

УДК 551.583

ВКЛАД ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ТРЕНД ГЛОБАЛЬНОЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО РАСЧЕТАМ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ АНСАМБЛЯ СМIP6

© 2025 г. И. И. Мохов^{a, b, *}, Д. А. Смирнов^{a, c, **}

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

^cСаратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019 Россия

*e-mail: mokhov@ifaran.ru

**e-mail: smirnovda@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.06.2024 г.

После доработки 11.12.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2025 г.

Получены количественные оценки вклада антропогенных воздействий, характеризующихся изменениями радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере, и вариаций солнечной активности в тренд глобальной приповерхностной температуры на вековом временном горизонте по расчетам с климатическими моделями ансамбля СМIP6 в сопоставлении с результатами анализа многолетних данных с XIX в. с использованием авторегрессионных моделей. Проведено сравнение результатов по расчетам с климатическими моделями, характеризующимися низкой, средней и высокой чувствительностью температуры к изменению содержания CO₂ в атмосфере. Получено, в частности, что эмпирическим оценкам определяющего вклада в тренд глобальной приповерхностной температуры содержания парниковых газов в атмосфере на полувековом и вековом временных интервалах наиболее соответствуют оценки по расчетам с климатической моделью INM-CM4-8 Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН с наименьшей чувствительностью глобальной приповерхностной температуры к удвоению содержания CO₂ в атмосфере.

Ключевые слова: современные изменения климата, температурные тренды, радиационное воздействие парниковых газов в атмосфере, солнечная активность, модели ансамбля СМIP6, многолетние данные, авторегрессионные модели, оценки направленных связей

DOI: 10.31857/S0002351525030062

1. ВВЕДЕНИЕ

В числе ключевых современных проблем — количественная оценка сравнительной роли природных и антропогенных факторов климатических изменений. На фоне общего повышения глобальной приповерхностной температуры (ГПТ) по данным наблюдений, начинающихся с XIX в., проявляются периоды ее более быстрого повышения и периоды понижения. При этом значения ГПТ увеличиваются от десятилетия к десятилетию, и самые высокие значения отмечены в последние годы. Согласно [Bindoff et al.,

2013], с вероятностью более 90% более половины повышения ГПТ с середины XX в. связано с антропогенным повышением содержания парниковых газов (ПГ) в атмосфере (см. также [Climate Change, 2021; Мохов, 2022]).

Значительное влияние роста содержания в атмосфере ПГ (CO₂ и др.) на современное повышение ГПТ было выявлено на основе эмпирических данных во многих исследованиях с учетом различных природных факторов, включая солнечную и вулканическую активность, и разных мод климатической изменчивости, с которыми связаны периоды более быстрого по-

тепления, его замедления и даже периоды похолодания на фоне векового потепления [Climate Change, 2021; Santer et al., 2001; Allen et al., 2006; Kaufmann et al., 2006; Lockwood, 2008; Foster and Rahmstorf, 2011; Kopp and Lean, 2011; Kaufmann et al., 2011; Loehle and Scafetta, 2011; Груза и Ранькова, 2012; Zhou and Tung, 2013; Stern and Kaufmann, 2014; Stolpe et al., 2017; Мохов и Смирнов, 2018а,б; Kajtar et al., 2019; McBride et al., 2021].

Что касается оценок ожидаемых изменений климата, то их адекватная оценка возможна только с использованием моделей. При этом разброс модельных оценок достаточно широк не только из-за неопределенности возможных сценариев антропогенных воздействий, но и из-за различной чувствительности модельных климатических характеристик к внешним воздействиям. В частности, существенно различается чувствительность ГПТ к изменению содержания CO_2 в атмосфере. Так, согласно [Scafetta, 2022; Scafetta, 2023], можно выделить климатические модели семейства CMIP6 с высокой (более 4.5 К, до 5.6 К), средней (3.0–4.5 К) и низкой (1.8–3.0 К) чувствительностью ГПТ к удвоению содержания CO_2 в атмосфере.

Существенная неопределенность модельных оценок чувствительности и устойчивости земного климата к внешним воздействиям связана с облачностью и ее параметризациями [Марчук и др., 1986] (см. также [Голицын и Мохов, 1978; Мохов, 1979; Мохов, 1981; Мохов и Петухов, 1988; Mokhov, 1991; Мохов, 1993; Мохов и др., 1994; Sherwood et al., 2020; Володин, 2021]). Как отмечено в [Мохов, 1981], параметр чувствительности глобальной приповерхностной температуры к изменению содержания углекислого газа в атмосфере может в несколько раз меняться в зависимости от климатических обратных связей, в частности при разных зависимостях в моделях количества облаков и их альбедо от температурного режима. Отмечена сильная зависимость от параметризаций облачности равновесной чувствительности к увеличению содержания CO_2 в атмосфере глобальной приповерхностной температуры в климатической модели Института вычислительной математики (ИВМ) им. Г.И. Марчука РАН [Володин, 2021], расчеты с которой используются в рамках ансамблевых модельных оценок возможных изменений климата Межправительственной группой экспертов по изменению климата [Climate Change, 2021].

