

УДК 620.9

ПЕРСПЕКТИВЫ ДОСТИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКИ РАЗВИТЫМИ СТРАНАМИ

© 2024 г. Академик РАН В. В. Клименко^{1,2,3,*},
академик РАН А. В. Клименко², А. Г. Терешин^{1,2}

Поступило 05.03.2024 г.

После доработки 03.06.2024 г.

Принято к публикации 05.06.2024 г.

Исследованы перспективы достижения углеродной нейтральности экономически развитыми странами (США, ЕС, Норвегия, Канада, Япония, Австралия). Выполнен анализ структуры энергетики и землепользования в этих странах. Разработаны сценарные оценки динамики углеродных показателей экономик ведущих стран мира. Показано, что существующие темпы декарбонизации и развития индустрии улавливания и хранения углерода не позволяют гарантировать достижение климатической нейтральности к 2050 г. даже в ведущих экономиках мира. Центральной проблемой в достижении климатической нейтральности становится быстрое и масштабное внедрение технологий улавливания и хранения углерода во всех ее возможных проявлениях. Все исследованные страны, кроме Японии, располагают собственными возможностями для захоронения углерода на период более ста лет. Для достижения климатической нейтральности ведущим странам ОЭСР к 2050 г. необходимо будет обеспечить ежегодное захоронение не менее 6 млрд т CO₂, что почти в 25 раз превосходит их современные мощности (действующие, строящиеся и находящиеся в стадии проектирования). Несмотря на то, что проблема изменения климата занимает едва ли не лидирующее место в мировой повестке, действительные результаты усилий в этой области далеки от декларируемых. Удержать потепление в пределах 1.5°C сейчас уже нереально и при нынешних темпах декарбонизации, достигнутых даже мировыми лидерами, скоро и оборона второго критического рубежа в 2°C окажется под угрозой.

Ключевые слова: экономически развитые страны, энергетика, эмиссия и поглощение парниковых газов, климатическая нейтральность, сценарии

DOI: 10.31857/S2686740024040116, **EDN:** JOMPUK

2023-й год оказался самым теплым в истории инструментальных наблюдений и завершился установлением поразительного рекорда среднеглобальной температуры, превысившей (по данным 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.

Климатически значимая средняя за десятилетие (2014–2023 гг.) аномалия среднеглобальной температуры составила 1.21°C, и, таким образом, мир оказался в шаге от достижения рубежа в 1.5°C, что однозначно рассматривается мировым сообществом как крайне нежелательное событие. При сохранении достигнутых в последние 30 лет скоростей потепления примерно в 0.2°C за декаду следует ожидать, что критический рубеж будет преодолен уже в середине 2030-х гг.

Мировое сообщество в последние 30 лет предпринимает значительные усилия для борьбы с опасным потеплением, и центральное место в них занимают мероприятия по

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

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

³Институт энергетических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: nilgre@mpei.ru

сокращению эмиссии парниковых газов (ПГ), вплоть до достижения т.н. климатической нейтральности, когда эмиссия ПГ уравнивается их стоком в естественные или антропогенные резервуары [1–9].

В своих недавних работах [10–12] авторы исследовали возможности решения Россией поставленной задачи в области охраны климата – достижения к 2060 г. углеродной нейтральности национальной экономики. Нами было показано, что, несмотря на существенный потенциал снижения выбросов парниковых газов в различных отраслях экономики [13–15], наша страна пока значительно отстает от развитых экономик мира по темпам снижения «углеродного следа», что серьезно затрудняет своевременное достижение поставленных задач. К таким же выводам приходят авторы других исследований [16–20].

В настоящей работе мы постараемся найти ответ на вопрос, способны ли страны, которые в настоящее время являются лидерами декарбонизации мировой экономики, достичь своих амбициозных целей в установленные ими сроки (табл. 1).

Для детального анализа нами были выбраны шесть представителей из числа наиболее развитых промышленных стран: США и ЕС (включая Великобританию) как крупнейшие экономики мира, Канада и Норвегия как ведущие экспортеры нефтегазовых энергетических ресурсов, Австралия, для которой уголь является основой национальной энергетики и важной

статьей экспорта, и, наконец, Япония – как технологически высокоразвитая страна, почти лишенная собственных природных энергоресурсов. Основные энергетические показатели избранных для исследования стран приведены в табл. 2. Данные табл. 2 показывают, что, несмотря на постепенное и неуклонное снижение их доли потребления всех видов энергии, избранные страны продолжают занимать видное место в мировом энергобалансе, в сумме представляя около 90% энергетики Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР).

Избранные для исследования страны являются ключевым элементом современного постиндустриального общества, характеризующегося насыщением энергопотребления (рис. 1), когда приходящееся на душу населения потребление первичной энергии (нефть, газ, уголь, электроэнергия ГЭС, АЭС и ВИЭ) стабилизировалось на уровнях, в основном определяемых природно-географическими условиями [22]. Более того, в последние 15–20 лет во всех исследуемых странах наблюдается даже некоторое снижение этого показателя, вызванное не только структурными изменениями в экономике, повышением энергоэффективности, но также климатическими изменениями, в результате которых в странах умеренного и холодного климата происходит уменьшение затрат энергии на отопление.

