран с сохранением экономического и демографического неравенства и разных подходов к охране окружающей среды. Потепление на 2.1–3.5°C (по сравнению с доиндустриальной эпохой)

Примечание. APS – Announced Pledges Scenario; BP – нефтяная компания British Petroleum; МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC); SSP – Shared Socioeconomic Pathways.

Таблица 2. Оценки геологических ресурсов горных пород, Гт, для захоронения CO₂ по группам стран мира [22, 23] и требуемые объемы CCS на период до 2200 г. для сценариев настоящей работы NetZero Intensive (NZI) и NetZero Historical (NZH)

Группа стран	Нижние оценки			Верхние оценки			CCS 2020–2200 гг.	
	суша	шельф	всего	суша	шельф	всего	NZH	NZI
Входящие в ОЭСР	1335	842	2177	9377	5921	15298	–	–
Прочие	4669	1064	5733	32806	7477	40283	–	–
Мир в целом	6004	1906	7910	42183	13398	55581	520	1180

степенное уменьшение площадей сельскохозяйственных земель и медленное восстановление лесов, в основном за счет посадок, что способствует росту объемов поглощения диоксида углерода. В прочих странах наблюдаются обратные тенденции – в целом продолжается сведение лесов⁸, ко-

торое не компенсируется посадками новых, и продолжается увеличение площади земель, отводимых под сельское хозяйство, впрочем, в значительной мере замедляемое развитием агротехнологий и повышением продуктивности земледелия (рис. 7). Следует, однако, иметь в виду, что эта большая группа стран существенно неоднородна. Так, наряду со странами, осуществляющими варварскую вырубку лесов (Бразилия, Индонезия), имеются такие, площадь лесопосадок в которых заметно превосходит площадь вырубок (Индия, Иран), и, наконец, Китай, занимающий первое место в мире по площади ежегодно восстанавливаемых лесов [18].

Ранее [9, 10, 19–22] неоднократно указывалось, что достижение климатической нейтральности в большинстве стран мира невозможно без масштабного развития технологий CCS. Различные оценки показывают, что мир в достаточной

⁷ К выходу Шестого оценочного доклада МГЭИК [15] была разработана группа сценариев антропогенного воздействия на атмосферу и климат SSP [16, 17], в которых предлагаются различные траектории динамики эмиссии парниковых газов в зависимости от целевого уровня воздействия к 2100 г. и путей мирового социально-экономического развития. В настоящей работе намеренно не рассматриваются наиболее агрессивные из них – SSP3-7.0 и SSP5-8.5, предполагающие сохранение и даже ускорение роста антропогенных выбросов, а также неоправданно оптимистический SSP1-1.9, нацеленный на достижение климатической нейтральности уже к 2050 г.

⁸ Сведение лесов – вырубка лесов и подлеска для увеличения сельскохозяйственных площадей, а также для использования древесины в промышленных или строительных целях.

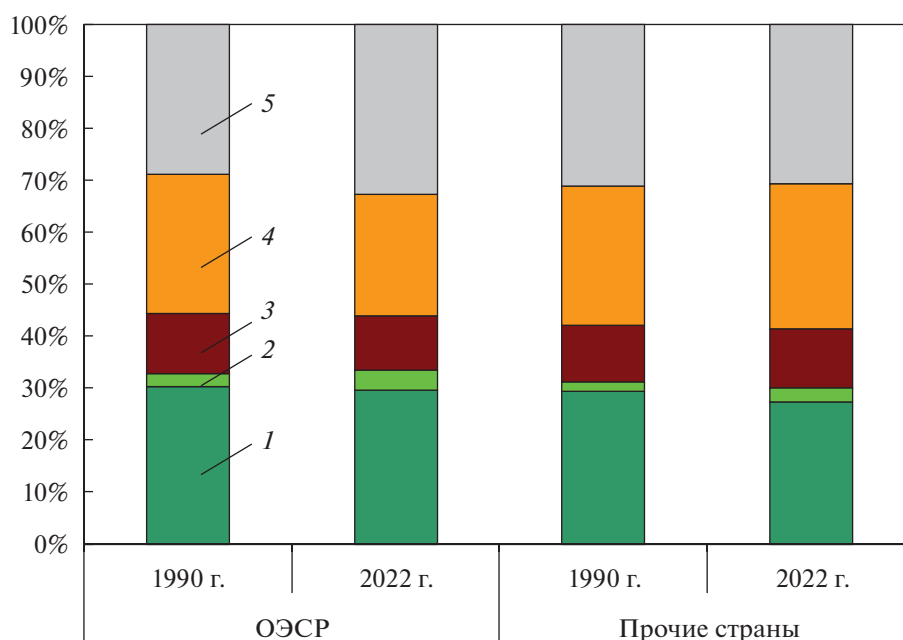


Рис. 6. Структура землепользования в развитых (ОЭСР) и прочих странах в 1990 и 2022 гг. по данным FAO⁹.
1 – естественные леса; 2 – посаженные леса; 3 – пахотные земли; 4 – другие сельскохозяйственные земли; 5 – остальные земли

мере обеспечен геологическими ресурсами для осуществления подобных проектов (табл. 2).