В данной работе представлены оценки вклада изменений концентрации парниковых газов и вариаций инсоляции в линейные тренды ГПТ на различных временных горизонтах по расчетам с климатическими моделями в сопоставлении с эмпирическими оценками по данным инструментальных наблюдений.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для оценки вклада изменений содержания в атмосфере ПГ, в частности CO_2 , в формирование тренда ГПТ на различных временных горизонтах использовались результаты расчетов с климатическими моделями в сопоставлении с эмпирическими оценками по многолетним данным инструментальных наблюдений. Наряду с этим оценивался также вклад изменений инсоляции [Mokhov and Smirnov, 2024].

При анализе использовались расчеты с 7 версиями климатических моделей ансамбля CMIP6 при историческом (“Historical”) сценарии естественных и антропогенных воздействий на климатическую систему для периода 1850–2014 гг.: INM-CM4-8 и INM-CM5-0 (ИВМ им. Г.И. Марчука РАН), MIROC-ES2L-f2 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology), BCC-CSM2-MR (Beijing Climate Center), CNRM-CM6-1-HR-f2, CNRM-ESM2-1-f2 и CNRM-CM6-1-f2 (Centre National de Recherches Météorologiques).

Выбор анализируемых модельных версий из ансамбля CMIP6 связан с разной чувствительностью их температурного режима к внешним воздействиям, в частности к изменению содержанию CO_2 в атмосфере. В табл. 1 представлены параметры, характеризующие чувствительность климатических моделей ансамбля CMIP6 (см. [Scafetta, 2023]): низкую (Н), среднюю (С) и высокую (В). Параметр I_{ECS} характеризует равновесное изменение ГПТ при удвоении содержания CO_2 в атмосфере.

Результаты модельных оценок сопоставлялись с соответствующими оценками, полученными по среднегодовым эмпирическим данным HadCRUT5 (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/>) для временного интервала 1880–2012 гг. [Мохов и Смирнов, 2018а,б; Mokhov and Smirnov, 2023]. Анализовались вклады концентрации CO_2 и вариаций инсоляции (на основе временных рядов их радиационных

Таблица 1. Параметры I_{ECS} , характеризующие низкую (Н), среднюю (С) и высокую (В) чувствительность ГПТ к удвоению содержания CO_2 в атмосфере, по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 (см. [Scafetta, 2023])

Модели ансамбля CMIP6		I_{ECS} , К
Н	INM-CM4-8	1.8
	INM-CM5-0	1.9
	MIROC-ES2L-f2	2.7
С	BCC-CSM2-MR	3.0
	CNRM-CM6-1-HR-f2	4.3
В	CNRM-ESM2-1-f2	4.8
	CNRM-CM6-1-f2	4.8

форсингов, используемых в расчетах с моделями CMIP6, см. <https://esgf-data.dkrz.de/projects/cmip6-dkrz/>) в тренд ГПТ на временных интервалах от 10 до 130 лет. При этом в качестве ГПТ использовались как значения поверхностной температуры (переменная ts в данных CMIP6), так и значения приповерхностной температуры (переменная tas в данных CMIP6).

Вклад разных факторов в тренды ГПТ оценивался на основе эмпирических трехкомпонентных авторегрессионных (АР) моделей для ГПТ (T [К])

$$T_n = a_0 + a_1 T_{n-1} + a_2 I_{CO_2, n-1} + a_3 I_{S, n-1} + \xi_n,$$

учитывающих форсинг CO_2 (I_{CO_2} [Вт/м²]) и вариаций инсоляции (I_S [Вт/м²]), где дискретное время n означает год. Наряду с анализом в скользящих окнах фиксированной длины (от 10 до 130 лет) проводился анализ в окне с фиксированным концом (2012 г.) и скользящим началом (от 1880 до 2002 г.). Оценивались коэффициенты связи и уровень (дисперсия) шума ξ , обусловленного различными процессами, не учтенными в модели. Вклад в тренды оценивался путем вычитания из наблюдаемой временной реализации T_n вариаций ГПТ ее временной реализации \tilde{T}_n , полученной с помощью АР модели при гипотетическом условии равенства форсинга КПП или форсинга вариаций инсоляции постоянно-му значению, начиная с 1880 г. Вклад C_f конкретного фактора f (одного из двух указанных — C_{CO_2} или C_S) в наблюдаемый линейный тренд

