

Научная статья

УДК 620.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30302>



В.В. Клименко¹ ✉, А.В. Клименко²,
А.Г. Терешин¹, О.В. Микушина³

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия;

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Москва, Россия;

³ Институт энергетических исследований Российской академии наук,
Москва, Россия

✉ nilgpe@mpei.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ДОСТИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ РАЗВИВАЮЩИМИСЯ СТРАНАМИ

Аннотация. Исследованы перспективы достижения углеродной нейтральности крупнейшими развивающимися странами (Китай, Индия, Индонезия, Бразилия, Иран, Саудовская Аравия). Выполнен анализ структуры энергетики и землепользования в этих странах. Разработаны сценарные оценки динамики углеродных показателей экономик исследуемых стран. Показано, что существующие темпы декарбонизации и развития индустрии улавливания и хранения углерода (CCS) в исследуемых странах не позволяют выполнить их обязательства по достижению климатической нейтральности в 2050–2070 гг. — эта цель не может быть достигнута ранее конца столетия. Центральной проблемой в достижении климатической нейтральности становится быстрое и масштабное внедрение технологий CCS во всех ее возможных проявлениях. Однако из исследованных стран только Китай и Бразилия полагают собственными возможностями для захоронения углерода на период более ста лет. 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.

Ключевые слова: развивающиеся страны, энергетика, эмиссия и поглощение парниковых газов, климатическая нейтральность, сценарии.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в НИУ «МЭИ» (проект «Разработка методов, моделей и программных средств оценки эффективности и надежности энергетических систем и комплексов с использованием климатических данных», соглашение № 20-19-00721-П, <https://rscf.ru/project/20-19-00721/>) в части энергетических исследований и в НИТУ «МИСИС» (проект «Исследование возможностей снижения эмиссии метана и перспектив присоединения России к Глобальному обязательству по метану», соглашение № 23-19-00398, <https://rscf.ru/project/23-19-00398/>) в части исследования улавливания, захоронения и поглощения парниковых газов.

Для цитирования:

Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Перспективы достижения углеродной нейтральности развивающимися странами // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 23–42. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30302>



V.V. Klimenko¹ ✉, A.V. Klimenko²,
A.G. Tereshin¹, O.V. Mikushina³

¹ National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI),
Moscow, Russia;

² National University of Science and Technology (MISIS), Moscow, Russia;

³ The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ERI RAS),
Moscow, Russia

✉ nilgpe@mpei.ru

PROSPECTS FOR ACHIEVING CARBON NEUTRALITY BY DEVELOPING COUNTRIES

Abstract. The article examines the prospects for achieving carbon neutrality by the largest developing countries (China, India, Indonesia, Brazil, Iran, and Saudi Arabia). An analysis of the structure of energy and land use in these countries is carried out. Scenario estimates of the dynamics of carbon indicators for the economies of the countries under study are developed. It is shown that the current pace of decarbonization and development of the carbon capture and storage (CCS) industry in the countries under study do not allow them to fulfill their commitments to achieve climate neutrality in 2050–2070. This goal cannot be achieved before the end of the century. The central challenge in achieving climate neutrality is the rapid and large-scale implementation of CCS technologies in all their possible manifestations. Of the countries under study, however, only China and Brazil have their own carbon storage capabilities for more than a hundred years. 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 declared, and it is no longer possible to keep warming within 1.5°C. The key task is to minimize the time that 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 emissions.

Keywords: developing countries, energy, greenhouse gas emissions and absorption, climate neutrality, scenarios.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation: in terms of energy research – project “Development of methods, models and software for assessing the efficiency and reliability of energy systems and complexes using climate data” (MPEI, agreement No. 20-19-00721-P, available online: <https://rscf.ru/project/20-19-00721/>) and in terms of the study of the capture, storage and absorption of greenhouse gases – project “Study of the possibilities of reducing methane emissions and the prospects for Russia’s accession to the Global Methane Pledge” (MISIS, agreement No. 23-19-00398, available online: <https://rscf.ru/project/23-19-00398/>).

Citation:

V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.V. Mikushina, Prospects for achieving carbon neutrality by developing countries, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 23–42, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30302>

Введение. 2023 год оказался самым теплым в истории инструментальных наблюдений и завершился установлением поразительного рекорда среднеглобальной температуры, превысившей (по данным Climate Research Unit, CRU) доиндустриальный (1850–1900 гг.) уровень на 1,46°C. При этом прежний рекорд 2016 г. был превышен сразу на 0,17°C, что является беспрецедентным событием за всю эпоху инструментальных наблюдений и вызывает серьезную тревогу мировой научной общественности [1]. В 2024 г. каскад рекордов продолжился, и к настоящему времени зафиксирована уникальная 13-месячная (июнь 2023 г. – июнь 2024 г.) серия ежемесячных максимумов.

В итоге средняя температура некалендарного года (июль 2023 г. – июнь 2024 г.) оказалась выше доиндустриального уровня на $1,59^{\circ}\text{C}$, преодолев тем самым первый критический рубеж, обозначенный Парижским соглашением. И хотя пока это лишь температура одного года, произошедшее событие является важным сигналом и тревожным посланием мировому сообществу, что опасный уровень потепления находится совсем рядом. Несмотря на то, что мощный Эль-Ниньо¹, в значительной мере ставший причиной прошлогоднего резкого всплеска температуры, завершился еще в мае 2024 г., температура не снижается, и 2024 год станет свидетелем нового рекорда. Климатически значимая средняя за десятилетие (2015–2024 гг.) аномалия среднеглобальной температуры составит, по предварительным данным, $1,26^{\circ}\text{C}$, и таким образом мир окажется в шаге от достижения рубежа в $1,5^{\circ}\text{C}$, что однозначно рассматривается мировым сообществом как крайне нежелательное событие [2]. При сохранении достигнутых за последние 30 лет скоростей потепления примерно в $0,2^{\circ}\text{C}$ за декаду следует ожидать, что критический рубеж будет преодолен уже в середине 2030-х гг. В сложившейся ситуации оптимальным и все еще возможным выглядит сценарий временного превышения (the Overshoot) рубежа в $1,5^{\circ}\text{C}$ с достижением пика потепления и последующим снижением температуры в результате последовательного осуществления инициатив саммитов в Глазго (2021) и Дубае (2023) [3] либо реализации низких демографических сценариев [4]. Превышение 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 за последние 30 лет предпринимает значительные усилия для борьбы с опасным потеплением, и центральное место в них занимают мероприятия по сокращению эмиссии парниковых газов (ПГ), целью которых видится достижение так называемой климатической нейтральности, когда эмиссия ПГ уравнивается их стоком в естественные или антропогенные резервуары [5–6].

В своих недавних работах [7–11] авторы исследовали возможности решения ведущими экономиками мира и Россией поставленных задач в области охраны климата – достижения к 2050–2060 гг. углеродной нейтральности национальных экономик. Нами было показано, что, несмотря на существенный потенциал снижения выбросов парниковых газов в различных отраслях экономики, как Россия, так и страны Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) сталкиваются со значительными затруднениями в решении поставленных задач.

В настоящей работе мы исследуем возможности развивающихся стран, которые в ближайшем будущем станут основой мировой экономики, достичь своих целей в установленные ими сроки. Избранные шесть стран (табл. 1), по данным Института мировых ресурсов (World Resources Institute, WRI), в настоящее время ответственны почти за половину глобальной эмиссии парниковых газов, и траектории их развития в решающей степени определяют возможность реализации Парижского соглашения об ограничении глобального потепления рубежом «значительно ниже 2°C и желательного в пределах $1,5^{\circ}\text{C}$ ».

Как видно из табл. 1, все указанные страны, кроме Ирана², поставили целью достичь климатической нейтральности в 2050–2070 гг. с прохождением пика эмиссии ПГ до 2030 г. Цель настоящей работы – выяснить, насколько велики шансы избранных стран на реализацию столь амбициозных планов.

История и современное состояние

Все избранные страны характеризуются существенным ростом эмиссии ПГ за последние десятилетия (рис. 1), лишь в Иране и Саудовской Аравии за последние 5–7 лет наметилась

¹ Эль-Ниньо – иррегулярное (один раз в 3–7 лет) повышение температуры воды в тропической части Тихого океана, основная причина межгодовых колебаний среднеглобальной температуры.

² Иран ставит принятие обязательств по ограничению эмиссии ПГ и достижению климатической нейтральности в зависимости от отмены экономических санкций.