На основании этих данных были разработаны два сценария развития захвата и захоронения диоксида углерода – исторический и интенсивный (NetZero Historical и NetZero Intensive) (рис. 8). Исторический сценарий предполагает достижение углеродной нейтральности (с учетом поглощения CO₂ в ЗИЗЛХ) к концу следующего столетия. Для этого необходимо увеличение мощностей CCS в ближайшие 50 лет со скоростью около 9% в год (что ниже современных темпов роста, равных 11%), которые составят к 2100 г. около 7 Гт/год, что, вместе с примерно таким же объемом стока благодаря ЗИЗЛХ, позволит добиться нетто-эмиссии 10 Гт CO₂-экв. по сравнению с общим объемом производимых ПГ 25 Гт CO₂-экв. В дальнейшем потребность в CCS будет снижаться, что позволит достичь углеродной нейтральности (полной компенсации выбросов стоками) к 2200 г. В период до 2050 г. траектория этого сценария лежит между умеренными сценариями STEPS [13] и Current Trajectory [14], практически совпадая с последним.

Интенсивный сценарий развития CCS нацелен на достижение отрицательной эмиссии ПГ (когда стоки превышают по абсолютной величине выбросы) до конца текущего столетия, в нем

предполагается сохранение современных чрезвычайно высоких темпов роста – около 11% в год с достижением мощностей в 10–11 Гт/год уже к 2075 г. и постепенным снижением до 2–3 Гт/год к концу следующего столетия. В 2050 г. мощности CCS по этому сценарию оказываются несколько ниже оценок радикального сценария APS [13] и почти в 2 раза меньше оценок “нулевого” сценария Net Zero [14], по сути не имеющего шансов на осуществление с позиций исторического опыта. Следует напомнить, что отрицательная эмиссия ПГ является абсолютным императивом, если ми-

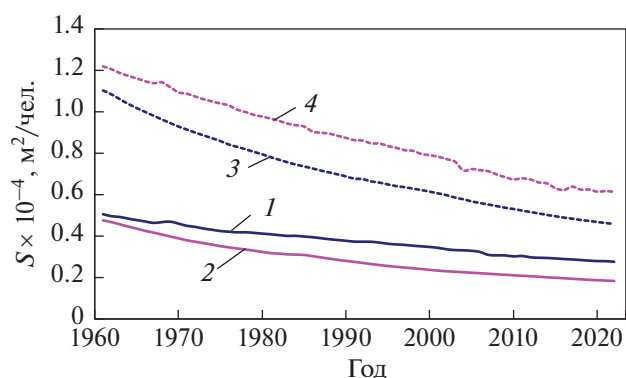


Рис. 7. Площади S пахотных (сплошные линии) и других (пунктирные линии) сельскохозяйственных земель, приходящиеся на душу населения в развитых (1, 3) и прочих (2, 4) странах по данным FAO и ООН

⁹ FAO (United Nations Food and Agriculture Organization) – Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций.

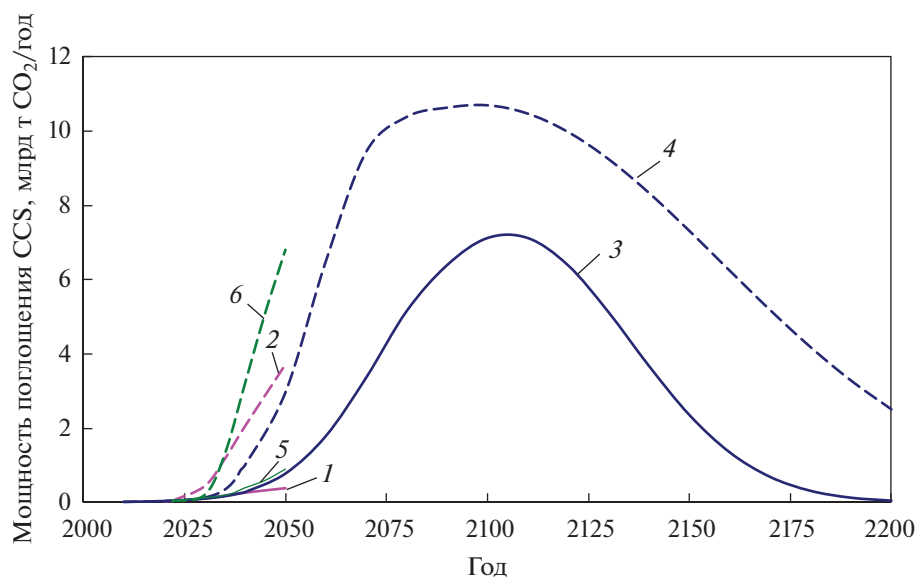


Рис. 8. Динамика изменения мощностей поглощения CCS — история по данным GCCSI¹⁰. Сценарий: 1 — МЭА (2023 г.) STEPS [13]; 2 — МЭА (2023 г.) APS [13]; 3 — NetZero Historical; 4 — NetZero Intensive; 5 — BP (2024 г.) Current Trajectory [14]; 6 — BP (2024 г.) Net Zero [14]

ровое сообщество намерено на горизонте столетия перейти от роста к снижению СГТ.

