

УДК 620.9

ГЛАЗГО-2021: ТРУДНАЯ ДОРОГА К ЦЕЛИ В 1.5°C

© 2022 г. Академик РАН В. В. Клименко^{1,2,*}, О. В. Микушина^{1,2}, А. Г. Терешин^{1,2,**}

Поступило 17.03.2022 г.

После доработки 17.03.2022 г.

Принято к публикации 30.05.2022 г.

Исследованы возможные последствия решений 26-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Глазго, 2021) для мировой энергетики и антропогенных изменений климата. Предложена группа сценариев антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему, включающая реализацию решений Глазго в области декарбонизации мировой экономики, снижения выбросов метана и восстановления лесов. Показано, что существует технический потенциал для выполнения решений Глазго, однако требуемые темпы реформации мировой энергетики и всей экономики носят беспрецедентный в историческом масштабе характер. С помощью разработанных в МЭИ моделей глобального углеродного цикла и климата рассчитаны изменения химического состава и теплового радиационного баланса атмосферы Земли, а также среднеглобальной температуры воздуха для каждого из сценариев. Показано, что реализация всего спектра предложенных в Глазго мероприятий по снижению антропогенного воздействия на климатическую систему планеты способно удержать потепление в рамках 1.5°C от доиндустриального уровня, однако существуют серьезные сомнения в практическом выполнении предложенной программы декарбонизации мировой экономики.

Ключевые слова: энергетика, декарбонизация, эмиссия метана, леса, изменения климата, модели, сценарии

DOI: 10.31857/S2686740022040046

С 31 октября по 13 ноября 2021 г. в Глазго проходила очередная 26-я Конференция сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК ООН), в которой приняли участие представители почти 200 государств [1]. Участники конференции выразили крайнюю озабоченность продолжающимся потеплением климата и приняли ряд важных инициатив, призванных замедлить, а затем и остановить дальнейшее повышение температуры. Важнейшими решениями, принятыми в результате конференции, являются следующие:

1. Обязательства большинства стран, включая все крупнейшие страны-эмитенты парниковых газов, достичь так называемой климатической нейтральности, т.е. нулевой нетто-эмиссии в промежуток времени между 2050 и 2070 г. (США и ЕС – к 2050, Россия и Китай – к 2060, Индия – к 2070 г.).

2. Обязательства группы из 109 стран снизить антропогенную эмиссию метана, второго по значению парникового компонента атмосферы, на 30% к 2030 г. (Глобальное обязательство по метану). Четыре крупнейших эмитента – Австралия, Индия, Китай и Россия, ответственные за 38% глобальной эмиссии, пока не присоединились к этим обязательствам.

3. Обязательства 140 стран остановить утрату лесов к 2030 г. и в дальнейшем приступить к их восстановлению.

Настоящая работа представляет собой попытку оценить эффективность предлагаемых мер, а также возможность их осуществления с точки зрения достижения главной цели – ограничения повышения среднеглобальной температуры (СГТ) в 2 (1.5)°C по сравнению с доиндустриальным (1850–1900 гг.) периодом.

Разработаны сценарии антропогенной эмиссии основных парниковых газов (диоксида углерода и метана), соответствующие принятым на конференции решениям, для которых выполнены модельные оценки изменения их атмосферных концентраций и вызванные этим изменения радиационно-теплового баланса атмосферы.

¹Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

²Институт энергетических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: nilgpe@mpei.ru

**E-mail: TereshinAG@mpei.ru

Таблица 1. Группы стран и их показатели

Группа	P , млрд чел.	E , млрд т у.т.	V_C , млрд т С	V_m , млн т	T_{\max}	$V_{C_{\max}}$, млрд т С
“2050”	1.33 (17%)	7.4 (39%)	2.9 (34%)	71 (19%)	2020	7.4
“2060”	2.01 (26%)	7.1 (37%)	3.5 (40%)	112 (30%)	2030	3.6
“2070”	1.38 (18%)	1.1 (6%)	0.6 (7%)	30 (8%)	2030–2040	0.7
“2080”	3.09 (39%)	3.4 (18%)	1.7 (19%)	160 (43%)	2030–2050	1.9
Мир в целом	7.80	19.0	8.8	375	2019	9.7

Население P , энергопотребление E , масса выбросов диоксида углерода V_C и метана V_m в 2020 г., а также величина $V_{C_{\max}}$ и год достижения пика эмиссии CO_2 T_{\max} для групп стран (в скобках указана доля от мировых величин).