За период 1990–2022 г. в топливно-энергетическом балансе развитых стран произошли

Таблица 1. Добровольные обязательства по снижению эмиссии парниковых газов сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК) по данным *UNFCCC* (2024)

Сторона РКИК	Базовый год	Эмиссия, в % к базовому году*		Год достижения	
		в 2030 г.	в 2050 г.	пика эмиссии	климатической нейтральности
США	2005	72–74 (48–50)	20 (0)	2007	2050
ЕС	1990	60 (45)	5 (0)	1990	2050
Канада	2005	70 (55–60)	20 (0)	2007	2050
Япония	2005	76 (54)	0	2013	2050
Норвегия	2005	45–50	0	2004	2050
Австралия	2005	72–74	0	2018	2050

*Примечание. Указаны первоначальные (2016 г.) и актуальные (в скобках, по состоянию на 01.03.2024) обязательства стран-участниц РКИК.

Таблица 2. Объемы потребления и добычи различных энергоресурсов по данным [21]

Энерго- носи- тель		Год	Ед. изм.	Канада	США	Норве- гия	Авст- ралия	Япо- ния	ЕС28	6 стран	ОЭСР	Мир в целом
Потребление	Нефть	1990	ЭДж	3.47	33.50	0.38	1.35	10.67	29.03	78.40	85.2	135.64
		2022		4.27	36.15	0.36	2.07	6.61	24.80	74.26	88.0	190.69
		1990	%: от мира	2.6%	24.7%	0.3%	1.0%	7.9%	21.4%	57.8%	62.8%	
		2022		2.2%	19.0%	0.2%	1.1%	3.5%	13.0%	38.9%	46.1%	
	Газ	1990	ЭДж	2.30	18.61	0.08	0.60	1.81	12.46	35.87	36.0	70.13
		2022		4.38	31.72	0.14	1.50	3.62	14.95	56.31	64.7	141.89
		1990	%: от мира	3.3%	26.5%	0.1%	0.9%	2.6%	17.8%	51.1%	51.3%	
		2022		3.1%	22.4%	0.1%	1.1%	2.5%	10.5%	39.7%	45.6%	
	Уголь	1990	ЭДж	1.14	19.22	0.03	1.60	3.27	19.09	44.34	45.6	93.26
		2022		0.39	9.87	0.03	1.55	4.92	7.19	23.94	28.9	161.47
		1990	%: от мира	1.2%	20.6%	0.0%	1.7%	3.5%	20.5%	47.5%	48.9%	
		2022		0.2%	6.1%	0.0%	1.0%	3.0%	4.5%	14.8%	17.9%	
	АЭС	1990	ЭДж	0.74	6.20	—	—	1.99	8.12	17.05	17.7	20.44
		2022		0.78	7.31	—	—	0.47	5.91	14.47	16.1	24.13
		1990	%: от мира	3.6%	30.4%	—	—	9.7%	39.7%	83.4%	86.7%	
		2022		3.2%	30.3%	—	—	1.9%	24.5%	60.0%	66.8%	
	ГЭС	1990	ЭДж	3.15	3.11	1.29	0.16	0.93	3.09	11.72	13.1	22.98
		2022		3.7	2.4	1.2	0.16	0.70	2.65	10.88	13.2	40.68
		1990	%: от мира	13.7%	13.5%	5.6%	0.7%	4.0%	13.4%	51.0%	57.1%	
		2022		9.2%	6.0%	2.9%	0.4%	1.7%	6.5%	26.7%	32.5%	
	ВИЭ	1990	ЭДж	0.05	0.73	^	0.01	0.13	0.21	1.13	1.2	1.73
		2022		0.59	8.43	0.16	0.70	1.53	9.99	21.40	23.5	45.18
		1990	%: от мира	2.6%	42.5%	0.1%	0.5%	7.4%	12.2%	65.4%	71.6%	
		2022		1.3%	18.7%	0.4%	1.6%	3.4%	22.1%	47.4%	52.1%	
Добыча	Нефть	1990	млн т	92.76	416.62	82.14	30.28		129.70	751.49	917.1	3157.93
		2022		273.98	759.46	88.95	17.49		52.99	1192.88	1331.8	4407.19
		1990	%: от мира	2.9%	13.2%	2.6%	1.0%	0.0%	4.1%	23.8%	29.0%	
		2022		6.2%	17.2%	2.0%	0.4%	0.0%	1.2%	27.1%	30.2%	
	Газ	1990	млрд м³	103.45	483.38	25.29	20.61		190.21	822.93	833.5	1969.72
		2022		185.02	978.55	122.85	152.82		79.29	1518.52	1589.1	4043.82
		1990	%: от мира	5.3%	24.5%	1.3%	1.0%	0.0%	9.7%	41.8%	42.3%	
		2022		4.6%	24.2%	3.0%	3.8%	0.0%	2.0%	37.6%	39.3%	
	Уголь	1990	млн т	68.33	933.56		213.14	8.26	1080.05	2303.34	2331.3	4764.25
		2022		45.09	539.40		443.43	0.70	369.21	1397.82	1507.2	8803.37
		1990	%: от мира	1.4%	19.6%	0.0%	4.5%	0.2%	22.7%	48.3%	48.9%	
		2022		0.5%	6.1%	0.0%	5.0%	0.0%	4.2%	15.9%	17.1%	

Примечание. Пересчет электроэнергии, выработанной на ГЭС, АЭС и за счет ВИЭ, в первичную энергию производился методом оценки затрат органического топлива на ее эквивалентную выработку на ТЭС с учетом среднемирового КПД тепловой генерации — 36% в 1990 г. и 40.7% в 2022 г.