Исторический сценарий динамики развития мощностей CCS предполагает некоторое снижение темпов их роста с достижением пика поглощения в 7 млрд т/год в начале следующего столетия с последующим постепенным выводом их из эксплуатации (по мере снижения промышленной брутто-эмиссии парниковых газов). В результате мировая климатическая нейтральность может быть достигнута лишь к концу следующего столетия. В период до 2050 г. траектория этого сценария будет находиться несколько выше сценария STEPS [13] и практически полностью совпадать со сценарием Current Trajectory [14].

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА

По разработанным в настоящей работе оценкам антропогенных нетто-выбросов парниковых газов с помощью комбинированной климатической модели [24] в сочетании с моделью глобального углеродного цикла [25] выполнены расчеты изменения концентрации диоксида углерода в атмосфере и изменения СГТ и проведено их сопоставление с другими сценариями: “Париж”¹¹ [26,

27] и “Глазго”¹¹ [3, 4, 28], в которых предполагается реализация решений соответствующих конференций сторон РКИК ООН¹².

Для расчетов использованы сценарии антропогенной промышленной нетто-эмиссии (эмиссия минус захоронение) (indCO_2) и биотических потоков диоксида углерода (bioCO_2), а также радиационные форсинги прочих ПГ (nonCO_2) и тропосферного сульфатного аэрозоля (TSA) антропогенного происхождения, разработанные авторами в настоящей работе и ранее [3, 26–28] (табл. 3 и рис. 9–11). Кроме того, учитывалось влияние основных естественных факторов — солнечной и вулканической активности, а также квазипериодических процессов в системе Мировой океан — атмосфера [24].

Результаты модельных расчетов динамики СГТ по различным сценариям приведены на рис. 12.

Как показывают результаты моделирования, ограничения Парижского соглашения не предотвращают дальнейший рост СГТ до 2.4°C к концу XXI в. и почти 3°C к концу XXII столетия и являются совершенно недостаточными. Между тем, как было указано ранее [27, 28], даже относительно мягкие ограничения в Парижском сценарии выполняются сегодня не в полной мере. Что касается ограничений в рамках пакта “Глазго”, то

¹⁰GCCSI (Global Carbon Capture and Storage Institute) — Всемирный институт улавливания и захоронения углерода.

¹¹В сценарии “Париж” предусматривается сокращение промышленной эмиссии в соответствии с решениями Парижской конференции сторон РКИК в 2015 г., а в сценарии “Глазго” — конференции, состоявшейся в 2021 г. в Глазго.

¹²РКИК ООН — Рамочная конвенция ООН об изменении климата — международное климатическое соглашение о совместной борьбе с последствиями опасного вмешательства человека в естественные природные системы, которое стало причиной глобального изменения климата, принятое на “Саммите Земли” в Рио-де-Жанейро в 1992 г.

Таблица 3. Комбинации сценариев эволюции различных компонентов антропогенного воздействия на климатическую систему indCO_2 , bioCO_2 , nonCO_2 и TSA (потоки диоксида углерода в промышленности и землепользовании, а также прочих парниковых газов и аэрозолей соответственно) для различных сценариев этого воздействия

Сценарий	indCO_2 с CCS	bioCO_2	nonCO_2	TSA
“Париж”	“Париж” [26, 27]	FAOSTAT [25]	“Париж” [26, 27]	“Париж” [26, 27]
“Глазго”	“Глазго” [3, 28]	GEPL'97 [25]	“Глазго” [3, 28]	“Глазго” [3, 28]
NetZero Intensive	Настоящая работа	GEPL'97 [25]	Настоящая работа	“Глазго” [3, 28]
		FAOSTAT [25]	» »	“Глазго” [3, 28]
NetZero Historical	» »	GEPL'97 [25]	» »	“Глазго” [3, 28]
		FAOSTAT [25]	» »	“Глазго” [3, 28]

Примечание. FAOSTAT – вариант того или иного сценария с учетом сохранения текущих темпов восстановления умеренных и прекращения уничтожения тропических лесов; GEPL'97 – вариант того или иного сценария с интенсивным восстановлением умеренных и тропических лесов.

только полная и своевременная их реализация позволит сдержать потепление в пределах желаемых 1.5°C . Однако анализ современных трендов показывает, что сценарий “Глазго” только демонстрирует такую возможность, но на самом деле не может быть осуществлен из-за невозможности сломать развивающиеся исторические тенденции [3, 28]. В настоящее время все еще актуальной видится реализация наиболее радикального сценария NetZero Intensive, при котором температура пройдет свой максимум около 1.8°C в конце нынешнего столетия, а затем будет снижаться до современных значений в результате удаления избыточного CO_2 из атмосферы. Даже при реализации этого наиболее радикального сценария период опасного превышения, а именно пребывания в зоне выше 1.5°C , продлится более столетия. Осуществление же NetZero Histori-

cal приведет к росту СГТ к концу текущего столетия на 2°C сверх доиндустриального значения с сохранением на этом уровне еще в течение не менее 100 лет.