Источники данных: OOH, BP, CDIAC, EDGAR, расчеты авторов.

ЭМИССИЯ

Для формирования возможного сценария выбросов диоксида углерода в секторах мировой экономики, охваченных соглашениями конференции в Глазго, все страны мира были поделены на несколько групп в зависимости от уровня их экономического развития и во многом связанной с ним степени амбициозности национальных долгосрочных программ снижения антропогенного воздействия на климат (табл. 1).

В первую группу “2050” вошли страны ОЭСР (Организации экономического сотрудничества и развития) и ЕС, добровольные обязательства которых предусматривают достижение углеродной нейтральности не позднее 2050 г. Во вторую (“2060”) и третью (“2070”) – крупнейшие развивающиеся экономики мира, национальные программы которых предполагают прекращение нетто-эмиссии парниковых газов к 2060 г. (Россия, Китай, Бразилия, Аргентина, Иран и Турция) и 2070 г. (Индия) соответственно. Беднейшие страны Азии и Африки, не имеющие в настоящее время собственных планов по радикальному сокращению парниковых выбросов, сведены в четвертую группу “2080”, для которой ожидается, что с финансовой и технологической помощью ведущих экономик мира она сможет достичь углеродной нейтральности к 2080 г.

Полученные оценки ожидаемых выбросов и углеродных коэффициентов представлены на рис. 1 вместе со сценариями из работ [2, 3], написанных по результатам Парижской конференции сторон РКИК ООН (2015 г.). Здесь углеродный коэффициент суть отношение эмиссии углекислого газа (в углеродных единицах) к величине коммерческого потребления энергии (в единицах условного топлива).

Выполнение Парижских договоренностей приводило к снижению выбросов CO_2 на 5% к 2050 г., на 10% к 2070 г. и на 30% к 2100 г. по сравнению с историческим сценарием. Как было показано в работах [2, 3], такие объемы выбросов не обеспечива-

ли удержание роста СГТ в пределах $2^\circ C$ по сравнению с доиндустриальным периодом.

Существенно более радикальные ограничения на выбросы углерода, предлагаемые решениями конференции сторон РКИК ООН в Глазго (2021 г.), должны привести к гораздо более значительному снижению выбросов (по сравнению с историческим сценарием [2, 3]) – почти на 20% уже к 2030 г., более чем в 2 раза к 2050 г. и практически в 4 раза – к 2100 г.

Еще один важнейший результат встречи в Глазго – решение снизить антропогенные выбросы метана к 2030 г. на 30%. В отличие от углекислого газа, основным антропогенным источником которого является сжигание органического топлива, более половины метана поступает в атмосферу из сельскохозяйственных источников, в то время как на энергетику и обращение с отходами приходится 30 и 20% соответственно. Вследствие этого более половины мировых антропогенных выбросов приходится на наиболее густонаселенные Индию, Китай и беднейшие страны Азии и Африки.

И, наконец, впервые на международном уровне на конференции в Глазго были приняты обязательства по сохранению и восстановлению лесов на планете – важнейшего управляемого резервуара стока углерода. Реализация этого решения приведет к прекращению многовековой утраты лесного покрова Земли и переходу к росту площадей лесов – к сценарию, чрезвычайно близкому к предложенному авторами еще в 1999 г. [4] биотическому варианту снижения антропогенного давления на углеродный баланс GEP L’99, предполагающему возвращение площади лесов планеты к доиндустриальному (до 1800 г.) уровню. Альтернативой этому Глазго-сценарию для лесов является вариант FAOSTAT из нашей недавней работы [5], согласно которому сохраняются тенденции последних десятилетий в сфере мирового лесопользования.