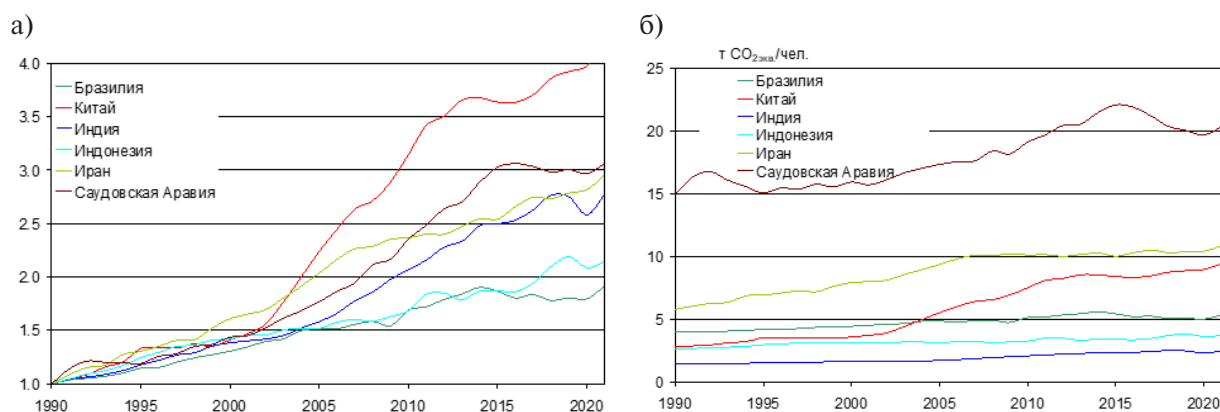


Рис. 1. Эмиссия ПГ (без учета ЗИЗЛХ) – валовая относительно уровня 1990 г. (а) и на душу населения (б) (по данным WRI и Демографической службы ООН)

Fig. 1. GHG emissions (excluding LULUCF) – gross, relative to 1990 (a) and per capita (b) (according to WRI and UN)

Таблица 1

Добровольные обязательства по снижению нетто-эмиссии парниковых газов сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК)

Table 1

Voluntary commitments to reduce net greenhouse gas emissions of parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

Сторона РКИК	Базовый год	Эмиссия, в % к базовому году		Год достижения	
		в 2030 г.	в 2050 г.	пика эмиссии	климатической нейтральности
Бразилия	2008	47			
Китай	2005	175	55	до 2030	2060
Индия	2005	100	62	до 2025	2070
Индонезия	2010	95	50	2030	2060
Иран	2010				
Саудовская Аравия	2020	61		2016	2060

стабилизация этого показателя. Темпы роста удельной (на душу населения) эмиссии значительно ниже, и стабилизация этого показателя заметна уже во всех странах, а в Бразилии и Саудовской Аравии наблюдается его снижение.

Наземная биота за счет землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) (рис. 2) может быть как нетто-стоком (Китай и Индия, где расширенное лесовосстановление превышает убыль лесов за счет вырубок и пожаров), так и нетто-источником ПГ (Бразилия и Индонезия, где продолжающееся масштабное сведение тропических лесов не компенсируется посадками). Эмиссия диоксида углерода из сектора ЗИЗЛХ Индонезии за последние 20 лет вообще составляла почти 50%, а в Бразилии – около 30% от общей национальной эмиссии.

Интенсивность выбросов основного ПГ – диоксида углерода – в значительной мере определяется объемом энергопотребления и структурой топливно-энергетического баланса (рис. 3). На долю производства цемента в исследуемых странах приходится не более 5% от общей эмиссии CO₂.

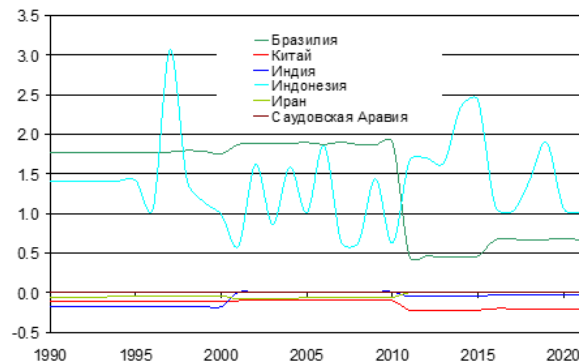


Рис. 2. Эмиссия/сток ПГ за счет ЗИЗЛХ (по отношению к 1990 г.) (по данным WRI)

Fig. 2. GHG emissions/absorption from LULUCF (relative to 1990) (according to WRI)

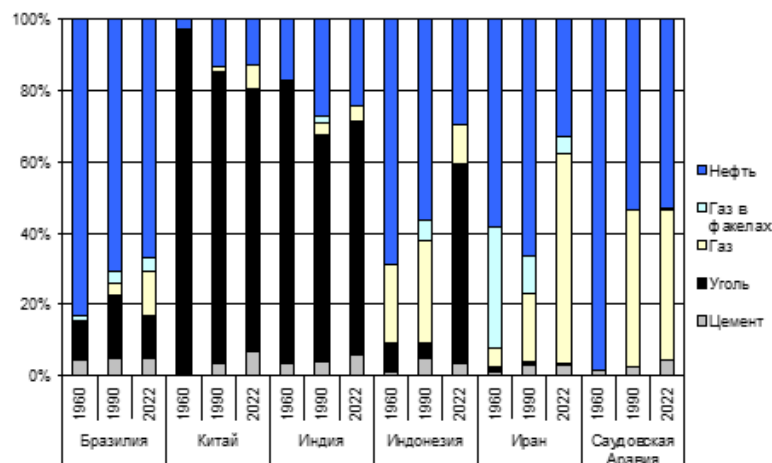


Рис. 3. Структура выбросов CO₂ от сжигания различных видов топлива и производства цемента (по данным WRI)

Fig. 3. Structure of CO₂ emissions from the fossil fuel combustion and cement production (according to WRI)

Как все бурно развивающиеся национальные экономики, исследуемые страны характеризуются интенсивным ростом энергопотребления (рис. 4а). Так, за период 1990–2022 гг. валовое потребление первичной энергии в Китае увеличилось почти в 5,5 раз, в Индии, Индонезии и Иране – в 4–4,5 раза, в Бразилии и Саудовской Аравии – в 2,5–3,5 раза.

Динамика удельных показателей энергопотребления (рис. 4б) выглядит более сдержанно. В Китае, Бразилии и Саудовской Аравии за последние годы наблюдается стабилизация и даже некоторое снижение этого показателя, а в Индии, Индонезии и Иране темпы роста заметно снизились.

Существенные различия имеются в структуре топливно-энергетического баланса (рис. 5а).

Энергетика Китая, Индии и Индонезии преимущественно основана на угле. При этом за последние 60 лет доля этого ископаемого топлива в национальном топливно-энергетическом балансе Китая и Индии планомерно снижалась, составив в 2022 г. около 55%, в то время как в Индонезии, напротив, она выросла до 45%. На безуглеродные источники энергии (ГЭС, АЭС, а также возобновляемые источники энергии – ВИЭ) в этих трех странах приходится 5–15% суммарного энергопотребления, и их доля в энергобалансе постоянно растет. Эта тенденция в ближайшие десятилетия обретет мощный дополнительный импульс – так, Китай, являясь абсолютным мировым лидером

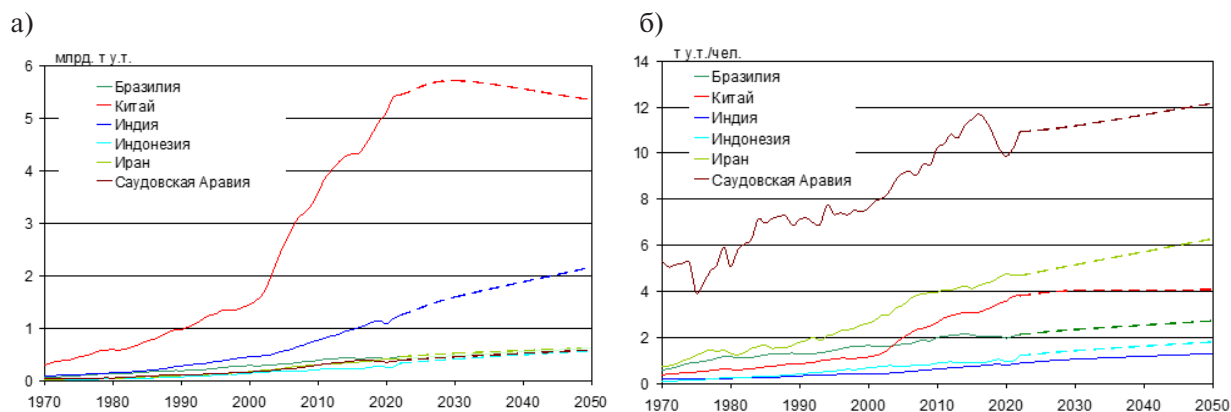


Рис. 4. Потребление первичной энергии – валовое (а) и на душу населения (б) (по историческим данным [12] и ООН и сценарию STEPS³ [13, 14])

Fig. 4. Primary energy consumption – gross (a) and per capita (b) (according to historical data [12] and UN and the STEPS scenario³ [13, 14])

по вводу безуглеродных источников энергии, намерен уже к 2028 г. производить 50% электроэнергии с помощью ВИЭ (включая ГЭС).