Приведенные расчеты также показывают важность мероприятий по восстановлению лесов. Переход от современных методов лесопользования (вариант FAOSTAT из [25]) к радикальному сокращению рубок и масштабным лесопосадкам (вариант GEPL'97 из [25]) будет способствовать уменьшению глобального потепления примерно на 0.3°C .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 8, 9 представлены полученные в настоящей работе оценки производства и нетто-эмиссии парниковых газов в сопоставлении с

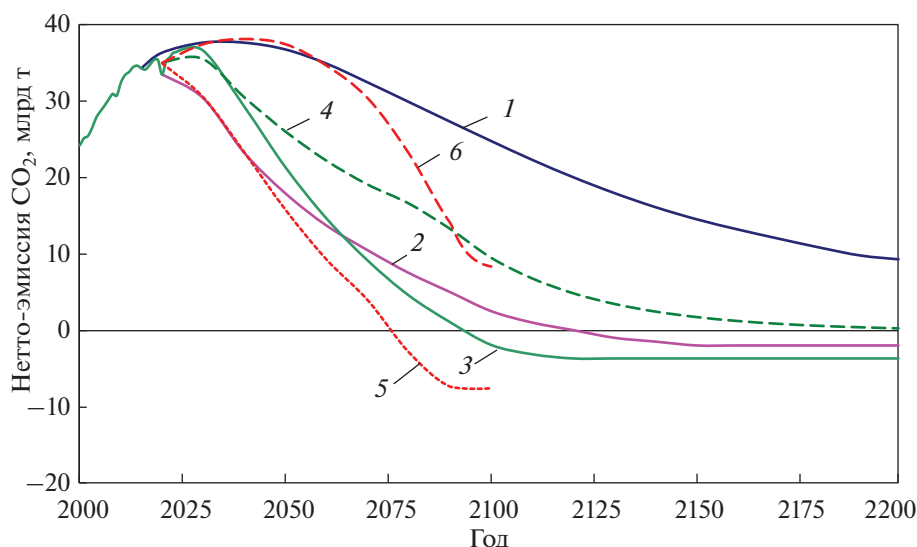


Рис. 9. Динамика индустриальной нетто-эмиссии диоксида углерода (с учетом CCS) – история [11], сценарии [3, 16, 17, 26–28] и настоящей работы (см. табл. 3).

Сценарий: 1 – “Париж” [26, 27]; 2 – “Глазго” [3, 28]; 3 – NetZero Intensive; 4 – NetZero Historical; 5 – SSP1-2.6 [16, 17]; 6 – SSP2-4.5 [16, 17]

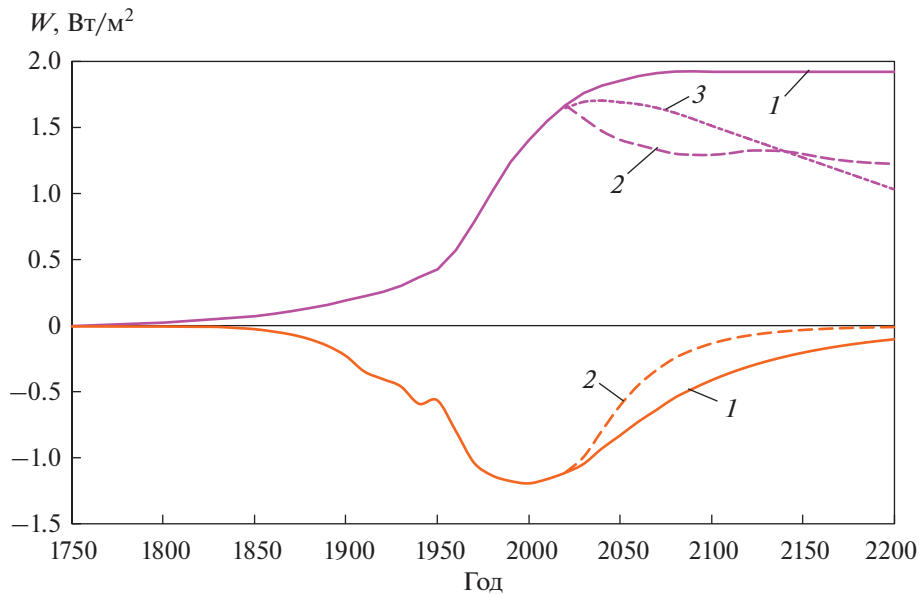


Рис. 10. Динамика форсингов W прочих ПГ (кривые в положительной части графика) и тропосферного сульфатного аэрозоля (кривые в отрицательной части графика). Сценарий: 1 – “Париж”; 2 – “Глазго”; 3 – Net Zero