Декларированные Пактом Глазго изменения являются беспрецедентными в истории, в связи с чем возникает резонный вопрос – а возможны ли

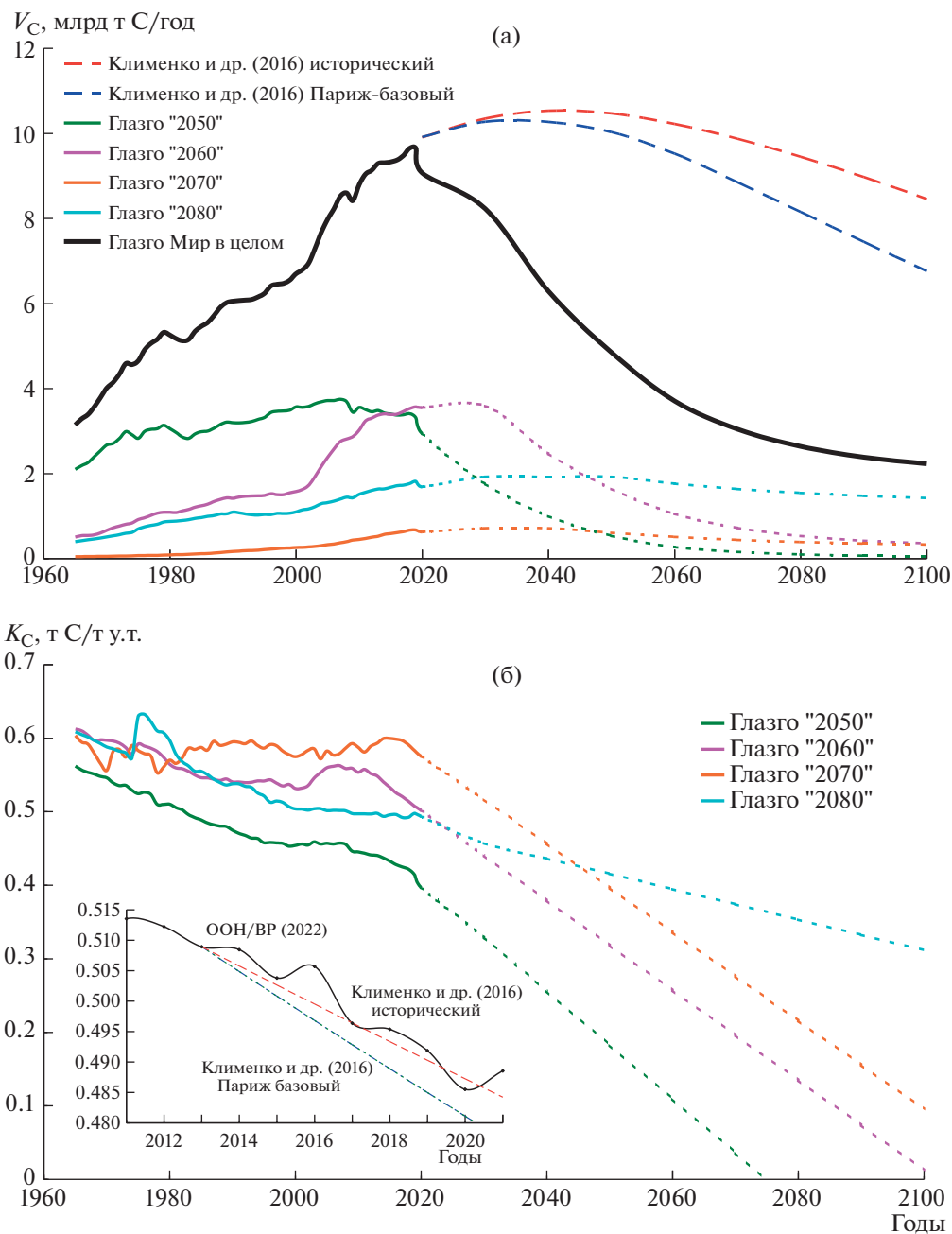


Рис. 1. Эмиссия диоксида углерода V_C (а) и изменения углеродного коэффициента K_C (б) по сценарию настоящей работы (“Глазго”) для различных групп стран и мира в целом и глобальные сценарии из [2, 3]. На врезке показаны мировые данные ООН/ВР за 2010–2021 гг.

теоретически и технически такие масштабные преобразования в мировой экономике? В первую очередь этот вопрос должен быть адресован к ее ключевому сектору – энергетике, – ответственному за 90% выбросов углерода и вовлеченному в последние десятилетия в масштабные реформы, получившие название “глобального энергоперехода” [6].

