
«ПЕРЕОСМЫСЛИВАЯ ПРЕДЕЛЫ». ДОКЛАД РОССИЙСКИХ УЧЕНЫХ РИМСКОМУ КЛУБУ

А. А. АКАЕВ, О. И. ДАВЫДОВА

КЛИМАТ И ЭНЕРГЕТИКА. СЦЕНАРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА И ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕНДЕНЦИЙ¹

Статья посвящена анализу климатических изменений и моделированию энергетического перехода на возобновляемые источники энергии. Современная климатическая ситуация характеризуется общим повышением средней глобальной температуры в результате чрезвычайно высокой концентрации углекислого газа (CO₂) в атмосфере, количество которого постоянно увеличивается и представляет угрозу для устойчивости глобальной экологической системы в целом. Принимая во внимание тот факт, что основная часть выбросов CO₂ приходится на энергопотребление (которое на протяжении всей истории переживало переходы от одного вида доминирующего энергоресурса к другому – от биомассы к углю, от угля к нефти и от нефти к природному газу), авторы анализируют возможности перехода к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), который, по прогнозам, произойдет во второй половине XXI в. Авторы проводят математическое моделирование предстоящего энергетического перехода с различными сценариями будущего топливно-энергетического баланса в XXI в. Для этого ученые разработали специализированную

¹ Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Математические методы анализа сложных систем» при финансовой поддержке РФФ (проект № 20-61-46004). Статья основана на главе 4 доклада российских ученых Римскому клубу «Переосмысливая пределы».

математическую модель, учитывающую современные тенденции энергопотребления на основе данных крупнейших энергетических компаний и международных организаций в сфере энергетики, таких как BP, Equinor, ExxonMobil, Shell, REN21, Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA), Международное энергетическое агентство (МЭА), Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), «Сколково» и др. Представлены и проанализированы три сценария повышения средней глобальной температуры приземной атмосферы в XXI в.: консервативный сценарий, амбициозный сценарий и сценарий Net Zero. Консервативный сценарий предполагает, что государственная политика, технологии и социальные предпочтения продолжат развиваться так же, как и в недавнем прошлом. Амбициозный сценарий предусматривает принятие мер, ведущих к значительному сокращению выбросов углерода от использования энергии, что, в свою очередь, позволяет ограничить рост глобальной температуры в XXI в. Сценарий Net Zero, который авторы считают оптимальным, предполагает, что меры, предлагаемые в амбициозном сценарии, дополняются и подкрепляются существенными изменениями в поведении и предпочтениях общества. В статье подробно описаны современные энергоэффективные технологии и методы использования возобновляемых источников энергии, реализация которых предусмотрена в рамках оптимального сценария Net Zero.

Ключевые слова: климат, энергетика, климатические изменения, энергетический переход, энергоресурсы, возобновляемые источники энергии, экологическая система, сценарии будущего, консервативный сценарий, амбициозный сценарий, сценарий Net Zero.

Современная ситуация

Как известно, с 1850 г. концентрация углекислого газа в атмосфере существенно выросла: с 280 ppm – величины, типичной для доиндустриального периода и наблюдаемой на протяжении многих сотен лет – до 421 ppm в настоящее время, то есть более чем на 50 %, что во многом способствовало потеплению климата (NOAA 2022). Доказано, что глобальное потепление на две трети вызвано именно ростом концентрации CO₂ в XIX–XX вв. в атмосфере Земли. Эти цифры обоснованы физическими измерениями в течение последних 150 лет как динамики средней мировой температуры приземной атмосферы, так и динамики роста концентрации CO₂ в атмосфере Земли (IPCC 2014; 2021). Углекислый газ постоянно накапливается в атмосфере Земли, а объемы его выбросов в настоящее время находятся в апогее (BP 2021; IEA 2020a; 2021a). Согласно данным Всемирной метеорологической организации, в 2021 г. средняя глобальная температура повысилась уже на 1,2 °C

по сравнению с доиндустриальным уровнем в +14 °С, что является прямым следствием антропогенной деятельности (WMO 2021). Изменение климата стало одной из самых острых проблем, с которыми сталкивается человечество. Его последствия наблюдаются повсеместно². Увеличивается температура мирового океана, наблюдаются таяние ледников и повышение уровня моря (Lindsey 2020), экстремальные погодные условия становятся более стремительными, суровыми и разрушительными: наводнения, ураганы. Только в течение 2020 г. в мире произошло более 415 природных катастроф (Statista 2022). Стихийные бедствия в среднем убивают 60 000 человек в год во всем мире (Ritchie, Roser 2021). Темпы деградации пахотных земель превышают исторические темпы в 30–35 раз (ООН 2021)³, происходят опустынивание территорий и снижение урожайности (Группа Всемирного банка 2014; МГЭИК 2019; ООН 2019; Ortiz-Oberea *et al.* 2021), связанные в том числе с истощением запасов воды. Согласно организации Welthungerhilfe, в 2020 г. от голода пострадали 811 млн человек (Welthungerhilfe 2021), что в свою очередь может привести к появлению регионального напряжения и усугублению существующих конфликтов. Климатологи показали, что если до середины века не уменьшить выбросы CO₂ в два-три раза, то потепление не удержать на уровне 2 °С, и к концу XXI в. оно превысит 3–4 °С, что приведет к катастрофическим последствиям (IPCC 2021), поэтому необходимо срочно принимать меры.

В 2015 г. было принято Парижское соглашение, целью которого стало удержание потепления на уровне 1,5–2 °С (United Nations 2016). Для достижения этой цели, по расчетам Международной группы экспертов по изменению климата, необходимо сокращение энергетических выбросов парниковых газов в атмосферу в три раза по сравнению с выбросами 2019 г. (33,3 Гт) примерно к 2050 г. (1,5 °С) или к 2070 г. (2 °С) (IPCC 2018).