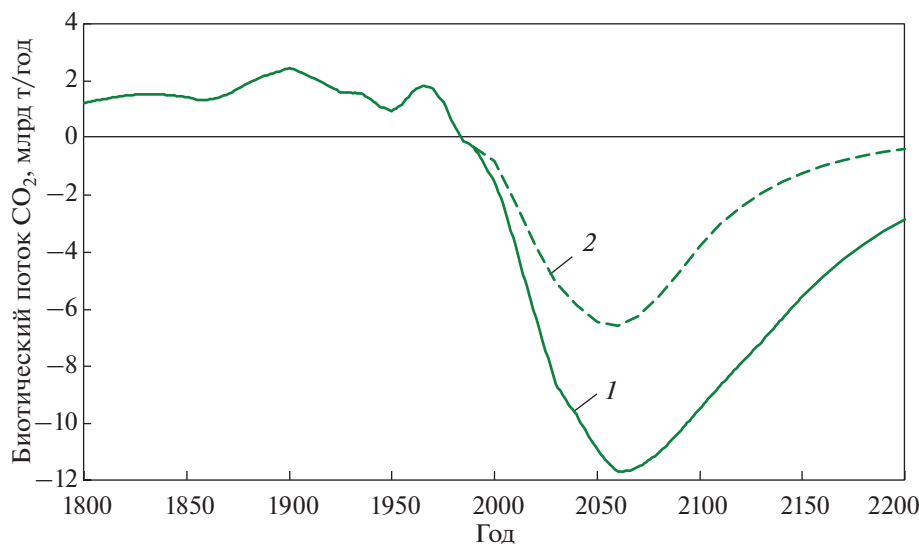


Рис. 11. Динамика изменения биотических потоков углерода за счет лесов и изменений в землепользовании с учетом изменения биопродуктивности: история [15] и сценарии [25] GEPL'97 (1) и FAOSTAT (2)

результатами других исследований, выполненных ведущими мировыми энергетическими агентствами [13, 14], а также академическими институтами в рамках деятельности МГЭИК [16, 17] (см. табл. 1).

Временной горизонт энергетических прогнозов [13, 14] ограничен 2050 г., поэтому этот интервал показан на рис. 13.

Несмотря на принципиальное различие в подходах к моделированию развития энергетики и

других сфер человеческой деятельности, разработанные ранее авторами настоящей статьи сценарии реализации решений конференций сторон РКИК в Париже (2015 г.) и Глазго (2021 г.) хорошо соответствуют низким сценариям SSP2-4.5 и SSP1-2.6 [16, 17] соответственно.

Что касается оценок настоящей работы, то в период до 2050 г. они лежат в гораздо более узком диапазоне — почти посередине между траекториями SSP2-4.5 и SSP1-2.6. Исторический NetZero

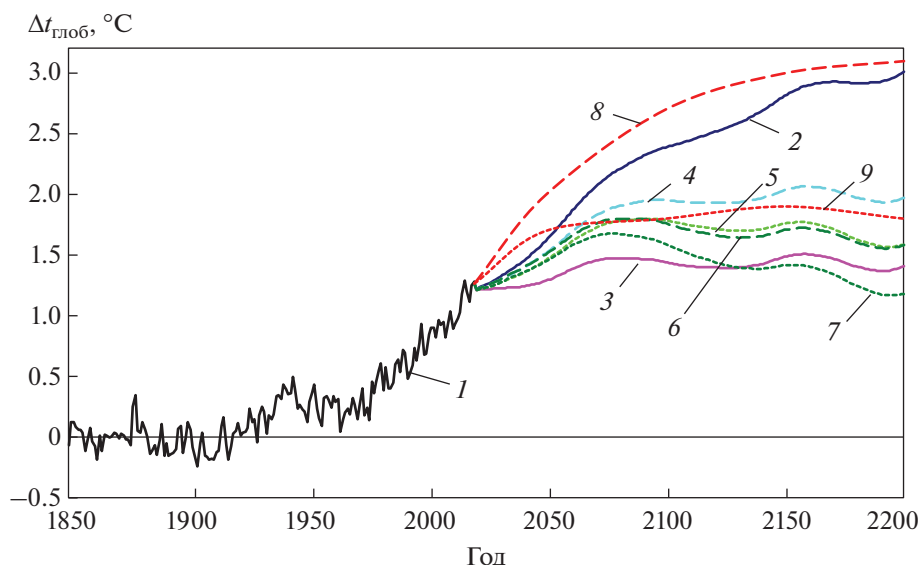


Рис. 12. Динамика изменения СГТ (в отклонениях от среднего значения $\Delta t_{\text{глоб}}$ за 1850–1900 гг.) – история (CRU), модельные расчеты по сценариям настоящей работы и [15, 27, 28] (см. табл. 3).

