



ПАРИЖСКОЕ СОГЛАШЕНИЕ: ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ПОД ВОПРОСОМ¹

В. В. КЛИМЕНКО², А. Г. ТЕРЁШИН
(Национальный исследовательский университет “МЭИ”)

12 декабря 2015 г. в Париже представители 195 стран – участниц Рамочной Конвенции ООН по изменению климата поставили свои подписи под историческим соглашением по охране климата планеты, которое придёт на смену Киотскому протоколу. Документ закрепляет основные принципы действий всех государств на период после 2020 г. В соглашении поставлена цель – сдерживать потепление на уровне менее 2 °С, а в идеале – 1.5 °С. Исходя из этого, все страны, включая Россию, должны

разработать собственные долгосрочные стратегии “низкоуглеродного” развития, планы по адаптации к изменениям климата и реализовывать соответствующие меры. По новому соглашению, наименее развитые и уязвимые к изменениям климата страны получат серьёзную финансовую помощь. Решено, что в 2020 г. финансовая поддержка этих государств составит 100 млрд долл., а дальше будет только увеличиваться. Наша страна также будет оказывать помощь уязвимым государствам³.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке следующих организаций: РФФИ – уточнение мировых объемов производства различных видов энергии (№ 15-08-01225); РГНФ – уточнение мировой потребности в энергии (№ 15-37-11129), расчеты изменений атмосферы и климата (№ 15-07-00012); РНФ – исследования региональных проявлений глобальных изменений климата (16-19-10568).

² nilgpe@mpei.ru

П арижскому соглашению, без сомнения, суждено в течение ближайшего столетия оказать громадное влияние на все стороны жизни современного общества и, в первую очередь,

³ <http://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/11949-14122015>

Основные климатические события 2015–2016 гг.:

Средняя глобальная температура достигла рубежа в 1°C по сравнению с доиндустриальной эпохой (середина XIX в.) и это, вероятно, самая высокая температура на Земле, по крайней мере, за последние шесть тысячелетий. Зафиксирована непрерывная 12-месячная (с мая 2015 г. по апрель 2016 г.)

серия рекордов среднемесячной температуры.

Среднеглобальная концентрация CO_2 превысила отметку в 400 ppm (частиц на миллион), достигнув наивысшего уровня за последние три миллиона лет. Средняя годовая температура в Москве достигла абсолютного максимума (7.4°C) за 240 лет инструментальных наблюдений.

на масштабы и стереотипы потребления энергии. Как уже давно и хорошо известно, удельное (приходящееся на душу населения) потребление энергии является надёжным индикатором состояния развития государства и общества⁴, история развития которого тесно связана с ростом удельного потребления энергии от 0.15 т у.т./год×чел, характерного для палеолитического человека, до нынешних почти 3 т у.т./год × чел. Энергетика современного общества в основном покоится на использовании ископаемого топлива (нефти, угля и газа), совместная доля которых в коммерческом энергопотреблении достигает 87%. Однако сжигание ископаемого топлива одновременно является главной причиной изменения газового состава атмосферы Земли и вполне уже ощутимых изменений климата, которые, по мнению некоторых экспертов, в скором будущем могут достичь угрожающих масштабов⁵. Парижское соглашение устанавливает потолок допустимого потепления в 1.5°C , что крайне желательно, или 2°C по сравнению с доиндустриальной эпохой (серединой XIX в.) и предполагает реше-

тельное и быстрое сокращение эмиссии парниковых газов, в основном в результате радикальных реформ в энергетике.

Попытаемся дать ответ на несколько главных вопросов:

Прежде всего, возможно ли в принципе осуществление реформ в мировой энергетике со скоростью, предписываемой Соглашением?

Если Соглашение будет полностью имплементировано, то какой при этом должна стать структура мирового энергодобавки?

И, наконец, являются ли мероприятия в рамках Соглашения достаточными для того, чтобы удержать потепление в пределах 1.5 или 2°C в течение нынешнего столетия?

В поиске ответа на эти вопросы мы будем использовать понятие углеродного коэффициента K_c – массы эмиссии углекислого газа в атмосферу (выраженной в тоннах углерода – C), приходящейся на тонну условного топлива потреблённой коммерческой энергии. Этот коэффициент является универсальным индикатором, позволяющим судить, насколько “зелёной” является энергетика страны или мира.

На рис. 1 показана эволюция K_c для восьми крупнейших потребителей энергии в мире, ответственных в настоящее время за выброс почти 75% диоксида углерода в атмосферу⁶. Этот рисунок

⁴ White L.A. *The Evolution of Culture: The Development of Civilization to the Fall of Rome*. 1959. N.Y.: McGraw-Hill; Клименко В.В. Энергия, климат и историческая перспектива России // *Общественные науки и современность*. 1995. № 1. С. 99–105; Сливко В.М. *Энергетические аспекты развития Древних цивилизаций*. 1999. М.: Газоил пресс. 112 с.

