

Мировая энергетика и глобальный климат в XXI веке в контексте исторических тенденций: Пределы роста

В. В. Клименко, А. Г. Терешин

Введение

Энергия – фундаментальная основа эволюции цивилизации, и XXI в. ставит перед мировой энергетикой серьезные задачи по обеспечению устойчивого развития человечества. Продолжающийся рост численности населения вместе с необходимостью ускоренного экономического развития многих регионов планеты несомненно приведет в ближайшие десятилетия к значительному росту потребности в энергии. Таким образом, обеспеченность мировой экономики топливно-энергетическими ресурсами – одна из важнейших проблем, стоящих перед человечеством. С другой стороны, в настоящее время энергетика признана мировым сообществом в качестве одного из основных факторов, влияющих на глобальные изменения окружающей среды, по масштабам воздействия на климат планеты превосходящего все остальные антропогенные факторы и сравнимого с мощными природными силами (IPCC 2007). Обеспокоенность масштабами наблюдаемых климатических изменений (повышение средней глобальной температуры за последние 100 лет на 0,6 градуса) и тревожные прогнозы ожидаемого потепления (до 5 градусов за текущее столетие) делают экологическую политику, наряду с состоянием ресурсной базы, одним из главных регуляторов развития мировой энергетической отрасли.

Указанные проблемы в последние десятилетия находят отражение в многочисленных публикациях, ими занимаются ведущие национальные и международные институты. Однако до сих пор весьма значителен разброс в оценках как перспектив развития мировой энергетике, так и масштабов связанных с ним изменений окружающей среды и климата.

Вместе с тем совершенно понятно, что, не имея более или менее ясных представлений о том, как будет развиваться мировая энергетика, невозможно строить реалистические сценарии будущих изменений окружающей среды и климата, разрабатывать эффективную адаптационную политику. Возможны ли вообще долгосрочные прогнозы развития энергетике? Многие специалисты, имея в виду обширный негативный опыт, накопившийся в этой области (обзор сценариев мирового энергопотребления см., например, в: Клименко и др. 2001), склонны отвечать на поставленный вопрос отрицательно.

На наш взгляд, ситуация представляется не настолько безнадежной, если для решения поставленной задачи использовать исторический экстраполяционный подход, широко распространенный в современной социологии и экономике в виде известной теории институциональных изменений (North 1990), основная идея которой заключена в положении, что история развития многих сложных систем определяет их буду-

щее поведение на много лет вперед. Настоящая работа ставит целью обозначить путь развития мировой энергетики, основанный на анализе основных тенденций ее исторической эволюции, и с этих же позиций оценить его ресурсную обеспеченность и наиболее вероятные последствия для глобальной климатической системы.

В основе предлагаемых оценок лежит так называемый генетический прогноз мирового энергопотребления, разработанный более 15 лет назад в МЭИ (Клименко В., Клименко А. 1990; Снытин и др. 1994; Клименко 1994) и за истекший период показавший очень хорошее соответствие фактическим данным (Клименко и др. 2001): отклонение прогнозных оценок от данных мировой энергетической статистики не превышало 2 %, что, на наш взгляд, делает возможным построения сверхдолгосрочного энергетического прогноза с точностью, необходимой для климатических расчетов, вполне реальной. Последовательное применение генетического подхода к прогнозированию развития энергетики (обнаружение и экстраполяция исторических тенденций в будущее) позволило сформулировать два фундаментальных вывода, определяющих путь развития энергетики мира в ближайшие десятилетия:

1) стабилизация национального удельного энергопотребления на душу населения на уровне, в основном определяемом климато-географическими факторами (Клименко 1994) (этот процесс уже завершился в большинстве развитых стран мира [UN 2010; ВР 2011]);

2) неуклонное и практически линейное снижение со временем углеродной интенсивности¹ мировой энергетики в результате изменений структуры топливно-энергетического баланса, наблюдающееся уже более 100 лет (Клименко и др. 1997).

Реализация первой тенденции должна привести к установлению среднемирового удельного энергопотребления на душу населения на уровне 2,9–3,0 т у.т./ (чел.год), кстаги, весьма близком к современному (2,66 т у.т./чел. 2010 г. [ВР 2011]), что, при ожидаемом росте численности населения планеты к 2100 г. примерно до 9,5 млрд чел. (UN 2011) приведет к ежегодному потреблению энергии в мире в 28–29 млрд т у.т., что всего в 1,5 раза выше современного уровня (18 млрд т у.т. в 2010 г. [ВР 2011]). Таким образом, исторический подход запрещает повышение уровня потребления энергии в течение текущего столетия до 60, 100 и, тем более, 200 млрд т у.т. в год, как это часто допускается авторами наиболее радикальных энергетических сценариев (см., например: IPCC 2001).

Сохранение второй тенденции означает снижение темпов роста антропогенного воздействия на климатическую систему и, в частности, довольно скорое, в течение четверти века, достижение пика антропогенной эмиссии CO₂. В постоянном, и, по-видимому, необратимом уменьшении углеродной интенсивности нет ничего мистического. Более того, этот факт может иметь фундаментальное философское обоснование в виде принципа прогрессирующего упрощения, широко распространенного в природе и общественной жизни и наблюдающегося не только в технике, но и в различных областях науки, искусстве, философии и теологии (Тойнби 1991). Применительно к энергетике этот принцип осуществляется в постепенном переходе от более сложных, «законсервированных» энергоносителей, к более элементарным, естественным. Именно так выглядит путь мировой энергетики от угля к нефти, затем к газу, и, наконец, к возобновляемым источникам.