Основным источником энергии нефтегазодобывающих Ирана и Саудовской Аравии являются углеводороды, причем за последние 60 лет наблюдается явная тенденция перехода от нефти к газу, доля которого к 2022 г. в Саудовской Аравии достигла почти 40%, а в Иране – 70%. Безуглеродные источники энергии в этих странах сегодня практически не дают вклада в энергобаланс.

Наиболее сбалансированным энергетическим комплексом обладает Бразилия, почти половина энергопотребления которой в настоящее время обеспечивается гидроэнергетикой, доля нефти снизилась до 40%, доля газа увеличилась до 10%, в то время как на уголь приходится не более 5% энергобаланса.

В электроэнергетике (рис. 5б) картина еще ярче. В Иране и Саудовской Аравии практически вся электроэнергия вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС), сжигающих природный газ и нефтетопливо. В Индии и Индонезии около 20% электрогенерации приходится на безуглеродные источники (ГЭС, АЭС и ВИЭ), остальное обеспечивается угольными ТЭС. В Китае более трети выработки электростанций происходит без сжигания органического топлива, теплоэнергетика в качестве топлива преимущественно использует уголь. Бразилия почти 90% своей электроэнергии производит за счет ГЭС, ВИЭ и АЭС, являясь одним из мировых лидеров по безуглеродной электроэнергетике.

Объем и структура энергопотребления определяют масштаб выбросов диоксида углерода в энергетике (рис. 6). Валовая эмиссия CO₂ в исследуемых странах (рис. 6а) растет меньшими темпами, чем энергопотребление (рис. 4а), что объясняется ростом доли низкоуглеродных (природный газ) и безуглеродных (ГЭС, АЭС, ВИЭ) источников энергии в энергобалансах.

В результате во всех исследуемых странах наблюдается снижение удельных (на единицу потребляемой первичной энергии) выбросов углекислого газа (рис. 6б), называемых углеродной интенсивностью, или карбоноемкостью энергопотребления.

В Бразилии этот процесс интенсивно протекал еще в 1970-е гг. за счет строительства больших ГЭС, в результате чего энергоемкость ее энергетики вот уже более 40 лет находится на очень

³ В последнем прогнозе Международного энергетического агентства (МЭА, International Energy Agency, IEA) [13] рассматриваются два сценария – STEPS (Stated Policies Scenario), ориентирующийся на уже действующие программы декарбонизации национальных экономик, и APS (Announced Pledges Scenario), предполагающий достижение национальных целей, согласно Парижскому соглашению, своевременно и в полной мере.

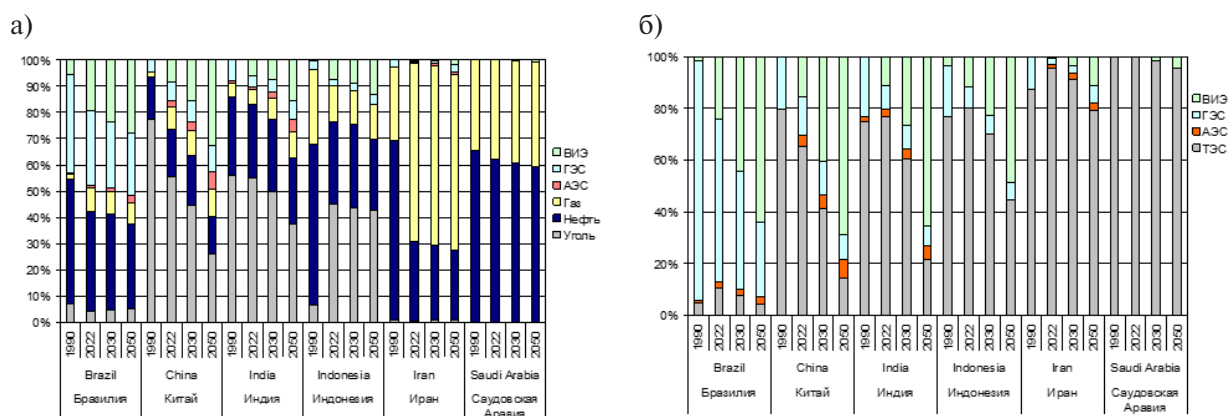


Рис. 5. Структура энергопотребления (а) и производства электроэнергии (б) (по историческим данным [12] и сценарию STEPS [13])

Fig. 5. Structure of primary energy consumption (a) and electricity production (b) (according to historical data [12] and the STEPS scenario [13])

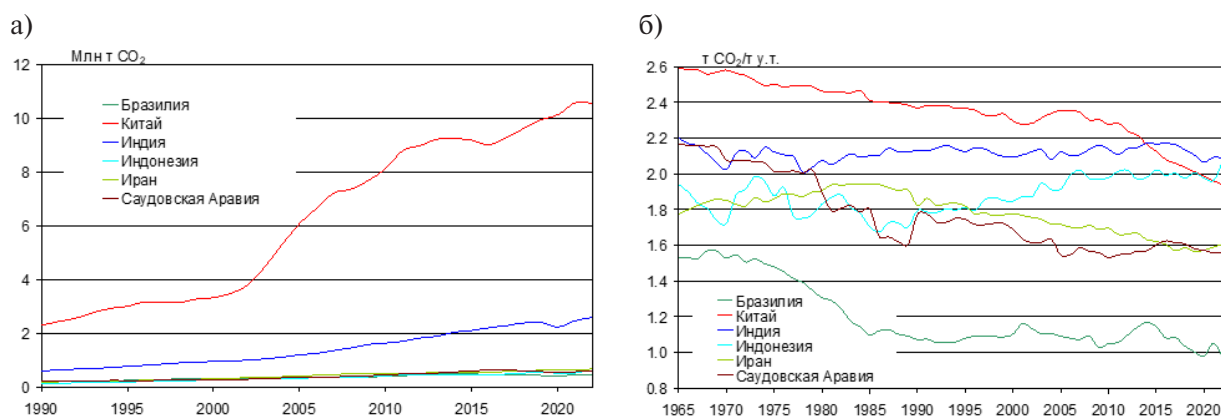


Рис. 6. Выбросы диоксида углерода в энергетике – валовые (а) и на единицу первичной энергии (б) (по данным [12])

Fig. 6. Carbon dioxide emissions in the energy sector – gross (a) and per unit of primary energy (b) (according to [12])

низком уровне в $1,0 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$, что существенно ниже, чем в ЕС или США. Иран и Саудовская Аравия последние десятилетия постоянно снижают углеродную интенсивность своего энергопотребления благодаря замещению в своем энергобалансе нефти природным газом, в результате чего удельные выбросы снизились с $1,9 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 1980 г. до $1,6 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 2022 г., что заметно ниже среднемирового значения в $1,75 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$

Китай также планомерно снижает удельные выбросы в национальной энергетике, до 2005 г. – в основном за счет ввода крупных ГЭС и АЭС, а последние два десятилетия – еще более высокими темпами за счет масштабного строительства солнечных и ветровых электростанций. Следствием такой перестройки энергетики стало снижение удельных выбросов с $2,57 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 1970 г. до $2,35 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 2005 г. и до $1,94 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 2022 г. Рис. 4б показывает, что энергетика является весьма инерционной сферой экономики, и для достижения значимых результатов здесь требуются десятилетия.