⁵ *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.) Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1552 p.

⁶ *BP Statistical Review of World Energy June 2016*. 65th edition. BP p.l.c., 2016. 48 p.; *Intended Nationally Determined Contributions. Compilation as communicated by 1st October 2015*. New York, UNFCCC, 2015. 1447 p.

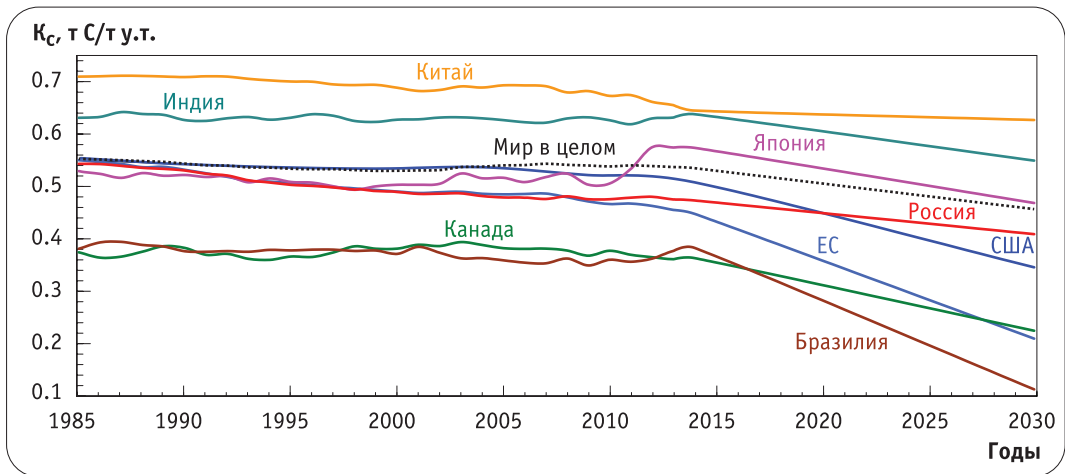
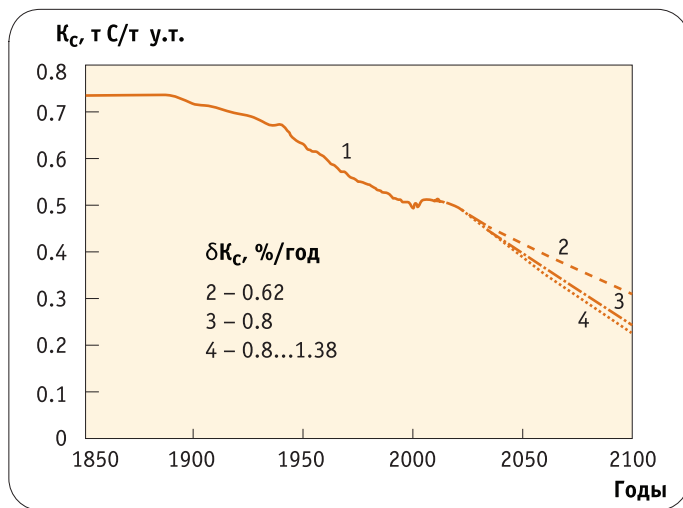


Рис. 1.
Изменения углеродной интенсивности мирового энергопотребления K_c в 1985–2030 гг. с учётом обязательств, принятых на себя государствами-участниками Рамочной Конвенции ООН по изменению климата.

показывает, что сегодня K_c изменяется в широких пределах от 0.64 т С/т у.т. для Китая и Индии с их преимущественно угольной энергетикой до 0.35 т С/т у.т.

Рис. 2.
Изменения углеродной интенсивности мирового энергопотребления K_c в 1850–2100 гг.: исторические данные (1) и сценарии – консервативный (2), “Парижский” (3) и целевой (4).



“Энергия: экономика, техника, экология” 4’2017

для Канады и Бразилии, где велика доля гидро- и ядерной энергетики, а также биотоплива. Из всех развитых стран мира наименьшим K_c обладает Норвегия (0.20 т С/т у.т.), где основу энергетики составляет гидроэнергия. Чтобы представить себе масштаб преобразований, предполагаемый Соглашением, отметим, что средний мировой углеродный коэффициент к 2100 г. должен достичь его современных значений для Норвегии, то есть опираться в основном на возобновляемые источники энергии при незначительной роли нефти и газа и фактически полном отсутствии угля в энергобалансе. Подчеркнём: **выполнение Парижского соглашения предполагает резкое снижение потребления угля в мире вплоть до фактически полного отказа от него в течение нескольких десятилетий.**