¹ Под углеродной интенсивностью понимается количество диоксида углерода (основного парникового газа, поступающего в атмосферу за счет антропогенной деятельности), приходящееся на единицу потребления энергии.

Ресурсы органического топлива и НВИЭ

Необходимым тестом на состоятельность любого энергетического сценария является его проверка на обеспеченность топливно-энергетическими ресурсами. Как это ни удивительно, многие «высокие» варианты энергопотребления прошлых лет предполагали использование таких объемов органического топлива, которые значительно превышают не только их доказанные извлекаемые запасы, но подчас и гипотетические дополнительные ресурсы.

В настоящей работе для оценки производства углеводородного топлива (нефти и природного газа) использована так называемая «методика расходования исчерпаемого ресурса» (IAEA 1985), предполагающая снижение объемов добычи этого ресурса по мере истощения его месторождений. В этом случае кривая его кумулятивного потребления описывается логистической функцией с экспоненциальным начальным участком и асимптотой, определяемой объемом доступных запасов. В качестве последних в настоящей статье принимается сумма разведанных извлекаемых запасов и перспективных дополнительных ресурсов, устанавливающая теоретический предел возможностей использования данного вида топлива с геологической и экономической точек зрения, по терминологии Всемирного энергетического совета (WEC 2001). В этой части исследование (Клименко, Терешин 2010) отличается от более ранней работы (Снытин и др. 1994), где дополнительные ресурсы нефти и газа не принимались во внимание, что привело к некоторому искажению прогноза структуры мирового энергобаланса, выраженному в постоянном повышении доли угля и, напротив, снижении уже с начала текущего столетия доли нефти и газа. В действительности же последнее десятилетие показало, что нефть и газ сохраняют ведущие позиции в мировом энергобалансе, а потребление угля остается практически на неизменном уровне.

Рис. 1 показывает динамику изменения разведанных извлекаемых запасов углеводородного сырья в течение последних 50 лет (см. данные в: BP 2011; WEC 2001). Очевидно, что оценки запасов как нефти, так и газа за этот период претерпели значительные изменения – с 1950 г. они увеличились на порядок, и даже в последние годы, несмотря на значительные объемы добычи (примерно 5 и 4 млрд т у.т. в год для нефти и газа соответственно), наблюдается их рост. Однако совершенно ясно, что этот процесс не может продолжаться бесконечно, и вид кривых на Рис. 1 показывает, что в настоящее время ежегодный прирост запасов нефти практически сравнялся с объемами ее добычи, а для газа такое состояние будет достигнуто, видимо, в течение ближайшего десятилетия. Таким образом, мировые доказанные извлекаемые запасы нефти и газа составляют примерно по 270 и 240 млрд т у.т., а окончательные (с учетом дополнительных извлекаемых запасов [NOAA 2012]) – 620 и 490 млрд т у.т. соответственно.

Аппроксимация исторических рядов кумулятивной добычи нефти и газа (BP 2011) логистической функцией со значениями окончательных запасов нефти и газа в качестве асимптот определяет динамику изменения ежегодной добычи углеводородного сырья в ближайшие десятилетия (Рис. 2–3). В рамках генетического прогноза эти виды топлива обеспечат примерно 50 % энергопотребления в мире к 2050 г., но лишь около 10 % – к концу столетия. Для сравнения на Рис. 2–3 представлен основной сценарий группы специалистов из Всемирного Энергетического совета и Международного института прикладного системного анализа (IIASA / WEC 1998), согласно которому к 2100 г. суммарное потребление нефти полностью исчерпает ее ресурсы, а природного газа даже превысит его окончательные резервы. Аналогичные показатели имеет и сценарий В2 Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC 2001), хоть и не указанный в качестве базового, но ориентирующийся на умеренные

показатели демографического и экономического развития и находящийся в середине спектра из представленных 40 альтернативных путей развития энергетики.

Рис. 1. Динамика оценок доказанных извлекаемых запасов углеводородного сырья (BP 2011; WEC 2001; IAEA 1985): 1 – нефти; 2 – природного газа

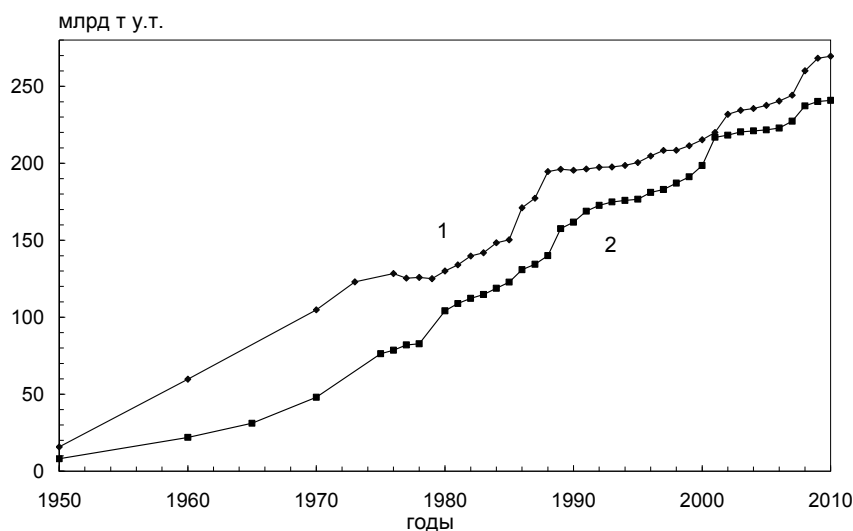


Рис. 2. Кумулятивное потребление газа в мире: 1 – исторические данные (UN 2010; BP 2011); 2 – базовый сценарий (Клименко, Терешин 2010); 3 – основной сценарий (IIASA / WEC 1998)