Сектор землепользования является еще более инерционным, чем энергетика, и также важен для обеспечения базовых потребностей населения. Данные Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (Food and Agriculture Organization, FAO) с 1961 г. (рис. 7а) свидетельствуют

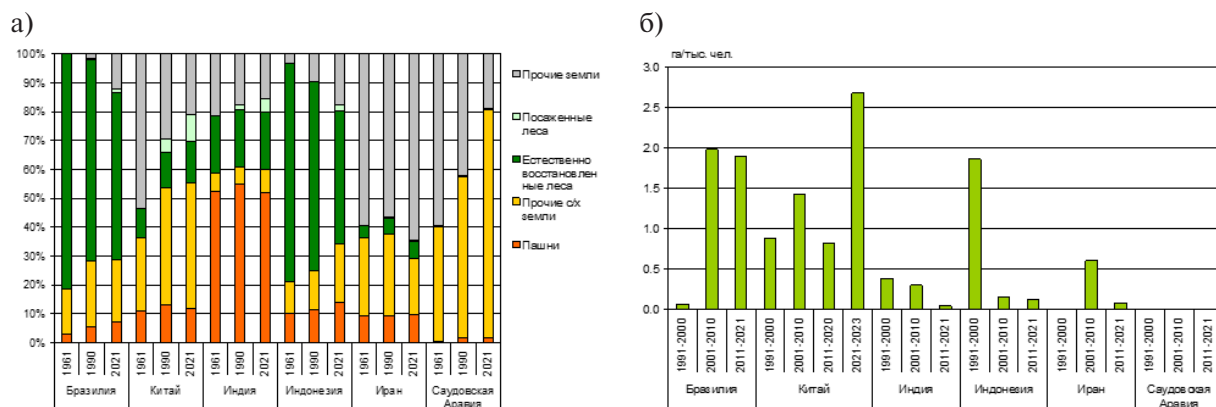


Рис. 7. Структура землепользования (а) и площадей лесопосадок, приходящихся на душу населения (б) (по данным FAO)

Fig. 7. Structure of land use (a) and forest planted areas per capita (b) (according to FAO)

о замедлении скорости роста площади сельскохозяйственных земель, в том числе пашен, во всех рассматриваемых странах, причем в тропических странах (Бразилия и Индонезия) это происходит за счет сведения лесов. Рост площади лесов отмечается в Индии, Иране и в особенности в Китае, в том числе за счет масштабных лесопосадок (рис. 7б). Мероприятия по лесовосстановлению в Бразилии и Индонезии сегодня находятся в зачаточной стадии и пока не могут компенсировать вырубку, в том числе часто нелегальные.

В результате площадь лесов увеличивается только в Индии, Китае и Иране (на 15%, 20% и 40% по сравнению с 1990 г. соответственно) и продолжает сокращаться в Бразилии и Индонезии (на 15% и 22% по сравнению с 1990 г. соответственно) (рис. 8а).

Еще одной важной тенденцией является снижение удельных площадей пашен, приходящихся на душу населения (рис. 8б). Развитие сельскохозяйственных технологий приводит к тому, что для обеспечения продовольствием требуется меньшая площадь обрабатываемых земель – в настоящее время на уровне 0,1–0,2 га/чел., что в 2–3 раза меньше, чем 60 лет назад.

Таким образом, современное состояние энергетики и землепользования в исследуемых странах как источников ПГ имеет следующие основные черты:

- сохраняющийся рост валового энергопотребления на фоне стабилизации (и даже снижения в отдельных странах) его удельных показателей (на душу населения);
- снижение углеродной интенсивности энергопотребления за счет перехода к низкоуглеродным (природный газ) и быстрого развития безуглеродных (ГЭС, АЭС, ВИЭ) источников энергии;
- увеличение площади сельскохозяйственных земель (в том числе пашен) при снижении их площадей в расчете на душу населения за счет интенсификации агротехнологий;
- формирование тенденции к росту лесовосстановления, которое в некоторых странах (Китай, Индия) уже превышает объемы вырубок, что ведет к росту площади лесов – основного поглотителя углекислого газа.

Сценарии

Для оценки перспектив декарбонизации экономик развивающихся стран была проанализирована связь темпов изменения удельных выбросов ПГ на душу населения с ВВП на душу населения (рис. 9). В качестве исходных данных были использованы показатели эмиссии ПГ (без учета ЗИЗЛХ) WRI и экономические данные МВФ. Для исследования были выбраны 130 стран с национальными выбросами ПГ более 10 млн т $CO_{2экв}$ /год каждая, страны с нестабильным политическим состоянием (Судан, Сирия, Сомали, Йемен) были исключены из рассмотрения.

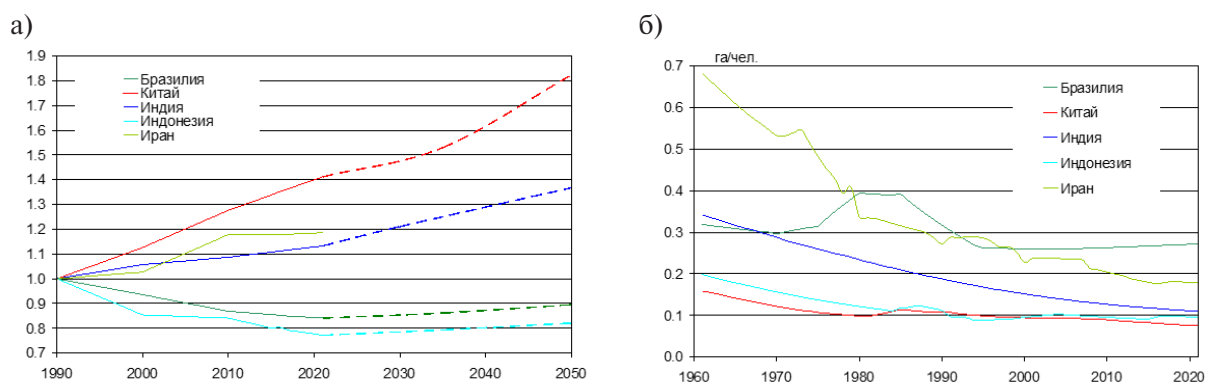


Рис. 8. Площадь лесов относительно уровня 1990 г. (а) и пашни, приходящихся на душу населения (б) (по историческим данным ФАО и национальным планам⁴)

Fig. 8. Forest area relative to 1990 level (a) and arable land per capita (b) (according to FAO historical data and national plans⁴)

Как и следовало ожидать, низкие душевые показатели ВВП не способствуют снижению карбоноёмкости экономики – для стран с удельным ВВП ниже примерно 10 тыс. долл. США/чел. преимущественно характерен рост удельных выбросов ПГ на душу населения. Здесь приоритетной задачей правительств является борьба с бедностью, а экологические проблемы, в частности проблемы ограничения выбросов ПГ, неизбежно отходят на второй план. В то же время при превышении уровнем жизни порога в 14 тыс. долл. США/чел. (эта величина совпадает с условной границей, отделяющей богатые и бедные страны по терминологии МВФ) наблюдается практически линейная зависимость темпов снижения удельных выбросов ПГ от удельного ВВП. Очевидно, что более богатые страны уже могут себе это позволить и охотно вкладывают средства в энергопереход и декарбонизацию экономики.

Для оценки возможностей декарбонизации исследуемых стран в ближайшие десятилетия в рамках предложенного подхода были использованы средний сценарий численности населения [14] и долгосрочный экономический прогноз группы Goldman Sachs [16]. По данным МВФ (рис. 9а), в настоящее время лишь Саудовская Аравия имеет удельный ВВП более 14 тыс. долл. США/чел. Согласно перспективным оценкам [16], эту планку Китай преодолит к 2030 г., Бразилия и Иран – в 2050 г., а Индонезия – лишь после 2060 г. Индия из-за неконтролируемого роста населения достигнет этого уровня лишь в конце текущего столетия. Полученные оценки динамики удельных выбросов на душу населения приведены на рис. 10, а валовые выбросы – на рис. 11.

Как следует из результатов выполненных расчетов, при сохранении действующих тенденций в сфере охраны климата только Бразилия и Китай способны достичь климатической нейтральности до конца столетия, но со значительным, в 20–40 лет, опозданием относительно декларируемого срока. Для этого Бразилия должна будет решительно отказаться от дальнейшей brutальной вырубке своих лесов и постепенно привести свою лесохозяйственную практику в соответствие с нормами, принятыми в других странах Южной Америки [17], а Китай – поддерживать рекордные темпы декарбонизации энергетики, достигнутые за последние 15 лет. Более

⁴ 2030–2050 Vision. The future of forests and agriculture in Brazil [online] URL: <https://coalizaobr.com.br/wp-content/uploads/2023/05/2030-2050-The-Future-of-Forests-and-Agriculture-in-Brazil.pdf>. Accessed September 19, 2024; Reducing Carbon Emissions | Saudi Green Initiative Target [online] URL: <https://www.greeninitiatives.gov.sa/about-sgi/sgi-targets/reduce-carbon-emissions/>. Accessed September 19, 2024; China sets ambitious forestry development goals for 2050 [online] URL: <https://bioenergyinternational.com/china-sets-ambitious-forestry-development-goals-2050/>. Accessed September 19, 2024; INDONESIA. Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (Indonesia LTS-LCCR 2050) [online] URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Indonesia_LTS-LCCR_2021.pdf. Accessed September 19, 2024; India's Long-Term Low-Carbon Development Strategy [online] URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/India_LTLEDS.pdf. Accessed September 19, 2024.