Как известно, выбросы углекислого газа могут иметь естественную и антропогенную природу. Естественные выбросы выделяются океанами при проявлениях вулканической активности, при естественных пожарах и в процессе перегнивания органических

² Этот вопрос был в центре внимания многих недавних отчетов Римского клуба. См.: Randers 2012; Maxton *et al.* 2016; Wijkman, Skånberg 2017; Randers *et al.* 2018; von Weizsäcker, Wijkman 2018; Berg 2019.

³ См. статью Н. О. Ковалевой и Е. М. Столпниковой «Экология: жизнь в “неустойчивой биосфере”» в этом номере.

материалов. Ранее, в естественном состоянии, такие выбросы поглощались природными процессами, сохранялось равновесие. В результате антропогенной деятельности (сжигание ископаемого топлива, вырубка лесов, земледелие и т. д.) равновесие было нарушено (IPCC 2018).

В настоящее время около 15–20 % выбросов CO₂ генерирует сектор сельского хозяйства, лесного хозяйства и землепользования (Climate Watch 2021; Our World In Data 2020). Источниками углекислого газа стали осваиваемые человеком почвы. Увеличение глобальной температуры вызывает более интенсивное выделение углекислого газа из почв. Ежегодно в атмосферу из почв поступает около 60 петаграмм CO₂ за счет «дыхания» (Our World In Data 2020).

Безусловно, на глобальный уровень промышленных выбросов CO₂ в атмосферу значительным образом влияет энергопотребление (которое уже достигло 14 млрд тонн нефтяного эквивалента в год [BP 2021]), а также структура мирового топливно-энергетического баланса. Вклад энергопотребления в глобальные выбросы CO₂ сегодня превышает 73 % (Our World In Data 2020). На протяжении исторического периода структура энергопотребления постоянно менялась, происходили так называемые «энергетические переходы» от текущей модели энергопотребления к новой, от преимущественного использования одного ресурса к другому ресурсу (Смил 2012). В истории известны три таких перехода – от биомассы к углю, от угля к нефти и от нефти к природному газу (ИНЭИ РАН 2019). В настоящий момент доли источников энергии в мировом энергопотреблении распределяются следующим образом: нефть – 31,2 %, природный газ – 24,7 %, уголь – 27,2 %, атомная энергетика – 4,3 %, гидроэнергия – 6,9 %, возобновляемые источники энергии – 5,7 % (BP 2021). В XXI в. прогнозируется четвертый энергетический переход к возобновляемым источникам энергии. Великий энергетический переход от использования доминирующих в настоящее время ископаемых углеводородов к преимущественному использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), когда доля ВИЭ в общем энергобалансе превысит 40 %, может состояться в 2060-е гг.

Возможные сценарии дальнейшего развития ситуации

Для того чтобы спрогнозировать предстоящий энергетический переход и выбрать оптимальный сценарий развития топливно-

энергетического баланса в XXI в., была разработана специализированная математическая модель (см.: Malkov *et al.* 2023). Для разработки и верификации модели были изучены сложившиеся в настоящее время тенденции в энергопотреблении и проанализированы статистические данные по энергопотреблению и топливно-энергетическому балансу следующих организаций: ВР (2021; 2020), Международное энергетическое агентство (IEA 2020b; 2021c), Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA 2020; 2021), Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC 2014; 2018; 2021), Всемирная ядерная ассоциация (WNA 2020), Мировой энергетический совет (WEC 2019), Организация стран – экспортеров нефти (ОПЕК 2021), Equinor (2020; 2021), Greenpeace (2015), DNV GL (DNV 2021a; 2021b), Shell (2013; 2018), «Сколково» (ИНЭИ РАН 2019), REN21 (2019; 2021), ExxonMobil (2019; 2021) и др.

Предложенная математическая модель позволяет прогнозировать изменение средней глобальной температуры приземной атмосферы в XXI в. (Акаев, Davydova 2020; 2021a; 2021b) в соответствии со следующим расчетным механизмом:

- расчет различных сценариев роста населения (Акаев, Sadovnichii 2010; Капица 2008);

- расчет сценариев развития динамики спроса на энергию (Акаев 2012; 2014);

- прогноз динамики структуры энергопотребления по видам источников энергии (уголь, нефть, газ, возобновляемые источники энергии, атомная энергия, гидроэнергетика) (Акаев, Davydova 2021a; 2021b);

- расчет динамики выбросов CO₂ в атмосферу при сжигании углеводородного топлива с учетом структурных изменений в потреблении органического ископаемого топлива (уголь, нефть, газ), а также использования технологий улавливания и хранения углерода;

- расчет динамики накопления CO₂ в атмосфере с учетом непроизводственных выбросов CO₂ (из-за вырубки лесов и эрозии почв) и поглощения части выбросов океанами и наземными экосистемами;

- расчет изменения средней глобальной температуры приземной атмосферы на основе использования методики (Тарко 2005), связывающей динамику отклонения средней глобальной температуры с ростом динамики накопления углерода (углекислого газа) в атмосфере Земли.