Анализ многочисленных публикаций ведущих научных организаций в этой области [7–11] пока-

зывает, что технический потенциал снижения выбросов парниковых газов в мире к 2030 г. составляет более 7 Гт $C_{\text{экв}}$ /год и может быть реализован широким спектром технологических и институциональных инструментов, примерно половина из которых относится к сфере энергетики и транспорта, причем возобновляемая энергетика может обеспечить около четверти снижения выбросов (рис. 2).



Рис. 2. Вклад различных мероприятий в сокращение эмиссии парниковых газов (расчеты авторов по данным [7]).

КОНЦЕНТРАЦИИ И РАДИАЦИОННЫЙ ФОРСИНГ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Расчеты атмосферных концентраций диоксида углерода по предложенным в настоящей работе сценариям индустриальной эмиссии углекислого газа и биотическим потокам углерода за счет изменения площади лесов выполнены на модели глобального углеродного цикла, разработанной в МЭИ [5].

Концентрации метана были рассчитаны по общепринятой балансовой модели, используемой Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) [12], согласно предложенному Глазго-сценарию его антропогенной эмиссии. Радиационные форсинги CO₂ и CH₄ рассчитаны по стандартным соотношениям, также рекомендованным МГЭИК [12].

Для оценки климатического эффекта каждого из рассмотренных в настоящем сообщении решений конференции в Глазго были сформированы четыре варианта антропогенного воздействия на

глобальную климатическую систему, представляющих собой различные комбинации реализаций этих решений (табл. 2). В качестве базовых (не учитывающих решений Глазго) сценариев были использованы оценки глобальных индустриальных выбросов парниковых газов в атмосферу из [3] (“Париж базовый”) и консервативный вариант мирового лесопользования “FAOSTAT” из работы [5], предполагающий дальнейшую утрату лесов со средней скоростью примерно в 1.5 млн га в год.

Суммарные радиационные форсинги для каждого из вариантов приведены на рис. 3.

Из представленных на рис. 3 данных видно, что эффект от снижения выбросов метана в долгосрочной перспективе примерно соответствует результатам мероприятий по сохранению лесов, но в ближайшие десятилетия будет почти вдвое превышать последний. Результаты же закрепленных решениями конференции в Глазго политики по снижению индустриальных выбросов диокси-

Таблица 2. Варианты антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему как комбинации сценариев реализации решений конференции в Глазго

Вариант (комбинация сценариев)	Сценарии		
	Индустриальная эмиссия CO ₂	Антропогенная эмиссия CH ₄	Биопоток CO ₂ за счет лесов
1 – “Париж”	“Париж” базовый [3]	“Париж” базовый [3]	FAOSTAT [5]
2 – Глазго – метан	“Париж” базовый [3]	“Глазго” (настоящая работа)	FAOSTAT [5]
3 – Глазго – леса	“Париж” базовый [3]	“Париж” базовый [3]	GEPL’99 [5]
4 – Глазго – леса + метан	“Париж” базовый [3]	“Глазго” (настоящая работа)	GEPL’99 [5]
5 – Глазго – полный	“Глазго” (настоящая работа)	“Глазго” (настоящая работа)	GEPL’99 [5]

