Семинар ИГКЭ, 22 мая 2013 г.

ОЦЕНКА ПРЕДСТОЯЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА С УЧЕТОМ РОСТА КОНЦЕНТРАЦИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И 60-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА

Э. Я. Ранькова, Г. В. Груза

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (ИГКЭ)

Для научно-обоснованной оценки предстоящих изменений климата необходимо иметь наиболее полную информацию о наблюдаемых изменениях климата, понимать их физические причины и фиксировать регулярные особенности тех изменений, причины которых изучены недостаточно.

Наиболее полный набор глобальных данных о наблюдаемой приземной температуре Земного шара собран в отделе климата Университета Восточной Англии (CRU UEA) под руководством Ф. Джонса (см., например, *Jones et al.,* 2012). Временной ряд глобально осреднённой приповерхностной температуры HadCRUT3 из этого набора приведен на рис. 9.1 (1850-2011 гг.).

Более подробная информация об этих данных приведена выше, в главе 2. Напомним, что аномалии температуры поверхности океанов используются в этих данных как адекватная замена аномалий температуры приземного воздуха. При этом различаются массивы CRUTEM (созданы CRU UEA) и HadCRUT (созданы совместно CRU и Hadley Center). Первые содержат только данные о температуре воздуха над сушей (surface air temperature), а вторые – совмещают данные о температуре воздуха на территории континентов и о температуре воды на акваториях океанов и морей (surface temperature). Последние («blended»-данные) в отечественной литературе часто упоминаются как «приповерхностная температура» (как и в настоящем докладе).

Массивы HadCRUT3 и CRUTEM3 (глобальные поля в пятиградусных боксах и глобально осредненные ряды), базирующиеся только на данных инструментальных наблюдений с 1850 года по настоящее время, использованы нами как основа данных о наблюдаемой приповерхностной температуре Земного шара, полушарий и других крупных частей географического

пространства. Для некоторых регионов и некоторых отрезков времени использовались более полные данные, если они были доступны, и если это было целесообразно. Отметим, что имеются интересные исследования (например, (Замолодчиков, 2013)), в которых рассматриваются данные за более ранний период (как правило, это палеоклиматические реконструкции), но они менее надёжны и в наших работах не используются.

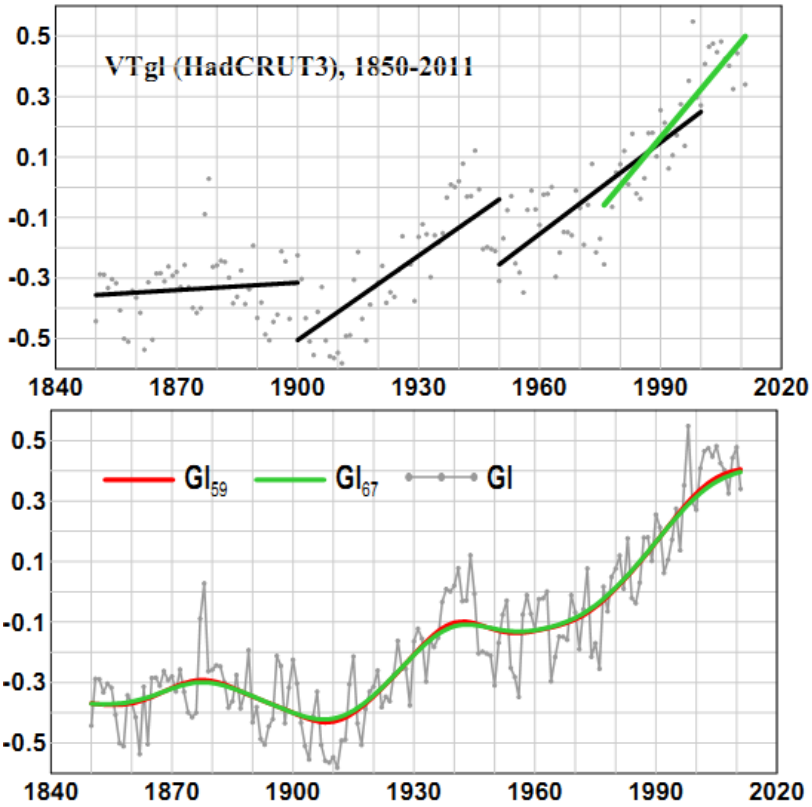

Рисунок 1 -Ход аномалии средней годовой глобальной приповерхностной температуры (HadCRUT3)

Вверху: Наблюдённые значения (точки) и линейные тренды для 4-х периодов: 1850-1900, 1900-1950, 1950-2011 и 1976-2011 гг.

Внизу: Ход наблюдённых значений (ломаная линия Gl); сглаженные кривые (Gl_{59}, Gl_{67}) получены с помощью фильтра Поттера с периодами отсечения 59 и 67 лет

На верхней панели рис.1 точками показаны аномалии средней годовой глобальной приповерхностной температуры воздуха. Аномалии вычислены как отклонения от среднего за 30 лет (с 1961 по 1990 годы). Такая картина показывает хаотические изменения температуры год от года, но отчетливо видно, что линейные тренды для различных отрезков времени показывают малые изменения температуры до 1900-го года и существенное потепление после 1910-го года. Следует обратить внимание, что аномалии среднегодовой среднеглобальной температуры имеют разброс всего 1.2 градуса!