температуры, т.е. в угловой коэффициент α_T прямой $\alpha_T \cdot n + \beta$, аппроксимирующей наблюдаемую временную реализацию T_n на заданном интервале времени $[L_{start}, L_{end}]$ длиной $L = L_{end} - L_{start}$, оценивался как линейный тренд разности двух реализаций $T_n - \tilde{T}_n$. Он равен разности трендов $C_f = \alpha_T - \tilde{\alpha}_T$ в силу линейности уравнения (1). Величины α и β для каждого анализируемого интервала времени определялись с использованием метода наименьших квадратов, т.е. аппроксимирующие прямые подгонялись путем минимизации среднего квадрата невязки $\sum_n (T_n - \alpha_T \cdot n - \beta)^2 \rightarrow \min$. Погрешности оценок параметров моделей, трендов и вкладов в тренды определялись с использованием обычного формализма множественной регрессии. Оценки уровня значимости выводов о наличии вклада в тренд определялись с помощью обратной функции распределения стандартного нормального закона, аргумент которой — оценка коэффициента связи, нормированная на оценку ее среднеквадратичной погрешности. Более подробно метод изложен в [Мохов и Смирнов, 2018а, б; Mokhov and Smirnov, 2023] (см. также [Smirnov and Mokhov, 2009; Мухин и др., 2021]).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены аномалии межгодовых вариаций аномалий ГПТ относительно периода 1961–1990 гг. с 1880 г. по данным HadCRUT5 и по расчетам с 7 климатическими моделями ансам-

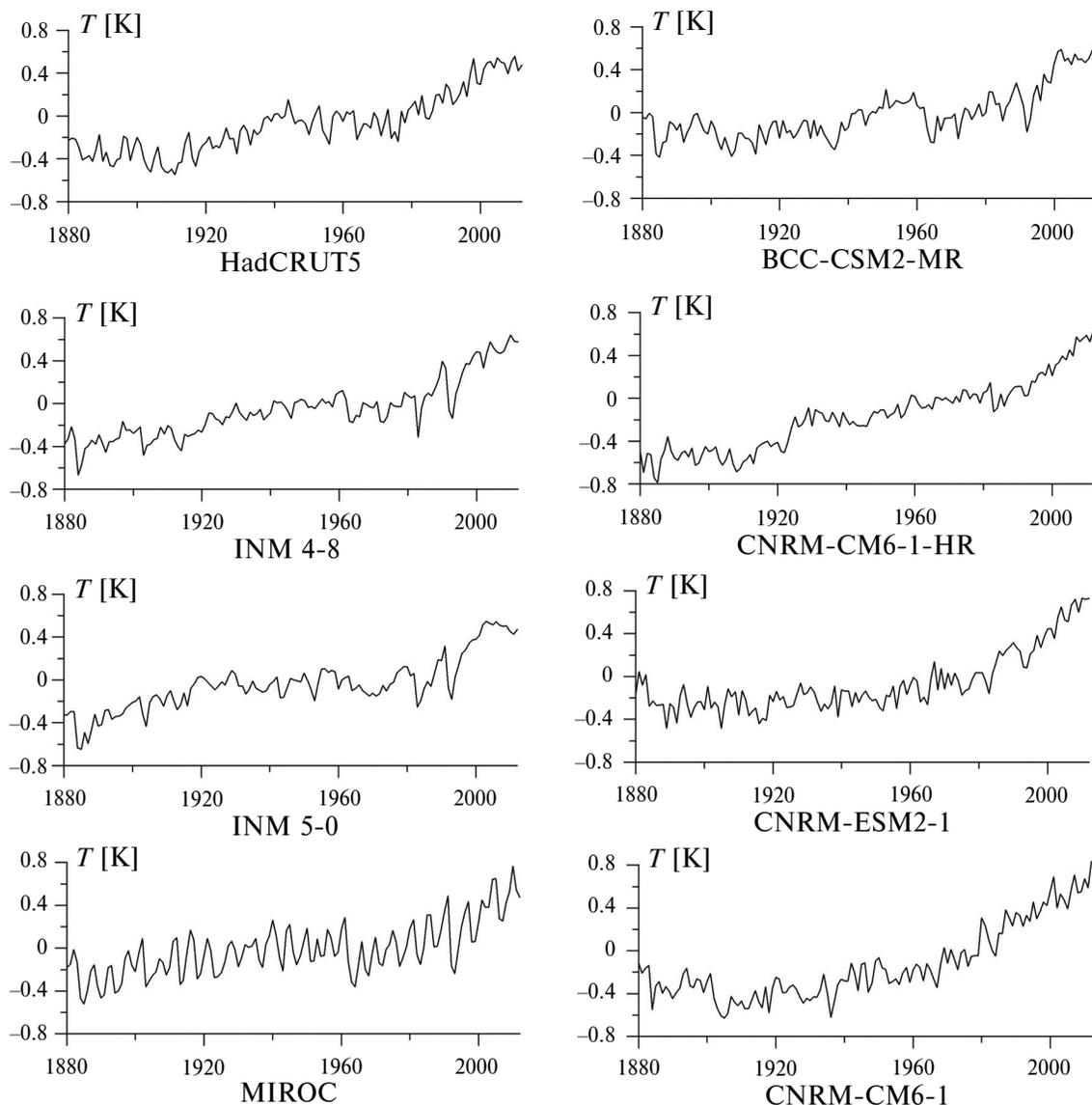


Рис. 1. Межгодовые вариации аномалий ГПТ с 1880 г. по данным HadCRUT5 и по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 при сценарии “Historical”

бля CMIP6 при сценарии “Historical”. По расчетам с разными моделями существенно различаются не только долгопериодные изменения и межгодовая изменчивость ГПТ, но и ее средний режим.