значительные изменения (рис. 2а). Во всех странах заметно (в 1.5–3 раза) снизились объемы потребления угля и его доля в энергобалансе (за исключением Японии, где после аварии на АЭС Фукусима в 2011 г. выработка закрытых атомных станций была временно замещена угольными ТЭС) и в 1.5–2 раза выросла доля природного газа в национальном энергопотреблении. Также для всех этих стран характерен многократный рост использования ВИЭ. Доля безуглеродных источников энергии (ГЭС, АЭС и ВИЭ) в суммарном потреблении первичных энергоресурсов составила в 2022 г. более 70% в Норвегии, около 45% в Канаде, более 30% в ЕС и 15–20% в США, Японии и Австралии.

В электроэнергетике эти изменения еще более заметны (рис. 2б). Во всех рассматриваемых странах, кроме Японии, значительно (в 1.7–3.3 раза) сократилась доля угля в производстве электроэнергии и примерно в такой же мере увеличилась доля природного газа (в Канаде – в 6 раз), а также повысился вклад безуглеродной выработки (включая ГЭС и АЭС) за счет развития ВИЭ-генерации, достигнув более 80% в Канаде, более 60% – в Евросоюзе, около 40% в США и более 30% в Австралии. Даже в Норвегии, где практически вся электроэнергия и ранее вырабатывалась на ГЭС, получила развитие ветрогенерация, обеспечив увеличение средней выработки на 10%. Единственным аутсайдером в этом процессе является Япония, где возобновляемым источникам не удалось пока заместить выработку закрытых АЭС.

Согласно сценарию STEPS (Stated Policies Scenario) Международного энергетического

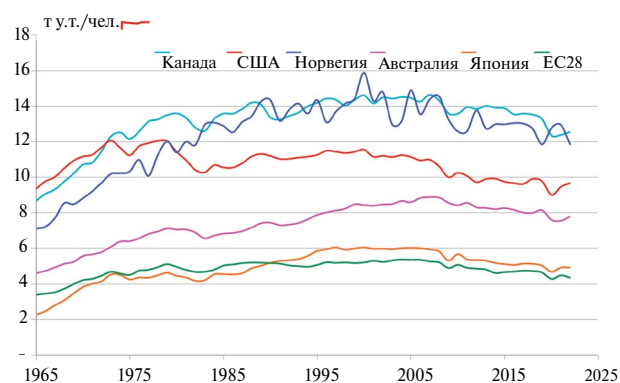


Рис. 1. Удельное потребление первичной энергии на душу населения в развитых странах мира (BP, 2023).

агентства [23], предполагающему последовательную реализацию уже заявленных национальных программ декарбонизации, к 2050 г. доля безуглеродных энергоресурсов в ЕС достигнет 65%, а в США и Японии – 45% общего энергопотребления (рис. 2). Национальные программы низкоуглеродного развития энергетики Канады [24] и Норвегии [25] также предусматривают рост этих показателей до 45% и 85% соответственно (рис. 2). Австралия, хотя и заявила о своей цели достичь углеродной нейтральности к 2050 г. [27], пока так и не обнародовала свои планы по декарбонизации национальной энергетики, а правительственный прогноз развития национальной энергетики 2015 г. предполагал существенный рост потребления органического топлива без развития ВИЭ [26] (рис. 2а).

Структурные изменения в топливно-энергетическом балансе развитых стран определили динамику углеродного коэффициента

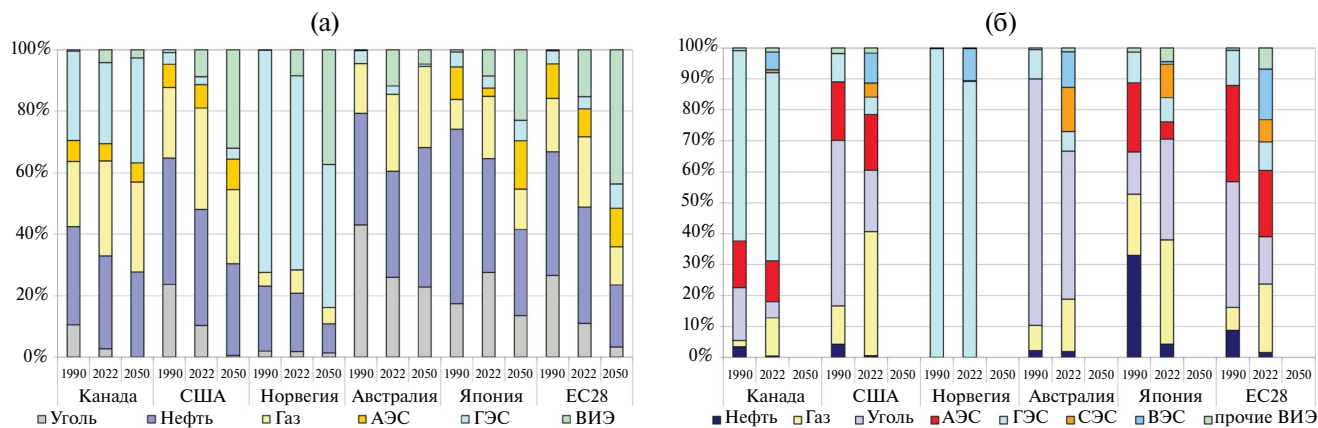


Рис. 2. Структура ТЭБ (а) и электрогенерации (б) в 1990 и 2022 гг. [21]; 2050 г. – сценарий STEPS МЭА [22] для ЕС, США и Японии, национальные программы Канады [24], Норвегии [25] и Австралии [26].