Более детальный анализ изменений температуры у земной поверхности позволяет сделать нижний рисунок, где аномалии среднегодовых температур соединены прямыми линиями (которые не отражают внутригодовые изменения!) и показаны сглаженные кривые, полученные с использованием низкочастотного фильтра Поттера с периодами отсечения 59 и 67 лет. Практически эти две кривые полностью совпадают и позволяют выделить два примерно 60-летних колебания от максимума до максимума: примерно от 1880 до 1940 и от 1940 до 2000 гг. Реальность этих колебаний не вызывает сомнений. Наличие составляющей, отражающей монотонный рост глобальной температуры после1910 года, также не вызывает сомнений. Она интерпретируется как отклик на рост концентрации парниковых газов в атмосфере Земли.

1. Основные причины изменений и изменчивости приземной температуры

В качестве факторов, ответственных за изменения и изменчивость приземной температуры ниже рассматриваются:

- концентрация парниковых газов в атмосфере (в данном случае использован временной ряд концентрации CO_2);
- низкочастотные составляющие временных рядов температуры;
- показатели солнечной активности: число солнечных пятен и числа Вольфа, с которыми часто делаются попытки связать климатические процессы на Земле.

В данном докладе из показателей солнечной активности предпочтение отдано числу солнечных пятен (SS, sunspots) как доступному за более длительный период времени (в среднем за год и для каждого месяца).

Низкочастотные составляющие глобальной температуры с периодами отсечения около 60 лет (T=59 и T=67) приведены на нижнем фрагменте рис. 9.1 и прокомментированы выше. В частности, на кривых четко про-

слеживается тренд потепления, на фоне которого визуально выделяются три максимума (около 1880, 1940 и 2000 гг.) и два минимума (около 1910 и 1970 гг.). В процессе исследования были проанализированы аналогичные составляющие глобальной температуры, соответствующие периодам отсечения *T* от 55 до 69 лет. Анализ выполнен для Земного шара в целом, континентов северного полушария (СП), полярных и умеренных широт СП и территории России. Отфильтрованные низкочастотные составляющие оказались очень сходными на всем интервале рассматриваемых периодов отсечения. По определению, они должны содержать колебания исследуемого ряда с периодами не ниже периода отсечения (в том числе тренд, если он есть в исходном ряду). На «хвостах» ряда сглаживание, как правило, менее надежно, так как здесь данные не полностью покрывают область сглаживания.

Временные ряды других двух факторов – концентрации CO_2 и числа солнечных пятен (sunspots) – приведены на рис. 2.

Красными кривыми показаны их составляющие, выделенные фильтром Поттера с периодом отсечения *T*= 55 лет. Характерно, что низкочастотная компонента хода CO_2 практически совпадает с самим рядом, поскольку ряд CO_2 не содержит колебаний с периодами менее 55 лет. Изгиб в конце периода подтверждает сделанное выше замечание относительно большей неопределенности результатов фильтрации на хвостах ряда.

Аналогичная составляющая для числа солнечных пятен, по-видимому, отражает некоторую тенденцию к уменьшению амплитуды колебаний до 1930 г. и последующие два примерно 20-летних всплеска амплитуды с минимумом между ними в 1970 и, возможно, в конце периода.

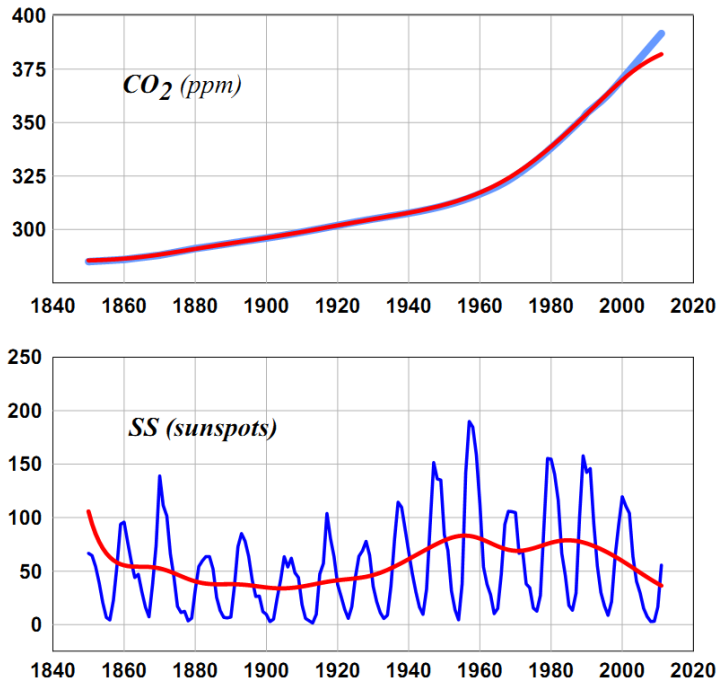

Рисунок 2 - Изменение среднегодовых значений концентрации двуокиси углерода (синяя линия, вверху) и числа солнечных пятен (синяя линия, внизу) в течение 1850-2011 гг. Красными кривыми показаны компоненты, выделенные фильтром Поттера с периодом отсечения 55 лет.