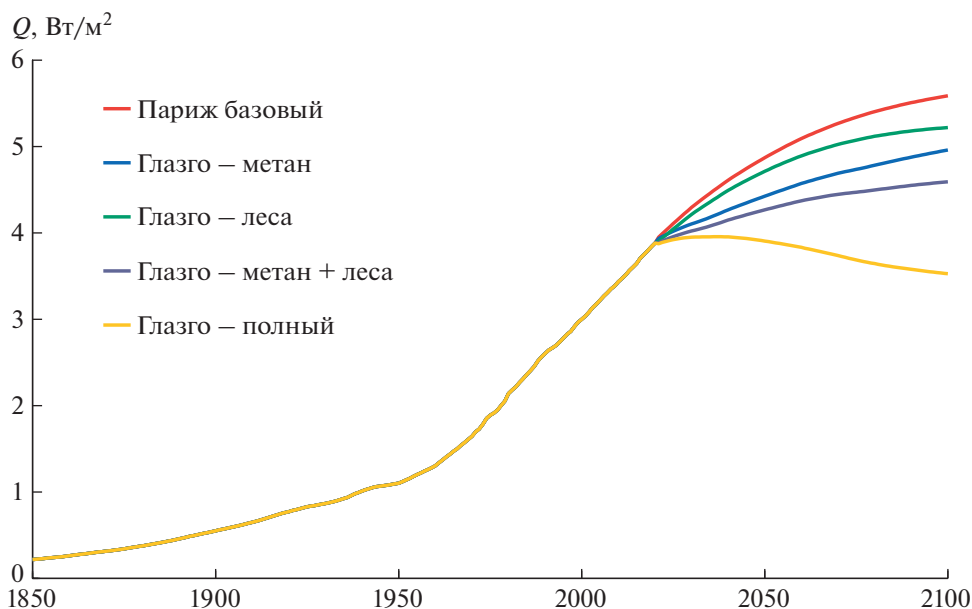


Рис. 3. Изменения радиационного форсинга парниковых газов Q согласно рассмотренным в настоящей работе сценариям антропогенного воздействия на атмосферу.

да углерода должны дать примерно такой же результат, как “метановый” и “лесной” компоненты, вместе взятые.

ТЕМПЕРАТУРА

Расчеты СГТ по предложенным в настоящей работе сценариям антропогенного воздействия на атмосферу и климат проведены на комбинированной климатической модели, разработанной в МЭИ [13], представляющей собой сочетание энергобалансовой и статистической моделей на базе множественной регрессии (рис. 4). В качестве входных данных использованы ряды радиационных форсингов парниковых газов (рис. 3), а также основных естественных климатических факторов — солнечной и вулканической активности (рассчитанные в соответствии с [12] по данным о полном солнечном излучении и оптической плотности атмосферы соответственно). Для учета циркуляционных процессов в глобальной климатической системе в качестве предиктора статистического блока климатической модели был использован индекс Атлантического мультисексуального колебания [14].

Сейчас в развитии глобального потепления наступила продолжительная пауза, обусловленная сдерживающим влиянием естественных факторов климата, в первую очередь — снижающейся солнечной активностью и изменением циркуляционных процессов в океане. Этот эффект был предсказан нами ранее [14] и теперь реализуется в течение последних восьми лет, когда СГТ фактически стабилизировалась на уровне 1.2°C выше

доиндустриальной. Эта пауза продлится до конца текущего десятилетия, после чего СГТ во всех сценариях, кроме 5, возобновит свой рост, причем в базовом сценарии 1 она достигает рубежа в 1.5°C уже в начале 2040-х, 2°C — в конце 2060-х гг. и, наконец, 2.3°C к концу столетия, лишь тогда обнаруживая явную тенденцию к стабилизации. Осуществление мероприятий Пакта Глазго позволяет снизить величину потепления относительно базового сценария в 2100 г. на 0.9°C , из которых 0.45°C приходится на программы энергоперехода и декарбонизации, 0.25°C — на сокращение эмиссии метана и около 0.2°C — на программы восстановления лесов. Сценарий 5 является единственным, при котором повышение СГТ проходит через максимум на уровне в 1.5°C в 2070-е гг. с последующим снижением.

В ближайшей перспективе снижение эмиссии метана оказывается наиболее радикальным инструментом, позволяющим остановить рост СГТ на два десятилетия, а в случае присоединения к Глобальным обязательствам по метану остающихся крупнейших эмитентов — и на более продолжительный срок. Такой довольно неожиданный результат обусловлен тем, что атмосферное время жизни метана (около 12 лет) гораздо короче времени жизни углекислого газа (более столетия) [12]. Это означает, что снижение эмиссии метана приводит к значительно более быстрому снижению его концентрации, а с ней и его радиационного форсинга. Однако при всей очевидной привлекательности задача снижения эмиссии метана может оказаться трудноразрешимой, поскольку затрагивает такие чувствительные для мирового