Сценарий: 1 – CRU; 2 – “Париж” [27]; 3 – “Глазго” [28]; 4 – NetZero Historical FAOSTAT; 5 – NetZero Historical GEPL’97; 6 – NetZero Intensive FAOSTAT; 7 – NetZero Intensive GEPL’97; 8 – SSP2-4.5 [15]; 9 – SSP1-2.6 [15]

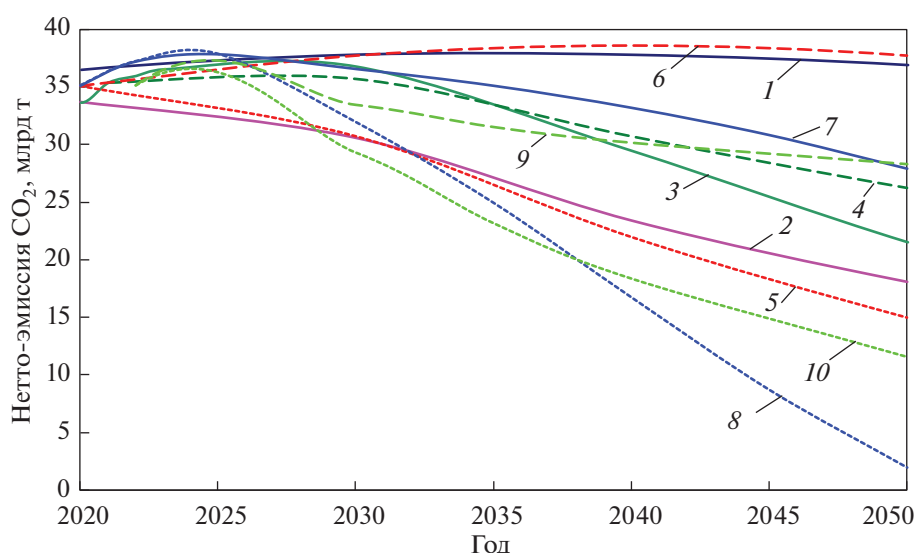


Рис. 13. Индустриальная нетто-эмиссия диоксида углерода (с учетом CCS): SSP1-2.6 и SSP2-4.5 [16, 17], STEPS и APS [13], Current Trajectory и Net Zero [14] и настоящей работы (см. табл. 3).

1 – “Париж”; 2 – “Глазго”; 3 – NetZero Intensive; 4 – NetZero Historical; 5 – SSP1-2.6; 6 – SSP2-4.5; 7 – Current Trajectory; 8 – Net Zero; 9 – STEPS; 10 – APS

Historical примерно соответствует инерционным прогнозам энергетических агентств STEPS [13] и Current Trajectory [14], что говорит о верной интерпретации в рамках настоящей работы действующих тенденций в мировой энергетике и глобальной экономике в целом. Существенные различия наблюдаются при сравнении более радикальных сценариев. Траекториям ускоренной

декарбонизации APS [13] и Net Zero [14] должны соответствовать исключительно высокие темпы снижения нетто-выбросов ПГ с уменьшением их в несколько раз всего за два с половиной десятилетия (в 3 раза для APS и более чем в 10 – для Net Zero). В такой инерционной системе, как энергетика, подобные темпы радикальных изменений практически недостижимы.

На более продолжительном временном интервале (до конца текущего столетия и далее — см. рис. 9) предложенные в настоящей статье сценарии нетто-выбросов ПГ выходят на траектории долговременных сценариев SSP. Эмиссия по сценарию NetZero Historical к 2100 г. практически соответствует оценкам SSP2-4.5, а по сценарию NetZero Intensive, так же как и в варианте SSP1-2.6, уходит в отрицательную область, но только на 20 лет позже.

Результаты расчетов изменения СГТ, выполненных с помощью авторского комплекса моделей глобальной климатической системы [24, 25], приведенные на рис. 12, хорошо соответствуют оценкам [15], полученным в рамках проекта сравнения результатов климатических моделей CMIP6¹³ для указанных сценариев. Так, рост СГТ по сценарию “Париж” соответствует модельным расчетам SSP2-4.5, согласно которым СГТ по сравнению с доиндустриальным уровнем повысится на 2°C к 2050 г. и на 2.7°C к 2100 г. Расчеты настоящей работы для сценария NetZero Historical с обоими вариантами динамики лесопользования (историческим FAOSTAT и интенсивным GEPL'97), а также сценария NetZero Intensive с радикальным лесовосстановлением (вариант GEPL'97) близки к оценкам сценария SSP1-2.6 [15], согласно которым СГТ во второй половине текущего столетия достигнет максимума, превышающего на 1.7–1.8°C доиндустриальное значение. Сценарий NetZero Intensive с радикальным лесовосстановлением (вариант GEPL'97), по расчетам настоящей работы, дает наиболее благоприятный климатический эффект благодаря интенсификации стока углерода, обеспечивающий снижение СГТ в течение следующего столетия до 1.2°C по сравнению с доиндустриальным уровнем, что даже ниже значений сценария “Глазго” [28].

Таким образом, предлагаемый авторами историко-экстраполяционный подход к прогнозированию развития энергетики и других сфер хозяйственной деятельности человека и их влияния на глобальную климатическую систему приводит к результатам, соответствующим другим методам моделирования социотехнических и природных систем.

ВЫВОДЫ

1. Страны обеих групп, как экономически развитые, так и развивающиеся, следуют со значительным опозданием относительно графика сокращения эмиссии CO₂, и ни одна из них не

способна достичь климатической нейтральности в планируемые сроки.