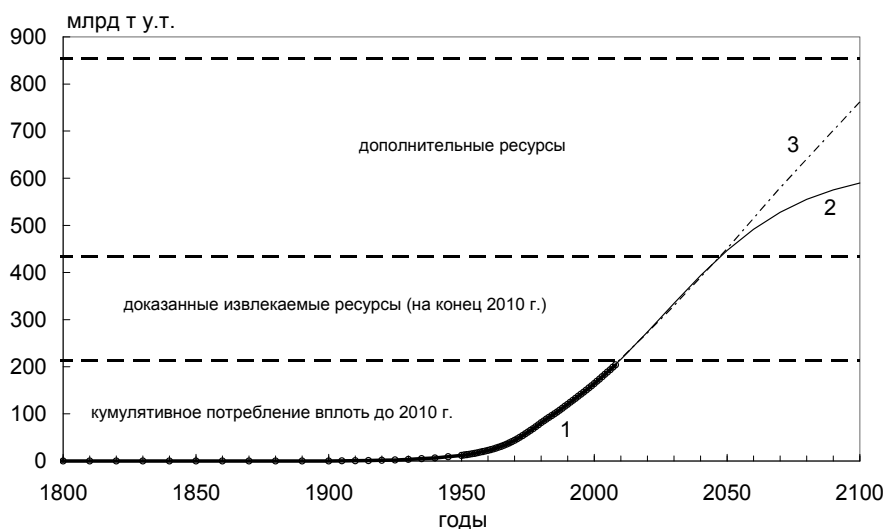
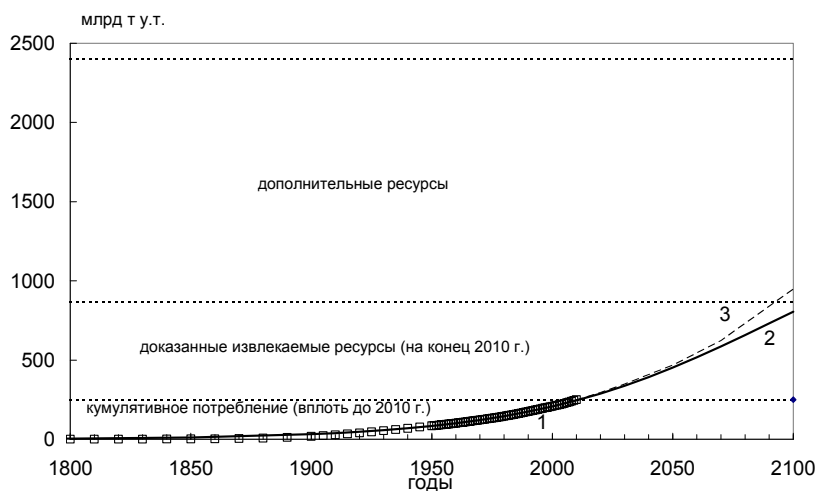


Рис. 3. Кумулятивное потребление нефти в мире: 1 – исторические данные (UN 2010; BP 2011); 2 – базовый сценарий (Клименко, Терешин 2010); 3 – основной сценарий (IIASA / WEC 1998)



Для сохранения тенденции снижения удельной эмиссии углекислого газа при производстве энергии (Рис. 5) в «экологическом» варианте генетического прогноза доля угля в глобальном энергетическом балансе должна сохраняться на уровне 15–20 %. Таким образом, на долю источников энергии, не связанных со сжиганием органического топлива, в предложенном сценарии приходится обеспечение примерно 30 % потребности в энергии в 2050 г. и до 60 % – к 2100 г. против современных 20 % (Табл. 1).

Тенденция практически линейного снижения удельных выбросов углерода при потреблении энергии, сохранявшаяся в течение многих десятилетий, в последние годы оказалась нарушенной благодаря увеличению потребления угля (в первую очередь в Китае), объем которого за последние 5 лет вновь превысил объемы сжигания природного газа и практически сравнялся с объемом потребления нефти. Аппроксимация кумулятивной добычи угля логистической функцией (Рис. 4) предлагает исторический сценарий потребления твердого топлива, согласно которому к концу столетия доля угля в мировом энергетическом балансе повысится до 30 %, а источники энергии, не связанные с выбросами углекислого газа, составят менее 50 % (Табл. 1).

В результате углеродный коэффициент, который в 2003–2010 гг. находился на уровне 0,5 т С/т у. т., в соответствии с исторической оценкой структуры энергопотребления сохранится на этом уровне еще примерно 20 лет (Рис. 5). В дальнейшем углеродный коэффициент возобновит снижение, связанное с постепенным вытеснением органического топлива и замещением его источниками энергии, не связанными с выбросами CO₂ (атомная и гидроэнергетика, НВИЭ). Какими видятся реальные пути осуществления столь значительных перемен в мировом энергобалансе?