С учетом статистических данных за период 1960–2021 гг. и наблюдаемых в последние годы трендов в сфере энергопотребления, а также внедряемых энергоэффективных технологий, были отобраны и рассчитаны три сценария роста средней глобальной температуры приземной атмосферы в XXI в.: консервативный сценарий, амбициозный сценарий и сценарий Net Zero. Консервативный сценарий предполагает, что государственная политика, технологии и социальные предпочтения продолжают развиваться так же, как и в недавнем прошлом. Амбициозный сценарий предусматривает введение мер, приводящих к существенному снижению выбросов углерода в результате использования энергии, что, в свою очередь, дает возможность ограничить рост глобальной температуры в XXI в.⁴ Сценарий Net Zero предполагает, что меры, предложенные в амбициозном сценарии, дополняются и подкрепляются существенными изменениями в поведении и предпочтениях общества. Динамика изменения структуры мирового топливно-энергетического баланса на XXI в. при реализации консервативного сценария, амбициозного сценария и сценария Net Zero представлена на рис. 1–3:

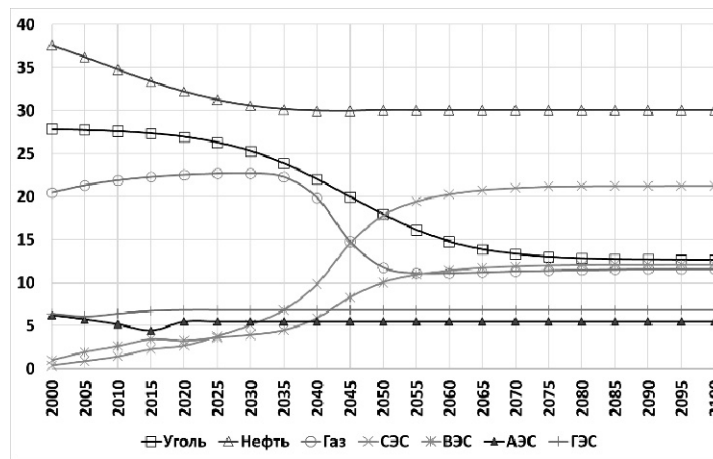


Рис. 1. Динамика изменения структуры мирового топливно-энергетического баланса на XXI век при реализации консервативного сценария

⁴ О сценариях глобального развития в экономическом, социальном и политическом измерениях, актуальных для проблемы предотвращения катастрофических климатических изменений, см.: (Grinin L. E., Grinin A. L., Malkov 2023a; 2023b; Grinin, Malkov, Korotayev 2023; Grinin L. E., Grinin A. L., Korotayev 2023; Grinin, Korotayev 2023; Korotayev *et al.* 2023).

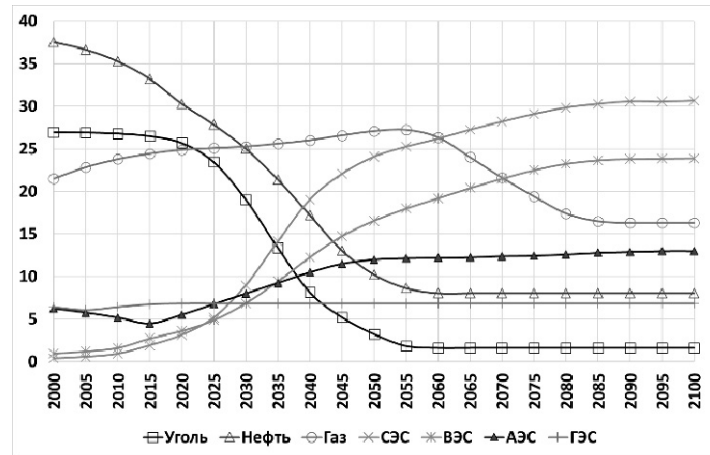


Рис. 2. Динамика изменения структуры мирового топливно-энергетического баланса на XXI в. при реализации амбициозного сценария

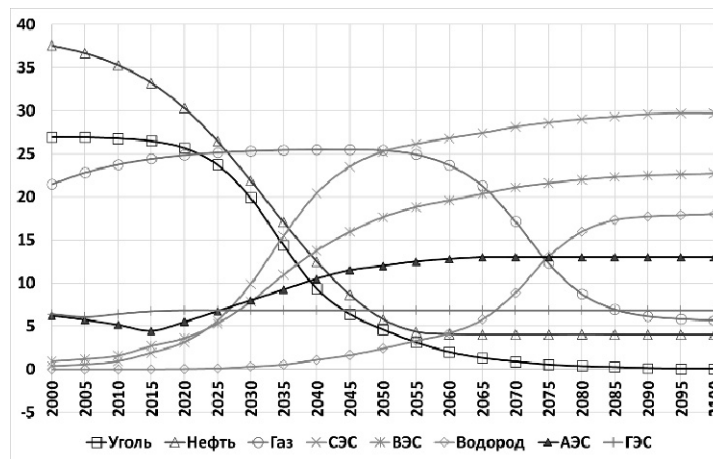


Рис. 3. Динамика изменения структуры мирового топливно-энергетического баланса на XXI в. при реализации сценария Net Zero

С помощью разработанной модели был найден оптимальный сценарий (Net Zero), при реализации которого будут выполнены требования Парижского климатического соглашения по удержанию глобального потепления на уровне 1,5–2 °С по сравнению с доиндустриальным уровнем. Сценарий Net Zero предполагает (Акаев, Davydova 2021a; 2021b):

– использование энергоэффективных технологий (Randers *et al.* 2018);

- широкое использование водорода как энергоносителя;
- дальнейшее развитие возобновляемых источников энергии;
- широкое использование химической технологии по улавливанию, связыванию и захоронению углекислого газа.

Существует множество энергоэффективных технологий, способствующих снижению выбросов углерода. Пример значительной экономии энергопотребления – широкое применение интеллектуальных цифровых технологий для управления расходом энергии. Данные, собираемые «умными датчиками», являются ключевым фактором в системе энергопотребления, работа которой оптимизируется интеллектуальными цифровыми устройствами, путем регулирования спроса и предложения в реальном времени.

«Умные сети» на основе данных производителей и потребителей позволяют в режиме реального времени синхронизировать спрос и предложение оптимальным образом (ИНЭИ РАН 2019). Они способны с учетом сложившихся метеоусловий регулировать потоки электроэнергии из одних регионов в другие.

В настоящее время также разрабатываются «умные устройства – потребители энергии» (Там же). Потребитель устанавливает оборудование для оптимизации режимов отбора электрической энергии на основе потребностей и нагрузки системы. Таким образом, для потребителя становится возможным не только принимать энергию, но и отдавать ее в сеть, получая прибыль.

