

БОРЬБА ЗА СПАСЕНИЕ КЛИМАТА: ЭЙФОРΙΑ ОТ ПЛАНОВ ПРОТИВ ХОЛОДНОЙ РЕАЛЬНОСТИ¹

© 2023 г. В. В. Клименко^{a, b, c, *}, А. В. Клименко^c, А. Г. Терешин^{a, b}, О. В. Микушина^{a, b}

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

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

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

*e-mail: nilgre@tpri.ru

Поступила в редакцию 12.09.2022 г.

После доработки 23.09.2022 г.

Принята к публикации 28.09.2022 г.

Исследованы возможные последствия решений 26-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (КС-26) для мировой энергетики и предстоящих изменений климата. Предложена группа сценариев антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему, включающая в себя реализацию решений КС-26 в области декарбонизации мировой экономики, снижения выбросов метана и восстановления лесов, а также альтернативные сценарии развития мировой энергетики, основанные на низких темпах роста численности населения планеты с точки зрения предотвращения опасных глобальных изменений климата. С помощью разработанных в НИУ МЭИ моделей глобального углеродного цикла и климата рассчитаны изменения химического состава и теплового радиационного баланса атмосферы Земли, а также средней глобальной температуры воздуха для каждого из сценариев. Показано, что только полная реализация всего спектра предложенных на КС-26 мероприятий по снижению антропогенного воздействия на климатическую систему планеты при сохранении современных темпов роста энергопотребления и численности населения мира способна удержать потепление в пределах 1.5°C, однако существуют серьезные сомнения в практическом выполнении предложенной программы декарбонизации мировой экономики. Вместе с тем естественные демографические процессы способны сдержать рост концентрации углекислого газа в атмосфере и обеспечить ее снижение еще до конца нынешнего столетия. В этом случае повышение средней глобальной температуры на 1.8°C по сравнению с доиндустриальным периодом (1850–1900 гг.) может быть вполне безопасным и не потребует крупномасштабной перестройки мировой энергетики.

Ключевые слова: энергетика, климат, атмосфера, демография, лесопользование, выбросы метана и диоксида углерода, модели, сценарии, средняя глобальная температура

DOI: 10.56304/S0040363623030013

В работе использованы данные Статистической и Демографической служб ООН (UN, <https://data.un.org/>), Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК ООН, <https://unfccc.int/>), 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/>), Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, <http://www.ipcc.ch/>), Национальной службы по атмосфере и океану США (NOAA/ESRL, <ftp://aftp.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/en/#data>), Европейского банка данных для климатических исследований Всемирной метеорологической организации (KNMI, <https://climexp.knmi.nl/>).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в НИУ МЭИ в части климатических и демографических исследований (проект № 20-19-00721) и в НИТУ МИСиС в части исследований энергетических ресурсов (проект № 22-29-00680).

Таблица 1. Население P , энергопотребление E , масса выбросов диоксида углерода V_C и метана V_M в 2020 г., год T_{\max} достижения пика эмиссии CO_2 $V_{C\max}$ для групп стран (в скобках указана доля от общих мировых значений, %)

| Номер группы | Группа | P , млрд чел. ¹ | E , млрд т у.т. ² | V_C , млрд т ³ | V_M , млн т ⁴ | T_{\max} ⁵ | $V_{C\max}$, млрд т ⁵ |
|--------------|--------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1 | “2050” | 1.33 (17) | 7.4 (39) | 2.9 (34) | 71 (19) | 2007 | 3.7 |
| 2 | “2060” | 2.01 (26) | 7.1 (37) | 3.5 (40) | 112 (30) | 2030 | 3.6 |
| 3 | “2070” | 1.38 (18) | 1.1 (6) | 0.6 (7) | 30 (8) | 2030–2040 | 0.7 |
| 4 | “2080” | 3.09 (39) | 3.4 (18) | 1.7 (19) | 160 (43) | 2030–2050 | 1.9 |
| 5 | Мир | 7.80 | 19.0 | 8.8 | 375 | 2019 | 9.7 |

Источники данных: ¹ООН; ²BP; ³CDIAC; ⁴EDGAR; ⁵РКИК ООН.

С 31 октября по 13 ноября 2021 г. в Глазго проходила 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 (Пакт Глазго, 2021), призванных замедлить, а затем и остановить дальнейшее повышение температуры. Важнейшими решениями, принятыми на конференции, являются следующие:

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

снизить антропогенную эмиссию метана, второго по значению парникового компонента атмосферы, на 30% к 2030 г. (Глобальное обязательство по метану). Первоначально 109 стран взяли на себя это обязательство, сегодня уже 130 стран присоединилось к нему, но четыре крупнейших эмитента (Австралия, Иран, Индия, Китай и Россия), ответственные за 33% глобальной эмиссии, пока поддерживаются от этой инициативы;

остановить утрату лесов к 2030 г. и в дальнейшем приступить к их восстановлению. Сегодня в этом обязательстве участвуют уже 145 стран, обладающие 91% площади лесов планеты.

Настоящая работа представляет собой попытку оценить эффективность предлагаемых мер, а также возможность их осуществления с точки зрения достижения главной цели – ограничить повышение средней глобальной температуры (СГТ) на 2.0 (1.5)°C по сравнению с доиндустриальным периодом.

Разработаны сценарии антропогенной эмиссии основных парниковых газов (диоксида углерода и метана), соответствующие принятым на

конференции решениям. Выполнены модельные оценки изменения атмосферных концентраций парниковых газов и вызванных этим изменений радиационно-теплового баланса атмосферы.

ГЛАЗГО-СЦЕНАРИИ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КЛИМАТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

Энергетика и эмиссия диоксида углерода²

Для формирования спектра возможных сценариев выбросов диоксида углерода в секторах мировой экономики, охваченных соглашениями конференции в Глазго, все страны мира были разделены 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 (Европейского союза), добровольные обязательства которых предусматривают достижение углеродной нейтральности не позднее 2050 г. Во вторую (“2060”) и третью (“2070”) вошли крупнейшие развивающиеся или переходные 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). Беднейшие страны Азии и Африки, не имеющие в настоящее время собственных планов

² В статье под энергетикой подразумеваются все процессы, связанные с потреблением энергии (электрогенерация, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство, промышленность). Соответственно, энергопотребление рассчитывается по первичной энергии (уголь, нефть, газ, ядерная и гидроэнергия, возобновляемые источники энергии), при этом безуглеродная выработка электроэнергии учитывается по среднемировому удельному расходу топлива на тепловой электростанции [в соответствии с данными BP в 2021 г. он составлял 303 г у.т./кВт·ч].

