

---

---

# ПРИРОДА И ОБЩЕСТВО

---

---

В. В. КЛИМЕНКО, О. В. МИКУШИНА,  
А. Г. ТЕРЕШИН

## МИРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА ПОСЛЕ ПАРИЖСКОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ 2015 ГОДА: QUO VADIS?\*

*Проанализированы последствия для мировой энергетики, а также атмосферы и климата планеты решений, принятых в декабре 2015 г. на Парижской конференции стран – участниц Рамочной конвенции ООН по изменению климата. Проведен анализ добровольных обязательств ряда стран – основных источников выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу по ограничению воздействия их экономики, в первую очередь энергетических комплексов, на атмосферу и климат. На основе анализа исторической динамики карбоноёмкости энергетики крупнейших стран мира показано, что реализация Парижских соглашений потребует беспрецедентных усилий по модернизации мировой энергетики. Разработаны три сценария структуры мирового энергопотребления, соответствующие целевым ориентирам Парижских соглашений. С помощью модельных расчетов изменений атмосферы и климата показано, что даже полная имплементация Парижских соглашений не предотвратит повышения средней глобальной температуры на более чем два градуса по сравнению с доиндустриальной эпохой.*

**Ключевые слова:** мировая энергетика, производство энергии, потребность в энергии, энергопотребление, изменение климата, изменение атмосферы, глобальное потепление.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке следующих организаций: Минобрнауки РФ – расчеты изменений атмосферы и климата (№ 508 базовой и № 116 проектной части государственного задания); РФФИ – уточнение мировых объемов производства энергии (№ 15-08-01225); РГНФ – уточнение мировой потребности в энергии (№ 15-37-11129), разработка сценариев мирового энергопотребления (№ 15-07-00012).

12 декабря 2015 г. в Париже представители 195 стран поставили свои подписи под историческим соглашением по охране климата планеты, которому, без сомнения, суждено в течение ближайшего столетия оказать громадное влияние на все стороны жизни современного общества, в первую очередь на масштабы и стереотипы потребления энергии. Как уже давно и хорошо известно, удельное (приходящееся на душу населения) потребление энергии является надежным индикатором состояния развития государства и общества (White 1959; Клименко 1995; Сливко 1999). История развития общества тесно связана с ростом удельного потребления энергии от 0,15 т у. т.<sup>1</sup>/год×чел., характерного для палеолитического человека, до нынешних почти 3 т у. т./год×чел. Энергетика современного общества в основном базируется 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 уже вполне ощутимых изменений климата, которые, по мнению некоторых экспертов, в скором будущем могут достичь угрожающих масштабов (Stocker *et al.* 2013). Парижское соглашение (далее – Соглашение) устанавливает потолок допустимого потепления в 1,5 °С, что крайне желательно, или максимум 2 °С по сравнению с доиндустриальной эпохой (серединой XIX в.), и предполагает решительное и быстрое сокращение эмиссии парниковых газов, в основном в результате радикальных реформ в энергетике.

В настоящей статье мы попытаемся дать ответ на несколько главных вопросов:

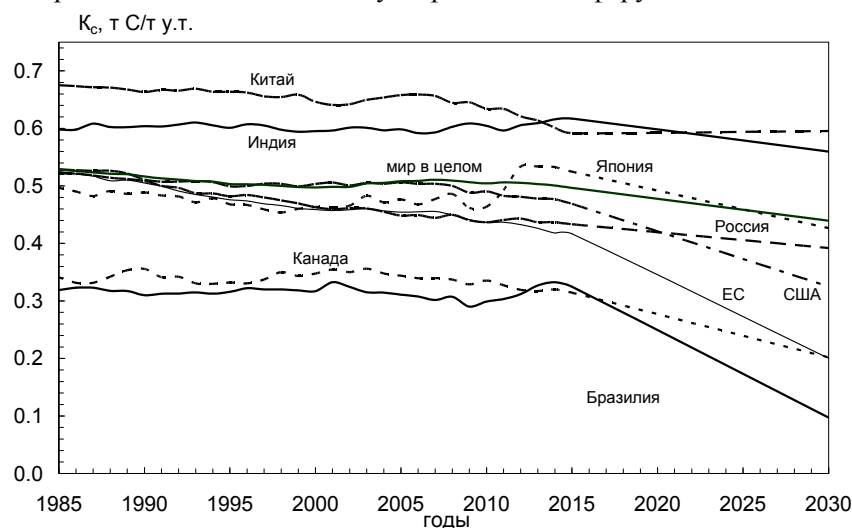
- 1) Возможно ли в принципе осуществление реформ в мировой энергетике со скоростью, предписываемой Соглашением?
- 2) Если Соглашение будет полностью имплементировано, то какой при этом должна стать структура мирового энергобаланса?
- 3) Являются ли мероприятия в рамках Соглашения достаточными для того, чтобы удержать потепление в пределах 1,5 °С или 2 °С в течение нынешнего столетия?