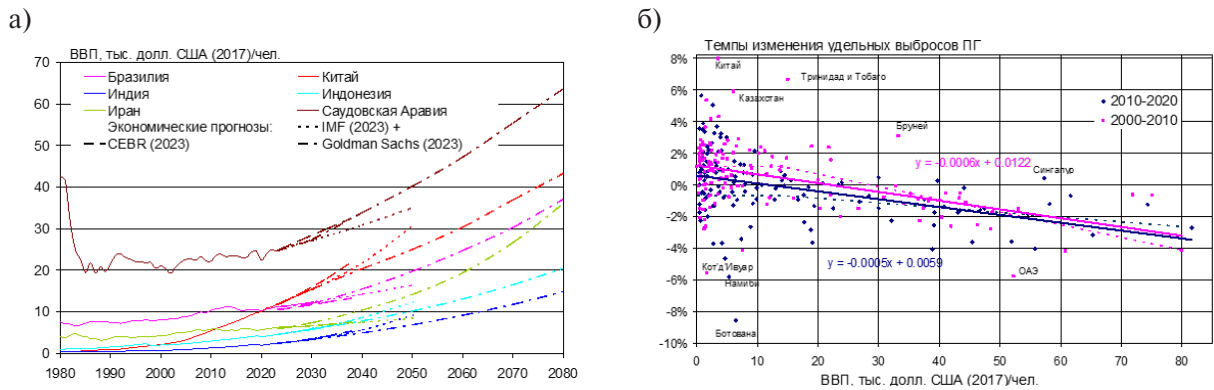


Рис. 9. ВВП на душу населения в постоянных ценах (данные МВФ, [15, 16]) (а) и его взаимосвязь с темпами изменения удельных выбросов ПГ на душу населения (по данным МВФ и WRI) (б)
 Fig. 9. GDP per capita at constant prices (IMF data, [15, 16]) (a) and its relationship with the rate of change in specific GHG emissions per capita (according to IMF and WRI) (b)

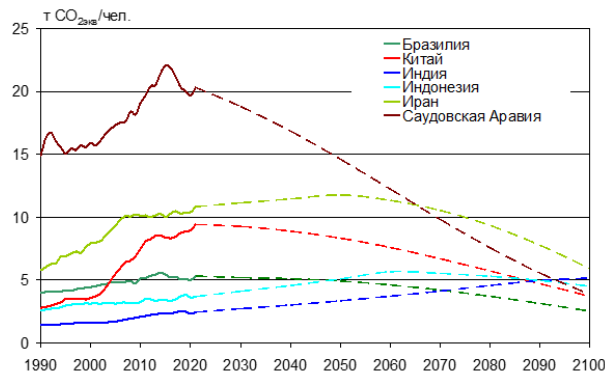


Рис. 10. Динамика удельных (на душу населения) выбросов ПГ
 Fig. 10. Dynamics of specific (per capita) GHG emissions

того, Бразилия остается единственной из больших стран, сохраняющей возможность достичь климатической нейтральности за счет полной активизации своего биологического резервуара углерода. Все другие страны не способны даже к 2100 г., не говоря уже о более ранних сроках, достичь климатической нейтральности, поскольку выбросы ПГ в экономике не компенсируются ростом поглощающей способности лесных насаждений. Современных усилий явно недостаточно – это станет совершенно очевидным уже через пять лет, когда на рубеже 2030 г. выяснится, что Китай, Бразилия и Саудовская Аравия, скорее всего, окажутся на плато выбросов, не приступив еще толком к их снижению, а Индия, Индонезия и Иран нарастят свои выбросы еще на 15–20%. Вообще, хронические неудачи многих стран в осуществлении планов по охране климата связаны с тем, что желаемые скорости трансформации весьма инерционных областей человеческой деятельности, в первую очередь энергетики, по-видимому, превосходят возможности этих стран, сформированные историческим опытом.

Тем не менее потенциал снижения выбросов ПГ в некоторых из рассмотренных экономик весьма значителен – так, к 2080 г. эмиссия ПГ по сравнению с уровнем 1990 г. снизится в Китае на 60%, в Саудовской Аравии – на 50%, а в Бразилии и Иране – на 30%. Индия и Индонезия ввиду сохраняющегося роста населения и отставания в экономическом развитии продолжают увеличивать свои выбросы ПГ вплоть до второй половины столетия, оставаясь их основными эмитентами.

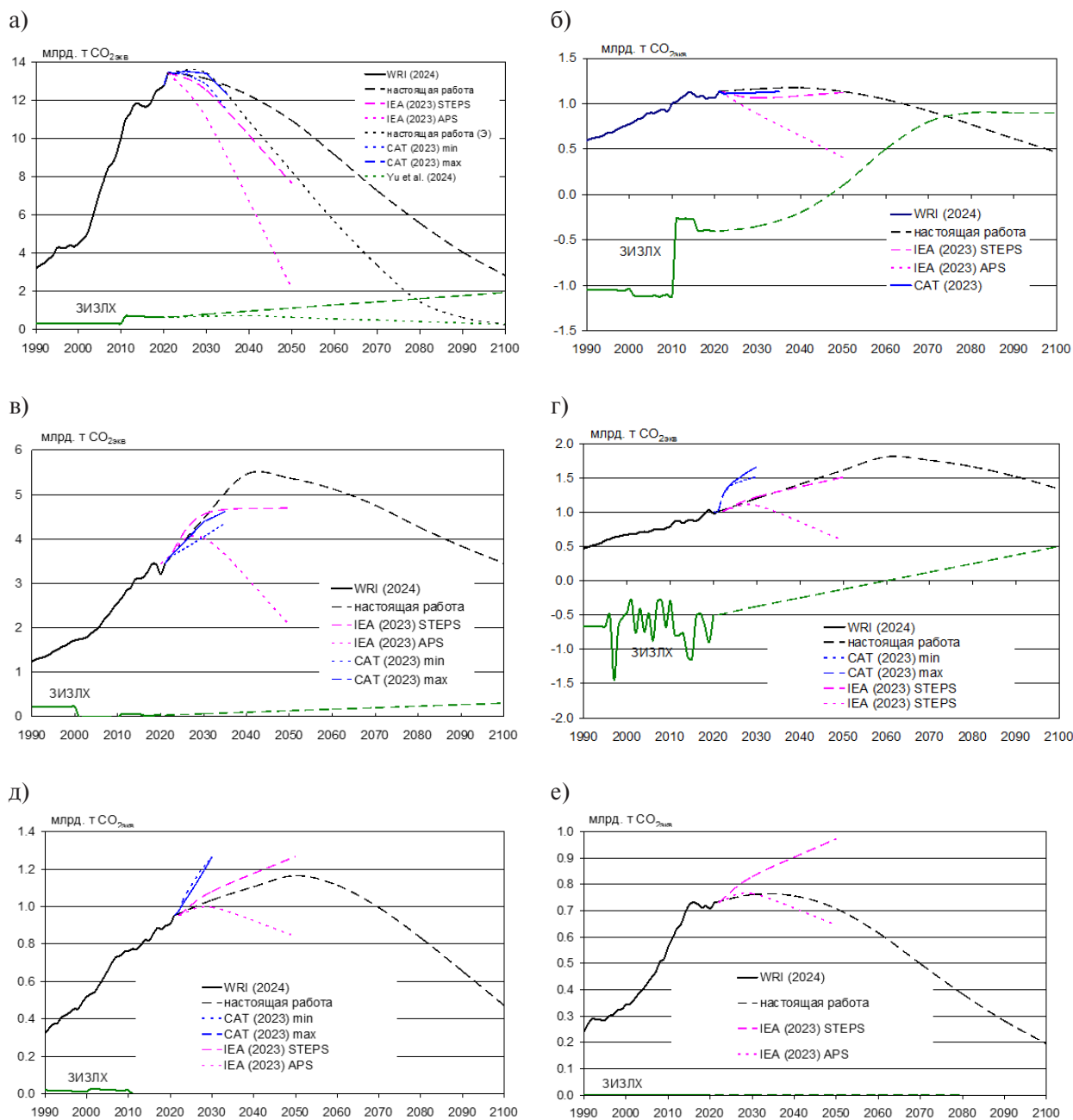


Рис. 11. Динамика валовых выбросов ПГ (без ЗИЗЛХ) и нетто-сток ЗИЗЛХ (по данным WRI и расчетам настоящей работы, а также сценариям IEA [13] и CAT⁵) в Китае (а), Бразилии (б), Индии (в), Индонезии (г), Иране (д) и Саудовской Аравии (е)
 Fig. 11. Dynamics of gross GHG emissions (excluding LULUCF) and net flux of LULUCF (according to WRI data and calculations of present study, as well as IEA [13] and CAT⁵ scenarios) in China (a), Brazil (b), India (c), Indonesia (d), Iran (e) and Saudi Arabia (f)

Возможности увеличения стока углерода в леса также весьма ограничены. Несмотря на амбициозные планы Китая, Индии, Индонезии и Бразилии ([18] и рис. 8) по увеличению площадей лесов в ближайшие десятилетия, их будет явно недостаточно для нейтрализации значительных остаточных выбросов везде, кроме Бразилии. Кроме того, все страны, располагающие значительными

⁵ Climate Action Tracker, Мониторинг действий в защиту климата, <https://climateactiontracker.org>.