В настоящее время 26 % мировых выбросов CO₂ генерируется транспортным сектором (IEA 2019). Решить проблему таких выбросов могут транспортные средства, приводимые в движение электродвигателями. Гибридные автомобили уже достигли большей топливной эффективности на 65 %, чем автомобили с бензиновым двигателем (Vorrath 2015). Транспортные средства, работающие на бензине, потребляют в четыре раза больше энергии по сравнению с полностью электрическими транспортными средствами (*Ibid.*; Energy Efficiency Day 2020; Virta 2021). В 2019 г. во всем мире было продано более 2 млн новых электромобилей (IEA 2021b), но их количество необходимо существенно увеличивать.

Также следует расширять использование различных энергоэффективных технологий для дома. Например, благодаря солнечным панелям годовые выбросы парниковых газов могут быть снижены на более чем 1350 кг в пределах одного домовладения. Использование экологически чистой возобновляемой солнечной энергии для обеспечения энергией миллиона домов позволяет сократить выбро-

сы углекислого газа на 4,3 млн тонн в год (NCAT 2021). Ветрогенераторы могут применяться для генерации постоянного или переменного тока с дальнейшим преобразованием его в тепло посредством тепловых насосов с целью обогрева зданий и нагревания воды. «Холодные крыши» помогают снизить расходы на кондиционирование в летнее время года на 15 %. Светодиодное освещение благодаря высокому КПД светодиодов и низкой потребляемой мощности позволяет экономить до 80 % электроэнергии (Janeway 2015). Учитывая, что около 20 % потерь тепла из дома происходит через плохо изолированные окна, установка энергосберегающих окон с двойным или тройным остеклением дает эффект снижения расходов на отопление в холодный период года и кондиционирование в жаркое время года. Согласно информации Лаборатории Лоуренса Беркли, от 5 до 10 % всего домашнего энергопотребления тратится на работу техники в режиме ожидания, что в конечном итоге способствует 1 % глобальных выбросов углекислоты в атмосферу (Meier 2021). Умные удлинители могут вовремя отключать неиспользуемые приборы, уменьшая таким образом расход электроэнергии. Программируемые комнатные термостаты позволяют сэкономить до 30 % электроэнергии, поскольку нагрев помещений производится не постоянно, а в определенные интервалы времени. Приборы, имеющие сертификат ENERGY STAR, каждый год будут потреблять на 10–50 % меньше энергии, чем его неэффективные эквиваленты (HomeAdvisor 2021).

Таким образом, один из важных залогов успеха – развитие самых разнообразных энергосберегающих и энергоэффективных технологий, улавливателей CO₂ и других загрязняющих веществ, а не только попытка заменить углеродные энергетические технологии зелеными.

Хотя водород широко используется в настоящее время, он далек от полного раскрытия своего потенциала в качестве источника энергии. Требуется множество исследований для обеспечения дешевой и устойчивой экологически чистой водородной энергии, полученной только из возобновляемых источников (с помощью гидроэнергетики, солнечных панелей или ветряных электростанций) без выбросов или, по крайней мере, с использованием систем хранения углерода (CCS), которые помогают избежать его выбросов в атмосферу. Зеленый водород производится путем электролиза, когда электричество вырабатывается только из источников с нулевым содержанием углерода. Эта технология позволяет существенно снизить выбросы CO₂, но в настоящее время она является слиш-

ком дорогой (IRENA 2019). В 2015 г. себестоимость производства 1 кг зеленого водорода составляла 6 долларов США (Casey 2021). За последние пять лет стоимость снизилась до 3 долларов за килограмм (S&P Global 2021). Для сравнения, один килограмм серого водорода, производимого из углеродных источников, стоит 1,80 доллара, голубого водорода (с использованием технологии CCS) – 2,40 доллара. Министерство энергетики США ожидает, что в 2025 г. себестоимость производства зеленого водорода снизится до 2 долларов за килограмм, и в этом случае он может стать конкурентоспособным по сравнению с другими невозобновляемыми источниками (EIA US 2021). Европейский союз, Япония, Южная Корея, Австралия, Нидерланды, Норвегия, Чили и Канада уже разработали водородные стратегии. Европейский союз поставил перед собой цель увеличить мощность электролизеров до 6 ГВт к 2024 г. и до 40 ГВт к 2030 г. (Patel 2021).

Сегодня доля зеленого водорода составляет менее 1 % от общего объема произведенного водорода. В ближайшие десятилетия ожидается экспоненциальный (до 60 % в год) рост производства зеленого водорода (Holbrook 2021). В целом в большинстве отчетов предполагается, что водород, произведенный только из возобновляемых источников энергии, будет составлять 10–25 % энергопотребления в XXI в. (Buli 2021; Flowers 2020; Scott 2020). Расчеты по разработанной модели показывают, что зеленый водород достигнет 18 % энергопотребления в XXI в. (см. рис. 4).

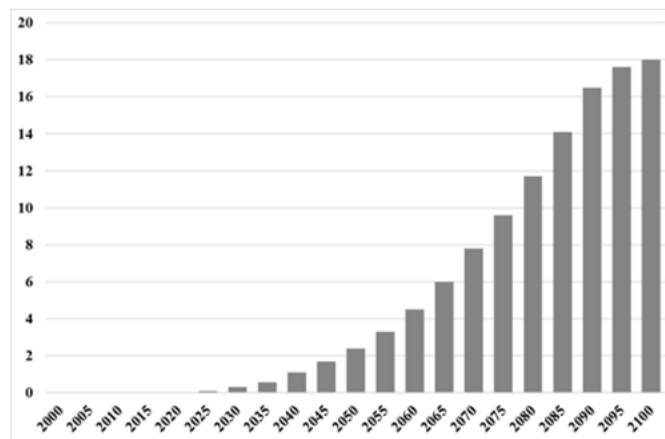


Рис. 4. Доля зеленого водорода в структуре мирового топливно-энергетического баланса на XXI век (сценарий Net Zero) (рассчитано авторами)

Также требуется широкое использование химической технологии по улавливанию, связыванию и захоронению углекислого газа как в процессе сжигания углеводородов в энергоустановках, так и непосредственно из атмосферы, что отражено в расчетах по модели. Однако этому препятствует дороговизна технологии.