2. Анализ откликов приповерхностной температуры в регионах Земного шара на предполагаемые факторы изменений

На рис. 9.3 показаны результаты сравнительной оценки вклада предполагаемых физических причин (рост концентрации двуокиси углерода, солнечная активность) и внутренней, собственной изменчивости (60-летнее колебание) в изменения среднегодовой глобальной температуры у поверхности (ломаная линия на верхнем фрагменте). На рис. 9.4 аналогичный анализ выполнен для средних месячных температур января и июля.

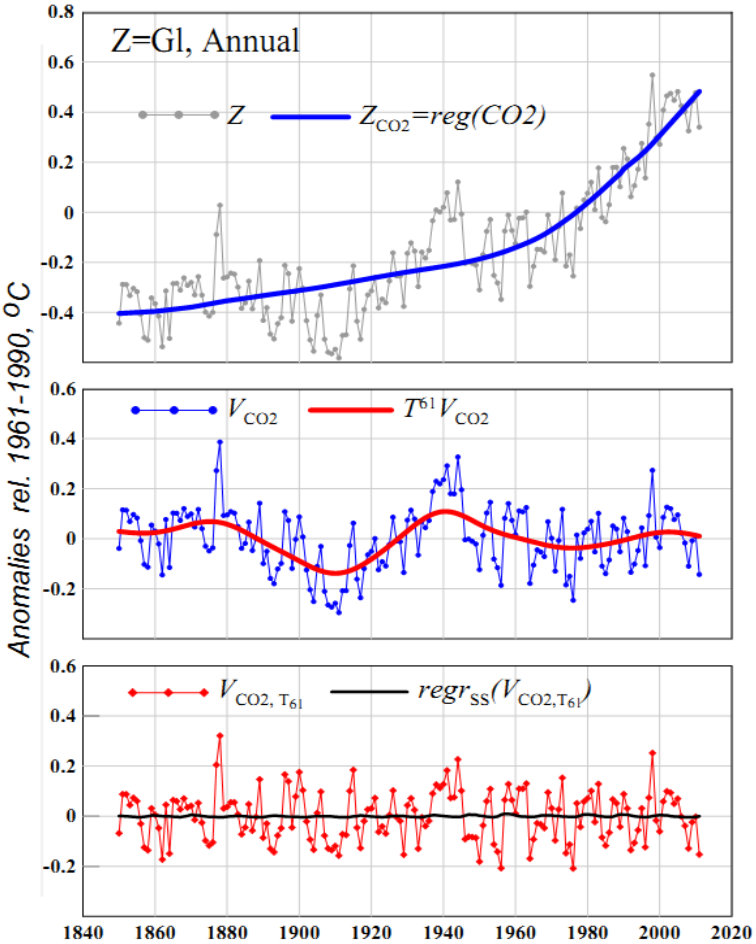

Рисунок 3 - Изменение средней годовой приповерхностной глобальной температуры:

<u>*Вверху*</u> – ход глобальной температуры (***Z***) и кривая ее регрессии на CO_2 ($\boldsymbol{Z_{CO2}}$).

<u>*В центре*</u> – ход остатков от регрессии ($\boldsymbol{V_{CO2}=Z-Z_{CO2}}$) и ее низкочастотная составляющая ($\boldsymbol{T^{61}V_{CO2}}$);

<u>*Внизу*</u> – ход $\boldsymbol{V_{CO2,\ T61}}$ (из хода температуры исключены компоненты, связанные с $\boldsymbol{CO_2}$ и с $\boldsymbol{T_{61}}$) и кривая ее регрессии на число солнечных пятен ***SS***.

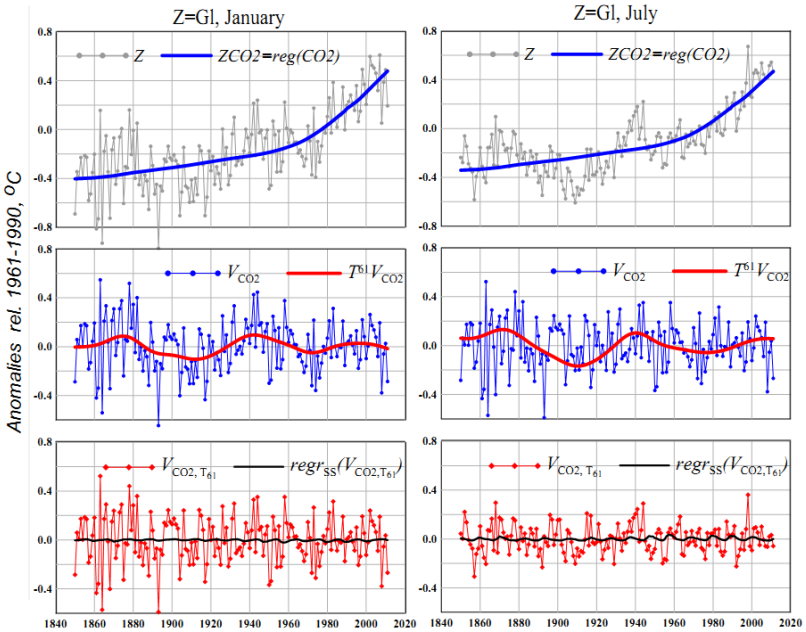

Рисунок 4 - См. Рис. 3, но для среднемесячных температур января (справа) и июля (слева)