2. В различных релевантных сферах человеческой деятельности, отличающихся значительной инерцией (энергетика, сельское и лесное хозяйство, промышленность), действуют определенные исторические закономерности, которые не позволяют осуществлять желаемые трансформации с произвольными скоростями.

3. Поставленные участниками РКИК цели в области охраны климата превосходят исторические возможности этих стран к трансформации экономики даже в условиях нарастающего климатического риска.

4. Порог условно безопасного потепления в 1.5°C будет неизбежно превышен уже в ближайшие 10 лет, и даже при реализации наиболее радикального сценария контроля над выбросами период этого опасного превышения температуры продлится более столетия.

5. Акцент усилий мирового сообщества должен постепенно смещаться с митигации на адаптацию к беспрецедентным климатическим условиям на основе проактивных мероприятий.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы данные Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК, <https://unfccc.int/>), Центра климатических исследований Университета Восточной Англии (CRU, <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>), базы данных по эмиссии парниковых газов Института мировых ресурсов (WRI, <https://www.wri.org/data/climate-watch-cait-country-greenhouse-gas-emissions-data>), Организации ООН по лесному и сельскому хозяйству (FAO, <http://www.fao.org/faostat/en/#data>), Демографической службы ООН (UN, <https://population.un.org/wpp/>), Всемирного института улавливания и захоронения углерода (GCCSI, <https://www.global-ccsinstitute.com>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schmidt G. Why 2023's heat anomaly is worrying scientists // Nature. 2024. V. 627. P. 467. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00816-z>
2. The Overshoot: Crossing the 1.5°C threshold and finding our way back / D. King, A. Hill, R.W. Corell, Q. Ye, K. Lackner, J. Rockström, L. Whitmarsh, N. Abram, A. Ghosh, L.D. Anadon, L. Rajamani, M. Maslin, F. Denton, C. McGlade, G.A. Luedemann, M. Mazzucato. Cambridge, UK: CCAG, 2023. https://cdn.prod.website-files.com/660df44c73d9da2a5912020a/6621e7c7661fd29dd2a16d3e_18.%20The%20Overshoot%2B-digital.pdf
3. Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Глазго-2021: Трудная дорога к цели в 1.5°C // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 505. № 1.

¹³CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 6) — Международный проект сравнения климатических моделей, 6-й этап.

- С. 66–72.
<https://doi.org/10.31857/S2686740022040046>
4. **Энергетика**, демография, климат — есть ли альтернатива отказу от ископаемого органического топлива? / В.В. Клименко, А.В. Клименко, О.В. Микушина, А.Г. Терешин // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 506. № 2. С. 66–72.
<https://doi.org/10.31857/S2686740022070070>
 5. **Energy** system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States / P. Fragkos, H. L. van Soest, R. Schaeffer, L. Reedman, A. C. Köberle, N. Macaluso, S. Evangelopoulou, A. de Vita, F. Sha, C. Qimin, J. Kejun, R. Mathur, S. Shekhar, R. G. Dewi, S. H. Diego, K. Oshiro et al. // *Energy*. 2021. V. 216. P. 119385.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119385>
 6. **Das A., Ghosh A.** Vision Net Zero: A review of decarbonisation strategies to minimise climate risks of developing countries // *Environ. Dev. Sustainability*. 2023.
<https://doi.org/10.1007/s10668-023-03318-6>
 7. **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** Безуглеродная Россия: есть ли шанс достичь углеродной нейтральности к 2060 году? // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 511. № 1. С. 67–77.
<https://doi.org/10.31857/S2686740023040065>
 8. **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** На пути к климатической нейтральности: выстоит ли русский лес против энергетики? // *Теплоэнергетика*. 2024. № 1. С. 5–20.
<https://doi.org/10.56304/S0040363624010053>
 9. **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** Перспективы достижения углеродной нейтральности экономически развитыми странами // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2024. Т. 517. (в печати).
 10. **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** Перспективы достижения углеродной нейтральности развивающимися странами // *Глобальная энергия*. 2024. (в печати).
 11. **Statistical Review of World Energy 2024**. 73rd ed. L.: Energy Institute, 2024. https://www.energyinst.org/___data/assets/pdf_file/0006/1542714/684_EI_Stat_Review_V16_DIGITAL.pdf.
 12. **World Population Prospects 2024: Summary of Results**. UN DESA/POP/2024. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. N.Y.: UN, 2024.
<https://desapublications.un.org/file/20622/download>
 13. **IEA World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>.
 14. **BP Energy Outlook 2024**. L.: BP p.l.c., 2024.
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2024.pdf>
 15. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock et al. Cambridge, UK; N.Y., USA: Cambridge University Press, 2021. P. 2339–2391.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
 16. **Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century** / M. J. Gidden, K. Riahi, S. J. Smith, S. Fujimori, G. Luderer, E. Kriegler, D. P. van Vuuren, M. van den Berg, L. Feng, D. Klein, K. Calvin, J. C. Doelman, S. Frank, O. Fricko, M. Harmsen et al. // *Geosci. Model Dev*. 2019. V. 12. Is. 4. P. 1443–1475.
<https://doi.org/10.5194/gmd-12-1443-2019>
 17. **The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500** / M. Meinshausen, Z. R. J. Nicholls, J. Lewis, M. J. Gidden, E. Vogel, M. Freund, U. Beyerle, C. Gessner, A. Nauels, N. Bauer, J. G. Canadell, J. S. Daniel, A. John, P. B. Krummel, G. Luderer et al. // *Geosci. Model Dev*. 2019. V. 3. P. 3571–3605.
<https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
 18. **Maximizing carbon sequestration potential in Chinese forests through optimal management** / Z. Yu, S. Liu, H. Li, J. Liang, W. Liu, S. Piao, H. Tian, G. Zhou, C. Lu, W. You, P. Sun, Y. Dong, S. Sitch, E. Agathokleous // *Nature Commun*. 2024. V. 15. No. 1. P. 3154–3166.
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-47143-5>
 19. **Chen X., Wu X.** The roles of carbon capture, utilization and storage in the transition to a low-carbon energy system using a stochastic optimal scheduling approach // *J. Cleaner Prod*. 2022. V. 366. P. 132860.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132860>
 20. **The role of carbon capture and storage to achieve net-zero energy systems: Trade-offs between economics and the environment** / D. Yang Shu, S. Deutz, B.A. Winter, N. Baumgärtner, L. Leenders, A. Bardow // *Renewable Sustainable Energy Rev*. 2023. V. 178. P. 113246.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113246>
 21. **Climate change mitigation measures for global net-zero emissions and the roles of CO₂ capture and utilization and direct air capture** / K. Akimoto, F. Sano, J. Oda, H. Kanaboshi, Y. Nakano // *Energy Clim. Change*. 2021. V. 2. P. 100057.
<https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100057>
 22. **Филиппов С.П., Жданев О.В.** Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2022. № 9. С. 5–21.
<https://doi.org/10.56304/S0040363622090016>
 23. **Developing a consistent database for regional geologic CO₂ storage capacity worldwide** / J. Kearns, G. Teletzke, J. Palmer, H. Thomann, H. Kheshgi, C.H. Yen-Heng, S. Paltsev, H. Herzog et al. // *Energy Procedia*. 2017. V. 114. P. 4697–4709.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1603>
 24. **Klimenko V. V., Mikushina O. V., Tereshin A. G.** A combined model for analysis and projection of the regional air temperature dynamics // *Proc. of the 23rd Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Irkutsk, Russian Federation, 3–7 July 2017. Id. 10466.
<https://doi.org/10.1117/12.2287753>

25. Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Динамика биотических потоков углерода при различных сценариях изменения площади лесов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 462–472.
<https://doi.org/10.31857/S0002351520040033>
26. Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Парижская конференция по климату — поворотный пункт в истории мировой энергетики // Докл. Академии наук. 2016. Т. 468. № 5. С. 521–524.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216170102>
27. Избежать потепления на 2°C — миссия невыполнима / В.В. Клименко, А.В. Клименко, О.В. Микушина, А.Г. Терешин // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 3–8.
<https://doi.org/10.1134/S0040363616090022>
28. Борьба за спасение климата: эйфория планов против холодной реальности / В.В. Клименко, А.В. Клименко, А.Г. Терешин, О.В. Микушина // Теплоэнергетика. 2023. № 3. С. 5–19.
<https://doi.org/10.56304/S0040363623030013>

Zero Carbon World: Is It Possible to Achieve Global Climate Neutrality?

V. V. Klimenko^{a, b, c, d, *}, A. V. Klimenko^b, A. G. Tereshin^{a, b, d}, and O. B. Mikushina^c

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI), Moscow, 111250 Russia

^b National University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia

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

^d Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: nilgpe@mpei.ru

Abstract—The prospects for achieving carbon neutrality in economically developed countries that are members of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) and other countries are examined. An analysis of the energy and land use structure in these countries was carried out. Scenario assessments of the dynamics of changes in carbon indicators of the economies of the countries under study have been developed, and a comparison has been made with forecasts from leading global energy agencies. It has been shown that, at the current rate of decarbonization and development of the carbon capture and storage (CCS) industry, it is impossible for countries in both groups to fulfill their commitments to achieve climate neutrality in 2050–2070; this goal cannot be achieved before the end of this century. The central challenge in achieving climate neutrality is the rapid and large-scale implementation of CCS technologies in all their possible manifestations. Using a set of global climate system models, calculations of the global average temperature (GAT) were performed for the proposed scenarios, and their results were compared with other works. Despite the fact that climate change occupies almost a leading place on the global agenda, the actual results of efforts in this area are far from those declared, and it is now impossible to contain warming to within 1.5°C. The key task is to minimize the time the global climate system remains in the dangerous extreme zone (above 1.5°C), which will require the creation of a global economy with negative greenhouse gas (GHG) emissions.

Keywords: global energy, greenhouse gas emissions and absorption, carbon neutrality, scenarios, model calculations, global average temperature, universal climate model, land use, forestry