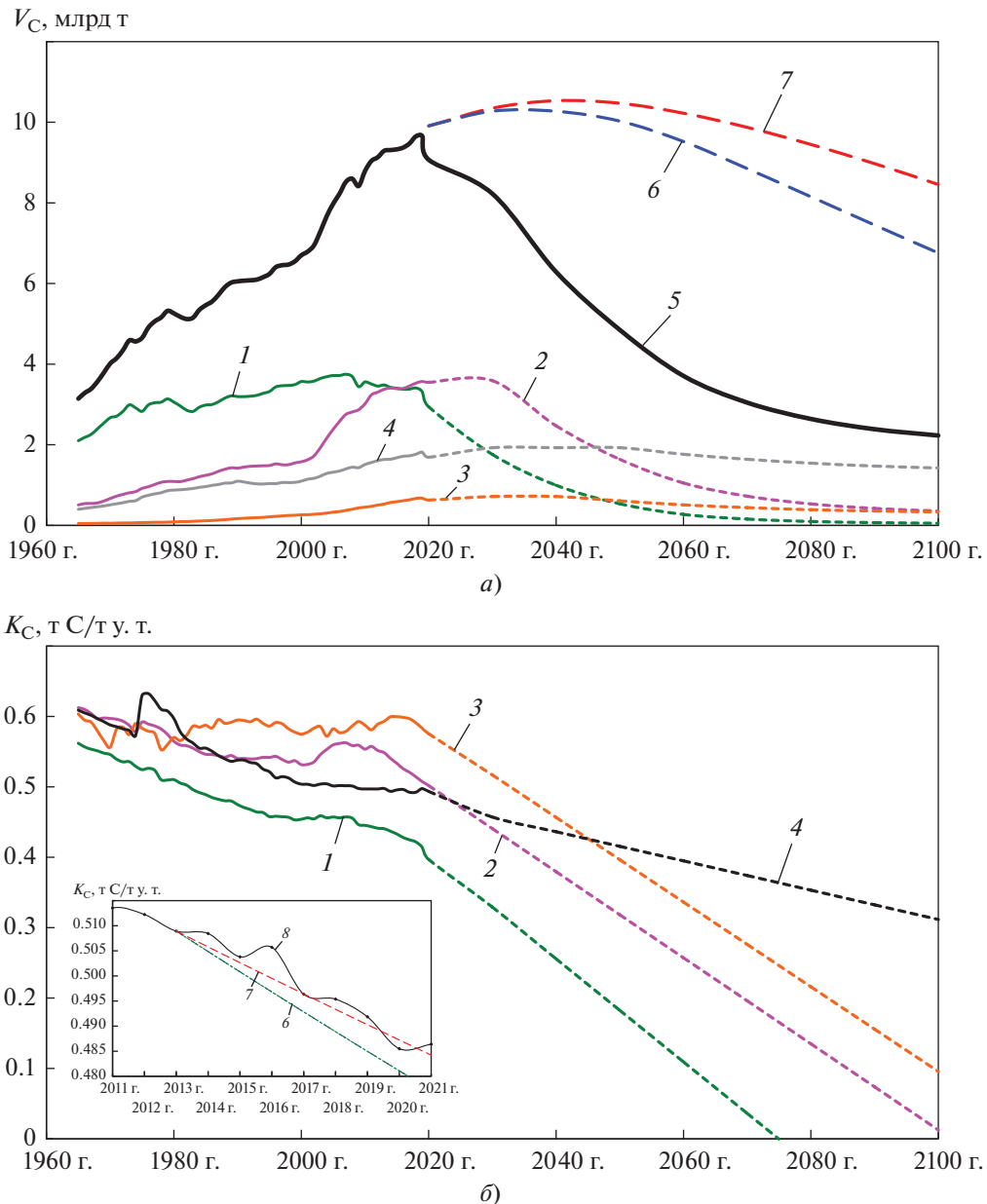


Рис. 1. Эмиссия диоксида углерода V_C (а) и углеродный коэффициент K_C (б) по сценарию настоящей работы (“Глазго”) для различных групп стран и мира в целом (1–5 из табл. 1) и глобальные базовый (6) и исторический (7) сценарии из [2, 3], данные ООН/ВР (8)

по радикальному сокращению выбросов парниковых газов, сведены в четвертую группу “2080”, для которой ожидается, что с финансовой и технологической помощью ведущих экономик мира они смогут достичь углеродной нейтральности к 2080 г.

Выполнение Парижских договоренностей должно привести к снижению выбросов CO₂ на 5% к 2050 г., на 10% к 2070 г. и на 30% к 2100 г. по сравнению с историческим сценарием. Оценки выбросов и углеродных коэффициентов представлены на рис. 1 вместе со сценариями из работ [2, 3],

написанных ранее по результатам Парижской конференции сторон РКИК ООН (2015 г.). Здесь углеродный коэффициент K_C — отношение эмиссии углекислого газа, выраженной в углеродных единицах, к коммерческому потреблению энергии, выраженному в массе условного топлива. Как было показано в работах [2, 3], такие объемы выбросов не обеспечивают удержание роста СГТ в пределах 2°C по сравнению с доиндустриальным периодом.

Существенно более радикальные ограничения на выбросы углерода, указанные в решениях кон-

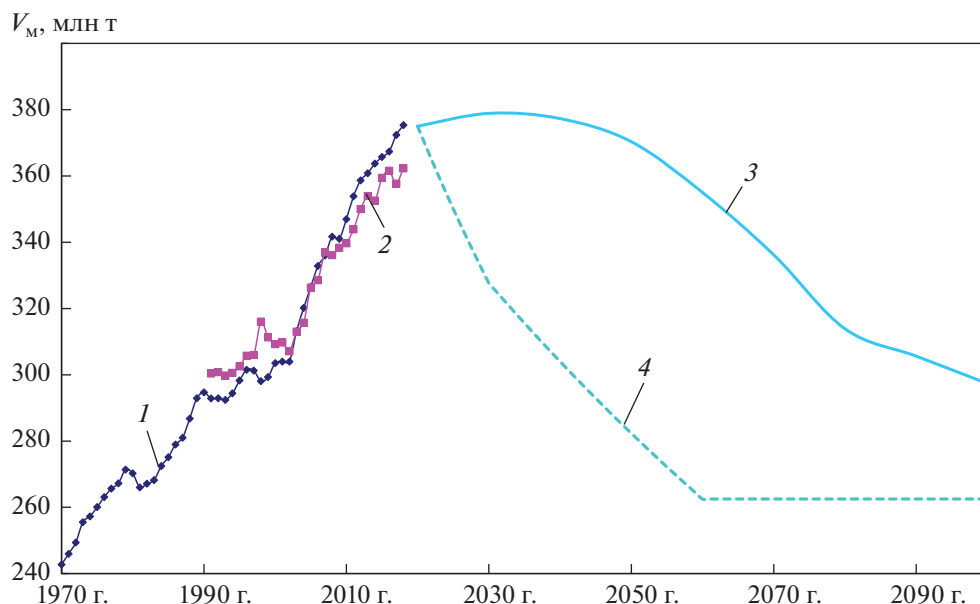


Рис. 2. Мировая эмиссия метана V_M по данным Европейской комиссии [4] (1), Всемирного банка [5] (2), а также сценарии RCP 4.5 (Representative Concentration Pathway) [6] (3) и “Глазго-метан” [7] (4)

ференции 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 — инициатива снизить антропогенные выбросы метана к 2030 г. на 30% (рис. 2). В отличие от углекислого газа, образующегося при сжигании органического топлива, более половины метана поступает в атмосферу из сельскохозяйственных источников, в то время как на энергетику и обращение с отходами приходится лишь около 30 и 20% соответственно. Вследствие этого более половины мировых антропогенных выбросов образуется в наиболее густонаселенных Индии, Китае и беднейших странах 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 должна привести к прекращению многовековой утраты лесного покрова Земли и последующему переходу к увеличению площадей лесов. Такой сценарий чрезвычайно близок к предложенному авторами еще в 1999 г. [8] биотическому варианту снижения антропогенного давления на углеродный баланс GEPL'97, предусматривающему восстановление лесов планеты до их доиндустриальных площадей (до 1800 г.). Альтернативой Глазго-сценарию для лесов служит вариант FAOSTAT из

недавней работы [9], согласно которому сохраняются тенденции последних десятилетий в сфере мирового лесопользования (рис. 3).

Декларированные Пактом Глазго изменения являются беспрецедентными в истории, а потому возникает резонный вопрос: возможны ли теоретически и технически такие масштабные преобразования в мировой экономике за такой короткий срок? В первую очередь этот вопрос должен быть адресован к ее ключевому сектору — энергетике, ответственной за 90% выбросов углерода и вовлеченной в последние десятилетия в масштабные реформы, получившие название глобального энергоперехода [14].

Анализ многочисленных публикаций ведущих научных организаций в этой области [15–19] показывает, что технический потенциал снижения выбросов диоксида углерода (в пересчете на углерод) в мире к 2030 г. составляет более 7 Гт/год и может быть реализован с помощью широкого спектра технологических и институциональных инструментов, примерно половина из которых относится к сфере энергетики и транспорта, причем возобновляемая энергетика может обеспечить около четверти снижения выбросов (рис. 4). Как было показано в [20], в период 1990–2017 гг. кумулятивное сокращение выбросов углекислого газа (в пересчете на углерод) составило более 15 Гт, из которых 7.4 Гт связано с повышением эффективности ТЭС и заменой на них угольного и нефтяного топлива природным газом, 7.5 Гт обеспечено развитием ГЭС и АЭС и лишь 0.3 Гт — генерацией с использованием НВИЭ.