Насколько желаемая картина мира далека от сегодняшней, можно судить по рис. 2, где представлена хронология изменения K_c за последние 165 лет. На этом графике без труда могут быть идентифицированы три различных участка: период относительно стабильного K_c (1850–1940),

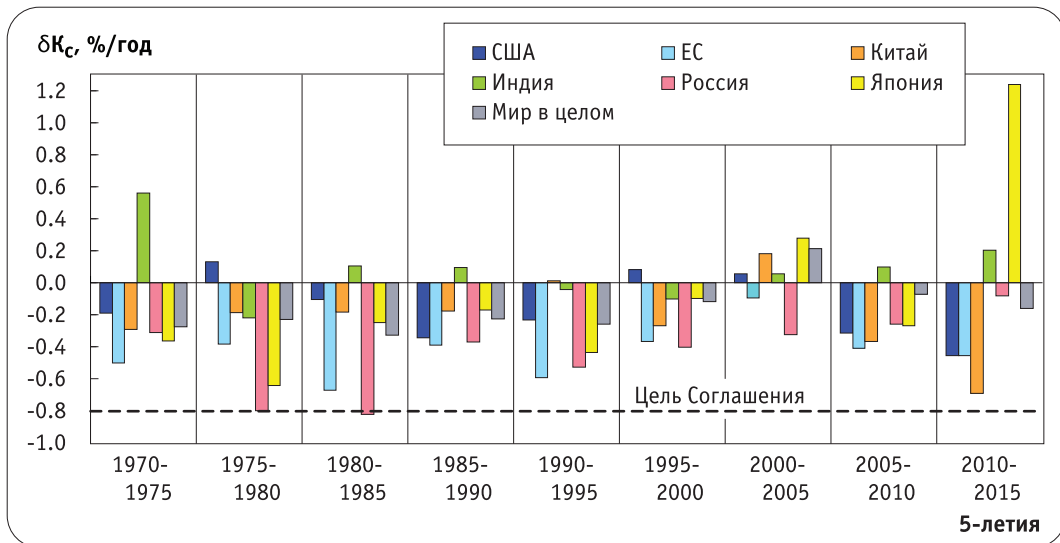


Рис. 3. Ежегодные темпы изменения углеродной интенсивности энергопотребления δK_c в ряде стран мира (средние годовые значения за 5-летки в 1970–2015 гг.).

когда уголь занимал доминирующее положение в мировой энергетике; эпоха значительного снижения K_c (1940–1995), когда уголь был в значительной мере потеснён сначала нефтью, а затем газом, гидро- и ядерной энергией; и, наконец, современный (1996–2015), когда снижение углеродной интенсивности внезапно остановилось. Это произошло в результате прихода “второй угольной волны”, вызванной резким возрастанием потребления твёрдого топлива в развивающихся странах и, в первую очередь, в Китае и Индии. По иронии судьбы, прекращение снижения углеродной интенсивности мировой энергетики произошло именно в тот период, когда мировое сообщество всерьёз озаботилось охраной климата, следствием чего и явилось подписание в 1997 г. Киотского протокола. История убедительно показывает, что дистанция между желаемым и реальным подчас оказывается очень велика.

Итак, Парижское соглашение призвано переломить современные негативные тен-

денции и, более того, сделать это очень быстро. Попытаемся понять, что говорит история мировой энергетики о возможностях её быстрого реформирования. На рис. 3 представлены данные по средне-пятилетней скорости изменения углеродной интенсивности за истекшие полстолетия. Оказывается, что ни одна из шести крупнейших стран мира, ответственных за почти 70% мировой эмиссии парниковых газов, даже на коротких промежутках времени не демонстрировала скорости снижения K_c выше 0.8% в год. Для мира в целом этот показатель выглядит ещё скромнее и не превышает 0.45% в год, что явно недостаточно для реализации Соглашения. На рис. 4 данные по абсолютным историческим максимумам скорости снижения K_c сопоставлены с параметрами, декларированными государствами-участниками Рамочной Конвенции ООН по изменению климата. Этот рисунок ясно показывает: для реализации только первой фазы соглашения (2015–2030 гг.) необходимо развить такие скорости преобразования в энергетике, которые намного превышают достигнутые в историческом прошлом, а потом ещё и поддерживать их в течение целого столетия!