энергопотребления, под которым здесь понимается величина выбросов диоксида углерода (рис. 3а) из энергетических источников (включая сжигание органического топлива, а также утечки метана при его добыче и транспортировке), приходящаяся на единицу потребляемой первичной энергии. Безусловным лидером здесь являются 27 стран Евросоюза и Великобритания (объединенные в настоящей работе в группу ЕС28), углеродоемкость энергетики которых за период 1990–2022 гг. снизилась более чем на 20%. Удельные показатели выбросов в энергетике США уменьшились за этот период почти на 15%, а Австралии – менее чем на 10%. Углеродные характеристики энергопотребления Норвегии и Японии за последние два десятилетия практически не изменились, но вызвано это совершенно различными причинами. В Норвегии исторически сложившееся преобладание возобновляемых источников в энергобалансе уже сейчас обеспечивает минимальные в мире показатели выбросов парниковых газов в энергетике страны, в основном приходящиеся на транспорт, переход которого на безуглеродные источники энергии сейчас находится в активной продвинутой стадии. В Японии авария на АЭС Фукусима в 2011 г. прервала убывающий тренд карбооемкости энергопотребления, когда она за 1990–2010 гг. снизилась более чем на 5%, до вполне достойного уровня в 1.75 т CO₂/т у.т. Однако закрытие японских АЭС и вызванный этим рост потребления органического топлива, преимущественно угля на ТЭС резко увеличили удельные выбросы диоксида

углерода до 2 т CO₂/т у.т., и, несмотря на предпринимаемые усилия, в первую очередь за счет развития возобновляемой энергетики, вернуться к уровню 2010 г. пока не удалось.

На рис. 3а также представлены «инерционные» сценарии динамики углеродной интенсивности энергопотребления до 2060 г., полученные экстраполяцией исторических рядов [21] с темпами изменения за последние 25 лет (для Японии – за последние 10 лет, после Фукусимской аварии). По этим сценариям к середине столетия углеродоемкость энергетики Норвегии будет находиться на минимальном уровне 0.5 т CO₂/т у.т., а остальных стран – в пределах 1.0–1.5 т CO₂/т у.т.

Реализация существующих национальных программ трансформации энергетики [23–27] в исследуемых странах заметно ускоряет процессы декарбонизации энергетики, снижая углеродный коэффициент энергопотребления до 0.3 т CO₂/т у.т. в Норвегии и до 0.7–1.2 в остальных странах (необходимо отметить, что энергетический сценарий 2015 г. для Австралии [26] вообще не предполагает какого-либо снижения углеродоемкости национальной энергетики).

Как видно из рис. 3б, даже по инерционному сценарию происходит заметное снижение выбросов диоксида углерода при сжигании топлива: к 2050 г. в ЕС их объемы будут составлять менее 40% от уровня 1990 г. (национальный максимум выбросов), в США, Канаде и Норвегии – 50, 70 и 80% соответственно от пикового значения 2005 г., в Австралии – 87% от

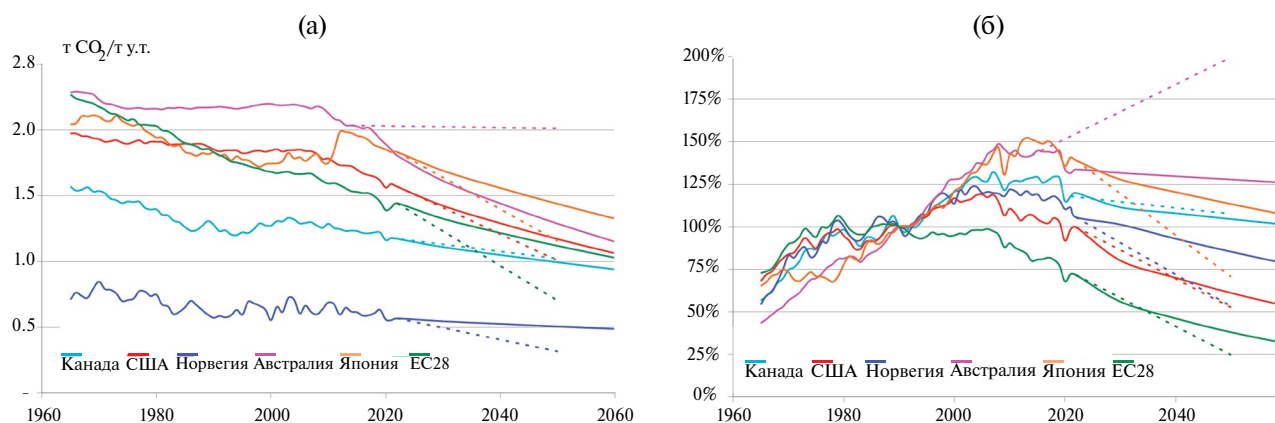


Рис. 3. Изменение удельной (а) и валовой (б) энергетической эмиссии CO₂ по данным [21] с экстраполяцией, выполненной с темпами изменения последних 25 лет («инерционный» сценарий), а также сценарий STEPS МЭА [23] для ЕС, США и Японии, национальные программы Канады [24], Норвегии [25] и Австралии [26] (штриховые линии).