В табл. 2 приведены полученные для модели (1) коэффициенты по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 в сопоставлении с соответствующими оценками по данным HadCRUT5 с 1880 г.

Оценки a_2 — коэффициента связи ГПТ с радиационным форсингом ПГ — по модельным расчетам получены в диапазоне от 0.06 до

0.17 $\text{K}^2/\text{Вт}$ с полушириной 95%-ного интервала от 0.03 до 0.05 $\text{K}^2/\text{Вт}$. При этом соответствующие оценки по эмпирическим данным ($0.13 \pm 0.04 \text{ K}^2/\text{Вт}$) находятся в пределах диапазона модельных оценок. Наибольшие значения a_2 соответствуют модельным версиям с наибольшей чувствительностью ГПТ к удвоению содержания CO_2 в атмосфере.

Оценки a_3 — коэффициента связи ГПТ с вариациями инсоляции — по эмпирическим данным ($0.03 \pm 0.05 \text{ K}^2/\text{Вт}$) и по модельным расчетам для временного интервала 1880–2012 гг. статистически незначимы. При этом к эмпири-

Таблица 2. Коэффициенты a_1 (безразмерная величина), a_2 [КМ²/Вт] и a_3 [КМ²/Вт] и дисперсия шума σ_{ξ}^2 [К²] для модели (1), полученные с использованием эмпирических данных и по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 с 1880 г. с низкой (Н), средней (С) и высокой (В) чувствительностью глобальной приповерхностной температуры к удвоению содержания CO₂ в атмосфере

Данные	HadCRUT5	$a_1(\pm 2\sigma_{a_1})$	$a_2(\pm 2\sigma_{a_2})$	$a_3(\pm 2\sigma_{a_3})$	σ_{ξ}^2	
		0.54 (±0.15)	0.13 (±0.04)	0.03 (±0.05)	0.010	
Модели	Н	INM 4-8	0.64 (±0.13)	0.10 (±0.04)	0.01 (±0.05)	0.008
		INM 5-0	0.76 (±0.12)	0.06 (±0.03)	-0.00 (±0.04)	0.008
		MIROC-ES2L-f2	0.42 (±0.16)	0.12 (±0.05)	0.01 (±0.08)	0.025
	С	BCC-CSM2-MR	0.65 (±0.13)	0.08 (±0.03)	0.02 (±0.05)	0.010
		CNRM-CM6-1-HR-f2	0.73 (±0.12)	0.09 (±0.04)	0.02 (±0.04)	0.006
	В	CNRM-ESM2-1-f2	0.49 (±0.15)	0.15 (±0.05)	-0.03 (±0.06)	0.012
CNRM-CM6-1-f2		0.55 (±0.14)	0.17 (±0.05)	0.02 (±0.06)	0.012	

ческим оценкам более близки оценки для климатических моделей средней чувствительности.

Модельные оценки коэффициента авторегрессии a_1 , характеризующего инерционность температурного режима (безразмерная величина, близкая к единице для большого времени инерционности, и к нулю для малого) получены в диапазоне от 0.42 до 0.76 при оценках ширины 95%-ного доверительного интервала от 0.12 до 0.16. Значения, наиболее близкие к эмпирическим оценкам 0.54 ± 0.15 , получены для модельных версий с высокой чувствительностью.

Модельные оценки коэффициента a_0 влияют лишь на среднее значение T и интереса при анализе трендов не представляют. Модельные оценки дисперсии шума характеризуют лишь быстрые флуктуации и получены в интервале от 0.006 до 0.025 К² при эмпирической оценке 0.01 К². Величина отклонения модельной оценки дисперсии шума от эмпирической, по-видимому, не коррелирует с чувствительностью модели для рассмотренного набора моделей.

В табл. 3 представлены оценки вклада CO₂ (C_{CO_2} [К/10лет]) и относительного вклада (C_{CO_2}/α_T) в тренд ГПТ (α_T [К/10 лет]) на временных интервалах (L) 50 и 130 лет по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6

в сопоставлении с оценками по данным HadCRUT5 с 1880 г. Наибольшие значения a_2 для последних двух моделей табл. 2 соответствуют и наибольшим значениям вклада в тренд ГПТ C_{CO_2} в табл. 3. Лучшее соответствие эмпирическим оценкам определяющего вклада атмосферного содержания CO₂ в тренд ГПТ на полувековом и вековом временных интервалах получено по расчетам с климатической моделью INM-CM4-8 ИВМ им. Г.И. Марчука РАН с наименьшей чувствительностью ГПТ к удвоению содержания CO₂ в атмосфере. В силу линейности уравнения (1) относительные погрешности полученных оценок C_{CO_2} совпадают с относительными погрешностями оценок соответствующего коэффициента a_2 .