На рис. 5 в нестандартном полулогарифмическом масштабе представле-

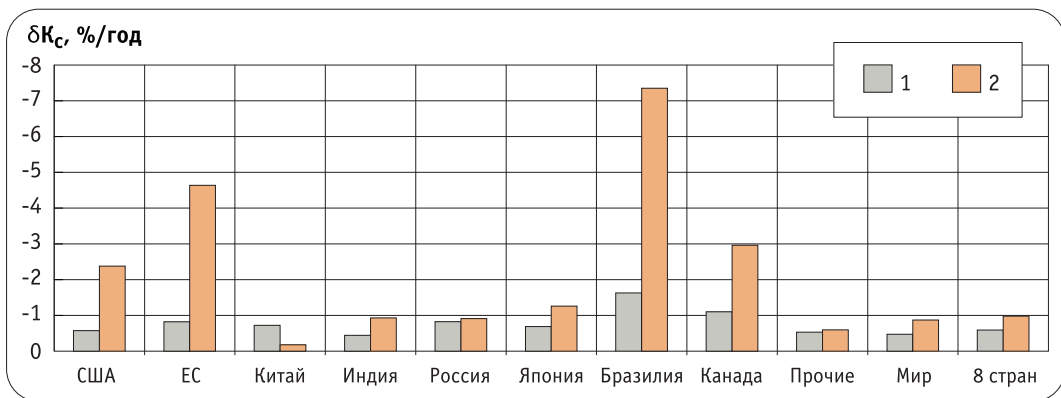
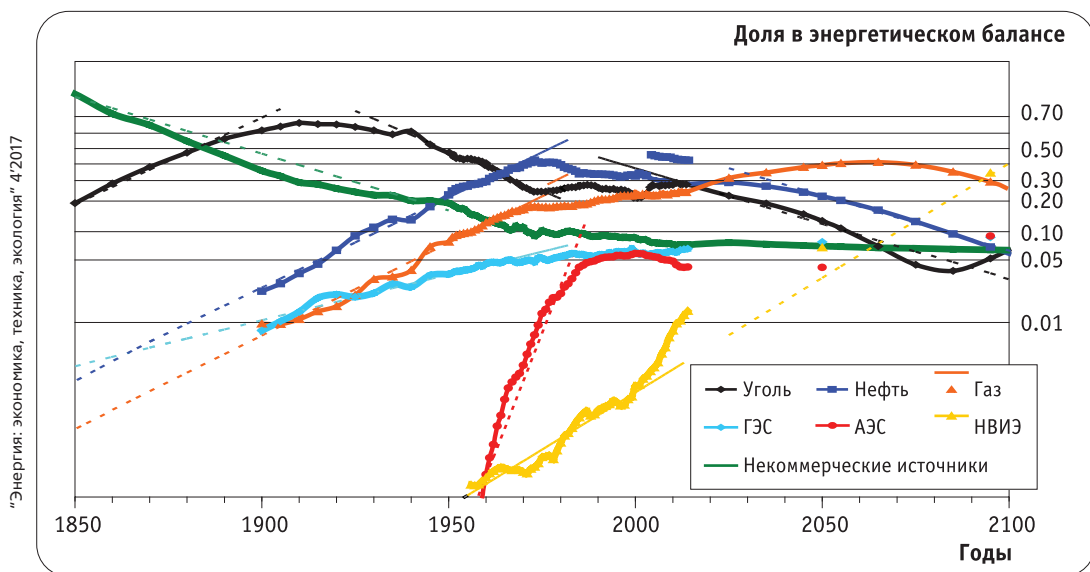


Рис. 4.
Ежегодные темпы изменения углеродной интенсивности энергопотребления δK_c в ряде стран мира: исторические максимумы (1) и целевые ориентиры Парижского соглашения (2).

но изменение с течением времени долей различных источников энергии в мировом энергетическом балансе. Как видно из данных мировой энергетической статистики, темпы внедрения различных видов органического топлива (уголь, нефть, газ) в соответствующих периодах весь-

Рис. 5.
Темпы продвижения различных источников энергии.

ма сходны, и каждый из них примерно за 70 лет после уверенного появления на рынке достигал доминирующего положения (уголь – 60% к концу XIX в., нефть – 40% к середине 1970-х гг., природный газ – 27% к настоящему времени). В дальнейшем скорость распространения падает и сменяется обратным процессом – вытеснением устаревающих видов энергии. Это явление с 1970-х годов известно, как “волны Маркетти”. Несколько особняком стоят источники энергии, не связанные с выбросами углекислого газа – гидро- и атомная энергетика. Темпы развития ГЭС оказались значительно ниже за счёт ограниченности доступных ресурсов



и высокой капиталоемкости технологий, и в настоящее время они обеспечивают менее 7% мирового энергопотребления. Атомная энергетика, напротив, пережила подлинный бум в 1960–80-х гг., который после нескольких тяжёлых аварий на АЭС завершился стагнацией (на уровне 5% от мирового энергопотребления) и продолжительным спадом.