Очевидно, что для успешной реализации сценария Net Zero требуются значительные инвестиции. К сожалению, инвестиционные потоки в настоящее время направляются в те области, которые приносят максимальную прибыль, а не пользу обществу в долгосрочной перспективе (Randers 2012; Maxton *et al.* 2016). Только в случае, когда появляются убедительные доказательства ущерба, деньги тратятся на снижение негативных последствий потепления климата, то есть на то, что можно было предотвратить.

Результаты прогнозных расчетов динамики сокращения антропогенных выбросов углекислого газа в атмосферу в XXI в. при реализации консервативного сценария, амбициозного сценария и сценария Net Zero представлены на рис. 5–7:



Рис. 5. Динамика сокращения антропогенных выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу в XXI в. при консервативном сценарии энергоперехода



Рис. 6. Динамика сокращения антропогенных выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу в XXI в. при амбициозном сценарии энергоперехода



Рис. 7. Динамика сокращения антропогенных выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу в XXI в. при сценарии энергоперехода Net Zero при использовании водорода и технологии CCS для улавливания и захоронения части CO_2

Результаты прогнозных расчетов динамики отклонения средней глобальной температуры приземной атмосферы в XXI в. при реализации консервативного сценария, амбициозного сценария и сценария Net Zero представлены на рис. 8–10:



Рис. 8. Динамика отклонения средней глобальной температуры приземной атмосферы в XXI в. при реализации консервативного сценария энергоперехода, а также применения технологии CCS в угольной энергетике



Рис. 9. Динамика отклонения средней глобальной температуры приземной атмосферы в XXI в. при реализации амбициозного сценария «Великого энергоперехода», а также применения технологий CCS в угольной энергетике

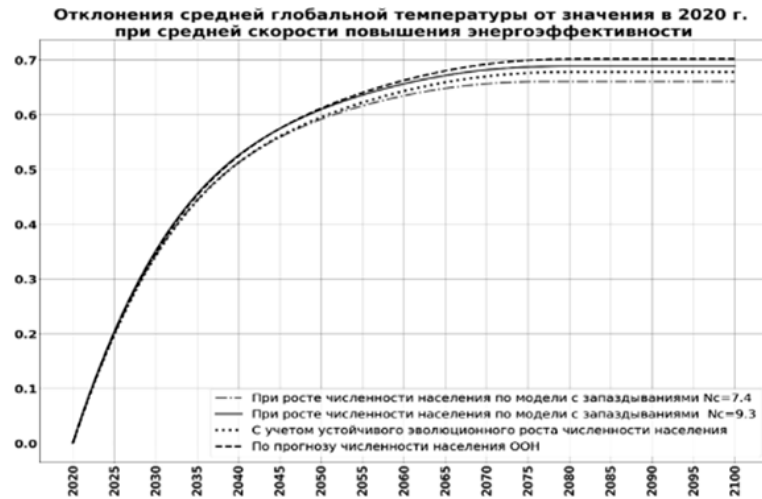


Рис. 10. Динамика отклонения средней глобальной температуры приземной атмосферы в XXI в. при реализации сценария энергоперехода Net Zero, применения технологии CCS в угольной энергетике и использования водорода

Заклучение

Расчеты показывают, что при реализации консервативного сценария глобальное потепление достигнет 2 °С, при реализации амбициозного сценария составит 1,8 °С. Сценарий Net Zero позволит удержать глобальное потепление на уровне 1,7 °С (Акаев, Давыдова 2021a; 2021b).

Так как консервативный сценарий предполагает, что к 2050 г. доля ископаемых источников энергии останется на уровне 60–65 %, это приведет к недопустимому уровню выбросов CO₂. Это далеко от текущих амбициозных целей – сокращения выбросов на 50–80 % к 2050 г. При реализации консервативного сценария в ближайшие десятилетия будут наблюдаться более частые экстремальные погодные явления. Во многих местах наводнения, ранее происходившие один раз в столетие, к 2050 г. будут случаться гораздо чаще, возможно, ежегодно. При подъеме уровня моря на несколько метров будет затоплено около 30 % суши, являющейся густонаселенной территорией (Мир 24 2021). Согласно исследованию, проведенному учеными Потсдамского института изучения климатических изменений, к 2100 г. вследствие таяния континентальных льдов уровень Мирового океана может повыситься на 0,75–1,5 метра

(Potsdam... 2013). В итоге через 100 лет под воду уйдет Венеция, еще через 50 лет – Амстердам, Гамбург, Лос-Анджелес, Санкт-Петербург и другие города.