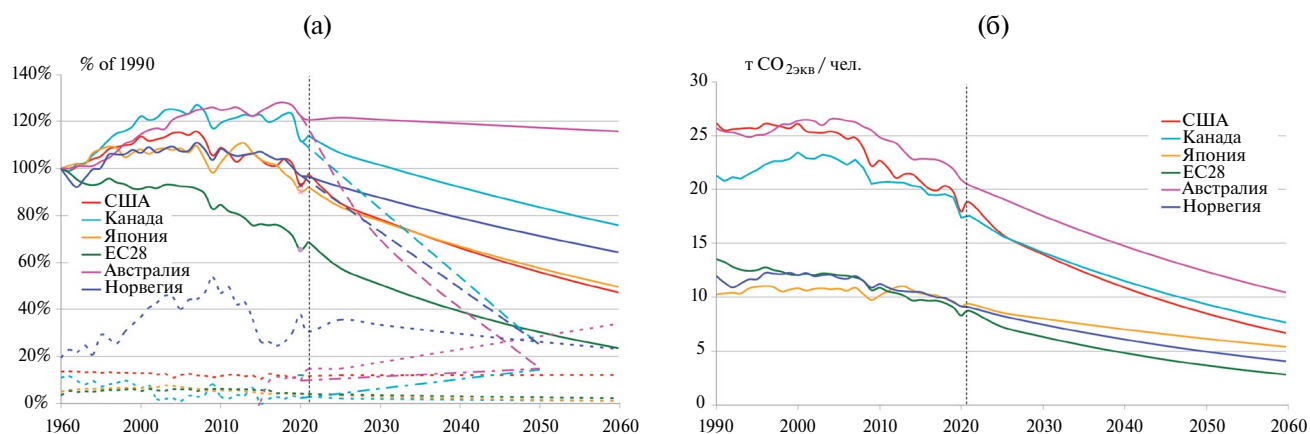


Рис. 4. Динамика суммарных выбросов (сплошные линии) и поглощения (штриховые линии) ПГ (относительно уровня антропогенных выбросов 1990 г.) (а) и удельных выбросов ПГ на душу населения (б) по данным *UNFCCC* (2024). Экстраполяция выполнена с темпами изменения последних 25 лет («инерционный» сценарий) и согласно актуальным национальным планам достижения климатической нейтральности и согласно актуальным национальным планам достижения климатической нейтральности (длинные штриховые линии).

максимума 2008 г. и в Японии — 74% от пика 2013 г. Однако сохранение исторических темпов декарбонизации энергетики даже близко не позволяет подойти к решению главной проблемы — снижению до нуля (или близкой к нему величины) углеродного коэффициента энергопотребления.

Действующие программы энергоперехода [23–27] существенно повышают темпы снижения выбросов диоксида углерода в ЕС, Норвегии и Японии (штриховые линии), доводя соответствующие значения эмиссии CO₂ в 2050 г. в 25, 40 и 45% от пиковых величин, но тем не менее сохраняя значительные и пока некомпенсированные объемы выбросов этого парникового газа.

Таким образом, реализация национальных целей «климатической нейтральности» (рис. 4) требует еще более радикальных мер снижения выбросов в энергетике и других отраслях экономики, а также увеличения стоков углекислого газа — в биологические резервуары (леса, болота, пахотные земли) или закачки его в геологические формации.

Однако ни данные дистанционного зондирования Земли (рис. 5а), ни результаты национальных инвентаризаций земельных ресурсов (рис. 5б) не свидетельствуют о каком-либо значимом увеличении площади лесных земель. Во всех странах, кроме Австралии, за период 1990–2021 гг. произошло некоторое (на 5–15%) сокращение площади пахотных земель, в Австралии