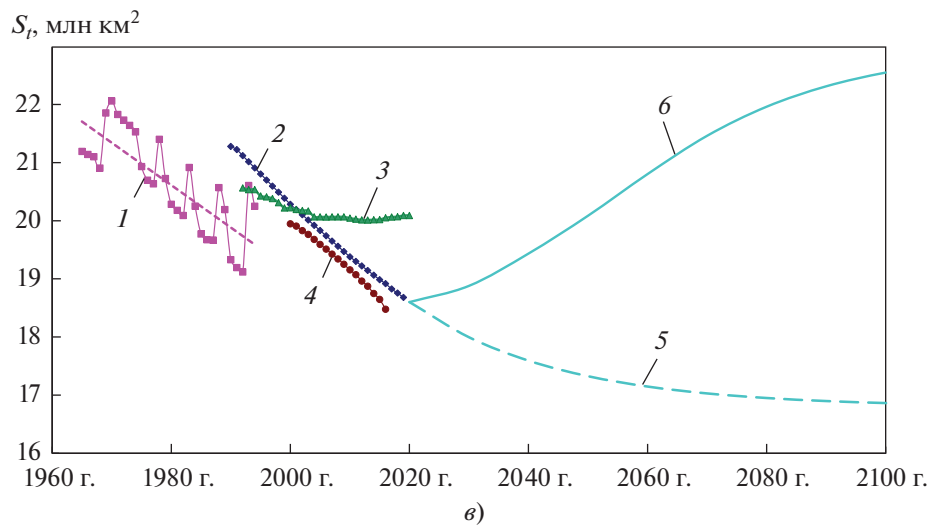
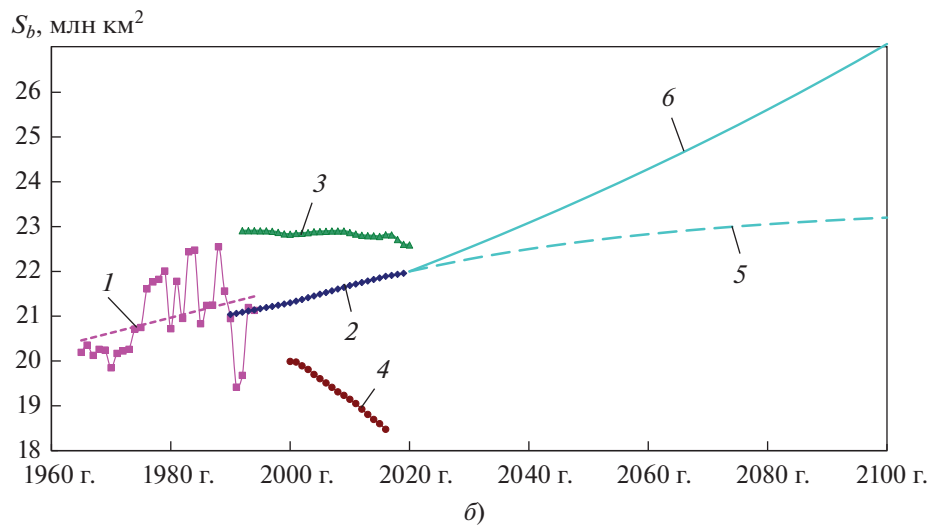
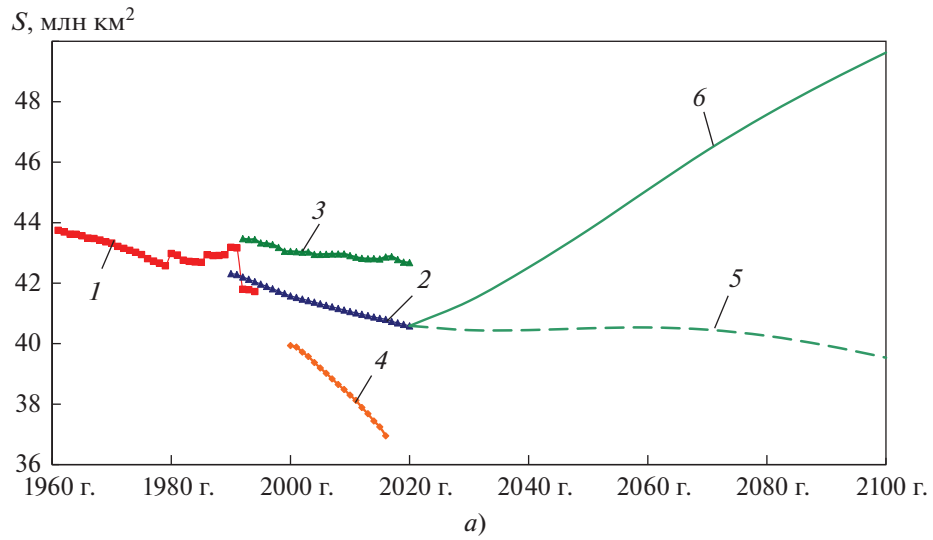


Рис. 3. Площадь лесов мира: суммарная S (а), умеренных и бореальных S_b (б), тропических S_t (в) – по данным инвентаризаций FAO 1995 г. [10] (1) и 2020 г. [11] (2) и результатам дистанционного зондирования Земли CCI_LC [12] (3) и LandSat [13] (4), а также сценарии FAOSTAT [9] (5) и GEPL'97 [7] (6)



Рис. 4. Вклад различных мероприятий, %, в сокращение эмиссии парниковых газов к 2030 г. (расчеты авторов по данным [15]).

НВИЭ – нетрадиционные и возобновляемые источники энергии

Изменения атмосферы и климата

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 НИУ МЭИ [9]. Концентрации метана рассчитаны по общепринятой балансовой модели, используемой МГЭИК [6], согласно предложенному Глазго-сценарию его антропогенной эмиссии. Радиационные форсинги CO_2 и CH_4 определены

по стандартным соотношениям, также рекомендованным МГЭИК [6].

Для оценки климатического эффекта каждого из рассмотренных в настоящей статье решений конференции в Глазго были сформированы четыре новых 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 консер-

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

| Номер варианта | Вариант (комбинация) | Сценарий | | |
|----------------|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | | индустриальная эмиссия CO_2 | антропогенная эмиссия CH_4 | биопоток CO_2 за счет лесов |
| 1 | “Париж” | “Париж” базовый [3] | “Париж” базовый [3] | FAOSTAT [9] |
| 2 | Глазго-метан | « | “Глазго” [7] | FAOSTAT [9] |
| 3 | Глазго-леса | « | “Париж” базовый [3] | GEPL’99 [9] |
| 4 | Глазго-леса + метан | « | “Глазго” [7] | GEPL’99 [9] |
| 5 | Глазго-полный | “Глазго” [7] | « | GEPL’99 [9] |