---

<sup>1</sup> Т у. т. – тонна условного топлива, общепринятая мера количества энергии, эквивалентного энергии, получаемой при сжигании метрической тонны высококалорийного угля или примерно 700 кг нефти.

В поиске ответов на эти вопросы мы будем использовать понятие углеродного коэффициента  $K_c$  – массовой эмиссии углекислого газа в атмосферу (выраженной в тоннах углерода), приходящейся на тонну условного топлива потребленной коммерческой энергии. Этот коэффициент является универсальным индикатором, позволяющим судить, насколько «зеленой» является энергетика страны или мира.

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

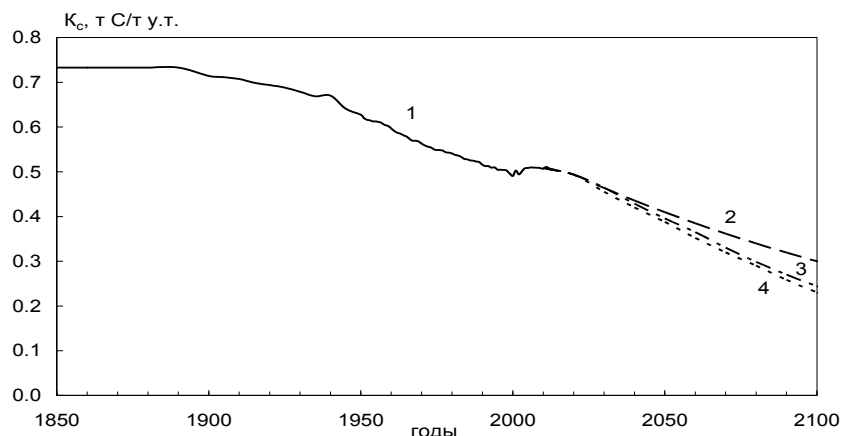


**Рис. 1а.** Изменения углеродной интенсивности мирового энергопотребления  $K_c$ : а) в ряде стран мира в 1985–2030 гг. с учетом обязательств [0]

Этот рисунок 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. (и ниже) для Канады и Бразилии, где весьма 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 преоб-

разований, 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.

Насколько желаемая картина мира далека от сегодняшней, можно судить по рис. 16, где представлена хронология изменения  $K_c$  за последние 165 лет.

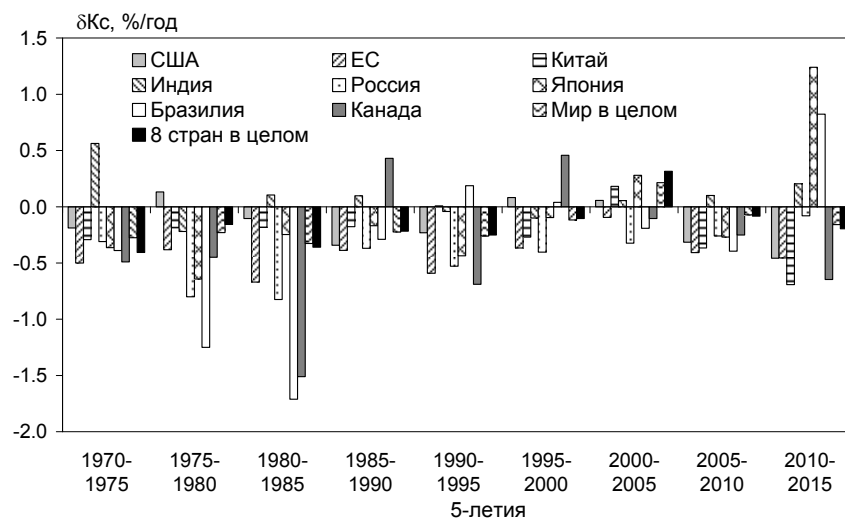


**Рис. 16.** Среднемировые значения в 1850–2100 гг.: исторические данные (Stocker *et al.* 2013) (1) и сценарии настоящей работы – консервативный (2), «Парижский» (3) и целевой (4)