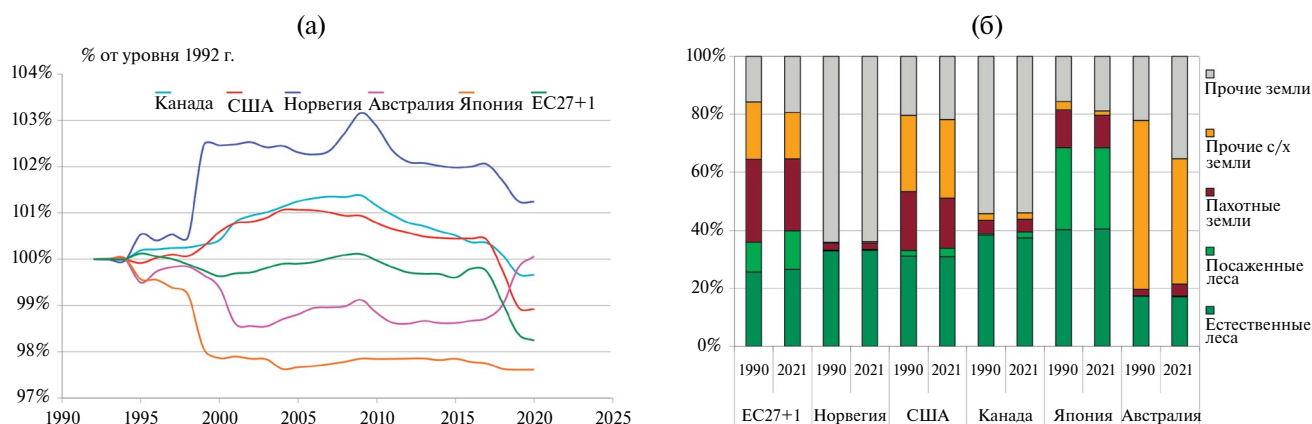


Рис. 5. Изменение площади земель, покрытых древесной растительностью (по сравнению со значением 1992 г.), по спутниковым данным *FAO*, (а) и структуры землепользования, по данным национальных инвентаризаций *FAO* (б).

Таблица 3. Оценки геологических ресурсов для захоронения CO₂ [32], мощность хранилищ для захоронения CO₂ S и их доля σ в предполагаемой нетто-эмиссии ПГ в 2030 г. [31]

Страна	Геологические ресурсы для захоронения CO ₂ , млрд т CO ₂			S_{2030} , млн т CO ₂ / год	σ_{2030} , %
	суша	шельф	всего		
США	551–3872	261–1836	812–5708	200–250	4–5
ЕС27+1	161–1129	141–991	302–2120	70–80	2.5–3
Канада	206–1445	112–790	318–2235	15	3
Япония	4–26	5–34	9–60	0	0
Норвегия	—	85	85	30–40	75–85
Австралия	334–2349	261–1835	595–4184	9–19	1.5–3

за это время они почти удвоились. Площадь лесов на исследуемых территориях оставалась практически неизменной, лишь в ЕС по данным инвентаризации отмечен их рост более чем на 20%, причем треть современных европейских лесов – результат посадок при лесовосстановлении (в Японии – более 40%). При относительно стабильной площади лесов и постоянной замене ненарушенных массивов менее продуктивными посадками не приходится рассчитывать, что они примут на себя дополнительную нагрузку по поглощению углерода из атмосферы. Ситуация дополнительно осложняется необратимыми потерями углерода из пахотных земель, ежегодно теряемых в результате продолжающейся урбанизации в масштабах 16–33 тыс. км

в год [28]. Детальные расчеты [29] показывают, что биосфера уже сегодня близка к пределу своих возможностей по депонированию углерода.

Что касается улавливания и захоронения диоксида углерода в различных геологических резервуарах, то теоретический потенциал этих технологий огромен и составляет сотни миллиардов тонн CO₂ (табл. 3), что даже по нижним оценкам способно обеспечить хранение избыточного CO₂ при современном уровне эмиссии в течение полутора столетий. Однако реализация подобных проектов сопряжена с многочисленными трудностями (экономическими, технологическими, экологическими), хотя и развивается бурными темпами в последнее десятилетие (рис. 6). Поэтому в настоящее время

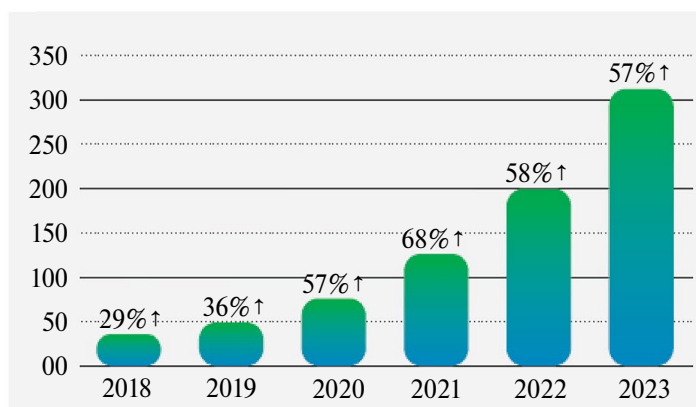


Рис. 6. Проекты по захоронению углекислого газа в мире в 2020 г. [30] и динамика их мощностей (млн т CO₂/год) [31].

общая мощность нескольких сотен хранилищ различной степени завершенности в мире достигла лишь 310 млн т CO_2 /год, из которых в эксплуатации находится только около 16%, обеспечивающих хранение лишь 49 млн т CO_2 /год [31], что составляет менее 0.15% современной эмиссии. В табл. 3 представлены данные о перспективах развития технологий улавливания и хранения углерода (УХУ, CCS – от англ. Carbon Capture and Storage) до конца текущего десятилетия. Эти данные показывают, что наиболее активно эти технологии развиваются в Европе и США, а Норвегия является единственной страной мира, способной уже в 2030 г. улавливать не менее 75% своих выбросов CO_2 . Сейчас наиболее затруднительным выглядит положение Австралии, располагающей всего 9 млн т CO_2 /год мощностей УХУ, и Японии, не имеющей таких мощностей вовсе, но планирующей ввод к 2030 г. семи первых проектов неуказанного размера. В целом, можно констатировать, что для реализации планов по достижению климатической нейтральности ведущим странам ОЭСР необходимо в ближайшие 25 лет поддерживать ежегодные темпы ввода хранилищ CO_2 на уровне 20%, что не выглядит простой задачей, поскольку исторические темпы в последнее десятилетие (2013–2023 гг.) находились на уровне 11%.