На рисунках 3, 4 каждая пара кривых одного цвета относится к одному фактору: синие – к фактору CO_2, красные – к естественной низкочастотной изменчивости, черная кривая – к числу солнечных пятен SS. *Синей кривой* на верхних фрагментах показана компонента глобальной температуры Z_{CO2}, связанная с изменением CO_2 (выделена с помощью регрессии глобальной температуры на концентрацию CO_2), а на средних фрагментах – временной ряд остатков от регрессии $V_{CO2}=Z-Z_{CO2}$. В этом ряду, не содержащем вклада CO_2, еще ярче, чем на рис. 9.1, выявляется 60-летнее колебание $T^{61}V_{CO2}$ – *красная кривая* на среднем фрагменте, которая получена фильтром Поттера с T=61 уже в применении к остаткам от регрессии V_{CO2}. По-прежнему выделяются три максимума вблизи 1880, 1940 и 2000 гг. и два минимума около 1910 и 1970 гг. Как упоминалось выше, эта кривая практически совпадает с компонентами T^{55} - T^{65}, так что их можно рассматривать как вклад «квази-60-летнего колебания» в изменение V_{CO2}. Соответственно, дисперсия этой компоненты характеризует вклад квази-60-летнего колебания в суммарную изменчивость глобальной температуры, не связанную с изменением CO_2.

Красная кривая на нижнем фрагменте $V_{CO2,T61}$ = V_{CO2} - $T^{61}V_{CO2}$ представляет остатки после исключения влияния обоих факторов. Этот временной ряд определенно не содержит тренда – в нем остались колебания с периодами менее 60 лет. Попытка связать их с изменением солнечной активности (фактор SS) ничего не дает: кривая регрессии на число солнеч-

ных пятен $Regr_{SS}(V_{CO2,T61})$ практически совпадает с тождественным нулем (*черная кривая* на нижнем фрагменте).

Анализ выполнен также для арктического пояса 65-85°с.ш. и пояса умеренных широт 40-65 °с.ш. Кроме того, выполнено сравнение оценок, полученных для приповерхностной температуры (данные HadCRUT3, «суша+море») и температуры приземного воздуха над сушей (данные CRUTEM3 и станционные данные для территории России).

Количественные результаты выполненного анализа приведены в табл. 1 для всех рассмотренных регионов и календарных периодов. Для удобства сравнения оценки выражены в кв. градусах и в процентах от суммарной дисперсии D_{Σ}. Наглядно данные таблицы представлены в виде диаграмм на рис. 5.

Данные табл. 1 и рис. 5 показывают, что относительный вклад роста концентрации CO_2 в изменчивость температуры во всех рассмотренных регионах значительно больше, чем влияние 60-летнего цикла. Исключение составляют оценки для континентов Северного полушария (в июле) и Арктического региона (в январе), где вклады этих двух факторов оказались сопоставимыми. Вклад солнечной активности (sunspots) в изменчивость глобальной температуры много ниже (менее 2%).

Особо следует отметить, что для территории России практически во всех случаях эти два фактора (концентрация CO_2 и 60-летнее колебание) объясняют менее 50% изменчивости температуры (а в январе – лишь около 10%). В январе доля объясняемой этими факторами дисперсии существенно ниже и для других регионов.

Таблица 9.1 - Оценки дисперсии пространственно осредненных аномалий приземной температуры и ее составляющих, связанных с предполагаемыми факторами изменчивости

Регион	Сезон	D_{Σ}	D_{CO2}		D_{T61}		D_{ε}	
			$(°C)^2$	%	$(°C)^2$	%	$(°C)^2$	%
HadCRUT3 (суша+море), 1850-2011								
Земной шар	Год	0.070	0.054	77.4%	0.004	5.3%	0.012	17.2%
	Январь	0.096	0.054	55.7%	0.003	3.1%	0.040	41.2%
	Июль	0.068	0.045	66.1%	0.007	9.7%	0.017	24.2%
Арктика, 65-85N	Год	0.618	0.280	45.3%	0.102	16.5%	0.236	38.2%
	Январь	2.566	0.233	***9.1%***	0.238	***9.3%***	2.095	81.7%
	Июль	0.566	0.216	38.1%	0.028	4.9%	0.322	57.0%
Умеренные широты СП, 40-65N	Год	0.156	0.090	57.8%	0.010	6.1%	0.056	36.1%
	Январь	0.888	0.134	15.0%	0.021	2.4%	0.734	82.6%
	Июль	0.142	0.025	***17.3%***	0.031	***22.1%***	0.086	60.6%
CRUTEM3 (суша), 1850-2011								
Северное полушарие	Год	0.158	0.113	71.2%	0.009	5.6%	0.037	23.2%
	Январь	0.615	0.134	21.8%	0.021	3.4%	0.460	74.8%
	Июль	0.115	0.033	***29.0%***	0.028	***24.7%***	0.053	46.3%
Арктика, 65-85N	Год	0.720	0.330	45.8%	0.109	15.1%	0.281	39.1%
	Январь	3.044	0.335	***11.0%***	0.240	***7.9%***	2.468	81.1%
	Июль	0.451	0.093	20.7%	0.028	6.2%	0.330	73.2%
Умеренные широты СП, 40-65N	Год	0.280	0.17	60.1%	0.01	3.6%	0.102	36.4%
	Январь	1.980	0.290	14.7%	0.05	2.5%	1.641	82.9%
	Июль	0.200	0.030	***15.6%***	0.04	***20.3%***	0.128	64.1%
БД ИГКЭ (станционные наблюдения), 1886-2011								
Россия	Год	0.583	0.248	42.5%	0.013	2.2%	0.322	55.3%
	Январь	5.026	0.464	9.2%	0.107	2.1%	4.455	88.6%
	Июль	0.378	0.063	16.6%	0.030	8.0%	0.285	75.4%