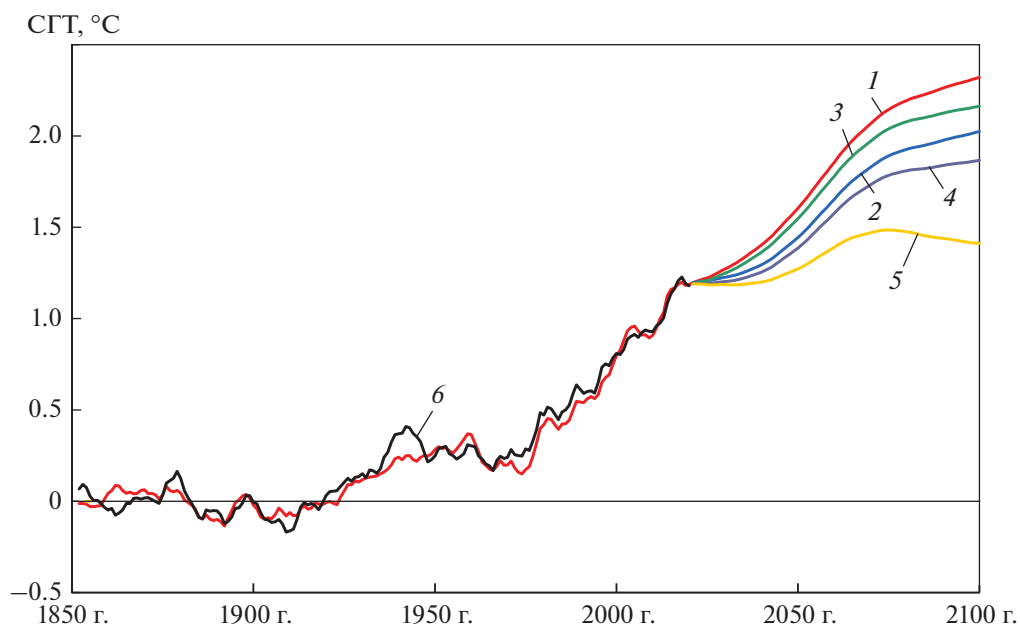


Рис. 5. Изменение СГТ (в сравнении со средними значениями за 1850–1900 гг.) по предложенным в настоящей работе вариантам антропогенного воздействия на атмосферу (1–5) из табл. 2 и историческим данным CRU, усредненным за пятилетия (6)

вативный вариант мирового лесопользования FAOSTAT из работы [9], предполагающий дальнейшую утрату лесов со средней скоростью примерно 1.5 млн га/год, что вполне соответствует данным FAO по инвентаризации площадей лесного покрова [10].

Расчеты СГТ по предложенным в настоящей работе сценариям антропогенного воздействия на атмосферу и климат были проведены на комбинированной климатической модели, разработанной в НИУ МЭИ [20], представляющей собой сочетание энергобалансовой и статистической моделей на базе множественной регрессии (рис. 5). В качестве входных данных использованы ряды радиационных форсингов парниковых газов, а также основных естественных климатических факторов — солнечной и вулканической активности, рассчитанные в соответствии с [6] по данным климатического архива KNMI о полном солнечном излучении и оптической плотности атмосферы. Для учета циркуляционных процессов в глобальной климатической системе [22] в качестве предиктора статистического блока климатической модели был использован индекс Атлантического мультideкадного колебания из базы данных KNMI.

Представленная на рис. 5 информация свидетельствует о том, что в настоящее время в развитии глобального потепления наступила продолжительная пауза, начавшаяся в 2015 г. и обусловленная сдерживающим влиянием естественных факторов климата, в первую очередь снижаю-

щейся солнечной активностью и изменением циркуляционных процессов в океане. Этот эффект был предсказан авторами ранее [22] и теперь реализуется в течение последних восьми лет, когда отклонения СГТ фактически стабилизировались на уровне 1.2°C. Эта пауза продлится до конца текущего десятилетия, после чего СГТ во всех сценариях, кроме 5 (см. табл. 2), возобновит свой рост, причем в базовом сценарии 1 (см. табл. 2) она достигнет рубежа 1.5°C уже в начале 2040-х годов, 2°C — в конце 2060-х годов и, наконец, 2.3°C к концу столетия, и лишь тогда наметится слабая тенденция к ее стабилизации.

Полное осуществление всех мероприятий Пакта Глазго позволяет снизить потепление относительно базового сценария к 2100 г. на 0.9°C, из которых 0.45°C приходится на программы энергоперехода и декарбонизации мировой экономики, 0.25°C — на сокращение эмиссии метана и около 0.2°C — на программы восстановления лесов. Сценарий 5 (см. табл. 2), предполагающий полную имплементацию всех намеченных мероприятий, является единственным, для которого повышение СГТ проходит через максимум на уровне 1.5°C в 2070-е годы 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 неожиданным

ный результат обусловлен тем, что атмосферное время жизни метана (около 12 лет) гораздо короче времени жизни углекислого газа (более столетия) [6]. Это означает, что снижение эмиссии метана приводит к значительно более быстрому сокращению 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 сообщества сферы, как производство продуктов питания и неизбежное в условиях декарбонизации энергетики расширенное использование природного газа. Не стоит забывать также, что основной источник поступления метана в атмосферу — это беднейшие страны мира (см. табл. 1), доля которых в глобальной эмиссии будет быстро увеличиваться в ближайшие десятилетия в связи с ростом их населения и, таким образом, нивелировать усилия развитых стран по сдерживанию.

Представленные на рис. 3 данные не внушают особого оптимизма по поводу ближайшей судьбы лесов планеты. Очевидно, что скорость вырубки тропических лесов если и снижается, то темпами, явно недостаточными для того, чтобы быть остановленной даже к середине столетия. Программы лесовосстановления в нетропической зоне, будучи весьма успешными во многих странах (Китай, США, Европа), тем не менее не компенсируют все еще значительную утрату лесов в развивающихся странах тропической зоны. При сохранении современных тенденций площадь лесов планеты может начать восстанавливаться не ранее 2060–2070 гг. Кроме того, даже наращивание их площади не означает восстановления прежних объемов фиксации углерода в лесном резервуаре, поскольку лесные плантации состоят из молодых и малопродуктивных деревьев и не замещают выбытие спелых лесов, подвергающихся вырубке. Наконец, не вполне ясно, на какие именно области могут быть распространены будущие лесные плантации. Ведь недостающая ныне площадь 10–12 млн км², которая была покрыта лесами к началу индустриальной революции, сейчас несвободна и занята сельскохозяйственными землями, городской, индустриальной и транспортной инфраструктурами и пр. Таким образом, осуществление лесной части Пакта Глазго с самого начала связано с серьезными затруднениями.

И все же основным инструментом в решении главной задачи Парижского соглашения является сокращение эмиссии углекислого газа, вызванной сжиганием ископаемого топлива. Однако, как выяснилось в последние 10 лет, с момента принятия Варшавской декларации (2013 г.), впервые призвавшей страны мира к “максимально быстрому” сокращению эмиссии CO₂, мировому

сообществу ни на шаг не удалось приблизиться к необходимой скорости декарбонизации мировой энергетики (см. рис. 1, б). Более того, дистанция между достигнутыми и необходимыми скоростями декарбонизации возрастает с каждым годом. На взгляд авторов, этот результат — проявление консервативности мировой энергетической системы, жесткая конструкция которой препятствует ее неоправданно быстрому реформированию [3, 23]. Отсюда следует, что обозначенная Пактом Глазго программа декарбонизации не может быть выполнена в срок и возжеленная цель 1.5°C не может быть достигнута, по крайней мере, в течение нынешнего столетия.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ДЕМОГРАФИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ

Геологическая история Земли и населяющей ее цивилизации развивается по своим естественно-научным законам, для которых геополитические возмущения не столь значимы, как экономические и гуманитарные. Поэтому проблема глобальных изменений климата, которая мировым научным сообществом признана как одна из важнейших для благополучия человечества [6], неизменно сохраняет свое значение. Правительства большинства стран мира, осознавая потенциальную угрозу развития глобального потепления для мировой экономики, последовательно принимали важные решения по ограничению антропогенного воздействия на климат (Рамочная конвенция ООН по изменению климата, 1992 г.; Киотский протокол, 1997 г.; Парижское соглашение РКИК, 2015 г.; Пакт Глазго, 2021 г.), направленные на предотвращение повышения средней глобальной температуры более чем на 1.5–2.0°C по сравнению с доиндустриальным периодом (1850–1900 гг.) — уровнем, признанным максимально допустимым [6].