Развитие НВИЭ в конце прошлого столетия происходило темпами, характерными для ископаемых видов топлива, которые резко ускорились с началом XXI века. В результате доля использования энергии биомассы, солнца, ветра и других возобновляемых природных источников в мировом энергопотреблении перешла 1%-ный рубеж уже в 2010 г. и при сохранении действующих тенденций (в том числе в области ограничений на выбросы углекислого газа в атмосферу) к концу текущего столетия может достигнуть 40–50%.

В последние два десятилетия выяснилось, однако, что скорости внедрения каждого нового потенциального доминирующего источника энергии оказывается меньше, чем предыдущего, и это имеет очень важные последствия – **мы просто не можем надеяться, что нетрадиционные возобновляемые источники энергии (НВИЭ) достигнут доминирующего положения на рынке энергии ранне конца XXI в.**

Поэтому, с высоты исторического опыта сценарий агрессивного сокращения K_c , соответствующий рис. 1 (назовём его “Парижский”) выглядит неоправданно оптимистическим, а с другой стороны, как будет показано ниже, поставленной цели – сдерживания глобального потепления в пределах 2 градусов, – даже он не достигает, поэтому в дополнение к нему рассмотрены ещё два:

– **консервативный**, со скоростью снижения $K_c = 0.62\%$ в год, что соответствует абсолютному историческому максимуму, достигнутому в период 1940–1974 гг. (см. рис. 2);

– **целевой**, позволяющий удержать повышение температуры в пределах 2°C до 2100 г., с возрастающей скоростью снижения K_c (начиная с $0.8\%/год$, увеличиваясь в 1.2 раза каждые 30 лет, что соответствует периодичности смены поколений).

Структура мирового энергопотребления на период до 2100 г., соответствующая заданным траекториям изменения его углеродной интенсивности, представлена на рис. 6. Для оценки мировой потребности в энергии использован актуализированный вариант генетического прогноза развития энергетики, показавшего хорошее соответствие данным последних 25 лет⁷. Объёмы потребления нефтегазового топлива рассчитаны с учётом масштабного использования их нетрадиционных ресурсов (сланцевые газ и нефть, угольный метан). Максимум потребления углеводородных ресурсов, согласно этим оценкам, ожидается в середине текущего столетия на уровне 12 млрд т у.т./год (против нынешних 11), а к концу столетия объёмы сжигания нефти и газа снизятся вдвое, до 6 млрд т у.т./год. Уголь в данных расчётах является “закрывающим” энергетический баланс топливом, объём использования которого в ближайшие 50 лет для обеспечения необходимого снижения углеродной интенсивности энергопотребления должен неуклонно сокращаться, чтобы достигнуть к 2060 г. минимальных значений в 1.4 млрд т у.т./год для консервативного и 0.7 млрд т у.т./год для целевого сценария. К концу столетия возможно некоторое увеличение потребления угля до 3–4 млрд т у.т./год с целью компенсации выбывающего нефтегазового топлива. Стоит отме-

⁷ Клименко В.В., Клименко А.В., Терёшин А.Г. Опыт построения дальних прогнозов воздействия мировой энергетики на атмосферу Земли // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 158–168; Терёшин А.Г., Клименко А.В., Клименко В.В. Золотой век газа и его влияние на мировую энергетику, глобальный цикл углерода и климат // Теплоэнергетика. 2015. № 5. С. 3–13.

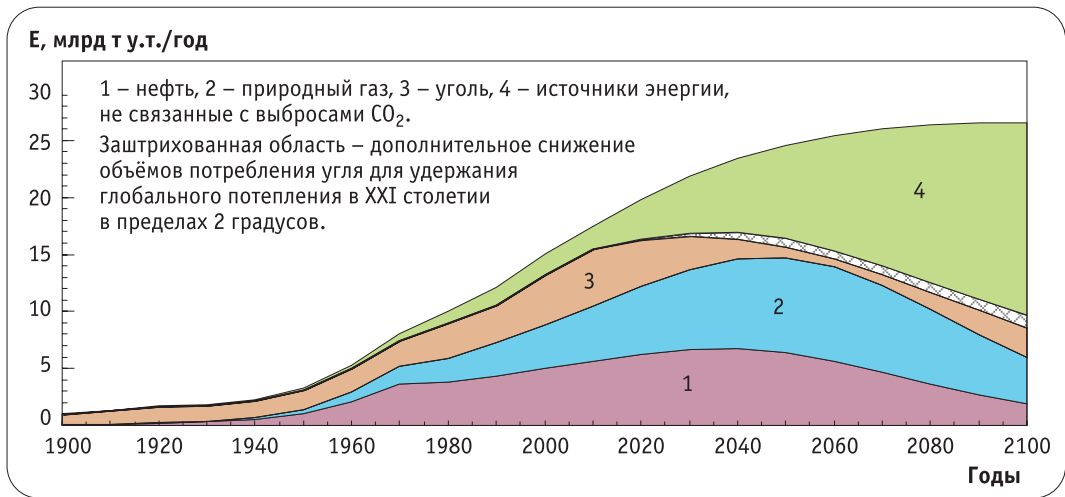


Рис. 6.
Изменения структуры мирового коммерческого энергопотребления E в период 1900–2100 гг. при полной имплементации Парижского соглашения (2015 г.): 1 – нефть, 2 – природный газ, 3 – уголь, 4 – источники энергии, не связанные с выбросами CO₂. Заштрихованная область – дополнительное снижение объёмов потребления угля для удержания глобального потепления в XXI столетии в пределах 2 градусов.