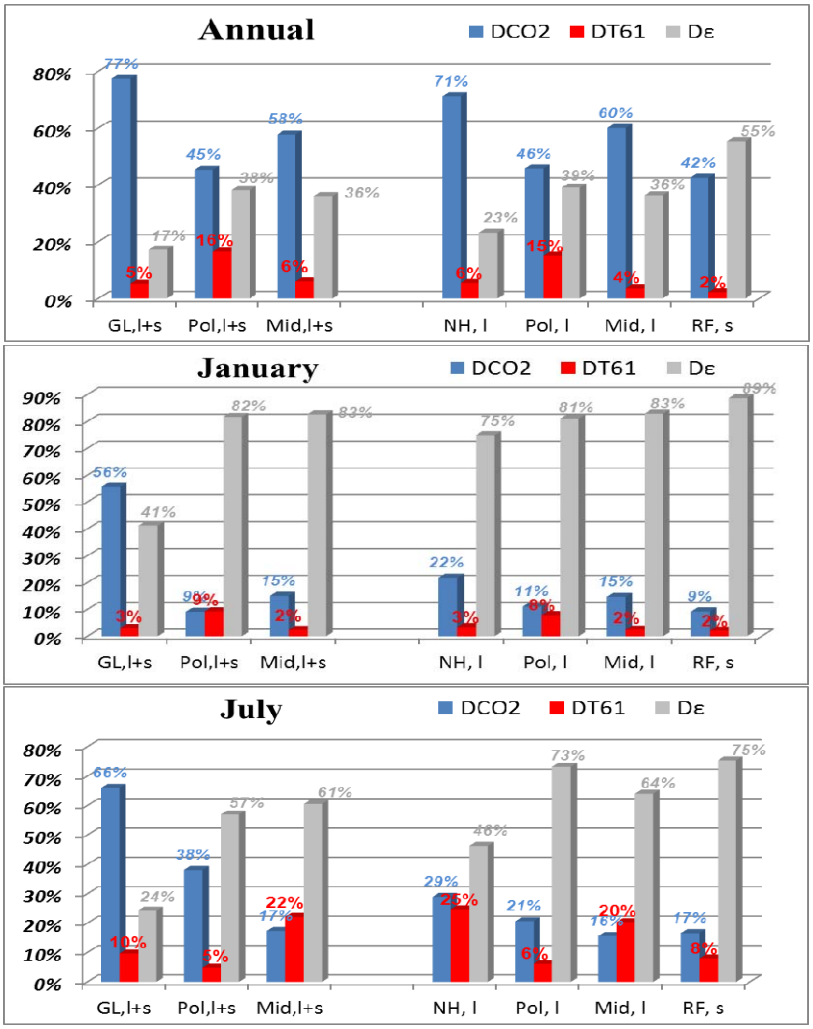

Рисунок 5 – Доля дисперсии пространственно осредненных температур, объясняемая изменением концентрации CO_2 и квази-60-летним колебанием T^{61} по данным HadCRUT3 (*s*+l), CRUTEM3 (l) и ИГКЭ (s) для года в среднем, января и июля. Серыми столбиками *D*ε показана остаточная дисперсия. Обозначения регионов: Gl – земной шар, NH – СП, Pol – арктический пояс (65-85N), Mid – пояс умеренных широт (40-65N), RF - Россия

Условные обозначения: $\boldsymbol{D\sum}$ – полная дисперсия ряда (кв. ^{o}C); $\boldsymbol{D_{CO2}}$ – дисперсия, объясняемая изменением концентрации CO_2 (дисперсия ряда Z_{CO2}); $\boldsymbol{DT^{61}}$ – дисперсия, связанная с квази-60-летним колебанием (дисперсия ряда $T^{61}V_{CO2}$); $\boldsymbol{D\varepsilon}$ – остаточная дисперсия, характеризующая изменчивость за счет других факторов (включая региональные, такие как чередование синоптических процессов в регионе).

3. Оценка (прогноз) ожидаемых изменений квази-60летней составляющей глобальной температуры

На рис. 6 представлен пример численного моделирования глобальной температуры у поверхности за период наблюдений 1901-2005 гг. с использованием 14 моделей (IPCC-2007, рис.5).