лесными ресурсами, за исключением разве что Китая, сталкиваются с упорным сопротивлением бизнеса и повальными нарушениями при исполнении законов, направленных на сохранение лесов.

Таким образом, единственным решением проблемы климатической нейтральности для этих стран являются технологии улавливания и захоронения углекислого газа (carbon capture and storage, CCS) [19–21]. Однако современные оценки геологических ресурсов горных пород для захоронения CO₂ (табл. 2) свидетельствуют о наличии достаточных возможностей лишь у Бразилии, единственной страны, способной депонировать свои выбросы при их современном уровне в течение сотен лет. Если же говорить о горизонте ближайших десятилетий, когда, собственно, и планируется достижение климатической нейтральности, то только Китай имеет перспективные планы реализации проектов CCS достаточной мощности (табл. 3).

Таблица 2

Оценки геологических ресурсов горных пород для захоронения CO₂ по странам и регионам мира, Гт CO₂ [19, 20]

Table 2

Estimates of geological resources for CO₂ storage by country and region of the world, Gt CO₂ [19, 20]

Страна	Нижние оценки			Верхние оценки		
	Суша	Шельф	Всего	Суша	Шельф	Всего
Бразилия	224	73	297	1572	515	2087
Китай	325	78	403	2286	544	2830
Индия	75	24	99	525	172	697
Индонезия	96	67	163	672	472	1144
Иран*	68	22	90	477	156	633
Саудовская Аравия*	89	29	119	629	206	835

* Оценка авторов настоящей работы.

Таблица 3

Емкость Q (Гт CO₂) и мощность G (Мт CO₂/год) действующих, проектируемых и перспективных проектов CCS (по данным OGCI⁶ и [21])

Table 3

Storage Q (Gt CO₂) and capacity G (MtCO₂/year) of operating, projected and prospective CCS projects (according to OGCI and [21])

Страна	Действующие		Проектируемые	Перспективные	Всего
	Q	G	Q	Q	
Бразилия	0,08	3.0	2.47		2.48
Китай		2.3	10.5	3067	3078
Индия			0.84	63.3	64
Индонезия			2.46	13.4	16
Иран	–	–	–	–	–
Саудовская Аравия		1.3	44		44

⁶ OGCI (The Oil and Gas Climate Initiative) – Нефтегазовая климатическая инициатива, <https://www.ogci.com/ccus/>.

Обсуждение результатов

Выполненные расчеты показывают, что ни одна из исследованных стран не способна в ожидаемые сроки достичь углеродной нейтральности без использования технологий CCS, поскольку снижающиеся выбросы ПГ в экономике не компенсируются ростом поглощающей способности лесных насаждений. При этом следует иметь в виду, что интенсивность глобального биотического стока имеет естественный предел не выше 6–9 Гт CO₂ [22] и может начать снижение уже в середине текущего столетия.

В результате реализации политики декарбонизации экономики в исследованных странах эмиссия ПГ к 2080 г., по сравнению с уровнем 2020 г., в Китае снизится на 90%, в Саудовской Аравии – на 50%, в Бразилии и Иране – на 30%. Индия и Индонезия в результате сохранения высоких темпов роста населения и невысокого уровня экономического развития продолжают увеличивать свои выбросы ПГ, которые к 2080 г. превысят современный уровень в 1,2 и 1,7 раз соответственно.

Увеличение поглощения углерода земными экосистемами также имеет свои пределы. Масштабные планы Китая, Индии, Индонезии и Бразилии по увеличению площадей лесов в ближайшие десятилетия хоть и сыграют заметную роль в снижении антропогенных выбросов ПГ, но не смогут полностью их компенсировать (табл. 4).

Таблица 4

Оценки эмиссии (E), поглощения за счет ЗИЗЛХ (S) ПГ и мощности CCS (G), необходимых для достижения климатической нейтральности в ожидаемые сроки, а также требуемых объемов захоронения до 2100 г. (Q_{2100}) и имеющихся геологических резервуаров (Q)

Table 4

Estimates of GHG emissions (E), absorption due to LULUCF (S), and CCS capacity (G) required to achieve climate neutrality within the expected timeframe, as well as required CCS storage volumes up to 2100 (Q_{2100}) and available geological reservoirs (Q)

Страна	Год	E , Гт CO _{2экв} /год	S , Гт CO _{2экв} /год	G , Гт CO _{2экв} /год	Q_{2100} , Гт	Q , Гт
Бразилия	2050	1.07	0.10	0.97	31	224
Китай	2060	5.44	0.56	4.88	257	325
Индия	2070	4.42	0.12	4.30	318	75
Индонезия	2060	1.75	0.00	1.75	194	96
Иран	2080	0.62	0.00	0.62	21	68
Саудовская Аравия	2060	0.60	0.00	0.60	58	89

Единственным решением проблемы климатической нейтральности для всех этих стран являются технологии улавливания и захоронения углекислого газа CCS [23–25]. Хотя современные оценки геологических ресурсов горных пород для захоронения CO₂ (табл. 2) свидетельствуют о наличии таких теоретических возможностей у всех исследуемых стран, инвентаризация действующих, проектируемых и перспективных проектов CCS на ближайшие десятилетия (табл. 3) оставляет в этом списке лишь Китай.

В качестве перспективных объемов геологических хранилищ CO₂ в табл. 4 использованы «нижние» оценки из табл. 2. Результаты простых расчетов показывают, что при условии освоения всех этих громадных резервуаров только Бразилия будет обладать практически неограниченными возможностями по захоронению объемов ПГ, необходимых для достижения и обеспечения в дальнейшем своей климатической нейтральности. Геологические резервуары Китая и Саудовской Аравии способны обеспечить захоронение необходимых объемов ПГ, для выполнения их

климатических обязательств, Индонезия обеспечена ими лишь наполовину, и, наконец, Индия со своими высокими показателями выбросов ПГ и низкой обеспеченностью ресурсами CCS не имеет даже теоретических возможностей для достижения своих климатических целей. Через несколько десятилетий именно Индия займет место Китая в качестве главного эмитента ПГ (рис. 11) и станет основным препятствием на пути осуществления Парижских соглашений.

Чтобы оценить масштабность задач по развитию технологий CCS, следует сравнить полученные оценки их необходимых мощностей из табл. 4 с современными показателями из табл. 3, которые различаются на два порядка. Это означает необходимость безотлагательного создания в течение ближайших двух-трех десятилетий целой отрасли промышленности, по масштабам сравнимой с газовой. Эта новая отрасль, включающая хранилища, трубопроводы и компрессорные станции⁷ [24, 25], должна к 2075 г. располагать мощностью, превышающей 15 Гт CO_{2экв}/год. Современные (2010–2023 гг.) весьма высокие темпы развития индустрии CCS (11% в год [21]) позволяют к 2075 г. достичь в глобальном масштабе мощности захоронения ПГ на уровне 7,5 Гт CO_{2экв}/год, из которых предположительно лишь треть будет размещена в изучаемых странах, чего явно недостаточно для решения поставленных задач (табл. 5). Поэтому следует предполагать, что достижение климатической нейтральности развивающимися странами в целом отодвигается на конец столетия, на 30–40 лет позже ее достижения ведущими странами ОЭСР, которые к этому времени должны будут создать развитую экономику с отрицательными выбросами ПГ для того, чтобы сохранить возможность ограничить потепление 2°C.

Таблица 5

Оценки эмиссии (E), поглощения за счет ЗИЗЛХ (S), захоронения (CCS), а также нетто-эмиссии ($E_{нет}$) ПГ в 2021 и 2100 гг. в России, развитых и развивающихся странах и мире в целом (Гт CO_{2экв}/год)

Table 5

Estimates of GHG emissions (E), absorption due to LULUCF (S), storage (CCS), and net emissions ($E_{нет}$) of GHGs in 2021 and 2100 in Russia, developed and developing countries and the world (Gt CO_{2eq}/year)

Страна	2021	2050					2075					2100				
	E	E	S^{**}	$E_{ост}$	CCS	$E_{нет}$	E	S^{**}	$E_{ост}$	CCS	$E_{нет}$	E	S^{**}	$E_{ост}$	CCS	$E_{нет}$
Россия [7, 9]	2,3	1,6	0,8	0,8	0,0	0,8	1,4	0,8	0,6	0,2	0,4	0,8	0,8	0,0	0,1	-0,1
Шесть развитых стран [10]	10,3	6,5	1,2	5,3	3,0	2,3	3,5	1,2	2,3	3,5	-1,2	2,0	1,2	0,8	3,5	-2,7
Шесть развивающихся стран*	19,7	17,1	0,8	16,4	1,0	15,4	10,8	1,5	9,3	2,5	6,8	5,7	2,0	3,7	3,7	0,0
Прочие страны*	13,7	10,7	0,7	10,0	1,0	9,0	6,7	0,7	6,0	1,3	4,7	3,6	0,7	2,9	2,9	0,0
Мир в целом*	46,1	35,9	3,4	32,5	5,0	27,5	22,4	4,2	18,2	7,5	10,7	12,1	4,7	7,4	10,2	-2,8
STEPS [12]	46,1	37,4	3,4	34,0	0,4	33,6										
APS [12]	46,1	15,2	3,4	11,7	3,7	8,0										

* Оценки настоящей работы.