На этом графике без труда могут быть идентифицированы три различных участка: период относительно стабильного  $K_c$  (1850–1940 гг.), когда уголь занимал доминирующее положение в мировой энергетике, далее эпоха существенного снижения  $K_c$  (1940–1995 гг.), когда уголь был в значительной мере потеснен сначала нефтью, а затем газом, гидро- и ядерной энергией, и, наконец, современный (1996–2015 гг.), когда снижение выбросов углекислого газа внезапно остановилось. Это произошло в результате появления так называемой «второй угольной волны», вызванной резким возрастанием потребления твердого топлива в развивающихся стра-

нах, в первую очередь в Китае и Индии. По иронии судьбы, прекращение снижения углеродной интенсивности мировой энергетики произошло именно в тот период, когда мировое сообщество серьезно озаботилось охраной климата с подписанием Киотского протокола (1997 г.). История убедительно показывает, что дистанция между желаемым и реальным подчас оказывается огромной.

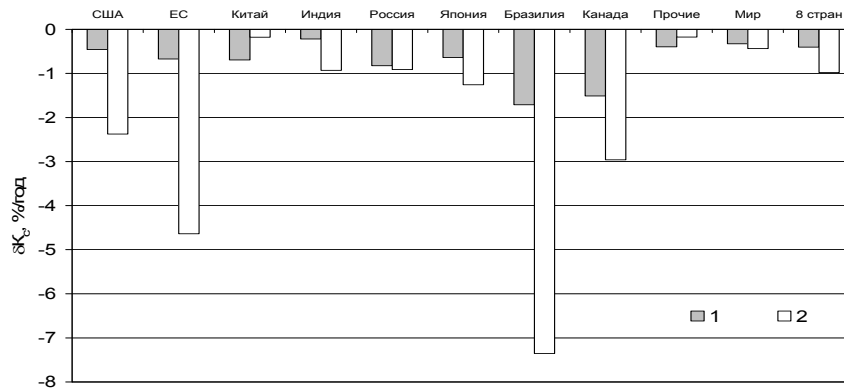
Итак, Парижское соглашение было призвано переломить современные негативные тенденции и, более того, сделать это очень быстро. Попытаемся понять, что свидетельствует история мировой энергетики о возможностях ее быстрого реформирования. На рис. 2а представлены данные по усредненной за пятилетие скорости изменения углеродной интенсивности за последние полстолетия.



**Рис. 2а.** Ежегодные темпы изменения углеродной интенсивности энергопотребления  $\delta K_c$  в ряде стран мира: средние годовые значения за пятилетие в 1970–2015 гг. (Intended... 2015)

Оказывается, что ни одна из шести крупнейших стран мира, вместе 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 еще скромнее и не превышает 0,45 % в год, что

явно недостаточно для реализации Соглашения. На рис. 2б данные по абсолютным историческим максимумам скорости снижения  $K_c$  сопоставлены с декларируемыми параметрами стран – участниц Соглашения (Intended... 2015). Этот рисунок ясно показывает: для реализации только первой фазы соглашения (2015–2030 гг.) необходимо развить скорости преобразования в энергетике намного выше достигнутых в историческом прошлом, а затем поддерживать их в течение целого столетия!



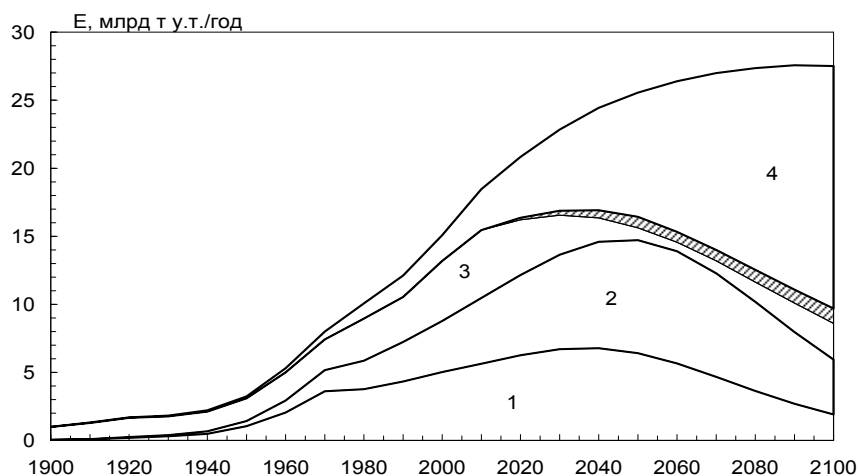
**Рис. 2б.** Ежегодные темпы изменения углеродной интенсивности энергопотребления  $\delta K_c$  в ряде стран мира: исторические максимумы (1) и целевые ориентиры Парижского соглашения (*Ibid.*) (2)