На рис. 2 приведены оценки вклада изменений CO₂ в тренд ГПТ на разных временных интервалах по расчетам с моделями CMIP6 и данным HadCRUT5: в зависимости от времени конца интервала L_{end} для 15-летних интервалов (рис. 2а) и от времени начала интервала L_{start} для интервалов с фиксированным концом $L_{end} = 2012$ г. (рис. 2б).

Полученные оценки вклада радиационного форсинга CO₂ в тренды ГПТ на интервале шириной 130 лет — статистически значимы и составляют от 0.05 К/десятилетие (для модели MIROC) до 0.08 К/десятилетие (для модели

Таблица 3. Оценки вклада изменений содержания в атмосфере CO_2 (C_{CO_2} [К/10лет]) и относительного вклада (C_{CO_2}/α_T , безразмерная величина) в тренд ГПТ (α_T [К/10лет]) на временных интервалах (L) 50 и 130 лет по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 в сопоставлении с оценками по данным HadCRUT5 с 1880 г.

Данные	HadCRUT5	$L = 50$ лет		$L = 130$ лет		
		C_{CO_2}	C_{CO_2}/α_T	C_{CO_2}	C_{CO_2}/α_T	
		0.13	0.90	0.06	0.94	
Модели	Н	INM-CM4-8	0.13	0.84	0.06	0.97
		INM-CM5-0	0.11	0.80	0.05	0.99
		MIROC-ES2L-f2	0.10	0.67	0.05	1.01
	С	BCC-CSM2-MR	0.11	0.71	0.05	1.04
		CNRM-CM6-1-HR-f2	0.16	1.26	0.07	0.93
	В	CNRM-ESM2-1-f2	0.14	0.79	0.07	1.12
		CNRM-CM6-1-f2	0.17	0.90	0.08	1.05

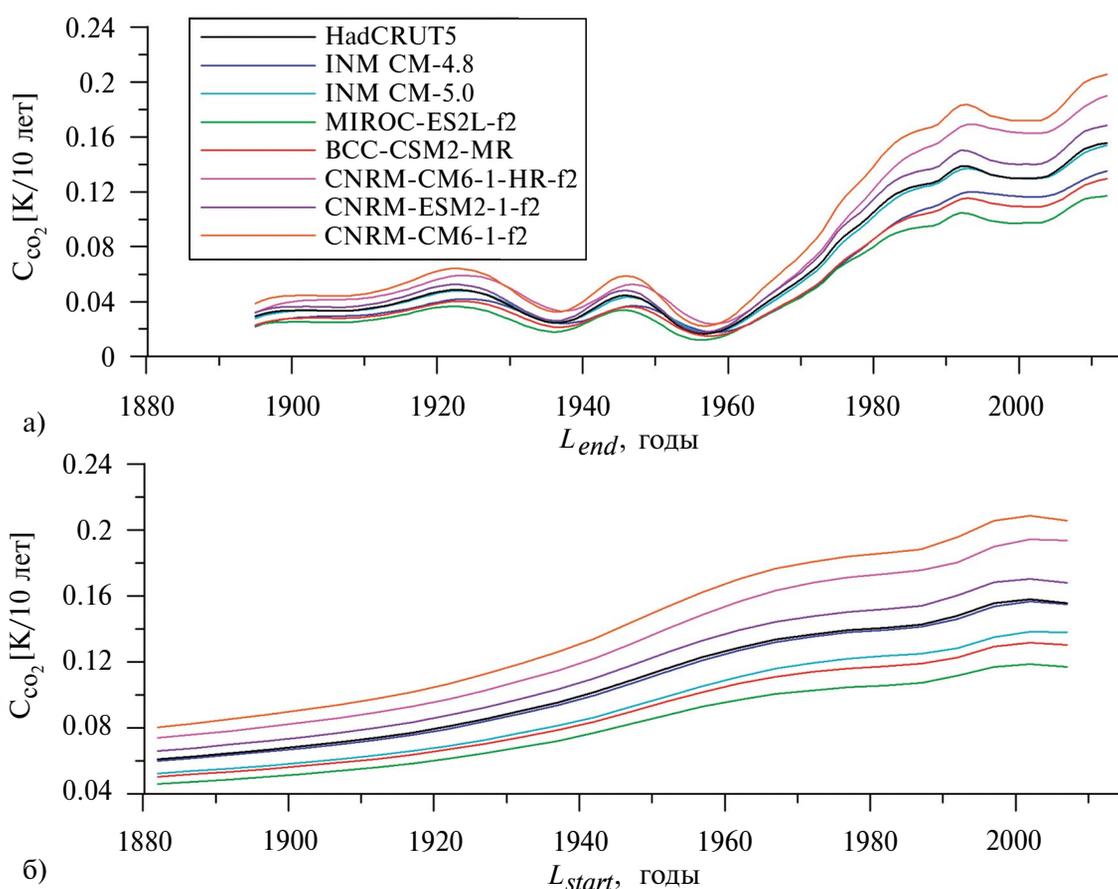


Рис. 2. Оценки вклада изменений CO_2 в тренд ГПТ по расчетам с моделями CMIP6 и данным HadCRUT5: (а) в зависимости от времени конца интервала для 15-летних интервалов, (б) от времени начала интервала L_{start} для интервалов с фиксированным концом $L_{end} = 2012$ г.