** Сценарий GEPL1997 [22].

⁷ Official report on CCUS development in China released [online] URL: https://enviliance.com/regions/east-asia/cn/report_3908. Accessed September 19, 2024.

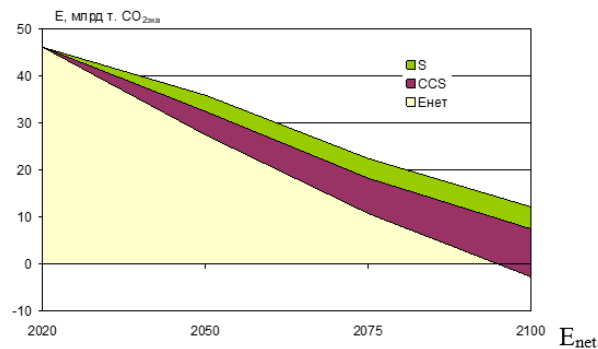


Рис. 12. Динамика мировых валовых выбросов ПГ (без ЗИЗЛХ) (E), нетто-сток за счет ЗИЗЛХ (S), объемы захоронения CCS и остаточная эмиссия E_{net} по расчетам настоящей работы
 Fig. 12. Dynamics of global gross GHG emissions (excluding LULUCF) (E), net flux due to LULUCF (S), CCS storage volumes and residual emission E_{net} according to the calculations of this study

Полученные в настоящей работе оценки выбросов в исследованных странах (рис. 11) на период до 2050 г. близки к сценариям STEPS [13], предполагающим реализацию текущей политики декарбонизации энергетики, что подтверждает плодотворность используемого в настоящей работе подхода. Динамика выбросов ПГ по сценарию APS [13], направленному на реализацию заявленных целей по достижению нулевых нетто-выбросов, предполагает значительно более высокие темпы декарбонизации национальных экономик, не имеющие аналогов в истории.

Также стоит отметить соответствие предложенных в настоящей работе сценариев для Китая, Бразилии и Индии диапазону оценок авторитетного портала анализа климатической политики САТ (рис. 11). В то же время обращают на себя внимание неоправданно завышенные оценки этой организацией будущих выбросов ПГ в Индонезии и Иране (рис. 11), не соответствующие ни текущим трендам, ни прогнозам экспертов [13].

Таким образом, по предложенному в настоящей работе и в [8, 10–11] сценариям мировая эмиссия ПГ к 2050 г. составит 75%, а к 2100 г. – 25% от уровня 2020 г. (рис. 12), что находится примерно посередине между «Парижским» и «Глазго»-сценариями из нашей недавней работы [26]. Как показывают модельные расчеты [26, 27], полная реализация сценария «Глазго» позволяет удержать среднеглобальную температуру в пределах $1,5^{\circ}\text{C}$ от доиндустриального уровня, в то время как по «Парижскому» сценарию к концу текущего столетия она превышает этот уровень на $2,4^{\circ}\text{C}$. В рамках предложенного в настоящей работе довольно оптимистического сценария повышение температуры составит $1,8^{\circ}\text{C}$, и это означает, что период опасного превышения (the Overshoot) будет весьма продолжительным и займет не менее столетия [27].

Сейчас не должно быть сомнений, что нынешние усилия мирового сообщества по достижению климатической нейтральности к середине столетия обречены на неудачу, но они не напрасны. Несмотря на то, что удержать повышение температуры в пределах $1,5^{\circ}\text{C}$ сейчас уже невозможно, реально и все еще достижимо остаться под потолком в 2°C и максимально сократить время пребывания в опасной запределной зоне. По нашим предварительным оценкам, запределный период продлится более столетия, и в это время центральной задачей мирового сообщества станет адаптация к неизведанным ранее условиям и формирование мировой экономики с отрицательными выбросами ПГ. Основы этой экономики создаются сегодня.

Выводы

1. Все исследованные страны следуют со значительным опозданием относительно графика сокращения эмиссии, и ни одна из них не способна достичь климатической нейтральности в означенные сроки.

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

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

4. Потолок условно безопасного потепления в 1,5°C будет неизбежно превышен уже в ближайшее 10 лет, и период опасного превышения 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 об изменении климата (РКИК, <https://unfccc.int/>), базы данных для глобальных исследований атмосферы, 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/>), базы данных Экономического прогноза Мирового валютного фонда (МВФ, <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/>), Всемирного института улавливания и захоронения углерода (GCCSI, <https://www.globalccsinstitute.com>), Нефтегазовой климатической инициативы (OGCI, <https://www.ogci.com/ccus/>), портала мониторинга действий по охране климата Climate Action Tracker (CAT, <https://climateactiontracker.org/>).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Schmidt G. Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly – we could be in uncharted territory // Nature. 2024. Vol. 627. Art. P. 467. DOI: 10.1038/d41586-024-00816-z

[2] King D. et al. The Overshoot: Crossing the 1.5°C threshold and finding our way back. Cambridge, UK: Climate Crisis Advisory Group, 2023. Режим доступа: https://cdn.prod.website-files.com/660df44c73d9da2a5912020a/6621e7c7661fd29dd2a16d3e_18.%20The%20Overshoot%2B-digital.pdf (дата обращения: 19.09.2024).

[3] Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Глазго-2021: Трудная дорога к цели в 1,5°C // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 505. № 1. С. 66–72. DOI: 10.31857/S2686740022040046

[4] Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Энергетика, демография, климат – есть ли альтернатива отказу от ископаемого органического топлива? // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 506. № 2. С. 66–72. DOI: 10.31857/S2686740022070070

[5] Fragkos P., Soest H.L. van, Schaeffer R., Reedman L., Köberle A.C., Macaluso N., Evangelopoulou S., De Vita A., Sha F., Qimin C., Kejun J., Mathur R., Shekhar S., Dewi R.G., Diego S.H., Oshiro K., Fujimori S., Park C., Safonov G., Iyer G. 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 // Energy. 2021. Vol. 216. Art. no. 119385. DOI: 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 // Environment, Development and Sustainability. 2023. DOI: 10.1007/s10668-023-03318-6

[7] Клименко А.В., Терешин А.Г., Прун О.Е. Перспективы России в снижении выбросов парниковых газов // Известия РАН. Энергетика. 2023. № 2. С. 3–15. DOI: 10.31857/S0002331023020036