тить, что в последние десять лет ежегодное потребление угля в мире превышало 5 млрд т у.т.

Совершенно ясно, что для радикального снижения углеродной интенсивности мировой энергетики необходимо развитие источников энергии, не связанных с потреблением органического топлива. Доля таких источников (гидро- и ядерная энергетика, нетрадиционные возобновляемые источники энергии) к середине XXI столетия должна составить около трети суммарного энергопотребления, что, несомненно, является серьёзным вызовом для мирового сообщества.

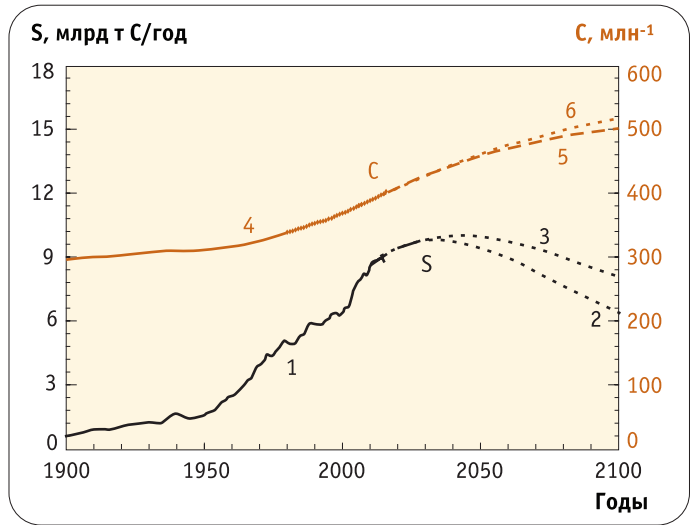
Эволюция эмиссии и концентрации углекислого газа, а также среднегло-

бальной температуры воздуха в случае последовательного и неуклонного осуществления Парижского соглашения представлены на рис. 7 и 8. В расчётах использовались модели глобального круговорота углерода и климата, разработанные в Лаборатории глобальных проблем энергетики МЭИ⁹, прошедшие успешную проверку данными наблюдений за последние 25 лет (см. сноску 7). Можно ожидать, что эмиссия CO₂ при сжигании органического топлива и производстве цемента, неуклонно возрастающая в течение двух с половиной столетий индустриальной истории, достигнет своего максимума на уровне около (10–11) Гт C/год уже в 30-х гг. нынешнего столетия (рис. 7), после чего начнёт постепенное снижение с возрастающей скоростью. Тем не менее, даже в случае реализации Парижского сценария к концу нынешнего столетия глобальная эмиссия всё ещё будет выше 6 Гт C/год, т.е. на уровне конца XX в. В рамках этого весьма оптимистического сценария концентрация CO₂ приближается к критическому рубежу в 500 ppm в конце нынешнего столетия и продолжает расти

⁹ Энергия, природа и климат / В.В. Клименко, А.В. Клименко, Т.Н. Андрейченко, В.В. Довгалюк, О.В. Микушина, А.Г. Терешин, М.В. Федоров. М.: Изд-во МЭИ, 1997. 215 с.

⁸ Клименко В.В. Почему замедляется глобальное потепление? // Докл. АН. 2011. Т. 440. № 4. С. 536–539.