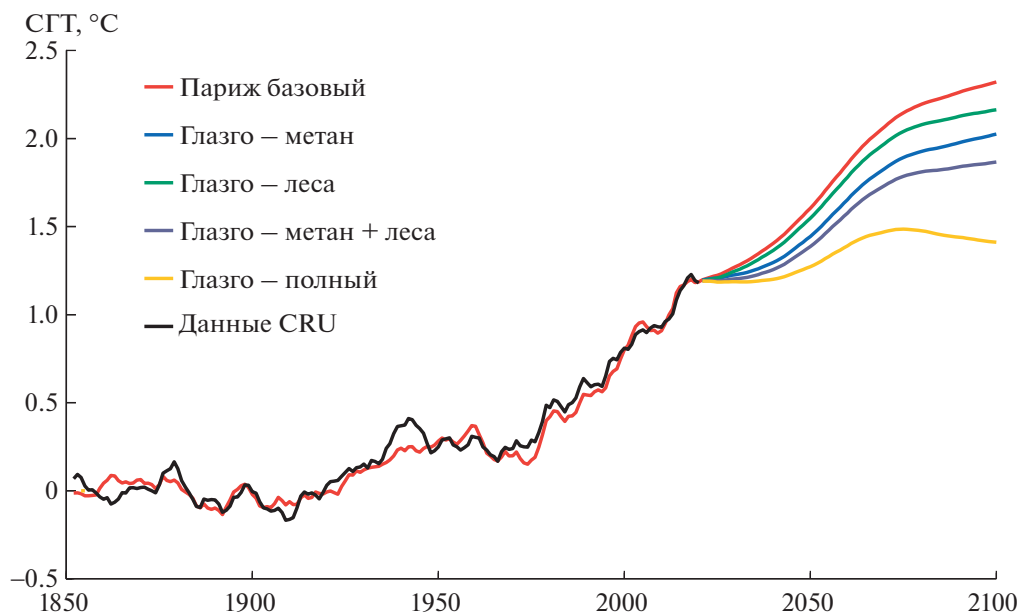


Рис. 4. Изменения СГТ по предложенным в настоящей работе сценариям антропогенного воздействия на атмосферу и историческим данным CRU, усредненным за пятилетия.

сообщества сферы, как производство продуктов питания и неизбежное в условиях декарбонизации энергетики расширенное использование природного газа.

И все же, с точки зрения решения главной задачи Парижского соглашения, основным инструментом является сокращение эмиссии углекислого газа, связанной со сжиганием ископаемого топлива. Однако, как выяснилось в последние десять лет, с момента принятия Варшавской декларации (2013), впервые призвавшей страны мира к “максимально быстрому” сокращению эмиссии, мировому сообществу ни на шаг не удалось приблизиться к необходимой скорости декарбонизации мировой энергетики (врезка на рис. 16). Более того, дистанция между достигнутыми и необходимыми скоростями декарбонизации возрастает с каждым годом. На наш взгляд, этот результат — суть проявление консервативности мировой энергетической системы, жесткая конструкция которой препятствует ее неоправданно быстрому реформированию [3, 15]. Отсюда следует, что обозначенная Пактом Глазго программа декарбонизации не может быть выполнена в срок и возделенная цель 1.5°C не может быть достигнута, по крайней мере в течение нынешнего столетия.

ВЫВОДЫ

1. Точное и неукоснительное исполнение мероприятий по охране климата, предусмотренных пактом Глазго, позволяет удержать повышение среднеглобальной температуры в пределах 1.5°C.

2. Реально достигнутая в последние десять лет скорость декарбонизации в 1.5 раза ниже предусмотренной Парижским соглашением и на порядок ниже требуемой Пактом Глазго. С точки зрения исторического опыта эволюции мировой энергетики осуществление Пакта Глазго невозможно.

3. Сегодня мир находится на траектории, ведущей к повышению температуры на 2.3°C к концу столетия, но даже при современных скоростях декарбонизации эффективные мероприятия в неэнергетических секторах (сокращение эмиссии метана и переход от сведения к восстановлению лесов) способны удержать повышение температуры в пределах 2°C до конца столетия.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы данные Статистической и Демографической служб ООН (UN, <https://data.un.org/>), компании British Petroleum (BP, <https://www.bp.com/>), базы данных для глобальных исследований атмосферы Европейской Комиссии EDGAR (<https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>), Информационно-аналитического центра по диоксиду углерода США (CDIAC, <http://cdiac.ornl.gov/>), МГЭИК (<http://www.ipcc.ch/>), Национальной службы по атмосфере и океану США (NOAA/ESRL, <ftp://aftr.cmdl.noaa.gov/products/trends/>), Центра климатических исследований Университета Восточной Англии (CRU, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>), Всемирного института улавливания и захоронения углерода (GCCSI, <http://www.globalccsinstitute.com/>), Организации ООН по лесному и сельскому хозяйству (FAO, <http://www.fao.org/faostat/>), Европейского бан-