CNRM-CM6-1) при оценке 0.06 К/десятилетие по эмпирическим данным (рис. 2а).

Относительный (нормированный на величину тренда ГПТ) вклад CO_2 в тренд ГПТ на интервале 130 лет оценен от 0.93 до 1.12 при оценке 0.94 по эмпирическим данным (рис. 2б).

В табл. 4 приведены оценки вклада вариаций солнечной активности (C_S [К/10лет]) и относительный вклад (C_S/α_T , безразмерная величина) в тренд ГПТ (α_T [К/10лет]) на временных интервалах длительностью 50 и 130 лет по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 в сопоставлении с оценками по эмпирическим данным с 1880 г.

Оценки вклада вариаций инсоляции в тренды ГПТ (в единицах К/десятилетие) на временных интервалах длительностью 50 и 130 лет малы и статистически незначимы. Относительный вклад вариаций инсоляции в тренд ГПТ (C_S/α_T) по эмпирическим данным на временном интервале 130 лет оценен величиной 5%, а на временном интервале 50 лет — 2%. Этим оценкам в большей степени соответствуют оценки с моделями средней чувствительности.

Подобные результаты получены и для других временных интервалов с несколько большими значениями вклада изменений содержания

в атмосфере ПГ в тренды на меньших временных интервалах (т.е. в последние десятилетия). Стоит отметить также, что результаты оценок вкладов в тренд ГПТ с использованием расчетов величин температуры поверхности и приповерхностной температуры с моделями ансамбля CMIP6 при определении ГПТ практически неотличимы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены количественные оценки вклада антропогенных воздействий, характеризуемых изменениями радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере, и вариаций солнечной активности в тренд глобальной приповерхностной температуры на вековом временном горизонте по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 в сопоставлении с результатами анализа многолетних данных с XIX в. с использованием авторегрессионных моделей. Для всех моделей и данных наблюдений оценки вклада изменений атмосферного содержания ПГ в тренды ГПТ статистически значимы и относительно велики, а оценки вклада вариаций инсоляции статистически незначимы и относительно малы.

Проведено сравнение результатов по расчетам с климатическими моделями, характеризуемыми низкой, средней и высокой чувствительностью температуры к изменению содержания CO_2 в ат-

Таблица 4. Оценки вклада вариаций солнечной активности (C_S [К/10лет]) и относительного вклада (C_S/α_T , безразмерная величина) в тренд ГПТ (α_T [К/10 лет]) на временных интервалах длительностью 50 и 130 лет по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 в сопоставлении с оценками по данным HadCRUT5 с 1880 г.

Данные	HadCRUT5	$L = 50$ лет		$L = 130$ лет		
		C_S	C_S/α_T	C_S	C_S/α_T	
		-0.003	-0.02	0.003	0.05	
Модели	Н	INM-CM4-8	-0.001	-0.01	0.002	0.03
		INM-CM5-0	0.0004	0.003	-0.0006	-0.01
		MIROC-ES2L-f2	-0.0003	-0.002	0.0004	0.01
	С	BCC-CSM2-MR	-0.002	-0.02	0.003	0.06
		CNRM-CM6-1-HR-f2	-0.002	-0.02	0.003	0.04
	В	CNRM-ESM2-1-f2	0.002	0.01	-0.003	-0.04
CNRM-CM6-1-f2		-0.002	-0.01	0.002	0.02	

мосфере. Получено, в частности, что эмпирическим оценкам определяющего вклада атмосферного содержания ПГ в тренд ГПТ на полувековом и вековом временных интервалах наиболее соответствуют оценки по расчетам с климатической моделью INM-CM4-8 ИВМ им. Г.И. Марчука РАН с наименьшей чувствительностью ГПТ к удвоению содержания CO_2 в атмосфере.

Следует отметить, что до сих пор сильнейшая неопределенность модельных оценок современного глобального потепления связана с облачностью и ее параметризациями [Sherwood et al., 2020]. В частности, отмечена сильная зависимость равновесной чувствительности климатической модели INM-CM4-8 Института вычислительной математики (ИВМ) им. Г.И. Марчука РАН от параметризаций облачности [Володин, 2021]. Показано, что замена диагностической параметризации типа схемы Смагоринского (с линейной зависимостью доли модельной ячейки от относительной влажности атмосферы) на прогностическую [Tiedke, 1993] увеличивает равновесную чувствительность ГПТ к изменению содержания CO_2 в атмосфере более, чем вдвое. При использовании диагностической параметризации по Смагоринскому потепление в модели сопровождается увеличением нижней облачности, связанным с усилением инверсии на верхней границе атмосферного погранслоя. При использовании параметризации [Tiedke, 1993] при потеплении облачность уменьшается на всех атмосферных уровнях. Отключение механизма, вызывающего уменьшение облачности глубокой конвекции при потеплении, еще более увеличивает равновесную чувствительность. Отключение механизма, вызывающего уменьшение облачности атмосферного погранслоя при потеплении, способствует уменьшению чувствительности модели.