Таблица 1. Структура мирового энергетического баланса для различных сценариев развития энергетики (потребление в млрд т у.т. и %)

Сценарий	Источники энергии	2000 г.	2020 г.	2050 г.	2100 г.
Экологический (Клименко, Терешин 2010)	Уголь	3,2 (23 %)	3,1 (15 %)	3,7 (14 %)	5,5 (19 %)
	Нефть и газ	8,0 (56 %)	11,1 (54 %)	10,2 (39 %)	2,0 (7 %)
	Без CO ₂	1,7 (12 %)	4,2 (20 %)	9,8 (38 %)	18,4 (65 %)
	Некоммерч.	1,3 (9 %)	2,1 (10 %)	2,3 (9 %)	2,4 (9 %)
	Всего	14,2 (100 %)	20,5 (100 %)	26,1 (100 %)	28,3 (100 %)
Угольный (Клименко, Терешин 2010)	Уголь	3,2 (23 %)	3,3 (16 %)	6,7 (26 %)	8,1 (29 %)
	Нефть и газ	8,0 (56 %)	11,1 (54 %)	10,2 (39 %)	2,0 (7 %)
	Без CO ₂	1,7 (13 %)	4,0 (20 %)	6,9 (26 %)	15,8 (56 %)
	Некоммерч.	1,3 (9 %)	2,1 (10 %)	2,3 (9 %)	2,4 (9 %)
	Всего	14,2 (100 %)	20,5 (100 %)	26,1 (100 %)	28,3 (100 %)
Основной сценарий (IIASA / WEC 1998)	Уголь	3,2 (22 %)	5,1 (26 %)	6,5 (23 %)	12,6 (26 %)
	Нефть и газ	8,0 (56 %)	10,5 (54 %)	13,4 (47 %)	14,4 (29 %)
	Без CO ₂	1,7 (13 %)	2,6 (13 %)	7,2 (25 %)	21,6 (44 %)
	Некоммерч.	1,3 (9 %)	1,2 (6%)	1,2 (4 %)	0,6 (1 %)
	Всего	14,2 (100 %)	19,4 (100 %)	28,3 (100 %)	49,2 (100%)
Сценарий В2 (IPCC 2001)	Уголь	3,2 (22 %)	3,3 (17 %)	3,0 (10 %)	10,2 (22 %)
	Нефть и газ	8,0 (56 %)	12,6 (65 %)	17,8 (60 %)	13,4 (29 %)
	Без CO ₂	1,7 (13 %)	2,2 (11 %)	7,6 (26 %)	21,4 (46 %)
	Некоммерч.	1,3 (9 %)	1,3 (7 %)	1,3 (4 %)	1,3 (3 %)
	Всего	14,2 (100 %)	19,3 (100 %)	29,7 (100 %)	46,3 (100 %)

Рис. 4. Кумулятивное потребление угля в мире: 1 – исторические данные (UN 2010; BP 2011); 2 – исторический сценарий (Клименко, Терешин 2010); 3 – основной сценарий (IIASA / WEC 1998)

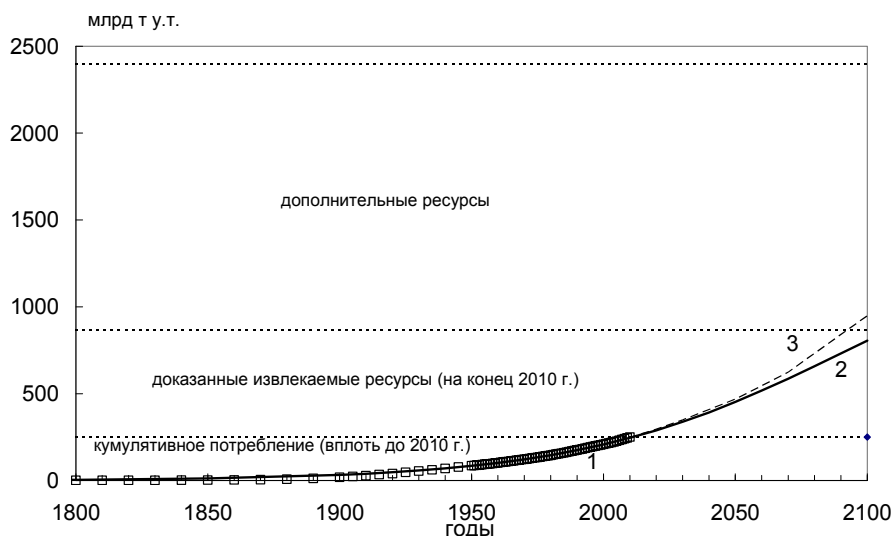
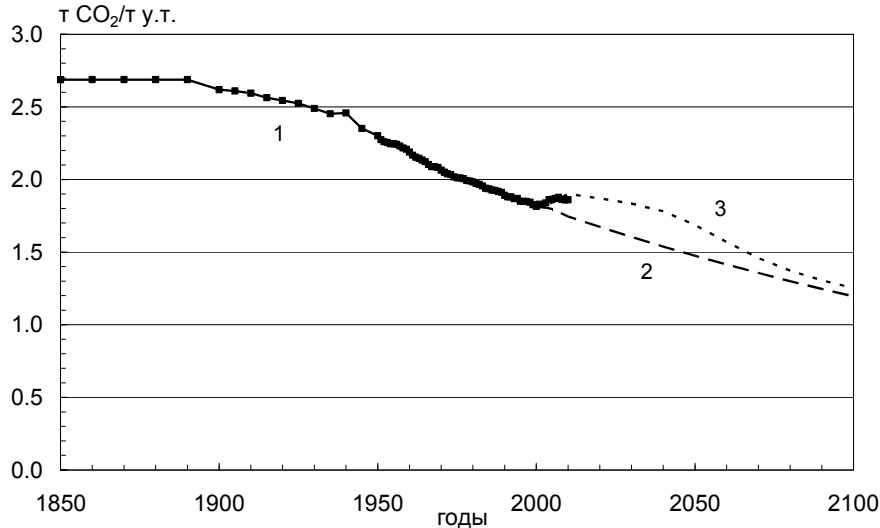


Рис. 5. Изменение углеродной интенсивности мирового энергопотребления: 1 – расчеты по фактическому энергопотреблению (BP 2011; UN 2010); экологический (2) и исторический (3) сценарии (Клименко, Терешин 2010)