ка данных для климатических исследований ВМО (KNMI, <https://climexp.knmi.nl>).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00721) в части климатических исследований и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00320) в части исследования энергетики России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Michaelowa A.* The Glasgow Climate Pact: A Robust Basis for the International Climate Regime in the 2020s // *Intereconomics*. 2021. V. 56. P. 302–303. <https://doi.org/10.1007/s10272-021-1004-7>
2. *Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г.* Парижская конференция по климату – поворотный пункт в истории мировой энергетики // *ДАН*. 2016. Т. 468. № 5. С. 521–524. <https://doi.org/10.7868/S0869565216170102>
3. *Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г.* Избежать потепления на 2°C – миссия невыполнима // *Теплоэнергетика*. 2016. № 9. С. 3–8. <https://doi.org/10.1134/S0040363616090022>
4. *Klimenko V.V., Mikushina O.V., Tereshin A.G.* Do we really need a carbon tax? // *Applied Energy*. 1999. V. 64. № 1–4. P. 311–316.
5. *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>
6. *Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В.* Сможет ли энергопереход остановить глобальное потепление и почему так сильно ошибаются климатические прогнозы? // *Теплоэнергетика*. 2022. № 3. С. 5–19. <https://doi.org/10.1134/S0040363622030067>
7. *Falk J., Gaffney O., Bhowmik A.K., Borgström-Hansson C., Pountney C., Lundén D., Pihl E., Malmodin J., Lenhart J., Jónás K., Höjer M., Bergmark P., Sareen S., Widforss S., Henningsson S., Plitt S., Shalit T.* Exponential Climate Action Roadmap. Stockholm, Sweden: Future Earth, 2018. 108 p.
8. *Energy Technology Perspectives 2020*. Paris: IEA, 2020.
9. *Makarov A.A., Mitrova T.A., Kulagin V.A.* Long-term development of the global energy sector under the influence of energy policies and technological progress // *Russian J. of Economics*. 2020. V. 6. № 4. P. 347–357. <https://doi.org/10.32609/j.ruje.6.55196>
10. *Vatalis K.I., Avlogiaris G., Tsalis T.A.* Just transition pathways of energy decarbonization under the global environmental changes // *J. Environmental Management*. 2022. V. 309. Id. 114713. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114713>
11. *Olabi A.G., Abdelkareem M.A.* Renewable energy and climate change // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. V. 158. Id. 112111.
12. *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M.M.B. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley.* Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
13. *Klimenko V.V., Mikushina O.V., Tereshin A.G.* A combined model for analysis and projection of the regional air temperature dynamics // *Proc. SPIE*. 2017. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; Id. 10466. <https://doi.org/10.1117/12.2287753>
14. *Клименко В.В.* Почему замедляется глобальное потепление? // *ДАН*. 2011. Т. 440. № 4. С. 536–539.
15. *Smil V.* The long slow rise of solar and wind // *Scientific American*. 2014. V. 282. № 1. P. 52–57. <https://doi.org/10.1038/SCIENTIFICAMERICAN0114-52>

GLASGOW-2021: A DIFFICULT ROAD TO 1.5°C GOAL

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

^aNational Research University “MPEI”, Moscow, Russia

^bEnergy Research Institute of RAS, Moscow, Russia

The possible consequences of the decisions of the 26th Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change (Glasgow, 2021) for the world energy and anthropogenic climate change were studied. A group of scenarios of anthropogenic impact on the global climate system is proposed, including the implementation of Glasgow solutions in the field of decarbonisation of the world economy, reduction of methane emissions and reforestation. It is shown that there is a technical potential to implement the Glasgow decisions, but the required pace of reformation of the world energy and the entire economy is unprecedented on a historical scale. Using the global carbon cycle and climate models developed at MPEI, changes in the chemical composition and thermal radiative balance of the Earth’s atmosphere, as well as the global average air temperature for each of the scenarios, were calculated. It is shown that the implementation of the entire range of measures proposed in Glasgow to reduce the anthropogenic impact on the planet’s climate system can limit warming within 1.5°C of the pre-industrial level, but there are serious doubts about the practical implementation of the proposed program of decarbonisation of the world economy.

Keywords: energy, decarbonization, methane emission, forests, climate change, models, scenarios