Представленные результаты имеют особое значение в связи с условиями Парижского соглашения по климату. Подобный анализ может использоваться для выявления более адекватных моделей и диагностики роли различных естественных и антропогенных факторов и разных положительных и отрицательных климатических обратных связей, от которых зависит скорость климатических изменений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 24-17-00211 с использованием результатов, полученных в рамках проекта РНФ 23-47-00104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Володин Е.М. Равновесная чувствительность модели климата к увеличению концентрации CO_2 в атмосфере при различных методах учета облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 139–145.
- Голицын Г.С., Мохов И.И. Оценки чувствительности и роли облаков в простых моделях климата // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 8. С. 803–814.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 2012. 194 с.
- Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б., Лыкоsov В.Н., Бобылева И.М., Галин В.Я., Перов В.Л. Математическая модель общей циркуляции атмосферы и океана // Докл. АН СССР. 1980. Т. 253. № 3. С. 577–581.
- Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б., Лыкоsov В.Н., Галин В.Я. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 320 с.
- Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостьянов В.И. Облака и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 512 с.
- Мохов И.И. Реакция простой энергобалансовой модели климата на изменение ее параметров // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1979. Т. 15. № 4. С. 375–383.
- Мохов И.И. О влиянии CO_2 на термический режим земной климатической системы // Метеорология и гидрология. 1981. № 4. С. 24–34.
- Мохов И.И. Диагностика структуры климатической системы. СПб: Гидрометеоздат, 1993. 271 с.
- Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вест. РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14.
- Мохов И.И., Галин В.Я., Дегтярев А.И., Круглова Е.Н., Мелешко В.П., Соколов А.П., Спорышев П.В., Стенчиков Г.Л., Тросников И.В., Шейнин Д.А. Сравнение моделей общей циркуляции. Диагностика внутрigoдовой эволюции облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 4. С. 527–542.
- Мохов И.И., Петухов В.К. Взаимодействие облачности и радиации в моделях общей циркуляции, прогноза погоды и климата. М.: Межведомственный геофизический комитет АН СССР. 1988. 52 с.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А. Эмпирические оценки воздействия антропогенных и естественных факторов

- на глобальную приповерхностную температуру // Доклады АН. 2009. Т.426. С. 679–684.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Оценки вклада Атлантической мультидесятилетней осцилляции и изменений атмосферного содержания парниковых газов в тренды приповерхностной температуры по данным наблюдений // Докл. РАН. 2018а. Т. 480. № 1. С. 97–102.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультидесятилетней осцилляции в тренды приповерхностной температуры // Метеорология и гидрология. 2018б. № 9. С. 5–13.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 48–54.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А.* Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений // Докл. РАН. 2012. Т. 443. № 2. С. 225–231.
- Мухин Д.Н., Селезнев А.Ф., Гаврилов А.С., Фейгин А.М.* Оптимальные эмпирические модели динамических систем с внешними воздействиями: общий подход и примеры из климата // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2021. Т. 29. Вып. 4. С. 571–602.
- Allen M.R., Gillett N.P., Kettleborough J.A., Hegerl G., Schnur R., Stott P.A. et al.* Quantifying anthropogenic influence on recent near-surface temperature change // *Surv. Geophys.* 2006. V. 27. P. 491–544.
- Bindoff N.L., Stott P.A., AchutaRao K.M. et al.* Detection and contribution // In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Ed. by T.F. Stocker et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, New York. 2013. P. 867–952.
- Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, et al. (eds.). NY, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2021. 2391 pp.
- Foster G., Rahmstorf S.* Global temperature evolution 1979–2010 // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6. 044022.
- Kajtar J.B., Collins M., Frankcombe L.M., England M.H., Osborn T.J., Juniper M.* Global mean surface temperature response to large-scale patterns of variability in observations and CMIP5 // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 2232–2241.
- Kaufmann R., Kauppi H., Stock J.* Emissions, concentrations, & temperature: A time series analysis // *Clim. Change.* 2006. V. 77. P. 249–278.
- Kaufmann R., Kauppi H., Mann M., Stock J.* Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008 // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2011. V. 108. P. 11790–11793.
- Kopp G., Lean J.* A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L01706.
- Lockwood M.* Recent changes in solar outputs and the global mean surface temperature. III. Analysis of contributions to global mean air surface temperature rise // *Proc. R. Soc. A: Math., Phys. and Eng. Sci.* 2008. V. 464(2094). P. 1387–1404.
- Loehle C., Scafetta N.* Climate change attribution using empirical decomposition of climatic data // *Open Atmos. Sci. J.* 2011. V. 5. P. 74–86.
- McBride L.A., Hope A.P., Canty T.P., Bennett B.F., Tribett W.R., Salawitch R.J.* Comparison of CMIP6 historical climate simulations and future projected warming to an empirical model of global climate // *Earth Syst. Dyn.* 2021. V. 12. P. 545–579.
- Mokhov I.I.* Global cloudiness: Tendencies of change / In: ISPP-7 "Piero Caldirola", Controlled Active Global Experiments (CAGE). E. Sindoni and A.Y. Wong (Eds.). Societa Italiana di Fisica, Bologna. 1991. P. 19–37.
- Mokhov I.I., Smirnov D.A.* Contributions to surface air temperature trends estimated from climate time series: Medium-term causalities // *Chaos.* 2022. V. 32. P. 063128. <https://doi.org/10.1063/5.0088042>
- Mokhov I.I., Smirnov D.A.* Contribution of solar irradiance variations to surface air temperature trends at different latitudes estimated from long-term data // *Pure Appl. Geophys.* 2023. V. 180. P. 3053–3070.
- Mokhov I.I., Smirnov D.A.* Contributions of greenhouse gases and solar activity to global climate change from CMIP6 models simulations // *arxiv.* 2024. <https://arxiv.org/abs/2406.05468>
- Santer B.D., Wigley T.M.L., Doutriaux C., Boyle, J.S., Hansen J.E., Jones P.D. et al.* Accounting for the effects of volcanoes and ENSO in comparisons of modeled and observed temperature trends // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106(D22). P. 28033–28059.
- Scafetta N.* Advanced testing of low, medium, and high ECS CMIP6 GCM simulations versus ERA5-T2m // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. e2022GL097716. <https://doi.org/10.1029/2022GL097716>
- Scafetta N.* CMIP6 GCM ensemble members versus global surface temperatures // *Clim. Dyn.* 2023. V. 60. P. 3091–3120. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>
- Sherwood S.C., Webb M.J., Annan J.D., Armour K.C., Forster P.M., Hargreaves J.C. et al.* An assessment of Earth's