Прежде всего, стоит отметить, что длительные надежды, связанные с развитием ядерной энергетики (в частности, сценарии IASA / WEC 1998), предполагающие в течение нынешнего столетия рост производства электроэнергии на АЭС до 25...40 трлн кВтч/год, что эквивалентно ежегодному сжиганию 8...13 млрд т у.т. органического топлива на ТЭС², не оправдались – в настоящее время большинство аналитиков (IEA 2009; EIA 2010) не видит возможности заметного увеличения современной выработки АЭС (около 2,8 трлн кВтч/год). Так, базовые сценарии Министерства энергетики США (EIA 2010) и Международного энергетического агентства (IEA 2009) предполагают на период до 2030 г. диапазон выработки АЭС в пределах 3.5–3.8 трлн кВтч/год. Таким образом, вклад ядерной энергетики в мировое энергопотребление не превысит нескольких процентов. Гидроэнергетика, несмотря на ожидаемый рост производства (в настоящее время используется уже примерно треть имеющегося в мире экономического гидропотенциала), также сможет обеспечить производство не более 10 % требуемой энергии. В результате к 2100 г. для реализации генетического сценария потребуется производство энергии из нетрадиционных возобновляемых источников до 16–18 млрд т у.т./год, или 50 трлн кВтч/год, что вполне осуществимо, поскольку эти объемы лежат значительно ниже планки технического потенциала (и лишь чуть более чем в 2 раза превосходят экономический потенциал, рассчитанный для условий начала столетия) как солнечной, так и других видов возобновляемой энергии (см. Табл. 2), темпы роста использования которых в последние три десятилетия составили устойчивые 8 % в год (UN 2010; BP 2011).

² Пересчет так называемого первичного электричества, то есть электроэнергии, вырабатываемой без сжигания органического топлива, производится на основе соотношения 1 кВтч = 0,319 кг у.т., предполагающего глобально осредненный КПД ТЭС, равным 0,385.

Таблица 2. Потенциал НВИЭ, трлн кВтч/год (IAEA 1985; WEC 2001; Hoogwijk, Graus 2008)

Вид НВИЭ	Теоретический потенциал	Технический потенциал	Экономический потенциал
Солнечная энергия	8700	720	5,3
Гидроэнергетика	40	15	8,0
Энергия ветра	500	53	2,4
Энергия морских волн и приливов	22	6	0,6
Геотермальная энергия	5000000	6	1,0
Всего	5009292	800	17,0

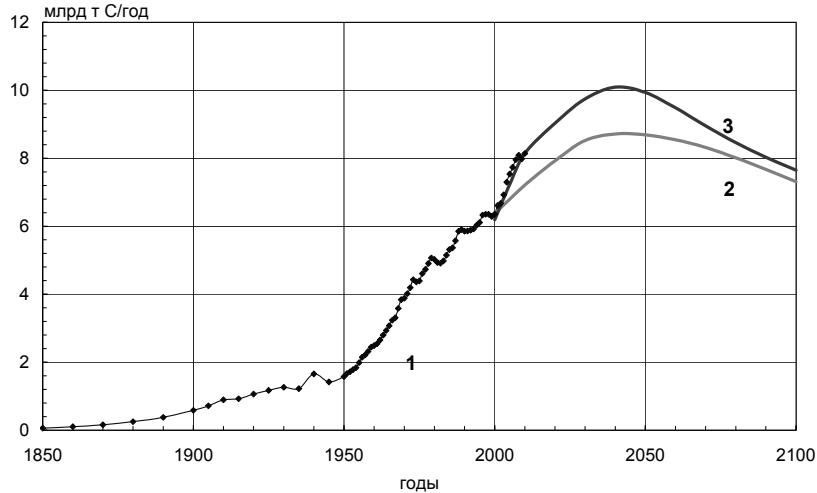
Сравнение структуры топливно-энергетического баланса, предлагаемого в настоящей работе для прогноза мирового энергопотребления, с аналогичными показателями работ (IIASA / WEC 1998; IPCC 2001) (см. Табл. 1) показывает, что для первой половины столетия они весьма близки. Заметные отличия во вкладах углеводородного топлива и вкладе источников энергии, не связанных с эмиссией углекислого газа, проявляются только ближе к 2100 г., когда неопределенность статуса энергетических технологий максимальна. Тем не менее, ожидаемая нами к 2100 г. доля источников энергии, не связанная со сжиганием топлива (55–65 %), предусмотрена в нескольких сценариях (IPCC 2001) (семейства A1T, A1B и B1). Таким образом, несмотря на принципиально отличный подход к прогнозной оценке состояния мировой энергетики, предлагаемая структура мирового топливного баланса в целом не противоречит экспертным оценкам путей развития технологий производства энергии и в части органического топлива полностью обеспечена природными ресурсами.

Изменения атмосферы и климата

На Рис. 6 представлены данные об объемах выбросов диоксида углерода из промышленных источников (включая производство цемента) по обоим сценариям. По историческому сценарию объемы эмиссии CO₂ будут расти до 2040 г., достигнув пика примерно в 10 млрд т С, после чего ожидается их снижение к 2100 г. Экологический сценарий отличается величиной пика – около 9 млрд т С, но в целом повторяет траекторию первого. Таким образом, даже к концу следующего столетия эмиссия углерода будет весьма значительной, примерно на уровне 1970–1980-х гг.