ВЫВОДЫ

1. Существующие темпы декарбонизации и развития индустрии улавливания и хранения углерода не позволяют гарантировать достижения климатической нейтральности к 2050 г. даже в ведущих экономиках мира. Наилучшими в этом отношении выглядят шансы Евросоюза и Норвегии, наихудшими – Австралии и Канады.

2. Центральной проблемой в достижении климатической нейтральности становится быстрое и масштабное внедрение технологий УХУ во всех ее возможных проявлениях. Все исследованные страны, кроме Японии, располагают собственными возможностями для захоронения углерода на период более ста лет.

3. Для достижения климатической нейтральности ведущим странам ОЭСР к 2050 г. необходимо будет обеспечить ежегодное захоронение не менее 6 млрд т CO_2 , что почти в 25 раз

превосходит их современные мощности (действующие, строящиеся и находящиеся в стадии проектирования).

4. Несмотря на то, что проблема изменения климата вербально занимает едва ли не лидирующее место в мировой повестке, действительные результаты усилий в этой области далеки от декларируемых. Удержать потепление в пределах 1.5°C сейчас уже нереально и при нынешних темпах декарбонизации, достигнутых даже мировыми лидерами, скоро и оборона второго критического рубежа в 2°C окажется под угрозой.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы данные Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК, <https://unfccc.int/>), базы данных для глобальных исследований атмосферы Европейской Комиссии (EDGAR, <https://edgar.jrc.ec.europa.eu>), Организации ООН по лесному и сельскому хозяйству (FAO, <http://www.fao.org/faostat/en/#data>), Демографической службы ООН (<https://population.un.org/wpp/>), Всемирного института улавливания и захоронения углерода (<https://www.globalccsinstitute.com>).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в НИУ «МЭИ» (проект № 20-19-00721-П) в части энергетических исследований, в ИНЭИ РАН (проект № 21-79-30013) в части расчетов выбросов парниковых газов и в НИТУ «МИСИС» (проект № 23-19-00398) в части исследования улавливания, захоронения и поглощения парниковых газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shirov A.A., Kolpakov A.Yu., Gambhir A., Koasidis K., Köberle A. C., McWilliams B., Nikas A.* Stakeholder-driven scenario analysis of ambitious decarbonisation of the Russian economy // *Renewable and Sustainable Energy Transition*. 2023. V. 4. Id. 100055. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2023.100055>
2. *Hechelmann R.-H., Paris A., Buchenau N., Ebersold F.* Decarbonisation strategies for manufacturing: A technical and economic comparison // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. V. 188. Id. 113797. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113797>

3. *Rinaldi A., Sylva A., Patel M.K., Parra D.* Optimal pathways for the decarbonisation of the transport sector: Trade-offs between battery and hydrogen technologies using a whole energy system perspective // *Cleaner Production Letters*. 2023. V. 5. Id. 100044. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2023.100044>
4. *Li C., Tian G. Chen C., Liu P., Li Z.* A long-term or a short-term decision when planning the decarbonisation transition pathway of power systems? A case study of China // *Energy for Sustainable Development*. 2023. V. 76. Id. 101264. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101264>
5. *Stephenson J.R., Sovacool B.K., Inderberg T.H.J.* Energy cultures and national decarbonisation pathways // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. V. 137. Id. 110592. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110592>
6. *Fragkos P., van Soest H. L., 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. V. 216. Id. 119385. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119385>
7. *Kilinc-Ata N., Proskuryakova L.N.* Empirical analysis of the Russian power industry's transition to sustainability // *Utilities Policy*. 2023. V. 82. Id. 101586. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101586>
8. *Durakovic G., Zhang H., Knudsen B.R., Tomasgard A., del Granado P.C.* Decarbonizing the European energy system in the absence of Russian gas: Hydrogen uptake and carbon capture developments in the power, heat and industry sectors // *J. Cleaner Production*. 2024. V. 435. Id. 140473. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140473>
9. *Crowley-Vigneau A., Kalyuzhnova Y., Ketenci N.* What motivates the 'green' transition: Russian and European perspectives // *Resources Policy*. 2023. V. 81. Id. 103128. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103128>
10. *Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.* Безуглеродная Россия: есть ли шанс достичь углеродной нейтральности к 2060 году? // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2023. Т. 511. С. 67–77. <https://doi.org/10.31857/S2686740023040065> EDN: VPFUXM
11. *Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Локтионов О.А.* Дорога к климатической нейтральности: через лес под землю // *Энергетическая политика*. 2023. № 7 (185). С. 8–25. EDN: WVMBKT
12. *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>
13. *Клименко А.В., Терёшин А.Г., Прун О.Е.* Перспективы России в снижении выбросов парниковых газов // *Известия РАН. Энергетика*. 2023. № 2. С. 3–15. <https://doi.org/10.31857/S0002331023020036> EDN: JXOTOM.
14. *Клименко А.В., Терёшин А.Г., Прун О.Е.* Пути снижения выбросов парниковых газов в черной металлургии России // *Промышленная энергетика*. 2023. № 9. С. 8–19. <https://doi.org/10.34831/EP.2023.67.59.002>
15. *Клименко В.В., Терешин А.Г., Коликов К.С., Бернадинер И.М.* Перспективы России в снижении выбросов метана и присоединении к Глобальному соглашению по метану // *Энергетическая политика*. 2023. № 11 (190). С. 56–73. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2023_11190_5E DN: TMXGQO
16. *Баишаков И.А.* Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики // *Вопросы экономики*. 2020. № 7. С. 51–74.
17. *Баишаков И.А.* Сценарии движения России к углеродной нейтральности // *Энергосбережение*. 2023. № 1. С. 40–49.
18. *Дегтярев К.С., Березкин М.Ю., Синюгин О.А.* Оценка инвестиционных затрат на переход к безуглеродной экономике в России к 2060 г. // *Окружающая среда и энергосбережение*. 2022. № 2. С. 29–39.
19. *Мастепанов А.М.* Россия на пути к углеродной нейтральности // *Энергетическая политика*. 2022. № 1(167). С. 94–108.
20. *Ланьшина Т.А., Логинова А.Д., Стоянов Д.Е.* Переход крупнейших экономик мира к углеродной нейтральности - сферы потенциального сотрудничества с Россией // *Вестник международных организаций*. 2021. Т. 16. №4. С. 98–125.
21. *Statistical Review of World Energy 2023*. London: Energy Institute, 2023. 64 p.
22. *Клименко В.В.* Влияние климатических и географических условий на уровень потребления энергии // *ДАН*. 1994. Т. 339. № 3. С. 319–332.
23. *International Energy Agency. World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023. 355 p.
24. *Canada's Energy Future 2023: Energy Supply and Demand Projections to 2050*. Ottawa: Canada Energy Regulator, 2023. 134 p.
25. *Energy Transition Norway 2022. A National Forecast to 2050* / Ed.: M. Irvine. Høvik, Norway: DNV and Norsk Industri, 2022. 56 p.
26. *Syed A. Australian Government Energy Projections to 2050* / Kimura, S. and H. Phoumin (eds.), *Energy Outlook and Energy Saving Potential in East Asia*. ERIA Research Project Report 2014-33, Jakarta: ERIA, 2015. P. 49–68.