Однако, как было показано в [3, 10, 24], меры, предусмотренные Парижским соглашением, неспособны обеспечить достижение этой цели, и лишь новые масштабные ограничения, накладываемые недавним Пактом Глазго (2021 г.), теоретически позволяют реализовать эту возможность. Вместе с тем воплощение курса Глазго потребует беспрецедентных усилий во всех основных отраслях мировой экономики (энергетике, транспорте, сельском и лесном хозяйстве) и сегодня выглядит трудновыполнимым. Авторы настоящей работы не раз выражали сомнение в том, что мировое сообщество располагает реальными возможностями для удержания повышения средней глобальной температуры в заданных пределах. Эта задача действительно выглядит почти неразрешимой, но только в том случае, если народонаселение мира продолжит свой безостановочный рост в период до конца столетия.

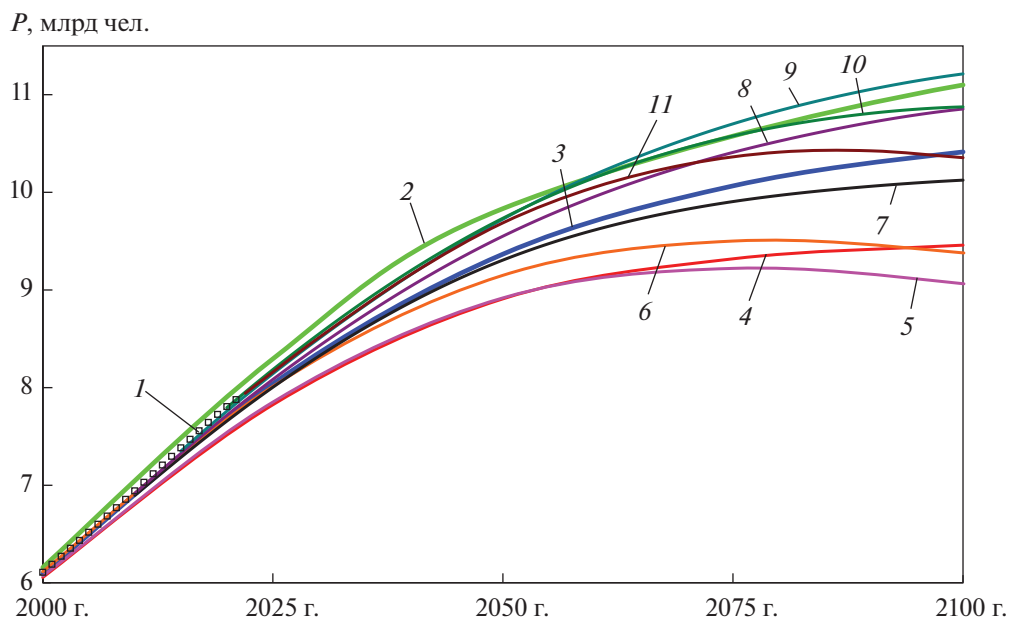


Рис. 6. Эволюция «средних» сценариев численности мирового населения ООН P по оценкам 1995–2022 гг. и данные демографической статистики.

1 – данные ООН [25]; сценарии ООН WPP (World Population Projections) Medium разных годов: 2 – 1995; 3 – 1998; 4 – 2000; 5 – 2004; 6 – 2008; 7 – 2010; 8 – 2012; 9 – 2015; 10 – 2019; 11 – 2022

Демография

Именно так сегодня выглядит демографическая картина мира в представлении Отдела народонаселения ООН (рис. 6), согласно которой численность населения мира стабилизируется в конце столетия на уровне 9–11 млрд чел., т.е. примерно на четверть выше современного. Соответственно, и влияние на окружающую среду (без применения дополнительных ограничительных мер) также обречено на возрастание в ближайшие десятилетия. Совершенно очевидно, что масштаб этого влияния критическим образом зависит от того, какому именно из представленных на рис. 6 сценариев суждено осуществиться. Случилось так, что представления ООН в последние 50 лет играют доминирующую роль в области демографического прогнозирования. В самом деле, почти во всех известных прогнозах развития энергетики, промышленности, сельского и лесного хозяйства, транспорта используется только один долгосрочный демографический прогноз – медианный прогноз ООН, который выпускается на регулярной основе каждые два года начиная с 1980-х годов, а нерегулярно – с 1951 г. Едва ли не единственным исключением является предпоследний доклад Межправительственной группы экспертов по изменениям климата [23], в котором был использован альтернативный демографический прогноз Института прикладного системного анализа [24, 26].

Такая беспредельная вера в единственный источник прогноза не встречается ни в одной другой области современного знания и вызвана в немалой степени тем, что ООН до сих пор, по-видимому, хорошо справляется с возложенной на нее миссией. Например, численность народонаселения мира, составившая 7.79 млрд чел. в 2020 г., практически точно совпадает с прогнозом 1980 г. [27], но, правда, сильно отличается от прогноза 1973 г. (8.42 млрд чел.) и даже прогноза 1990 г. (8.09 млрд чел.) [27]. Таким образом, все, что известно сейчас, – это способность ООН продуцировать удовлетворительные прогнозы с точностью до 5% на горизонтах до 40 лет [28], но про качество более далеких прогнозов сегодня сказать ничего нельзя, поскольку горизонты дальностью более 50 лет вошли в обращение лишь в 1994 г., а свыше 80 лет – только в 2010 г. Однако теперь в свете событий последних десятилетий уже не кажется невероятным резкое снижение фертильности [здесь фертильность – ключевой демографический фактор, определяемый как количество рождений, приходящееся на одну женщину репродуктивного возраста (15–49 лет)] во многих странах мира до уровня гораздо ниже простого воспроизводства населения, и поэтому стоит присмотреться к тем демографическим прогнозам, авторы которых достаточно тщательно и подробно изучают такую возможность.

На недостатки прогнозов ООН настойчиво обращает внимание ряд современных исследовате-

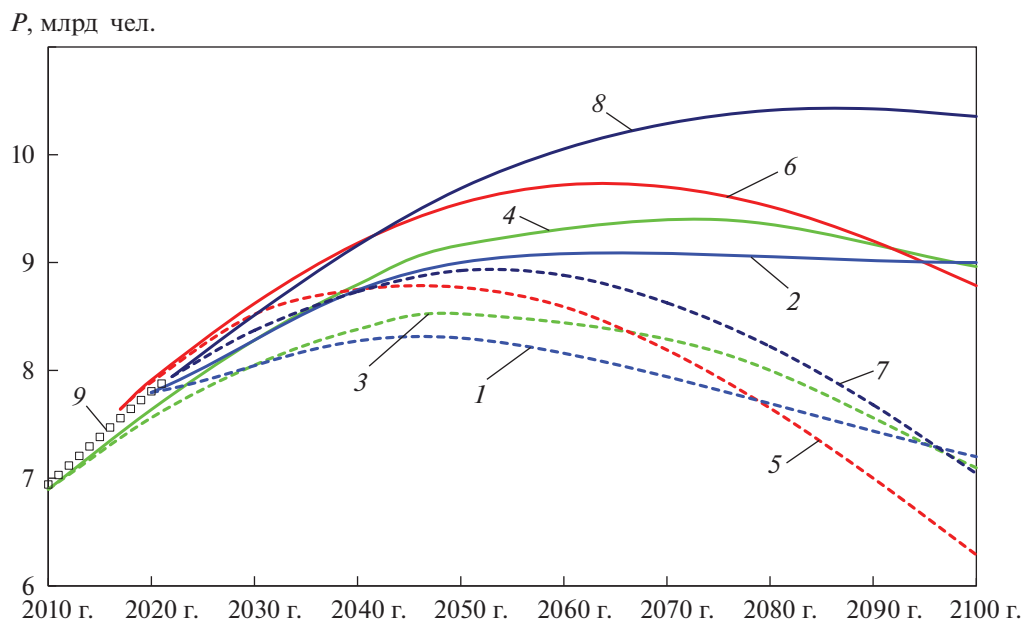


Рис. 7. Альтернативные сценарии численности населения мира с депопуляцией: Акаев, Давыдова (2020) [24] низкий (1) и высокий (2); ПАСА (2014) [29, 30] SSP1-Rapid Development (3) и SSP2-Medium (4); Vollset et al. (2020) [31] SDG pace (5) и Reference (6); ООН (2022) [25] WPP 2022 Low (7) и Medium (8), а также исторические данные ООН (2022) [25] (9)