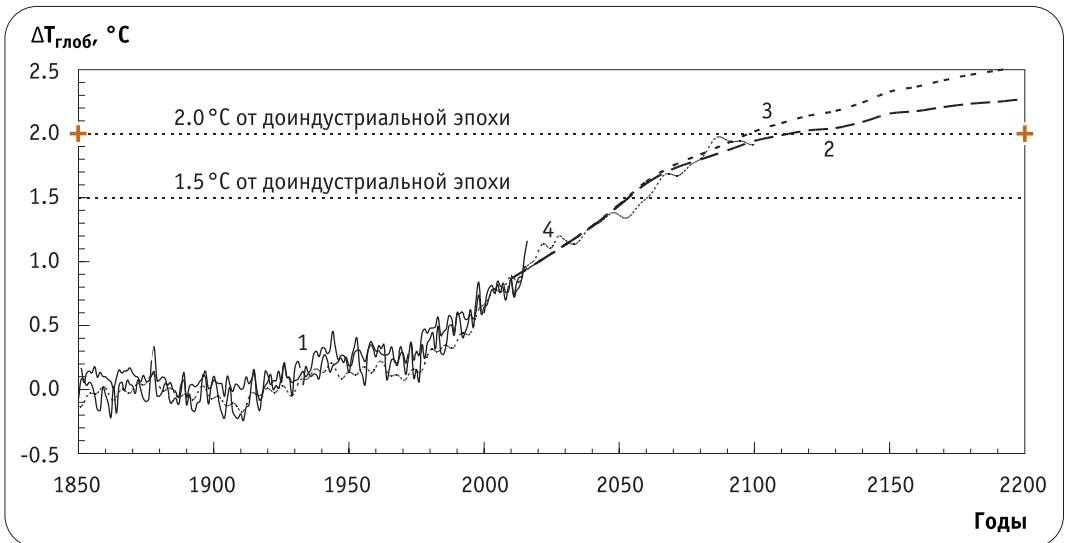
Рис. 7.
Динамика эмиссии S
(в пересчёте на углерод)
и атмосферной
концентрации
 C диоксида углерода
в период 1900–2100 гг.:
история (1, 4)
и сценарии
“Парижский” (2, 5)
и консервативный (3, 6).



далее, хотя и с небольшой скоростью. Преодоление рубежа среднеглобальной температуры в 1.5°C неотвратимо и наступит при любом сценарии дальнейшего развития событий ещё при жизни нынешнего поколения не позднее 2050-х гг. (рис. 8). Хотя и с ощутимым замедлением, она продолжит свой дальнейший рост и превысит критическую отметку в 2°C в первой четверти XXII в. Мы полагаем, что, с учётом влияния естественных факторов климата, это событие произойдёт ещё раньше,

а именно – в 80-х гг. нынешнего столетия. Сомнения в возможности удержания потепления в условно безопасных преде-

Рис. 8.
Изменения среднеглобальной
температуры $\Delta T_{\text{глоб}}$
в 1850–2200 гг.: история (1),
сценарии – “Парижский” (2)
и консервативный (3)
и прогноз с учетом влияния
естественных факторов⁸ (4).
Температура отсчитана
от средних за период
1871–1900 гг.



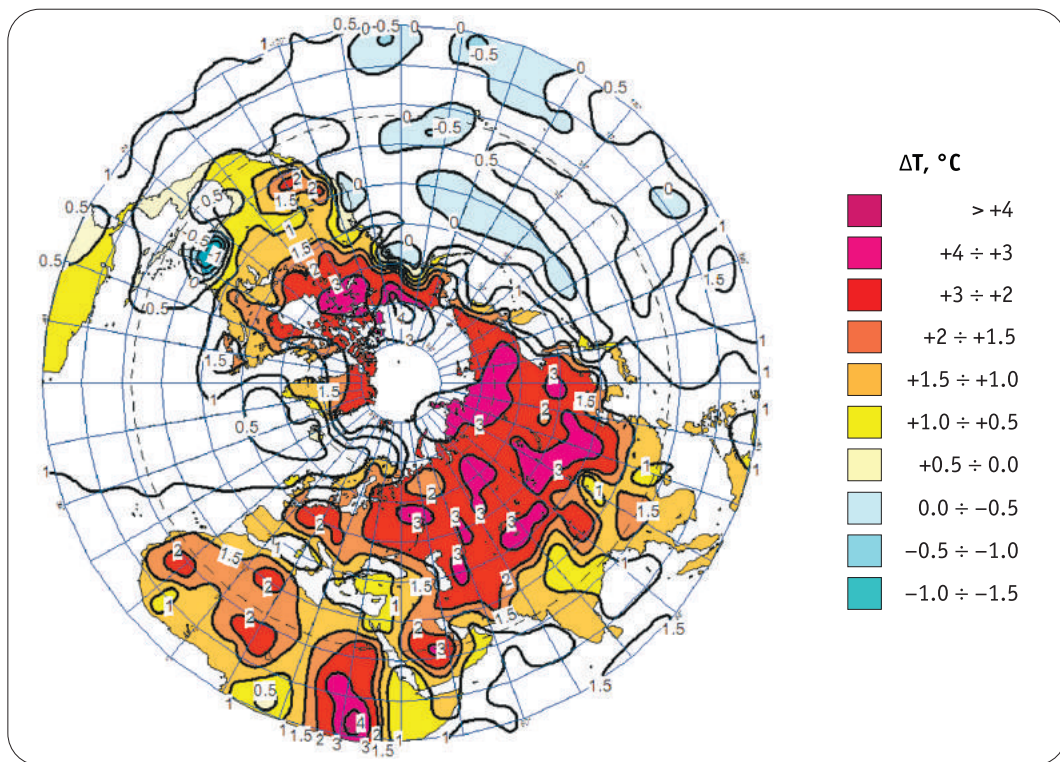


Рис. 9.
Относительное (на 1 °С) изменение среднегодовых температур Северного полушария в период 1994–2013 гг. по сравнению с периодом 1951–1970 гг.