С высоты исторического опыта такой сценарий (назовем его «Парижский») выглядит неоправданно оптимистическим, с другой стороны, как будет показано ниже, поставленной цели – сдерживания глобального потепления в пределах  $2\text{ }^\circ\text{C}$ , – даже он не достигает, поэтому в дополнение к нему рассмотрены еще два:

- консервативный, со скоростью снижения  $K_c = 0,62\%$  в год, что соответствует абсолютному историческому максимуму, достигнутому в период 1940–1974 гг. (см. рис. 1б);

- целевой, позволяющий удержать повышение температуры в пределах  $2\text{ }^\circ\text{C}$  до 2100 г., с возрастающей скоростью снижения  $K_c$  (начиная с  $0,8\%$  в год с ее увеличением 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. 3.



**Рис. 3.** Изменения структуры мирового коммерческого энергопотребления  $E$  в 1900–2100 гг. при полной имплементации Парижского соглашения (2015 г.): 1 – нефть, 2 – природный газ, 3 – уголь, 4 – источники энергии, не связанные с выбросами  $\text{CO}_2$ . Заштрихованная область – дополнительное снижение объемов потребления угля для удержания глобального потепления в XXII столетии в пределах  $2^\circ\text{C}$

Для оценки мировой потребности в энергии использован актуализированный вариант генетического прогноза развития энергетики, показавшего хорошее соответствие данным последних 25 лет (Клименко и др. 2015). Объемы потребления нефтегазового топлива рассчитаны с учетом масштабного использования их нетрадиционных ресурсов (сланцевые газ и нефть, угольный метан) (Клименко, Терешин 2013; Терешин и др. 2015). Максимум потребления углеводородных ресурсов, согласно этим оценкам, ожидается в середине текущего столетия на уровне 12 млрд т у. т./год, а к концу столетия объемы сжигания нефти и газа снизятся вдвое, – до 6 млрд т у. т./год. Уголь в данных расчетах является «замыкающим» энергетический баланс топливом, объем использования

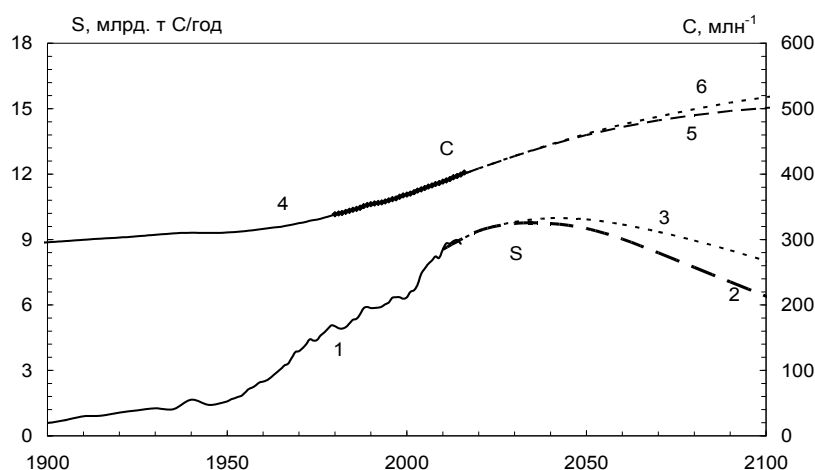
которого в ближайшие 50 лет для обеспечения необходимого снижения углеродной интенсивности энергопотребления должен неуклонно сокращаться и достигнуть к 2060 г. минимальных значений в 1,4 млрд т у. т./год для консервативного сценария и 0,7 млрд т у. т./год для целевого сценария. К концу столетия возможно некоторое увеличение потребления угля до 3–4 млрд т у. т./год с целью компенсации выбывающего в результате истощения ресурсов нефтегазового топлива. Стоит отметить, что в последние десять лет потребление угля в мире превышало 5 млрд т у. т., из которых более 2,5 млрд т у. т приходилось на долю одного лишь Китая.