лей [29–33]. Главный недостаток этих прогнозов видится в весьма произвольном предположении о финальной конвергенции фертильности к единому значению 1.75 для всех стран мира, преодолевших в своем развитии критический порог фертильности 2.10, соответствующий простому воспроизводству населения. Однако в последнюю четверть столетия появились десятки стран, в которых фертильность упала гораздо ниже 1.75 и остается на этом чрезвычайно низком уровне десятилетиями (Греция, Италия, Польша, Таиланд, Тайвань, Южная Корея и др.). Оказывается также, что финальные значения фертильности прекрасно коррелируют с двумя ключевыми социальными факторами – продолжительностью обучения и доступностью средств регулирования рождаемости для женщин репродуктивного возраста. Учет этих новых обстоятельств позволяет выстроить более обоснованные демографические модели, которые предсказывают достижение пика численности населения мира уже через несколько десятилетий, т.е. в течение жизни одного-двух поколений с заметной последующей депопуляцией до конца столетия.

Анализ публикаций последних лет показывает, что численность населения планеты в конце текущего столетия, скорее, может находиться в пределах 6–9 млрд чел. (рис. 7), что, несомненно, должно сказаться на воздействии земной цивилизации на окружающую среду. В этой системе воззрений медианный прогноз ООН является вовсе не золотой серединой, как многие склонны полагать, а верхней огибающей целого се-

мейства альтернативных сценариев (см. рис. 7). В настоящей работе используются два таких сценария [31] вместе с традиционным медианным сценарием ООН [25].

Энергетика и выбросы диоксида углерода

В первую очередь вышеупомянутые демографические процессы повлияют на мировое энергопотребление. Как было показано ранее [34], в результате постиндустриального развития удельное душевое энергопотребление стабилизируется на уровне, в основном определяемом природно-географическими условиями, и в среднем по миру составит около 3 т у.т./чел. · год, что почти не отличается от современного. Это означает, что динамика будущего энергопотребления практически полностью определяется демографическим фактором.

Для настоящих расчетов авторы использовали два демографических сценария из работы [31], а именно – высокий “базовый (reference)” и более низкий “устойчивый (Sustainable Development Goal – SDG)” как наиболее аргументированные с медицинской точки зрения и находящиеся в верхней и нижней частях диапазона депопуляционных сценариев (см. рис. 7).

В этом случае снижение численности населения приводит к уменьшению потребления энергии в мире (рис. 8), которое к концу столетия может достигнуть 20–40% базового варианта (примерно 30 млрд т у.т. к 2100 г.). Более того, в радикальном сценарии SDG валовое энергопо-

требление уже к середине столетия прекращает свой рост, а к концу века и вовсе оказывается ниже современного.

Уменьшение потребления энергии неминуемо приводит к снижению эмиссии основного парникового газа – диоксида углерода. В настоящей работе рассматриваются две основные траектории развития мировой энергетики в текущем столетии (табл. 3):

“const CC rate” – сохранение темпов снижения углеродной интенсивности энергопотребления, предусмотренных Парижским соглашением (примерно 0.8%/год) [2, 3];

“const nonCO₂ rate” – сохранение темпов развития безуглеродных источников энергии, необходимых для выполнения условий Парижского соглашения, при которых ежегодное производство энергии с их помощью к 2100 г. достигнет примерно 20 млрд т у.т. [2, 3].

В итоге мировая индустриальная эмиссия диоксида углерода после 2030 г. существенно снизится – на 15–40% по сравнению с базовым Парижским сценарием из [2, 3], а в наиболее радикальном варианте – даже в 10 раз к концу столетия (рис. 9).

Концентрации CO₂ и средняя глобальная температура

Результаты расчетов изменения средней глобальной концентрации диоксида углерода для двух вариантов развития мировой энергетики по демографическим сценариям [31] “reference” и SDG представлены на рис. 10. При снижении индустриальной эмиссии углекислого газа вследствие демографически обусловленного уменьшения энергопотребления будут существенно меняться тенденции изменения содержания этого основного парникового газа в атмосфере Земли и сформируется максимум концентрации CO₂ во второй половине столетия на уровне 500–520 ppm, за которым последует ее дальнейшее снижение.

Изменения выбросов прочих парниковых газов (метан, закись азота, хлорфторуглеводороды и пр.), а также оксидов серы и соответствующий радиационный форсинг (изменения теплового радиационного баланса атмосферы) принимались пропорциональными снижению численности населения для каждого из демографических сценариев по сравнению с базовым (Парижским) сценарием.

Выполненные на комбинированной климатической модели НИУ МЭИ расчеты изменения средней глобальной температуры по используемым демографическим сценариям представлены на рис. 11 вместе с оценками из работы [7] для сценария имплементации инициатив по транс-

E , млрд т у.т.,
 e , т у.т./чел.

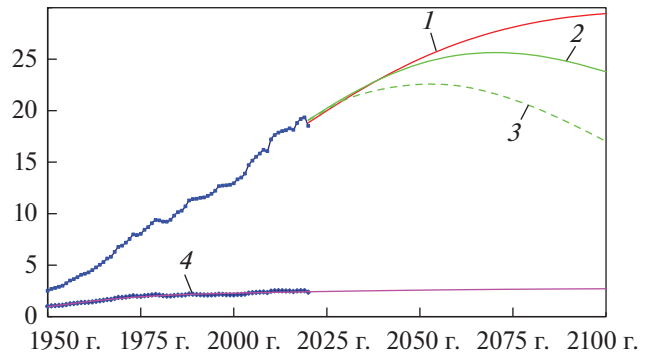


Рис. 8. Валовое E (1–3) и удельное e (4) коммерческое энергопотребление по демографическим сценариям ООН [25] WPP 2022 Medium (1) и Vollset et al. (2020) [31] Reference (2) и SDG pace [30] (3) вместе с историческими данными ООН/ВР (4)

формации мировой энергетики Конференции сторон РКИК ООН в Глазго (2021 г.).

Следует отметить, что рассмотренные здесь альтернативные демографические сценарии [31] не предполагают осуществление жестких насильственных мер по ограничению рождаемости. Напротив, даже наиболее радикальный сценарий SDG непосредственно вытекает из целей устойчивого развития, провозглашенных Генеральной Ассамблеей ООН в 2015 г., предусматривающих распространение современных образовательных, медицинских и гигиенических стандартов на развивающиеся страны. Тем более поразительно, что по сути глобальная гуманитарная акция оказывает на динамику климата эффект в перспективе даже больший, чем осуществление Великого энергетического перехода (см. рис. 11). Демографический переход позволяет достичь главной цели Парижского соглашения путем использования преимущественно гуманитарных средств без болезненной и чрезвычайно затратной ломки мировой энергетической системы и отказа от исторически сложившихся стандартов потребления, неизбежно связанных с глобальным энергопереходом.