- climate sensitivity using multiple lines of evidence // *Rev. Geophys.* 2020. V. 58. e2019RG000678.
<https://doi.org/10.1029/2019RG000678>
- Smirnov D.A., Mokhov I.I.* From Granger causality to “long-term causality”: application to climatic data // *Phys. Rev. E.* 2009. V. 80. P. 016208.
- Smirnov D.A., Mokhov I.I.* Relating Granger causality to long-term causal effects // *Phys. Rev. E.* 2015. V. 92. № 4. 042138.
- Stern D.I., Kaufmann R.K.* Anthropogenic and natural causes of climate change // *Clim. Change.* 2014. V. 122. P. 257–269.
- Stolpe M.B., Medhaug I., Knutti R.* Contribution of Atlantic and Pacific multidecadal variability to twentieth-century temperature changes // *J. Climate.* 2017. V. 30. P. 6279–6295.
- Tiedke M.* Representation of clouds in large-scale models // *Mon. Wea. Rev.* 1993. V. 121. P. 3040–3061.
- Weare B.C., Mokhov I.I.* Evaluation of total cloudiness and its variability in the Atmospheric Model Intercomparison Project // *J. Climate.* 1995. V. 8. No. 9. P. 2224–2238.
- Zhou J., Tung K.K.* Deducing multidecadal anthropogenic global warming trends using multiple regression analysis // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70. P. 3–8.

CONTRIBUTIONS OF GREENHOUSE GASES AND SOLAR ACTIVITY TO GLOBAL SURFACE TEMPERATURE TRENDS FROM CMIP6 CLIMATE MODELS SIMULATIONS

© 2025 I. I. Mokhov^{1, 2, *}, D. A. Smirnov^{1, 3, **}

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevsky per., 3, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskiye Gory, 1, bld. 2, Moscow, 119991 Russia*

³*Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Zelyonaya Str., 38, Saratov, 410019 Russia*

**e-mail: mokhov@ifaran.ru*

***e-mail: smirnovda@yandex.ru*

Quantitative estimates of the contributions of anthropogenic impacts, characterized by changes in the radiative forcing of greenhouse gases in the atmosphere, and solar activity variations to the trends of global surface temperature on secular temporal horizons are obtained from simulations with climate models of the CMIP6 ensemble in comparison with corresponding estimates based on the analysis of long-term observational data since the 19th century using autoregressive models. The results for simulations with climate models characterized by low, medium and high temperature sensitivity to changes in CO₂ content in the atmosphere are compared. It is found, in particular, that empirical estimates revealing the determinative contribution of the content of greenhouse gases in the atmosphere to the global surface temperature trends on half-century and century-long time intervals are most consistent with the estimates from simulations with the INM-CM4-8 climate model of G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS with the lowest sensitivity of global surface temperature to doubling the CO₂ content in the atmosphere.

Keywords: current climate change, temperature trends, radiative forcing, atmospheric greenhouse gases, solar activity, CMIP6 ensemble models, long-term data, autoregressive models, directional coupling estimates