Климатического кризиса можно избежать, если мир начнет действовать решительно и сообща и примет меры, необходимые для снижения выбросов углекислого газа. В частности, мировому сообществу необходимо перенаправить инвестиционные потоки с наиболее выгодных на те, которые принесут пользу обществу в долгосрочной перспективе. Ежегодные глобальные инвестиции в климат в среднем составляли 632 млрд долларов в год в течение 2019 и 2020 гг. (Burg 2021). Для сравнения, глобальный ВВП в 2020 г. составил 85 трлн долларов США, то есть в настоящий момент глобальные инвестиции в климат составляют менее 1 % мирового ВВП. Как показывают расчеты, для успешной реализации сценария Net Zero требуются значительные инвестиции в развитие возобновляемых источников энергии. Сценарий Net Zero предполагает увеличение доли возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом балансе до 50–60 % к 2050 г. с текущих 6 %. Таким образом, необходимо более существенно расширять использование солнечной и ветряной энергии. Инвестиции необходимы также для расширения использования энергоэффективных технологий, в том числе интеллектуальных цифровых технологий и энергоэффективных технологий для дома. Изучение и совершенствование химической технологии по улавливанию, связыванию и захоронению углекислого газа также требует финансирования. Кроме того, инвестиции следует направить на развитие водородной, атомной и термоядерной энергетики. Частично они могут быть получены посредством увеличения налогов на выбросы CO₂, что в свою очередь способствует решению проблемы глобального потепления. Как показывают расчеты, при реализации вышеперечисленных мер будут выполнены требования Парижского климатического соглашения по удержанию глобального потепления на уровне 1,5–2 °С по сравнению с доиндустриальным уровнем.

Литература

Группа Всемирного банка. 2014. *Убавьте тепло: Лицом к лицу с новой климатической нормой*. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/ru/318441468238479152/pdf/927040v10Russi0s0010ES0with0embargo.pdf>.

ИНЭИ РАН. 2019. *Прогноз развития энергетики мира и России 2019*. Доклад ИНЭИ РАН. М.: Московская школа управления СКОЛКОВО.

Капица, С. П. 2008. *Очерк теории роста человечества. Демографическая революция и информационное общество*. М.: Никитский клуб.

МГЭИК. 2019. *Глобальное потепление на 1,5 °С: Резюме для политиков*. URL: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwim_5DkxJX2AhVOiYsKHVygB9MQFnoECBIAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ipcc.ch%2Fsite%2Fassets%2Fuploads%2Fsites%2F2%2F2019%2F09%2FSR15_Summary_Volume_russian.pdf&usq=AOvVaw119bQPnLk_sZCqmgibvp40 (дата обращения: 25.04.2021).

Мир 24. 2021. *В ближайшие годы произойдет глобальная природная катастрофа*. Мир 24 17 января. URL: <https://mir24.tv/news/16492071/klimatolog-v-blizhaishie-gody-proizoidet-globalnaya-prirodnaya-katastrofa> (дата обращения: 29.09.2021).

ООН

2019. *Борьба с изменением климата*. URL: <https://www.un.org/ru/aboutun/booklet/climate.shtml> (дата обращения: 21.01.2021).

2021. *Всемирный день борьбы с опустыниванием и засухой*. 17 июня. URL: <https://www.un.org/ru/observances/desertification-day/background> (дата обращения: 21.12.2021).

Смил, В. 2012. *Энергетика: мифы и реальность. Научный подход к анализу мировой энергетической политики*. М.: АСТ-ПРЕСС КНИГА.

Тарко, А. М. 2005. *Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов*. М.: ФИЗМАТЛИТ.

Акаев, А. А.

2012. Stabilization of the Planetary Climate in the Twenty-First Century by Transition to a New Paradigm of Energy Consumption. *Doklady Earth Sciences* 446(2): 1180–1184.

2014. The Stabilization of Earth's Climate in the 21st Century by the Stabilization of Per Capita Consumption. *The Oxford Handbook of the Macroeconomics of Global Warming*. New York: Oxford University Press. Pp. 499–554.

Акаев, А. А., Давыдова, О. И.

2020. The Paris Agreement on Climate is Coming into Force: Will the Great Energy Transition Take Place? *Herald of the Russian Academy of Sciences* 90(5): 588–599.

2021a. A Mathematical Description of Selected Energy Transition Scenarios in the 21st Century, Intended to Realize the Main Goals of the Paris Climate Agreement. *Energies* 14: 2558. DOI: 10.3390/en14092558.

2021b. Mathematical Description of Energy Transition Scenarios Based on the Latest Technologies and Trends. *Energies* 14: 8360. DOI: 10.3390/en14248360.

Акаев, А. А., Sadovnichii, V. A. 2010. Mathematical Model of Population Dynamics with the World Population Size Stabilizing about a Stationary Level. *Doklady Mathematics* 82(3): 978–981.

Berg, Ch. 2019. *Sustainable Action: Overcoming the Barriers*. N. p.: The Club of Rome.

BP

2020. *Energy Outlook 2020 Edition*. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf> (дата обращения: 15.11.2021).

2021. *Statistical Review of World Energy*. London, UK: British Petroleum Co. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения: 20.01.2022).

Buli, N. 2021. *Green Hydrogen to Account for 20% of European Power Demand by 2050 – Statkraft*. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/green-hydrogen-account-20-european-power-demand-by-2050-statkraft-2021-10-21/> (дата обращения: 05.12.2022).

Burg, N. 2021. *Who Funds the Fight Against Climate Change?* URL: <https://meansandmatters.bankofthewest.com/article/sustainable-living/taking-action/who-funds-the-fight-against-climate-change/>.

Casey, J. P. 2021. *Will China do for Hydrogen What It Did for Solar Power?* London: Future Power Technology, Inc. URL: <https://www.power-technology.com/features/will-china-do-for-hydrogen-what-it-did-for-solar-power/> (дата обращения: 10.08.2021).

Climate Watch. 2021. World Resources Institute. *World Greenhouse Gas Emissions in 2019 by Sector, End Use and Gases*. URL: https://www.climatewatchdata.org/key-visualizations?topic=sectoral_emissions&visualization=4 (дата обращения: 14.12.2021).

DNV

2021a. *Energy Transition Outlook 2020*. URL: <https://download.dnvgl.com/eto-2020-download> (дата обращения: 14.12.2021).

2021b. *Energy Transition Outlook 2021*. URL: <https://eto.dnv.com/2020/index.html> (дата обращения: 15.12.2021).

EIA US. 2021. *Hydrogen Explained*. URL: <https://www.eia.gov/energy-explained/hydrogen/> (дата обращения: 19.08.2021).