Таблица 3. Комбинации демографических и энергетических сценариев

| Номер сценария | Демографический сценарий [31] | Энергетический сценарий настоящей работы |
|----------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| 1 | Reference | “const CC rate” |
| 2 | Reference | “const nonCO ₂ rate” |
| 3 | SDG pace | “const CC rate” |
| 4 | SDG pace | “const nonCO ₂ rate” |

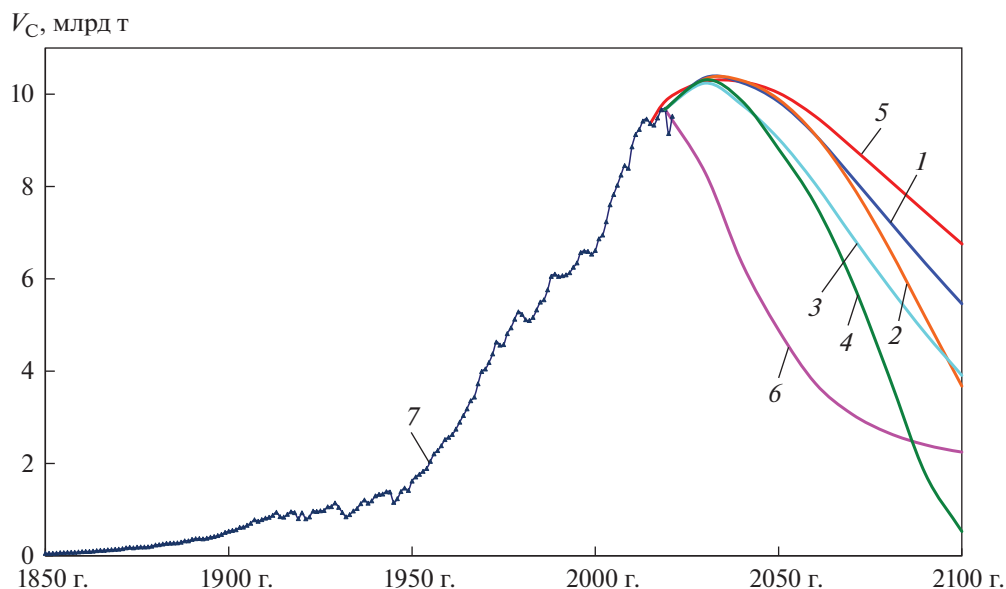


Рис. 9. Индустриальная эмиссия CO_2 .

1–4 – расчеты настоящей работы (для вариантов демографических сценариев 1–4 из табл. 3); 5 – базовый Парижский сценарий [2, 3]; 6 – сценарий Глазго-энергопереход [7]; 7 – исторические данные CDIAC/UN/ВР

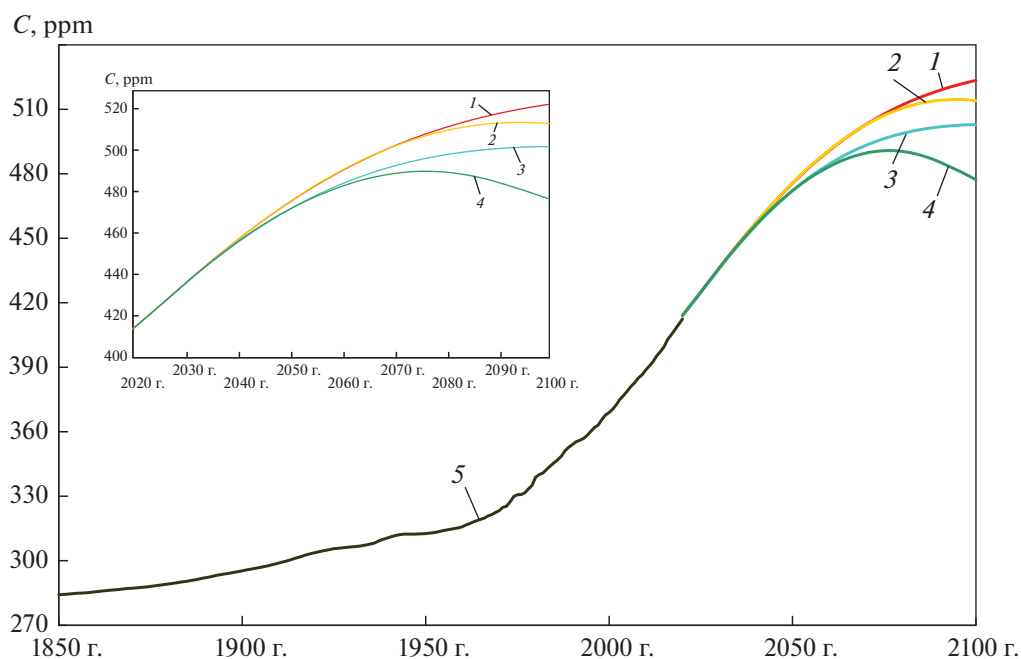


Рис. 10. Изменение средней глобальной концентрации диоксида углерода C .

1–4 – модельные оценки настоящей работы (для вариантов демографических сценариев 1–4 из табл. 3); 5 – исторические данные МГЭИК и NOAA

ВЫВОДЫ

Сходные результаты получены и другими исследователями, например [35], которые указывают на важную роль демографической политики (планирование семьи, контроль рождаемости и пр.) в снижении антропогенного воздействия на климатическую систему.

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

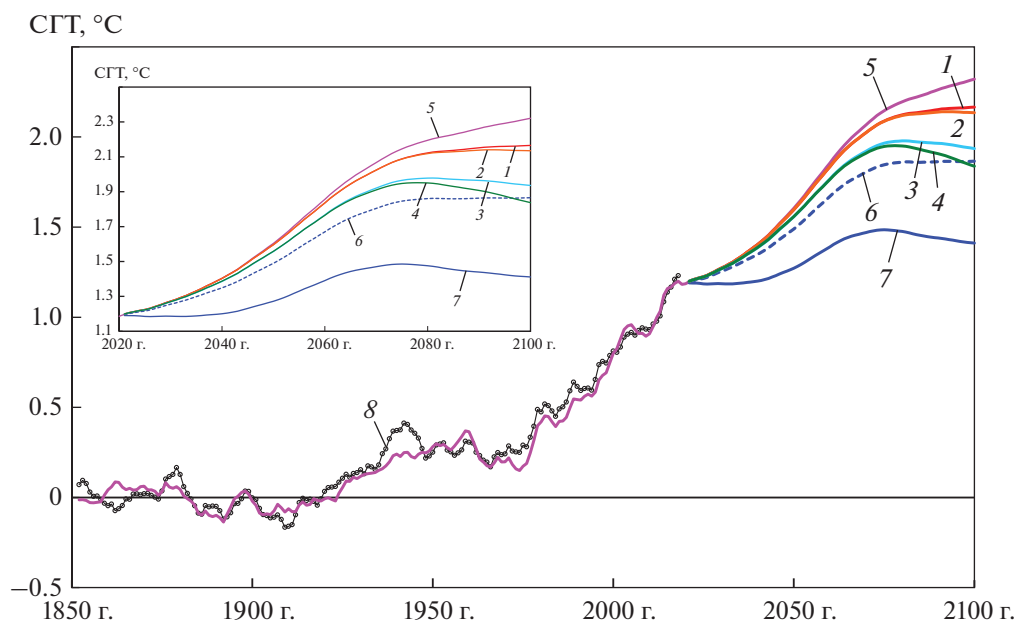


Рис. 11. Изменение СГТ в сравнении со средними значениями за 1850–1900 гг.

1–4 – модельные оценки настоящей работы (для вариантов демографических сценариев 1–4, см. табл. 3); 5 – базовый сценарий “Париж” [2, 3]; 6, 7 – сценарии “Глазго-энергопереход” и “Глазго-полный” [7]; 8 – данные наблюдений CRU

Однако реально достигнутая в последние 10 лет скорость декарбонизации в 1.5 раза ниже предусмотренной Парижским соглашением и на порядок ниже требуемой Пактом Глазго. С точки зрения исторического опыта развития мировой энергетики осуществление Пакта Глазго невозможно.

2. Сегодня мир находится на траектории, ведущей к повышению температуры на 2.3°C к концу столетия, но даже при современных довольно низких скоростях декарбонизации энергетики эффективные мероприятия в неэнергетических секторах (сокращение эмиссии метана и переход от сведения к восстановлению лесов) теоретически способны удержать повышение температуры в пределах 2.0°C до конца столетия.

3. Мировое сообщество не располагает реальными возможностями ограничить повышение температуры 2.0°C и тем более 1.5°C, и они не появятся, если не будет остановлен рост народонаселения мира во время жизни нынешнего или следующего поколения. Естественное развитие процессов в демографической сфере, таких как совершенствование женского образования, расширение доступности средств регулирования рождаемости, поощрение миграции, способствует разрешению климатической и иных проблем, связанных с деградацией окружающей среды.