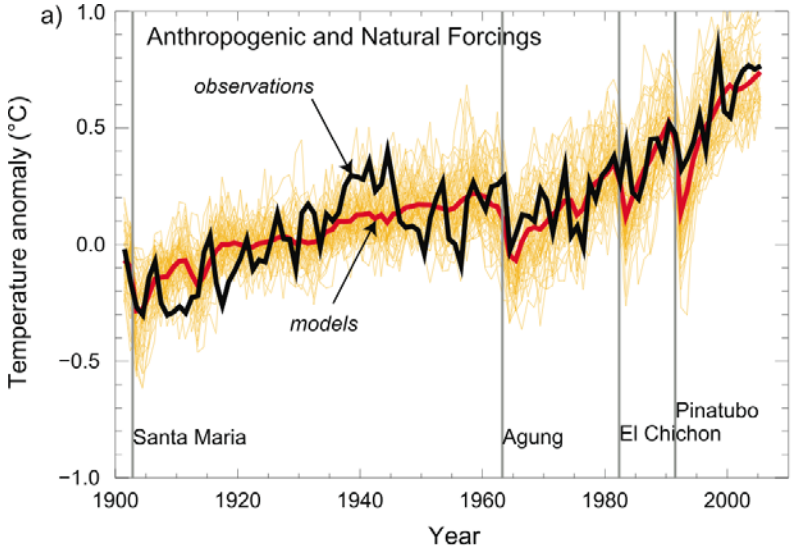

Рисунок 6 – Типичный результат численного эксперимента по моделированию средней годовой глобальной температуры у поверхности земли по 58 прогонам 14 моделей за период 1901-2005 гг. (ансамблевая средняя и полоса ±σ). Черной ломаной линией показан наблюденный ход среднегодовой глобальной температуры за тот же период (цитируется по IPCC-2007, рис.9.5)

Данные рис. 6 позволяют сделать вывод о том, что экстремумы квази-60-летнего цикла, обнаруживаемые в рядах наблюденной температуры для всех рассмотренных пространственных регионов и сезонов, не воспроизводятся гидродинамическими моделями. Такой вывод позволяет предположить, что эти колебания, возможно, связаны с внеземными влияниями. Например, это может быть цикл изменения расстояния между Солнцем и Землей вследствие влияния положения крупных планет. В [Монин, Берестов, 2005] 60-летний цикл рассматривается, как «самый длинный из коротких циклов», в котором «приблизительно повторяется взаимное расположение Солнца, Юпитера и Сатурна».

В любом случае ясно, что учет квази-60-летнего колебания в прогнозе изменений климата пока может быть реализован лишь в виде достаточно грубой эмпирической оценки. При этом речь идет о колебаниях с амплитудой менее 0.2°C.

Выше было отмечено (Рис 3, 4), что изменения средней глобальной приповерхностной температуры складываются из отклика на изменения

концентрации парниковых газов и квази-60-летнего цикла, а также хаотических колебаний, связанных с чередованием синоптических процессов.

Рассмотрим одну составляющую этих изменений, а именно: вклад квази-60-летнего цикла, который в данной задаче представлен величиной $T^{61}V_{CO2}$, то есть составляющей глобально осредненной приповерхностной температуры, связанной лишь с 60-летним циклом. На Рис. 7 ход этой величины в течение 1850-2011 гг. показан черными кривыми для среднегодовой температуры, температуры января и июля (на рис. 3, 4 им соответствуют красные кривые на средних фрагментах).

Доступный временной интервал практически не включает восходящую ветвь первого цикла и нисходящую ветвь последнего. Кроме того, следует помнить, что фильтрация на «хвостах» рядов выполнена по неполным данным. В результате, доступны лишь два ~60-летних периода между максимумами – на рисунке они выделены цветными кривыми, розовой и голубой.

Общий характер колебаний в январских, июльских и годовых величинах достаточно близок, хотя в деталях они не совпадают, особенно вблизи последнего максимума. Тем не менее, будем считать далее, что различия численных оценок этих колебаний скорее всего связаны со случайными ошибками, которых невозможно избежать в оценках такого рода.

Понятно, что двух «реализаций» 60-летнего колебания (то есть двух имеющихся 60-летних циклов) недостаточно для статистической оценки его следующей «реализации». В этих условиях естественно предложить упрощенное решение по типу «инерционного прогноза», с той разницей, что в качестве «прогноза» может рассматриваться в равной мере любой из двух наблюденных 60-летних циклов. Другими словами, предлагается перенести в точку последнего максимума каждый из двух наблюденных циклов. На рис. 7 момент последнего максимума на всех кривых показан вертикальной чертой, а подобные каждому циклу «инерционные» изменения температуры показаны кривыми соответствующего цвета.

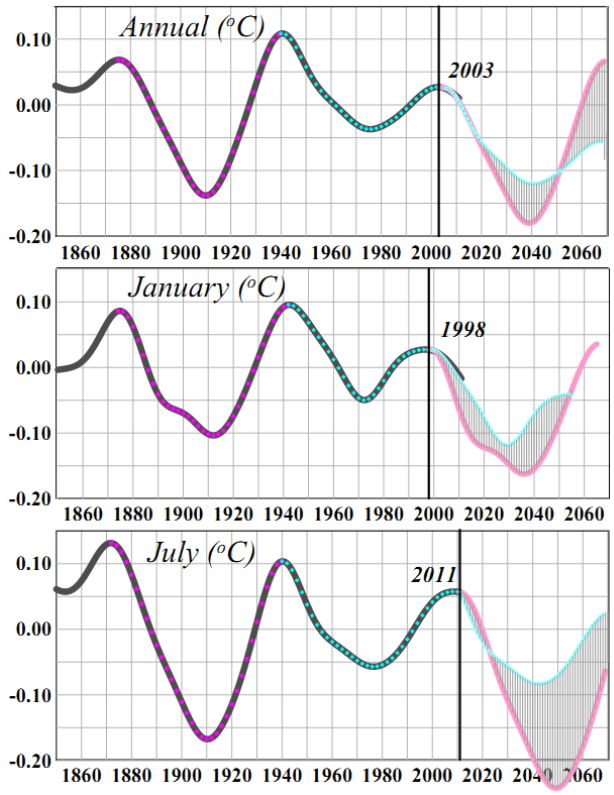

Рисунок 7 – Вклад 60-летнего колебания в изменение глобальной приповерхностной температуры в течение 1850-2011 гг. и оценка его изменения в следующем 60-летнем цикле (до 2070 г.)