Energy Efficiency Day. 2020. *Electric Vehicles: An Efficient Choice for Transportation and the Grid*. URL: <https://energyefficiencyday.org/electric-vehicles-an-efficient-choice-for-transportation-and-the-grid/>.

Equinor

2020. *Energy Perspectives 2020*. URL: <https://www.equinor.com/en/sustainability/energy-perspectives.html>.

2021. *Energy Perspectives 2021*. URL: <https://www.equinor.com/en/sustainability/energy-perspectives.html>.

ExxonMobil

2019. *Outlook for Energy: a Perspective to 2040*. URL: https://corporate.exxonmobil.com/-/media/Global/Files/outlook-for-energy/2019-Outlook-for-Energy_v4.pdf.

2021. *2021 Outlook for Energy*. URL: <https://corporate.exxonmobil.com/Energy-and-innovation/Outlook-for-Energy>.

Flowers, S. 2020. *Future Energy – Green Hydrogen. Could It Be a Pillar of Decarbonization*. URL: <https://www.woodmac.com/news/the-edge/future-energy-green-hydrogen/> (дата обращения: 05.12.2022).

Greenpeace. 2015. *Energy Revolution 2015*. URL: <https://wayback.archive-it.org/9650/20200212151746/http://p3-raw.greenpeace.org/international/en/publications/Campaign-reports/Climate-Reports/Energy-Revolution-2015/>.

Grinin, L., Grinin, A., Korotayev, A. 2023. Future Political Change. Toward a More Efficient World Order. In Sadovnichy, V. *et al.* (eds.), *Overcoming the Limits to Growth. A Report to the Club of Rome*. Cham: Springer (in print).

Grinin, L., Grinin, A., Malkov, S.

2023a. Economics. Optimizing Growth. In Sadovnichy, V. *et al.* (eds.), *Overcoming the Limits to Growth. A Report to the Club of Rome*. Cham: Springer (in print)

2023b. Socio-Political Transformations. A Difficult Path to Cybernetic Society. In Sadovnichy, V. *et al.* (eds.), *Overcoming the Limits to Growth. A Report to the Club of Rome*. Cham: Springer (in print).

Grinin, L., Korotayev, A. 2023. Africa – the Continent of the Future. Challenges and Opportunities. In Sadovnichy, V. *et al.* (eds.), *Overcoming the Limits to Growth. A Report to the Club of Rome*. Cham: Springer (in print).

Grinin, L., Malkov, S., Korotayev, A. 2023. High Income and Low Income Countries. Toward a Common Goal at Different Speeds. In Sadovnichy, V. *et al.* (eds.), *Overcoming the Limits to Growth. A Report to the Club of Rome*. Cham: Springer (in print).

Holbrook, E. 2021. Study Says Global Green Hydrogen Production to Skyrocket 57 % to 2030. *Environment + Energy Leader*. URL: <https://www.environmentalleader.com/2021/01/study-says-global-green-hydrogen-production-to-skyrocket-57-to-2030/> (дата обращения: 12.11.2021).

HomeAdvisor. 2021. *Pros, Cons and Costs: Energy Star Appliances*. URL: <https://www.homeadvisor.com/r/energy-star-appliances/> (дата обращения: 29.07.2021).

IEA

2019. *Global CO₂ Emissions by Sector*. Paris, France: IEA. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2019> (дата обращения: 19.10.2021).

2020a. *Energy Related CO₂ Emissions, 1990–2019*. Paris: IEA. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/energy-related-co2-emissions-1990-2019> (дата обращения: 17.10.2021).

2020b. *World Energy Outlook 2020*. Paris: IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.

2021a. *Global Energy Review 2021*. Paris: IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/co2-emissions> (дата обращения: 29.12.2021).

2021b. *Global EV Outlook 2020 Entering the Decade of Electric Drive?* Paris, France: IEA. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/af46e012-18c2-44d6-becd-bad21fa844fd/Global_EV_Outlook_2020.pdf (дата обращения: 02.08.2021).

2021c. *World Energy Outlook 2021*. Paris: IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.

IPCC

2014. Climate Change 2014. Synthesis Report. In Pachauri, R. K., Meyer, L. A. (eds.), *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC.

2018. Global Warming of 1.5°C. In Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O. et al. (eds.), *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: IPCC.

2021. Summary for Policymakers. In Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A. et al. (eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

IRENA

2019. *Hydrogen: A Renewable Energy Perspective*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

2020. *Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

2021. *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

Janeway, K. 2015. *Consumer Reports. How an LED Uses So Much Less Energy*. URL: <https://www.consumerreports.org/lightbulbs/why-an-led-uses-so-little-energy/> (дата обращения: 29.07.2021).

Korotayev, A., Shulgin, S., Ustyuzhanin, V., Zinkina, J., Grinin, L. 2023. Modeling Social Self-Organization and Historical Dynamics. Africa's Futures. In Sadovnichy, V. *et al.* (eds.), *Overcoming the Limits to Growth. A Report to the Club of Rome*. Cham: Springer (in print).

Lindsey, R. 2020. Climate Change: Global Sea Level. NOAA. URL: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level> (дата обращения: 12.03.2022).

Maxton, G., Randers, J., Suzuki, D. 2016. *Reinventing Prosperity*. URL: <https://www.clubofrome.org/publication/reinventing-prosperity-2016/>.

Malkov, S., Grinin, L., Grinin, A., Musieva, J., Korotayev, A. 2023. Modeling Social Self-Organization and Historical Dynamics. Global Phase Transitions. In Sadovnichy, V. *et al.* (eds.), *Overcoming the Limits to Growth. A Report to the Club of Rome*. Cham: Springer (in print).

Meier, A. 2021. *Should the Next Standby Power Target Be 0-Watt?* Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. URL: <https://escholarship.org/content/qt566951pn/qt566951pn.pdf> (дата обращения: 21.08.2021).