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 // Докл. АН. 2016. Т. 468. № 5. С. 521–524.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216170102>

3. **Избежать потепления на 2°C – миссия невыполнима** / В.В. Клименко, А.В. Клименко, О.В. Микушина, А.Г. Терешин // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 3–8.
<https://doi.org/10.1134/S0040363616090022>

4. **Emissions database for global atmospheric research (EDGAR)**, release EDGAR v6.0_GHG (1970–2018) of May 2021. European Commission, Joint Research Centre (EC-JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). <https://edgar.jrc.ec.europa.eu>

5. **CAIT climate data explorer**. Washington, DC: World Resources Institute, 2022.

6. **Climate change 2013. The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change** / 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; N.Y., USA: Cambridge University Press, 2013.

7. **Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г.** Глазго-2021: трудная дорога к цели в 1.5°C // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 505. № 1. С. 50–56.
<https://doi.org/10.31857/S2686740022040046>

8. **Klimenko V.V., Mikushina O.V., Tereshin A.G.** Do we really need a carbon tax? // Appl. Energy. 1999. V. 64. No. 1–4. P. 311–316.

9. **Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г.** Динамика биотических потоков углерода при различных сценариях изменения площади лесов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 462–472. <https://doi.org/10.31857/S0002351520040033>
10. **18 FAO Production Yearbook 1994.** V. 48. Rome: FAO, 1995.
11. **Global forest resources assessment 2020: Main Report.** Rome: FAO, 2020.
12. **Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015** / H. Liu, P. Gong, J. Wang, N. Clinton, Y. Bai, S. Liang // *Earth System Sci. Data*. 2020. V. 12. No. 2. P. 1217–1243. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1217-2020>
13. **High-resolution global maps of 21st century forest cover change** / M.C. Hansen, P.V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S.A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S.V. Stehman, S.J. Goetz, T.R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C.O. Justice, J.R.G. Townshend // *Science*. 2013. V. 342. № 6160. P. 850–853.
14. **Сможет ли энергопереход остановить глобальное потепление и почему так сильно ошибаются климатические прогнозы?** / В.В. Клименко, А.В. Клименко, А.Г. Терешин, О.В. Микушина // *Теплоэнергетика*. 2022. № 3. С. 5–19. <https://doi.org/10.1134/S0040363622030067>
15. **Exponential climate action roadmap** / J. Falk, O. Gaffney, A.K. Bhowmik, C. Borgström-Hansson, C. Pountney, D. Lundén, E. Pihl, J. Malmodin, J. Lenhart, K. Jónás, M. Höjer, P. Bergmark, S. Sareen, S. Widforss, S. Henningsson, S. Plitt, T. Shalit. Stockholm, Sweden: Future Earth, 2018.
16. **Energy Technology Perspectives 2020.** Paris: IEA, 2020.
17. **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. Economics*. 2020. V. 6. No. 4. P. 347–357.
18. **Vatalis K.I., Avlogiaris G., Tsalis T.A.** Just transition pathways of energy decarbonization under the global environmental changes // *J. Environ. Manage.* 2022. V. 309. Id. 114713. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114713>
19. **Olabi A.G., Abdelkareem M.A.** Renewable energy and climate change // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2022. V. 158. Id. 112111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112111>
20. **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** От Рио до Парижа через Киото: как усилия по охране глобального климата влияют на развитие мировой энергетики // *Теплоэнергетика*. 2019. № 11. С. 5–15. <https://doi.org/10.1134/S004036361911002X>
21. **Klimenko V.V., Mikushina O.V., Tereshin A.G.** A combined model for analysis and projection of the regional air temperature dynamics // *Proc. of SPIE: The 23rd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. San Jose, CA VSA, 26 Febr.–2 March 2017. Id. 10466. <https://doi.org/10.1117/12.2287753>
22. **Клименко В.В.** Почему замедляется глобальное потепление? // *Докл. АН*. 2011. Т. 440. № 4. С. 536–539.
23. **Smil V.** The long slow rise of solar and wind // *Scientific American*. 2014. V. 282. No. 1. P. 52–57. <https://doi.org/10.1038/SCIENTIFICAMERICAN0114-52>
24. **Акаев А.А., Давыдова О.И.** Парижское климатическое соглашение вступает в силу. Состоится ли великий энергетический переход? // *Вестник РАН*. 2020. Т. 90. № 10. С. 926–938. <https://doi.org/10.31857/S0869587320100023>
25. **World Population Prospects 2022.** N.Y.: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022.
26. **IPCC.** Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: World Meteorological Organization, 2018.
27. **World population prospects as assessed in 1980.** N.Y.: United Nations, 1981.
28. **Buettner T.** World population prospects – A long view // *Economie et Statistique*. 2020. No. 520–521. P. 9–27. <https://doi.org/10.24187/ecostat.2020.520d.2030>
29. **Lutz W., Butz W.P., KC S.** World population and human capital in the 21st century. Oxford: Oxford University Press, 2014.
30. **KC S., Lutz W.** The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100 // *Global Environ. Change*. 2017. V. 42. P. 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.004>
31. **Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: A forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study** / S.E. Vollset, E. Goren, C.W. Yuan, J. Cao, A.E. Smith, T. Hsiao, C. Bisignano, G.S. Azhar, E. Castro, J. Chalek, A.J. Dolgert, T. Frank, K. Fukutaki, S.I. Hay, R. Lozano et al. // *Lancet*. 2020. V. 396 (10258). P. 1285–1306. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30677-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30677-2)
32. **Акаев А.А., Садовничий В.А.** Математическая модель демографической динамики со стабилизацией численности населения мира вокруг стационарного уровня // *Докл. АН*. 2010. Т. 435. № 3. С. 320–324.
33. **Энергетика, демография, климат – есть ли альтернатива отказу от ископаемого органического топлива?** / В.В. Клименко, А.В. Клименко, О.В. Микушина, А.Г. Терешин // *Докл. РАН. Физика, технические науки*. 2022. Т. 506. № 2. С. 66–72. <https://doi.org/10.31857/S2686740022070070>
34. **Клименко В.В., Терешин А.Г.** Мировая энергетика и глобальный климат после 2100 г. // *Теплоэнергетика*. 2010. № 12. С. 38–44.
35. **Population growth and climate change. Addressing the overlooked threat multiplier** / J.C. Dodson, P. Dérer, P. Cafaro, F. Götmarm // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 748. Id. 141346. DOI [j.scitotenv.2020.141346](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141346)

Struggle for Climate Saving: The Euphoria of Plans against Cold Reality

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

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

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

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

*e-mail: nilgpe@mpei.ru

Abstract—Possible outcomes from the decisions adopted at the COP26, the latest Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), for the world energy and upcoming climate changes are studied. The article suggests a group of scenarios for man-induced impacts on the global climatic system, which includes implementation of the COP26 decisions in the field of world economy decarbonization, reduction of methane emissions, and reforestation as well as alternative world energy development scenarios based on a low globe population growth level from the viewpoint of preventing dangerous global climate changes. By using the global carbon cycle and climate models developed at the National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI), changes in the chemical composition and thermal radiation balance of Earth's atmosphere, as well as the global average air temperature, are evaluated for each scenario. It is shown that global warming by 1.5°C can only be kept if the entire range of measures suggested at COP26 on reducing the man-induced impact on Earth's climatic system is implemented in the full scope while keeping the energy consumption and world population growth rates at the contemporary levels; however, there are serious doubts as to whether the proposed world economy decarbonization program can really be implemented. At the same time, the natural demographic processes are able to curb the growth of carbon dioxide concentration in the atmosphere and decrease it even before the end of this century. In that case, the increase in the global average temperature by 1.8°C in comparison with that in the preindustrial period (1850–1900) may be quite safe and will not require large-scale reformation of the world energy sector.

Keywords: energy, climate, atmosphere, demography, forest management, methane and carbon dioxide emissions, models, scenarios, global average temperature