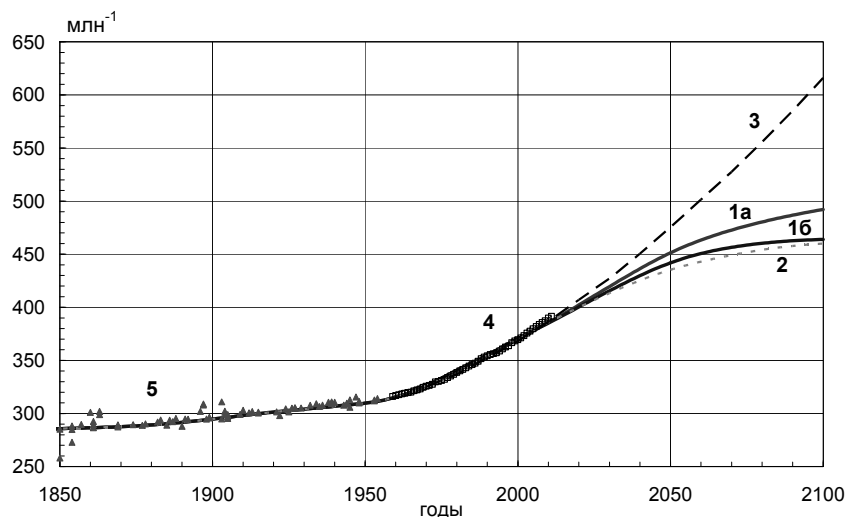
Расчеты на модели глобального углеродного цикла с учетом рассмотренных выше сценариев антропогенной эмиссии диоксида углерода показывают, что рост концентрации CO₂ в атмосфере в течение текущего столетия сдержать, по-видимому, не удастся (Рис. 7), хотя скорость ее изменения упадет с современных 0,5 до 0,1 % в год к 2100 г.

Рис. 6. Мировая эмиссия углекислого газа из энергетических источников: 1 – расчеты по фактическому энергопотреблению (BP 2011; UN 2010); экологический (2) и исторический (3) сценарии (Клименко, Терешин 2010)



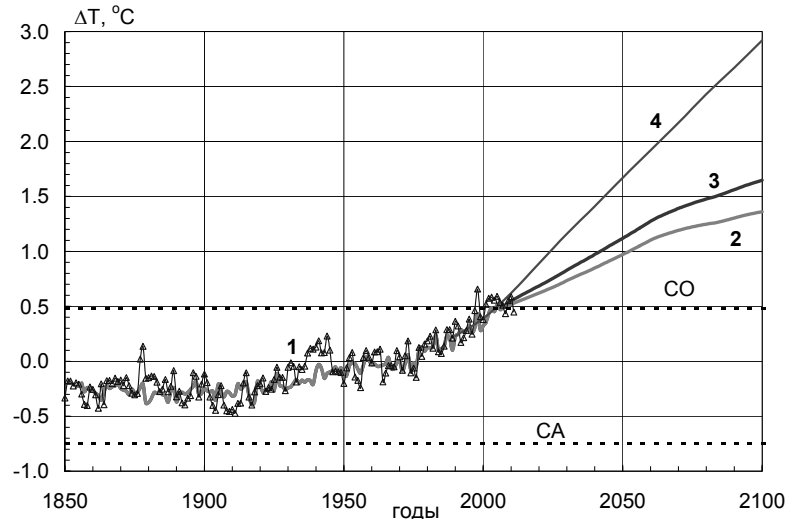
Драматические сценарии будущего глобального потепления (IPCC 2007) (по самым крайним из которых среднеглобальная температура повысится за ближайшие сто лет на 5 градусов – такого не было не только за всю историю цивилизации, но и вообще за последние 70 млн лет) основаны на расчетах на моделях общей циркуляции атмосферы и океана. Как уже было неоднократно показано (см., например: Клименко и др. 1997; 2001), при всей своей постоянно повышающейся сложности они еще не в состоянии адекватно описывать наблюдающиеся климатические изменения и допускают значительный разброс даже в оценке такого важнейшего параметра климатической системы, как чувствительность к изменению содержания парниковых газов в атмосфере, которая по различным работам (их обзор представлен в: IPCC 2007) находится в пределах 1,5–5,5 градусов при удвоении концентрации CO_2 . Для преодоления этих трудностей авторами настоящей работы была разработана более простая регрессионно-аналитическая климатическая модель (РАМК) (Клименко и др. 1997), сочетающая в себе физические методы описания термодинамических процессов в системе «океан-атмосфера» и статистических методов оценки связи их результатов (температурных откликов) с внешним возмущающим воздействием. Корректный учет ряда естественных климатообразующих факторов позволил рассчитать чувствительность глобальной климатической системы, которая составила примерно 1,9 градуса при удвоении содержания CO_2 , что находится в нижней части диапазона оценок этого параметра в (IPCC 2007).

Рис. 7. Изменения атмосферной концентрации углекислого газа: исторический (1а) и экологический (1б) сценарии (Клименко, Терешин 2010); 2 – базовый прогноз (Снытин и др. 1994); 3 – сценарий В2 (IPCC 2001); 4 – данные инструментальных измерений (NOAA 2012); 5 – данные ледовых кернов (IPCC 2007)



Расчеты ожидаемых в текущем столетии глобальных климатических изменений, проведенные на РАМК (Клименко и др. 1997; 2001; 2005), показывают, что, по базовому прогнозу основных климатообразующих факторов, включая эмиссию ПГ, среднеглобальная температура за 100 лет повысится еще примерно на 1 градус, что, хотя и превысит несколько максимальную отметку голоцена, но, по другому важнейшему критерию – скорости изменения температуры, – находится в рамках адаптационных возможностей биосферы. Рис. 8 представляет результаты расчетов изменений среднеглобальной температуры воздуха, сделанных на регрессионно-аналитической модели МЭИ по двум сценариям эмиссии диоксида углерода из энергетических источников для единого сценария других антропогенных и естественных факторов.