27. Australian Long Term Emissions Reduction Plan. A whole-of-economy Plan to achieve net zero emissions by 2050. Australian Government Department of Industry, Science, Energy and Resources, 2021.
28. Ковалева Н.О., Столпникова Е.М. Экология: жизнь в неустойчивой биосфере // История и современность. 2022. № 4. С. 58–80.
29. Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Динамика биотических потоков углерода при различных сценариях изменения площади лесов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 462–472.
<https://doi.org/10.31857/S0002351520040033>
30. Global Status of CCS Report 2021. Melbourne, Australia: Global Carbon Capture and Storage Institute, 2021.
31. Global Status of CCS Report 2023. Executive summary. Melbourne, Australia: Global Carbon Capture and Storage Institute, 2023.
32. 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>
33. Member State Specific Pathway for NETP Deployment / Editors/Authors: Nixon Sunny, Solene Chiquier, Niall Mac Dowell. London: NEGEM, 2023.
34. Freer-Smith P., Muys B., Bozzano M., Drössler L., Farrelly N., Jactel H., Korhonen J., Minotta G., Nijnik M. and Orazio C. Plantation forests in Europe: challenges and opportunities. From Science to Policy 9. European Forest Institute, 2019.
<https://doi.org/10.36333/fs09>
35. Rhodes D., Stephens M. Planted forest development in Australia and New Zealand: comparative trends and future opportunities // New Zealand J. of Forest Science. 2014. V. 44 (Suppl 1), S10.
<https://doi.org/10.1186/1179-5395-44-S1-S10>

PROSPECTS FOR ACHIEVING CARBON NEUTRALITY BY ECONOMICALLY DEVELOPED COUNTRIES

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

^aNational Research University «MPEI», Moscow, Russia

^bNational University of Sciences and Technology «MISIS», Moscow, Russia

^cEnergy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The prospects for achieving carbon neutrality by economically developed countries (USA, EU, Norway, Canada, Japan and Australia) are studied. An analysis of the structure of energy and land use in these countries is carried out. Scenario estimates of the dynamics of carbon indicators of the economies of the world's leading countries have been developed.

It is shown that the current rates of decarbonisation and development of the carbon capture and storage industry do not guarantee the achievement of climate neutrality by 2050, even in the world's leading economies. A central challenge in achieving climate neutrality is the rapid and large-scale deployment of CCS in all its possible manifestations. All of the countries studied, except Japan, have their own capacity to store carbon for more than a hundred years.

To achieve climate neutrality, the leading OECD countries will need to ensure the annual capture of at least 6 billion tons of CO₂ by 2050, which is almost 25 times higher than their current capacities (operating, under construction and under design) 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. It is no longer realistic to keep warming within 1.5°C, and at the current rate of decarbonization, even by world leaders, the defense of the second critical frontier in 2°C will soon be threatened.

Keywords: economically developed countries, energy, greenhouse gas emissions and absorption, climate neutrality, scenarios