The National Center for Appropriate Technology (NCAT). 2021. *Solar Energy*. URL: <https://www.ncat.org/solar-energy/> (дата обращения: 04.08.2021).

NOAA. 2022. *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, Mauna Loa CO2 Weekly Mean and Historical Comparisons*. URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html> (дата обращения: 14.03.2022).

The Organization of the Petroleum Exporting Countries (ОПЕК). 2021. *World Oil Outlook 2021*. URL: <https://woo.opec.org/pdf-download/> (дата обращения: 14.03.2022).

Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M. et al. 2021. Anthropogenic Climate Change has Slowed Global Agricultural Productivity Growth. *Nature Climate Change* 11: 306–312. DOI: 10.1038/s41558-021-01000-1.

Our World in Data. 2020. *Emissions by Sector*. URL: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.

Patel S. 2021. *Countries Roll Out Green Hydrogen Strategies, Electrolyzer Targets, Power*. URL: <https://www.powermag.com/countries-roll-out-green-hydrogen-strategies-electrolyzer-targets/>.

Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). 2013. *Expert Assessment: Sea-level Rise could Exceed One Meter in This Century*. URL: <https://www.pik-potsdam.de/en/news/latest-news/archive/2013/expert-assessment-sea-level-rise-could-exceed-one-meter-in-this-century>.

Randers, J. 2012. *2052: A Global Forecast for the Next Forty Years*. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing. URL: <http://www.2052.info/>.

Randers, J., Rockström, J., Stoknes, P. E., Golüke, U., Collste, D., Cornell, S. 2018. *Transformation is Feasible*. Stockholm: Stockholm Resilience Centre. URL: <https://www.clubofrome.org/publication/transformation-is-feasible/>.

REN21

2019. Перспективы глобального перехода к возобновляемой энергетике. *Глобальный доклад REN21 «Возобновляемая энергетика 2019»*. URL: www.ren21.net/GSR.

2021. *Renewables 2021 Global Status Report*. URL: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.

Ritchie, H., Roser, M. 2021. Natural Disasters. *Our World in Data*. URL: <https://ourworldindata.org/natural-disasters>.

Scott, M. 2020. Green Hydrogen, The Fuel Of The Future, Set For 50-Fold Expansion. *Forbes* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.com/sites/mikescott/2020/12/14/green-hydrogen-the-fuel-of-the-future-set-for-50-fold-expansion/?sh=6f5485306df3> (дата обращения: 05.12.2021).

Shell

2013. *New Lens Scenarios A Shift in Perspective for a World in Transition* [Электронный ресурс]. URL: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwih_7mr-4ftAhVMr4sKHT_tBAEQFjABegQIAx-AC&url=https%3A%2F%2Fwww.shell.com%2Fcontent%2Fdam%2Froyaldutchshell%2Fdocuments%2Fcorporate%2Fscenarios-newdoc.pdf&usg=AOvVaw2yKUrS_ZGNsFk9icrtWoM1 (дата обращения: 21.01.2022).

2018. *Sky Meeting the Goals of the Paris Agreement*. URL: https://www.shell.com/promos/business-customers-promos/download-latest-scenario-sky/_jcr_content.stream/1530643931055/eca19f7fc0d20adbe830d3b0b27bcc9ef72198f5/shell-scenario-sky.pdf (дата обращения: 21.01.2022).

Statista. 2022. *Annual Number of Natural Disaster Events Globally from 2000 to 2020* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/statistics/510959/number-of-natural-disasters-events-globally/> (дата обращения: 27.03.2022).

S&P Global. 2021. *Experts Explain Why Green Hydrogen Costs Have Fallen and Will Keep Falling* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/experts-explain-why-green-hydrogen-costs-have-fallen-and-will-keep-falling-63037203> (дата обращения: 19.08.2021).

United Nations. 2016. *Paris Agreement*. URL: <https://unfccc.int/process/conferences/pastconferences/paris-climate-change-conference-november-2015/paris-agreement>.

Virta. 2021. *Myth Buster: Electric Vehicles will Overload the Power Grid*. URL: <https://www.virta.global/blog/myth-buster-electric-vehicles-will-overload-the-power-grid>.

Vorrath, S. 2015. Top 10 Technologies to Double the Energy Efficiency, Deliver Zero Emissions. *Renew Economy* [Электронный ресурс]. URL: <https://reneweconomy.com.au/top-10-technologies-to-double-energy-efficiency-deliver-zero-emissions-65210/> (дата обращения: 02.08.2021).

Weizsäcker, E. U. von, Wijkman, A. 2018. *Come On! Capitalism, Short-termism, Population and the Destruction of the Planet*. Cham: Springer.

Welthungerhilfe. 2021. *Global Hunger Index* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.welthungerhilfe.org/hunger/global-hunger-index/> (дата обращения: 06.03.2022).

Wijkman, A., Skånberg, K. 2017. *The Circular Economy and Benefits for Society. Jobs and Climate Clear Winners in an Economy Based on Renewable Energy and Resource Efficiency. A Study Pertaining to Finland, France, the Netherlands, Spain and Sweden*. N. p.: Club of Rome, MAVA Foundation.

World Energy Council (WEC). 2019. *World Energy Scenarios 2019*. URL: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/2019_Scenarios_Full_Report.pdf.

World Nuclear Association (WNA). 2020. *The Nuclear Fuel Report: Expanded Summary – Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2019-2040*. Report No. 2020/005. URL: <https://world-nuclear.org/getmedia/b488c502-baf9-4142-8d12-42bab97593c3/nuclear-fuel-report-2019-expanded-summary-final.pdf.aspx>.

World Meteorological Organization (WMO). 2021. *State of the Global Climate 2020* [Электронный ресурс]. URL: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21880#.Yf79XfhRVD9 (дата обращения: 17.02.2022).