Рис. 8. Изменения среднеглобальной температуры приземного слоя воздуха (по сравнению с нормой 1951–1980 гг.): 1 – данные инструментальных измерений (CRU 2012); экологический (2) и исторический (3) сценарии (Клименко, Терешин 2010); 4 – сценарий B2 (IPCC 2001); CA и CO – температурные уровни субатлантической эпохи (Клименко 2004) и средневекового оптимума (Он же 2001) соответственно



Как видно из рисунка, модельные расчеты показывают продолжение наблюдающегося глобального потепления, однако темпы роста среднеглобальной температуры будут ниже, чем в последние три десятилетия (в среднем $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ за декаду). Мы ожидаем, что довольно высокая скорость потепления сохранится в первой половине текущего столетия, когда по историческому сценарию она составит $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ за декаду, в то время как во второй половине столетия она снизится до $0,10$ градуса за декаду.

Региональные проявления климатических изменений будут весьма разнообразны. Наши исследования, проведенные для территории России (Клименко и др. 2001; Клименко, Микушина 2005), показывают, что в ближайшие десятилетия следует ожидать заметного повышения средних годовых, зимних и весенних температур, что, в свою очередь, приведет к изменению многих прикладных климатических характеристик, имеющих значение для различных отраслей экономики. Так, снижение продолжительности и повышение средней температуры холодного периода приведет к значительной экономии топлива на отопление (к 2050 г. – до 15 % от современных значений) (Клименко 2007). Следует ожидать положительных изменений в сфере транспорта, сельского хозяйства, что также должно привести к снижению необходимого энергопотребления. Пожалуй, наиболее уязвимыми для климатических изменений на территории России являются области вечной мерзлоты (Клименко и др. 2007). Произойдет полное разрушение или значительная деградация вечной мерзлоты на площади более 5 млн км², то есть 30 % всей территории страны. Берега омывающих Россию морей подвергнутся затоплению из-за неизбежного подъема уровня мирового океана и интенсивной волновой эрозии в результате повышенной штормовой активности.

Сравнение географического распространения современного потепления и полей температур и осадков для других исторических теплых эпох – возможных аналогов ожидаемого потепления: субатлантического оптимума голоцена (примерно 5–6 тыс. лет назад) и средневековой теплой эпохи (конец IX–XII вв. н. э.) (Клименко 2001; 2004) свидетельствует о том, что лишь несколько стран Северного полушария ожидают значительные климатические изменения. Так, существенный рост средних годовых температур помимо России наблюдается лишь в Канаде, северной части США и в Средней и Центральной Азии, а в Европе, на юго-востоке США и большей части Китая и Индии эти температурные изменения либо незначительны, либо даже отрицательны. Эти изменения будут сопровождаться почти повсеместно увеличением количества осадков, за исключением северо-востока США, Средиземноморья, восточных провинций Китая и юго-восточных штатов Индии, где происходит некоторое иссушение.

Однако сценарии будущих климатических изменений, представленные в других работах, имеют широкий диапазон оценок вплоть до катастрофических. Так, в последнем обзоре (IPCC 2007) не исключается повышение среднеглобальной температуры на 5 градусов. Глобальное потепление такого масштаба вызовет необратимые изменения природной среды в большинстве регионов мира, не исключая и Россию, что приведет к чрезвычайно негативным последствиям во всех сферах человеческой жизни. Несомненно, что судьба Киотского протокола (КП) в значительной мере зависит и от подтверждения или опровержения этих оценок. Если подтвердится несостоятельность катастрофических прогнозов, дальнейшее ужесточение ограничений КП будет менее вероятным. В то же время в случае развития событий по неблагоприятному сценарию следует ожидать еще большей консолидации мирового сообщества в области охраны климата. Однако, повторим, результаты наших многолетних исследований свидетельствуют в пользу умеренных сценариев развития глобальных климатических изменений.

Как было указано, предложенный в настоящей работе подход к составлению перспективного топливного баланса обеспечивает сохранение тенденции снижения углеродной интенсивности энергопотребления. Таким образом, несмотря на внесенные в настоящей работе изменения в прогнозные оценки структуры мирового энергопотребления, в основном ожидаемый уровень воздействия глобального топливно-энергетического комплекса на атмосферу и климат планеты в XXI в. соответствует нашим прежним оценкам. Как показывают расчеты, за ближайшее столетие эмиссия углекислого газа при реализации сценария развития энергетики, основанного на анализе исторических тенденций, приведет к росту концентрации CO_2 в атмосфере до 490 млн^{-1} . Изменения в оценках будущих мировых выбросов метана и закиси азота, вызванные уточнением топливного баланса, из-за малой доли в них энергетических источников также пренебрежимо малы. Очевидно, что сделанные в настоящей работе поправки к нашему прогнозу 15-летней давности должны сказаться на оценках эмиссии таких загрязняющих веществ, как оксиды серы и азота, в основном поступающие в атмосферу при сжигании органического топлива. В целом можно заключить, что использованный для прогнозирования развития энергетики генетический подход является весьма устойчивым к изменениям исходных данных.