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, НВИЭ) к середине XXII столетия должна составить около трети суммарного энергопотребления, что, несомненно, является серьезным вызовом для мирового сообщества и включает в себе серьезные институциональные трудности (Smil 2014; Mediavilla *et al.* 2013).

Эволюция эмиссии и концентрации углекислого газа, а также среднеглобальной температуры воздуха в случае последовательного и неуклонного осуществления Парижского соглашения представлена на рис. 4–5. В расчетах использовались модели глобального круговорота углерода и климата Лаборатории глобальных проблем энергетики МЭИ (Клименко и др. 1997), прошедшие успешную проверку данными наблюдений за последние 25 лет (Клименко и др. 2015). Можно ожидать, что эмиссия CO<sub>2</sub> 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 С/год уже в 2030-х гг. (рис. 4), после чего начнет постепенное снижение с возрастающей скоростью. Тем не менее даже в случае реализации Парижского сценария к концу нынешнего столетия глобальная эмиссия все еще будет выше 6 Гт С/год, то есть на уровне начала XXI в. В рамках этого весьма оптимистического сценария концентрация CO<sub>2</sub> (рис. 4) приближается к критическому рубежу в



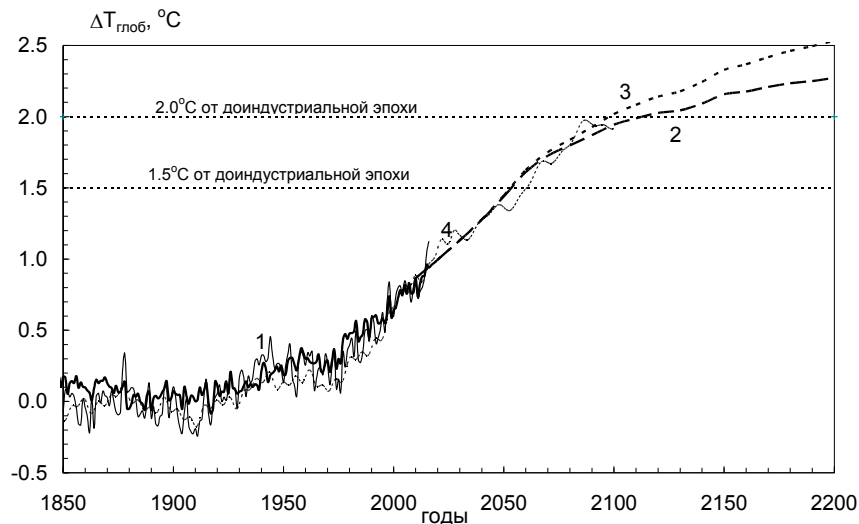
500 млн<sup>-1 2</sup> в конце нынешнего столетия и продолжает расти далее, хотя и с небольшой скоростью.



**Рис. 4.** Динамика эмиссии  $S$  (в пересчете на углерод) и атмосферной концентрации  $C$  диоксида углерода в 1900–2100 гг.: история (Stocker *et al.* 2013) (1, 4) и сценарии настоящей работы – «Парижский» (2, 5) и консервативный (3, 6)

Среднеглобальная температура (рис. 5) при любом сценарии развития событий преодолевает отметку в  $1,5^{\circ}\text{C}$  всего через несколько десятилетий. Хотя и с ощутимым замедлением, она продолжает свой дальнейший рост и пробивает критическую отметку в  $2^{\circ}\text{C}$  в первой четверти XXII в. Мы полагаем, что с учетом влияния естественных факторов климата это событие произойдет еще раньше, а именно – в 2080-х гг.

<sup>2</sup> Миллионная доля, единица измерения каких-либо относительных величин, равная  $1 \cdot 10^{-6}$  от базового показателя. Обозначается сокращением ppm (англ. *parts per million*), или млн<sup>-1</sup>.