Как следует из приведенных рисунков, можно ожидать понижения глобальной температуры примерно на 0.15 °C за ближайшие 15 лет за счет квази-60-летнего колебания.

Принимая гипотезу, что все три графика на Рис. 7 равнозначны, можно объединить их в один, что сделано и представлено на рис. 9.8.

Этими кривыми можно пользоваться для прогностической оценки ожидаемых изменений средней глобальной температуры за счет квази-60-летнего колебания. Достаточно определить диапазон изменений ординаты (внутри заштрихованной полосы) на вертикали с абсциссой, равной сроку прогноза. Например, к 2040 году можно ожидать уменьшения глобальной температуры только за счет 60-летнего колебания на 0.25 °C (в сравнении с 2010 годом).

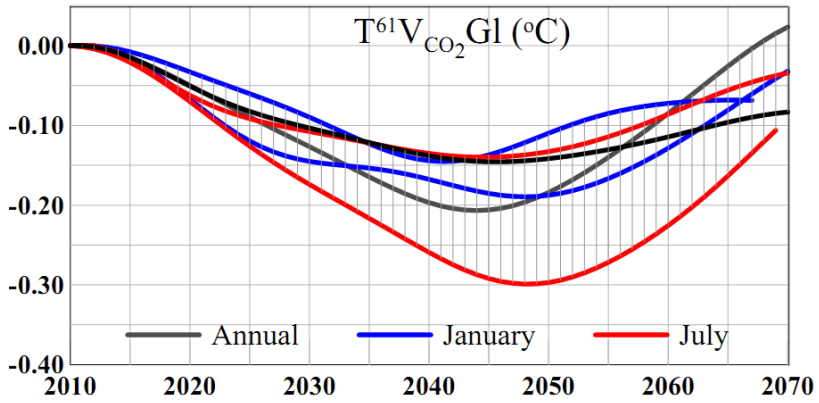

Рисунок 8 – Оценка изменения вклада 60-летнего колебания в изменение глобальной приповерхностной температуры в следующем 60-летнем цикле (в течение 2011-2070 гг., относительно уровня 2010 года)

Поскольку принята гипотеза о равнозначности всех временных срезов, эта оценка применима в равной мере к средней глобальной температуре любого календарного месяца, сезона и года в целом.

9.4. Суммарная оценка ожидаемых изменений среднегодовой глобальной температуры у поверхности Земли

Конечная цель наших рассмотрений - формирование сценария изменений глобальной температуры воздуха в ближайшие десятилетия с учетом суммарного воздействия предполагаемых факторов. Речь идет о сценарии, поскольку предстоящие изменения внешних факторов неизвестны, и оценка глобальной температуры основывается на некоторых условных (наиболее соответствующих решаемой задаче) сценариях их изменения. В нашем случае такими факторами являются: концентрация парниковых газов в атмосфере и квази-60-летнее колебание. Отклики глобальной температуры на изменение каждого из факторов были исследованы выше и будут использованы здесь для оценки результирующего (суммарного) эффекта, представленной на рис. 9. Верхний фрагмент рисунка представляет оценки вклада каждого из факторов, а нижний – суммарную оценку.