лах высказывались и ранее¹⁰. Теперь же мы получаем новые подтверждения, что даже полномасштабная имплементация достигнутых в Париже соглашений не позволяет достичь желаемой цели. Перед мировым сообществом стоит нелёгкий выбор между осуществлением ещё более жёстких мер по сокращению

эмиссии, что на наш взгляд почти нереально, или адаптацией к совершенно новым климатическим условиям, которые продлятся не одно столетие. Исторический опыт свидетельствует в пользу ограниченных способностей мировой энергетики к реформации, что ставит под сомнение возможность полного осуществления Парижского соглашения. Каких последствий по изменению климата можно в связи с этим ожидать?

Авторы проанализировали, каким образом уже достигнутое к настоящему времени среднеглобальное потепление в 1 градус (зафиксированное, к примеру, в период 1994–2013 гг. по сравнению со средним значением за 1951–1970 гг.) распределяется по территории Северного полушария (рис. 9). Видно, что максимальные значения повышения среднегодовой температуры воздуха наблюдаются в умеренных широтах, достигая 2–3 градусов на большей части северной Евразии и в приполярных регионах

¹⁰ Клименко В.В., Терёшин А.Г. Мировая энергетика и глобальный климат после 2100 г. // Теплоэнергетика. 2010. № 12. С. 38–44; New M., Liverman D., Schroder H. and Anderson K. Four degrees and beyond: the potential for a global temperature increase of four degrees and its implications // Phil. Trans. Royal Society. Ser. A. 2011. Vol. 369. No. 1934. P. 6–19; Rogelj J., Nabel J., Chen C., Hare W., Markmann K., Meinshausen M. Schaeffer M., Macey K., Höhne N. Copenhagen Accord pledges are paltry // Nature. 2010. Vol. 464. No. 7292. P. 1126–1128.

Северной Америки. Также обращают на себя внимание отдельные, не столь большие области экстремального потепления в Африке и на Ближнем Востоке. В то же время климат большей части американского континента, почти всей Европы и территории юго-востока Азии испытал к настоящему времени значительно менее интенсивное потепление, сравнимое или даже уступающее по величине среднеглобальным значениям.

Таким образом, волею судьбы или, если угодно, в силу особенностей глобальной климатической системы Россия оказывается в эпицентре происходящих на планете климатических изменений. Именно на территории нашей страны следует и в будущем ожидать самых масштабных изменений природной среды и климата. **Дать прогноз этих изменений, оценить их воздействие на природу и экономику – одна из важнейших задач современной науки.**

Если Вас интересуют проблемы энергетики, экономики и экологии: энергетическая политика и безопасность стран и регионов, нефте- и газодобыча, энергопроизводство и его экологические последствия, энергосберегающие технологии, прошлое, настоящее и будущее атомной энергетики, перспективы развития местных возобновляемых гелио-, ветро- и гидроресурсов, доступно и точно изложенные ведущими отечественными и зарубежными специалистами, а также разнообразные социальные проблемы, связанные с развитием топливно-энергетического комплекса, и многое другое (вопросы образования, здоровья, управления, природопользования и т.д.), Вам, несомненно, нужен ежемесячный иллюстрированный журнал Президиума Российской академии наук:

“ЭНЕРГИЯ: ЭКОНОМИКА, ТЕХНИКА, ЭКОЛОГИЯ”

Наш девиз – доступность и достоверность.
Именно поэтому журнал “Энергия” называют в числе самых авторитетных источников точной информации по проблемам экономики, экологии, энергетики.
Формат журнала удобен для:

- проведения дискуссий и рассмотрения различных точек зрения по актуальным проблемам развития энергетики и смежным научно-техническим направлениям;
- рассмотрения новых и малоизученных методов получения и преобразования видов энергии, с выявлением их перспектив для практического применения.

Будут приветствоваться также публикации обзорных статей:

- о деятельности различных отделений РАН;
- о наиболее важных результатах фундаментальных научных исследований и прикладных разработок, полученных в ведущих отечественных институтах и университетах.

В дополнение к специальным материалам в каждом номере “Энергии” Вы найдете материалы, посвященные гуманитарным проблемам современного мира.

В розничную продажу журнал не поступает. Подписной индекс – 71095.
Желающие могут оформить льготную подписку в редакции. Тел.: 8(495)362-07-82.