- [8] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. Безуглеродная Россия: есть ли шанс достичь углеродной нейтральности к 2060 году? // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2023. Т. 511. С. 67–77. DOI: 10.31857/S2686740023040065
- [9] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Локтионов О.А. Дорога к климатической нейтральности: через леса под землю // Энергетическая политика. 2023. Т. 185. № 7. С. 8–25.
- [10] 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. DOI: 10.56304/S0040363624010053
- [11] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. Перспективы достижения углеродной нейтральности экономически развитыми странами // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. Т. 517. С. 162–171.
- [12] Statistical Review of World Energy 2023. London: Energy Institute, 2023. 64 p.
- [13] IEA World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. 355 p.
- [14] World Population Prospects 2022. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022. 52 p.
- [15] World Economic League Table 2024: A world economic league table with forecasts for 190 countries to 2038. London: Centre for Economics and Business Research, 2023. 226 p.
- [16] Daly K., Gedminas T. The Path to 2075 – Slower Global Growth, but Convergence Remains Intact. New York: Goldman Sachs, 2022. 45 p.
- [17] Harris N.L., Gibbs D.A., Vaccini A. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes // Nature Climate Change. 2021. Vol. 11. P. 234–240. DOI: 10.1038/s41558-020-00976-6
- [18] Yu Z., Liu S., Li H. et al. Maximizing carbon sequestration potential in Chinese forests through optimal management // Nature Communications. 2024. Vol. 15. Iss. 1. P. 3154–3166. DOI: 10.1038/s41467-024-47143-5
- [19] Филиппов С.П., Жданеев О.В. Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 9. С. 5–21. DOI: 10.56304/S0040363622090016
- [20] Kearns J., Teletzke G., Palmer J., Thomann H., Kheshgi H., Chen Y.-H.H., Paltsev S., Herzog H. Developing a Consistent Database for Regional Geologic CO₂ Storage Capacity Worldwide // Energy Procedia. 2017. Vol. 114. P. 4697–4709. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1603
- [21] Global Status of CCS Report 2023. Scaling up through 2023. Melbourne: Global Carbon Capture and Storage Institute, 2023. 98 p.
- [22] Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Динамика биотических потоков углерода при различных сценариях изменения площади лесов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 462–472. DOI: 10.31857/S0002351520040033
- [23] Debarre R., Gahlot P., Grillet C., Plaisant M. Carbon Capture Utilization and Storage. Towards Net-Zero. FactBook. Kearney Energy Transition Institute, 2021. 166 p.
- [24] Cai B., Li Q., Zhang X. China Status of CO₂ Capture, Utilization and Storage (CCUS) 2021 – China’s CCUS Pathway. Chinese Academy for Environmental Planning, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, The Administrative Centre for China’s Agenda 21, 2021. 72 p.
- [25] Rao T.J., Pandey K.K. Carbon Capture and Storage (CCS) for India: Bottlenecks and Their Role in Adoption // Future Energy. Green Energy and Technology / ed. by X. Wang. Springer, Cham., 2023. P. 247–254. DOI: 10.1007/978-3-031-33906-6_22
- [26] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Борьба за спасение климата: эйфория планов против холодной реальности // Теплоэнергетика. 2023. № 3. С. 5–19. DOI: 10.56304/S0040363623030013
- [27] Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Безуглеродный мир: возможно ли достижение глобальной климатической нейтральности // Теплоэнергетика. 2024. № 12. (в печати)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЛИМЕНКО Владимир Викторович – главный научный сотрудник, руководитель лаборатории, Национальный исследовательский университет «МЭИ», д-р техн. наук.

E-mail: nilgpe@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1397-1311>

КЛИМЕНКО Александр Викторович – главный научный сотрудник, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», д-р техн. наук.

E-mail: KlimenkoAV@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1376-0864>

ТЕРЕШИН Алексей Германович – ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «МЭИ», д-р техн. наук.

E-mail: TereshinAG@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6864-8792>

МИКУШИНА Ольга Викторовна – старший научный сотрудник, Институт энергетических исследований РАН, канд. техн. наук.

E-mail: MikushinaOV@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1595-1365>

REFERENCES

[1] **G. Schmidt**, Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly – we could be in uncharted territory, *Nature*, 627 (2024) 467. DOI: 10.1038/d41586-024-00816-z

[2] **D. King et al.**, The Overshoot: Crossing the 1.5°C threshold and finding our way back, Climate Crisis Advisory Group, Cambridge, UK, 2023, https://cdn.prod.website-files.com/660df44c73d9da2a5912020a/6621e7c7661fd29dd2a16d3e_18.%20The%2BOvershoot%2B-digital.pdf. Accessed September 19, 2024.

[3] **V.V. Klimenko, O.V. Mikushina, A.G. Tereshin**, Glasgow-2021: The Difficult Road to the 1,5°C Goal, *Doklady Physics*, 67 (7) (2022) 215–221. DOI: 10.1134/S1028335822070023

[4] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, O.V. Mikushina, A.G. Tereshin**, Energy, Demography, Climate – Is There an Alternative to Abandoning Fossil Fuels? *Doklady Physics*, 67 (10) (2022) 433–438. DOI: 10.1134/S102833582210007X

[5] **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, S. Fujimori, C. Park, G. Safonov, G. Iyer**, 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, *Energy*, 216 (2021) 119385. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119385

[6] **A. Das, A. Ghosh**, Vision Net Zero: A review of decarbonisation strategies to minimise climate risks of developing countries, *Environment, Development and Sustainability*, 2023. DOI: 10.1007/s10668-023-03318-6

[7] **A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.E. Prun**, Prospects for Reducing Greenhouse Gas Emissions in Russia, *Izvestiâ Rossiyskoi Akademii nauk SSSR, Ènergetika [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]*, 2 (2023) 3–15. DOI: 10.31857/S0002331023020036

[8] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin**, Carbon-free Russia: Is There a Chance to Achieve Carbon Neutrality by 2060? *Doklady Physics*, 68 (7) (2023) 66–77. DOI: 10.31857/S2686740023040065

[9] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.A. Loktionov**, The road to climate neutrality: Through the forest underground, *Energeticheskaya Politika [Energy Policy]*, 185 (7) (2023) 8–25.

- [10] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin**, Towards Climate Neutrality: Will Russian Forest Stand Against Energy? *Thermal Engineering*, 1 (2024) 5–20. DOI: 10.56304/S0040363624010053
- [11] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin**, Prospects for achieving carbon neutrality by economically developed countries, *Doklady Physics*, 69 (2024) (in press)
- [12] *Statistical Review of World Energy 2023*, Energy Institute, London, 2023.
- [13] *IEA World Energy Outlook 2023*, IEA, Paris, 2023.
- [14] *World Population Prospects 2022*, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, 2022.
- [15] *World Economic League Table 2024: A world economic league table with forecasts for 190 countries to 2038*, Centre for Economics and Business Research, London, 2023.
- [16] **K. Daly, T. Gedminas**, *The Path to 2075 – Slower Global Growth, but Convergence Remains Intact*, Goldman Sachs, New York, 2022.
- [17] **N.L. Harris, D.A. Gibbs, A. Baccini et al.**, Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes, *Nature Climate Change*, 11 (2021) 234–240. DOI: 10.1038/s41558-020-00976-6
- [18] **Z. Yu, S. Liu, H. Li et al.**, Maximizing carbon sequestration potential in Chinese forests through optimal management, *Nature Communications*, 15 (1) (2024) 3154–3166. DOI: 10.1038/s41467-024-47143-5
- [19] **S.P. Filippov, O.V. Zhdaneev**, Opportunities for the application of carbon dioxide capture and storage technologies in case of global economy decarbonization (review), *Thermal Engineering*, 69 (9) (2022) 637–652. DOI: 10.1134/s0040601522090014
- [20] **J. Kearns, G. Teletzke, J. Palmer, H. Thomann, H. Kheshgi, Y.-H.H. Chen, S. Paltsev, H. Herzog**, Developing a Consistent Database for Regional Geologic CO₂ Storage Capacity Worldwide, *Energy Procedia*, 114 (2017) 4697–4709. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1603
- [21] *Global Status of CCS Report 2023. Scaling up through 2023*, Global Carbon Capture and Storage Institute, Melbourne, 2023.
- [22] **V.V. Klimenko, O.V. Mikushina, A.G. Tereshin**, Dynamics of Biotic Carbon Fluxes under Different Scenarios of Forest Area Changes, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 56 (4) (2020) 405–413. DOI: 10.1134/S0001433820040039
- [23] **R. Debarre, P. Gahlot, C. Grillet, M. Plaisant**, *Carbon Capture Utilization and Storage. Towards Net-Zero. FactBook*. Kearney Energy Transition Institute, 2021.
- [24] **B. Cai, Q. Li, X. Zhang**, *China Status of CO₂ Capture, Utilization and Storage (CCUS) 2021 – China’s CCUS Pathway*, Chinese Academy for Environmental Planning, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, The Administrative Centre for China’s Agenda 21, 2021.
- [25] **T.J. Rao, K.K. Pandey**, Carbon Capture and Storage (CCS) for India: Bottlenecks and Their Role in Adoption, X. Wang (ed.), *Future Energy. Green Energy and Technology*, Springer, Cham., (2023) 247–254. DOI: 10.1007/978-3-031-33906-6_22
- [26] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.V. Mikushina**, Struggle for Climate Rescue: The Euphoria of Plans versus Cold Reality, *Thermal Engineering*, 70 (3) (2023) 161–174. DOI: 10.1134/S0040601523030011
- [27] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.V. Mikushina**, Carbon-Free World: Is It Possible to Achieve Global Climate Neutrality, *Thermal Engineering*, 71 (12) (2024) (in press)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vladimir V. KLIMENKO – *National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)*.

E-mail: nilgpe@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1397-1311>

Alexander V. KLIMENKO – *National University of Science and Technology MISIS.*

E-mail: KlimenkoAV@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1376-0864>

Alexei G. TERESHIN – *National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI).*

E-mail: TereshinAG@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6864-8792>

Olga V. MIKUSHINA – *Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: MikushinaOV@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1595-1365>

Поступила: 27.08.2024; Одобрена: 20.09.2024; Принята: 21.09.2024.

Submitted: 27.08.2024; Approved: 20.09.2024; Accepted: 21.09.2024.