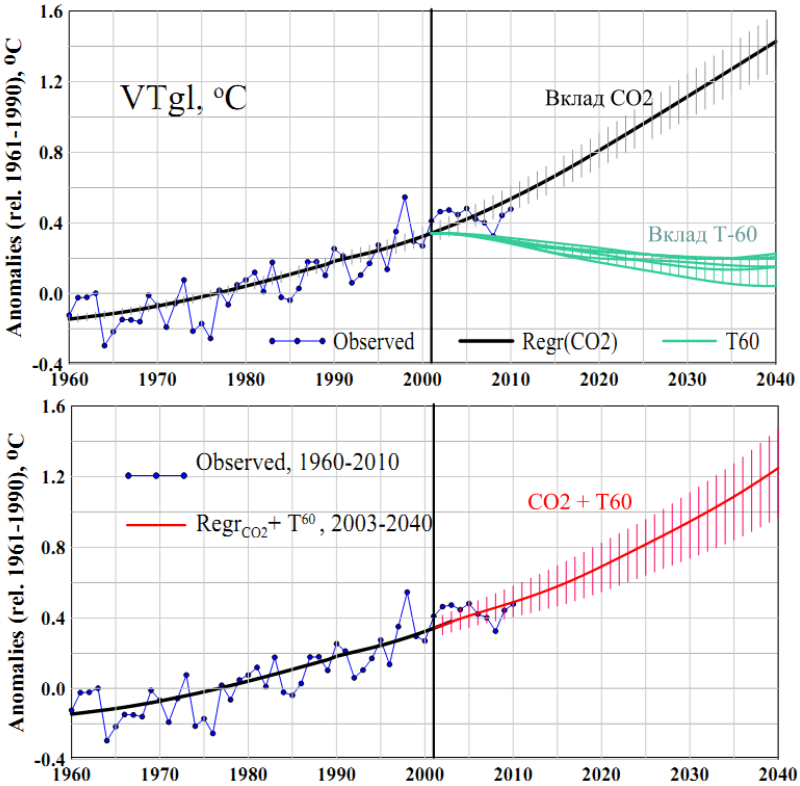

Рисунок 9 – Суммарная оценка ожидаемых изменений приповерхностной глобальной температуры на период до 2040 г. с учетом изменения концентрации CO_2 и фазы квази-60-летнего колебания в комплексе (комментарий см. в тексте)

Чувствительность приповерхностной глобальной температуры к изменению атмосферной концентрации двуокиси углерода, оцененная по эмпирическим данным, приведена в главе 8. На рис. 8.4 эта оценка в форме регрессионного отклика температуры на изменение концентрации CO_2, использована для получения прогностической оценки ожидаемых изменений температуры до 2040 г. Необходимые для расчета значения регрессора (концентрация CO2) на период прогноза взяты из сценария A1B МГЭИК (SRES, 2000). На рис.9.9 данный сценарный прогноз изменения глобальной температуры вследствие изменения концентрации CO2 воспроизведен на верхнем фрагменте как «вклад CO2» и включает оценку ожидаемого среднего значения (черная кривая) и 95%-ого доверительного интервала (вертикальные отрезки серого цвета).

Ожидаемые изменения глобальной температуры, связанные с квази-60-летним колебанием (второй фактор) приведены на рис. 9.8. На рис. 9.9 они изображены как пучок кривых зеленого цвета («вклад *T*-60»). За точку отсчета принят 2003 год как точка последнего максимума квази-60-летнего

колебания для среднегодовых значений глобальной температуры (для разных сезонов она лежит в интервале от 1998 до 2011 гг.).

Нижний фрагмент содержит только ход наблюдаемой температуры до 2010 г. включительно и искомую прогностическую оценку предстоящих изменений глобальной температуры до 2040 г. (красная кривая и доверительный интервал). Получена эта оценка суммированием вкладов обоих факторов, показанных на верхнем фрагменте.

Напомним, что полученные оценки относятся к средним 30-летним температурам («нормам»), или к серединам соответствующих 30-летий. В соответствии с полученной оценкой, можно ожидать через 30 лет (от 1981-2010 к 2011-2040 гг.) повышения глобальной температуры на 0.58 ± 0.17 ^{o}C, в том числе повышения на ~0,72 ± 0,11 за счет роста CO2 и снижения на 0.14 ± 0.0.06 ^{o}C за счет 60-летнего колебания. По отношению к базовому 30-летию 1961-1990 гг. это потепление составит в среднем 0.84 ± 0.17 ^{o}C.

Выводы

1. Межгодовая изменчивость приземной температуры крупных регионов растет с уменьшением площади осреднения; над сушей больше, чем над океанами; в Арктике больше, чем в умеренных широтах СП; в январе больше, чем в июле.

2. Относительный вклад роста концентрации CO_2 в изменчивость температуры во всех рассмотренных регионах значительно больше, чем влияние 60-летнего цикла. На континентах СП (в июле) и в Арктическом регионе (в январе) вклады этих двух факторов сопоставимы. Во всех случаях вклад солнечной активности (sunspots) в изменчивость глобальной температуры много ниже (менее 2%).

3. Экстремумы квази-60-летнего цикла обнаруживаются в рядах температуры для всех рассмотренных пространственных регионов и во все сезоны, но не воспроизводятся гидродинамическими моделями. Это позволяет предположить, что эти циклы связаны с внеземными влияниями. Например, это может быть цикл изменения расстояния между Солнцем и Землей вследствие влияния положения крупных планет. Выдвигаются также гипотезы, что причиной могут быть процессы в мировом океане. Вопрос об учете 60-летнего цикла при прогнозировании ожидаемых изменений климата остается весьма актуальным..

4. Причиной остаточной межгодовой изменчивости $D\varepsilon$ (после исключения воздействий CO_2 и 60-летнего колебания) является, по-видимому, внутренняя изменчивость и, в частности, чередование синоптических процессов на рассматриваемых территориях. Исследование этих процессов является актуальной научной проблемой.

5. Снижение глобальной температуры вследствие 60-летнего колебания в первые 30 лет после точки максимума может составить до 0.20-0.25 ^{o}C.

6. В соответствии с полученной оценкой (с учетом также и парникового потепления), можно ожидать через 30 лет (от 1981-2010 к 2011-2040 гг.) повышения глобальной температуры на 0.58 ± 0.17 ^{o}C, в том числе повышения на ~0,72 ± 0,11 за счет роста CO2 и снижения на 0.14 ± 0.0.06 ^{o}C за счет 60-летнего колебания. По отношению к базовому 30-летию 1961-1990 гг. это потепление составит в среднем 0.84 ± 0.17 ^{o}C.