**Рис. 5.** Изменения среднеглобальной температуры  $\Delta T_{\text{глоб}}$  в 1850 – 2200 гг.: история (Morice *et al.* 2012) (1), сценарии настоящей работы – «Парижский» (2), консервативный (3) и прогноз (Клименко 2011), сделанный с учетом влияния естественных факторов (4). Температура отсчитана от средних значений за 1871–1900 гг.

Сомнения в возможности удержания потепления в условно безопасных пределах высказывались и ранее (Клименко, Терешин 2010; New *et al.* 2011; Rogelj *et al.* 2010). Теперь же мы получаем новые подтверждения тому, что даже полномасштабная имплементация достигнутых в Париже соглашений не позволяет достичь желаемой цели. Перед мировым сообществом стоит нелегкий выбор между осуществлением еще более жестких мер по сокращению эмиссии, что, на наш взгляд, почти нереально, или адаптацией к совершенно новым климатическим условиям, которые продлятся не одно столетие.

### Выводы

1. Исторический опыт свидетельствует в пользу ограниченных способностей мировой энергетики к реформированию, что ставит под сомнение возможность полного осуществления Парижского соглашения.

2. Выполнение Парижского соглашения предполагает резкое снижение потребления угля в мире вплоть до фактически полного отказа от него в течение нескольких десятилетий.

3. Преодоление рубежа в 1,5 °С неотвратимо и наступает при любом сценарии дальнейшего развития событий еще при жизни нынешнего поколения – не позднее 2050-х гг.

4. Последовательное выполнение Парижского соглашения позволяет удержать повышение температуры в пределах 2 °С до 2100 г., но не предотвращает его дальнейшего роста.

### *Литература*

**Клименко, В. В.**

1995. Энергия, климат и историческая перспектива России. *Общественные науки и современность* 1: 99–105.

2011. Почему замедляется глобальное потепление? *Доклады Академии наук* 440(4): 536–539.

**Клименко, В. В., Терешин, А. Г.**

2010. Мировая энергетика и глобальный климат после 2100 г. *Теплоэнергетика* 12: 38–44.

2013. Нетрадиционный газ и трансформация глобального углеродного баланса. *Доклады Академии наук* 453(1): 95–98.

**Клименко, В. В., Клименко, А. В., Терешин, А. Г.** 2015. Опыт построения дальних прогнозов воздействия мировой энергетика на атмосферу Земли. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* 51(2): 158–168.

**Клименко, В. В., Клименко, А. В., Андрейченко, Т. Н., Довгало, В. В., Микушина, О. В., Терешин, А. Г., Федоров, М. В.** 1997. *Энергия, природа и климат*. М.: Изд-во МЭИ.

**Сливко, В. М.** 1999. *Энергетические аспекты развития древних цивилизаций*. М.: Газоил пресс.

**Терешин, А. Г., Клименко, А. В., Клименко, В. В.** 2015. Золотой век газа и его влияние на мировую энергетику, глобальный цикл углерода и климат. *Теплоэнергетика* 5: 3–13.

**Intended Nationally Determined Contributions.** Compilation as communicated by 1st October 2015. 2015. N. Y.: UNFCCC.

**Mediavilla, M., de Castro, C., Capellan, I., Miguel, L. J., Arto, I., Frechoso, F.** 2013. The Transition Towards Renewable Energies: Physical Limits and Temporal Conditions. *Energy Policy* 52(1): 297–311.

**Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Jones, P. D.** 2012. Quantifying Uncertainties in Global and Regional Temperature Change Using an Ensemble of Observational Estimates: the HadCRUT4 dataset. *Journal of Geophysical Research* 117/D08101. doi:10.1029/2011JD017187.

**New, M., Liverman, D., Schroder, H., Anderson, K.** 2011. Four Degrees and Beyond: the Potential for a Global Temperature Increase of Four Degrees and its Implications. *Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369(1934): 6–19.

**Rogelj, J., Nabel, J., Chen, C., Hare, W., Markmann, K., Meinshausen, M., Schaeffer, M., Macey, K., Höhne, N.** 2010. Copenhagen Accord Pledges are Paltry. *Nature* 464(7292): 1126–1128.

**Smil, V.** 2014. The Long Slow Rise of Solar and Wind. *Scientific American* 310: 52–57.

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

**White, L. A.** 1959. *The Evolution of Culture: The Development of Civilization to the Fall of Rome*. N. Y.: McGraw-Hill.