Таким образом, сделанный нами ранее (Клименко и др. 1990; 2001) прогноз глобальных климатических изменений сохраняет свою силу, что, кстати, подтверждается его полным соответствием фактическим данным для истекшего периода времени (CRU 2012). Согласно этому прогнозу, в течение текущего столетия ожидается повышение средней глобальной температуры примерно на 1 градус (Рис. 8), что находится

ниже всего диапазона оценок возможных глобальных изменений атмосферы и климата, сделанных экспертами (IPCC 2007), включая даже сценарии, ориентированные на сокращение численности населения планеты (B1), и в пять раз меньше возможного глобального потепления по экстремальной группе сценариев A1FI, предусматривающих наиболее интенсивный рост потребления органического топлива. Тем не менее, прогнозируемое потепление выходит далеко за рамки естественной изменчивости глобального климата, зафиксированной в палеоклиматических данных последних 2,5 тыс. лет (Клименко 2001; 2004), однако темпы роста температуры (примерно 0,1 градуса в десятилетие) находятся, по-видимому, в пределах адаптационных возможностей биосферы. Можно сделать вывод, что ожидаемое к концу XXI в. потепление, равно как и повышение концентрации CO₂ в атмосфере, лишь незначительно превосходит масштаб глобальных изменений, уже достигнутых в течение последнего столетия.

Выводы

- 1) Время, прошедшее после опубликования первых результатов применения генетического подхода для прогнозирования развития энергетики, показало его перспективность. Обнаружено хорошее соответствие прогнозных оценок мирового энергопотребления фактическим данным за последние 15 лет.
- 2) Развитие метода исторической экстраполяции в отношении оценки будущей структуры мирового производства энергии позволило разработать перспективный энергетический баланс на текущее столетие, в котором определяющая роль органического топлива сохраняется по крайней мере до 2060–2065 гг.
- 3) Исторический сценарий мирового энергопотребления полностью обеспечен имеющимися ресурсами органического топлива и не противоречит оценкам перспектив развития источников энергии, не связанных со сжиганием углеводородов.
- 4) В результате реализации исторического сценария развития энергетики следует ожидать весьма умеренных изменений состава атмосферы и климата, вполне соизмеримых с масштабом глобальных изменений, уже достигнутых в течение последнего столетия.

Библиография

- Клименко В. В. 1994. Влияние климатических и географических условий на уровень потребления энергии. *Доклады РАН* 339(3): 319–332.
- Клименко В. В. 2001. *Климат средневековой теплой эпохи в Северном полушарии*. М.: Изд-во МЭИ.
- Клименко В. В. 2004. *Холодный климат ранней субатлантической эпохи в Северном полушарии*. М.: Изд-во МЭИ.
- Клименко В. В. 2007. Влияние климатических изменений на уровень теплотребления в России. *Энергия* 2: 2–12.
- Клименко В. В., Клименко А. В. 1990. Приведет ли развитие энергетики к климатическому коллапсу? *Теплоэнергетика* 10: 6–11.
- Клименко В. В., Сныгин С. Ю., Федоров М. В. 1990. Энергетика и предстоящее изменение климата в 1990–2020 гг. *Теплоэнергетика* 6: 14–20.
- Клименко В. В., Федоров М. В., Андрейченко Т. Н. и др. 1994. Климат на рубеже тысячелетий. *Вестник МЭИ* 3: 103–108.
- Клименко В. В., Клименко А. В., Андрейченко Т. Н., Довгалюк В. В., Микушина О. В., Терешин А. Г., Федоров М. В. 1997. *Энергия, природа и климат*. М.: МЭИ.

- Клименко В. В., Клименко А. В., Терешин А. Г. 2001.** Энергетика и климат на рубеже веков: прогнозы и реальность. *Теплоэнергетика* 10: 61–66.
- Клименко В. В., Микушина О. В. 2005.** История и прогноз изменений климата в бассейне Карского и Баренцева морей. *Геоэкология* 1: 43–49.
- Клименко В. В., Терешин А. Г. 2010.** Мировая энергетика и глобальный климат после 2100 г. *Теплоэнергетика* 12: 38–44.
- Клименко В. В., Хрусталева Л. Н., Микушина О. В., Емельянова Л. В., Ершов Э. Д., Пармузин С. Ю., Терешин А. Г. 2007.** Изменения климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России в ближайшие 300 лет. *Криосфера Земли* XI(3): 3–13.
- Сныгин С. Ю., Клименко В. В., Федоров М. В. 1994.** Прогноз развития энергетики и эмиссия диоксида углерода в атмосферу на период до 2100 года. *Доклады РАН* 336(4): 476–480.
- Тойнби А. Дж. 1991.** *Постижение истории*. М.: Прогресс.
- BP 2011.** *BP Statistical Review of World Energy 2011*. London: BP. URL: <http://www.bp.com/statisticalreview>
- CRU 2012.** *Climatic Research Unit: Data. Temperature*. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>
- EIA 2009.** *International Energy Outlook 2009*. Washington, D.C.: Energy Information Administration.
- EIA 2010.** *International Energy Outlook*. Washington, D.C.: Energy Information Administration.
- Hoogwijk M., Graus W. 2008.** *Global Potential of Renewable Energy Sources: A Literature Assessment*. Background report by order of REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- IAEA 1985.** *Energy and Nuclear Power Planning in Developing Countries*. Technical reports series, 245. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IEA 2010.** *World Energy Outlook 2010*. Paris: OECD/IEA.
- IIASA/WEC 1998.** *Global Energy Perspectives* / Ed. by N. Nakicenovic, A. Grubler, A. McDonald. IIASA/WEC. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC 2001.** *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* / Ed. by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC 2007.** Ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning. Cambridge: Cambridge University Press.
- NOAA 2012.** Mauna Loa CO₂ Annual Mean Data. Earth System Research Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/
- North D. C. 1990.** *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- UN 2010.** *Energy Statistics Yearbook*. New York: UN.
- UN 2011.** *World Population Prospects: The 2010 Revision*. New York: UN.
- WEC 2001.** *WEC Survey of Energy Resources*. London: World Energy Council.