

УДК 551.583

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ВКЛАДА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ЕСТЕСТВЕННОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В ТРЕНДЫ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ШИРОТ

© 2022 г. Академик РАН И. И. Мохов^{1,2,*}, Д. А. Смирнов^{1,3,**}

Поступило 18.11.2021 г.
После доработки 24.11.2021 г.
Принято к публикации 25.11.2021 г.

Получены количественные оценки вклада антропогенных воздействий, характеризующихся изменениями радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере, и ключевых мод естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры разных широтных зон Северного (СП) и Южного полушария (ЮП) на различных временных горизонтах с использованием данных наблюдений. В том числе с использованием трехкомпонентных авторегрессионных моделей и данных с XIX века оценена роль в формировании температурных трендов Атлантической мультисотлетней осцилляции, Эль-Ниньо/Южного колебания, Тихоокеанской десятилетней осцилляции, Тихоокеанской междесятилетней осцилляции и Антарктической осцилляции. Результаты анализа свидетельствуют о существенной роли изменений радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере в формировании тренда глобальной приповерхностной температуры, усиливающейся с увеличением временного горизонта. При этом отмечены значительные различия для широтных зон ЮП и СП, связанные с влиянием разных мод естественной климатической изменчивости. При более слабых температурных трендах в широтных зонах ЮП с большим покрытием океанами, чем в СП, вследствие естественных колебаний климата могут проявляться и проявляются отрицательные тренды приповерхностной температуры на интервалах в несколько десятилетий на общем фоне долгопериодного глобального потепления. С отмеченными глобальными и региональными особенностями температурных изменений связана одна из ключевых климатических проблем последних лет – разнонаправленные тренды протяженности антарктических и арктических морских льдов.

Ключевые слова: современные изменения климата, температурные тренды, Атлантическая мультисотлетняя осцилляция, Эль-Ниньо/Южное колебание, Тихоокеанская десятилетняя осцилляция, Тихоокеанская междесятилетняя осцилляция, Антарктическая осцилляция, авторегрессионные модели

DOI: 10.31857/S2686739722030082

ВВЕДЕНИЕ

Одна из современных проблем связана с получением адекватных количественных оценок вклада естественных и антропогенных факторов в

формирование происходящих глобальных и региональных изменений климата. По данным наблюдений на фоне векового приповерхностного потепления для Земли в целом, которое связывается с ростом содержания в атмосфере парниковых газов, проявляется значительная климатическая изменчивость. Межгодовые и междесятилетние температурные вариации связаны как с внешними воздействиями, включая солнечную и вулканическую активность, так и с естественными климатическими вариациями, в том числе с ключевыми модами климатической изменчивости, включая квазициклические процессы типа Эль-Ниньо/Южного колебания (El-Niño/Southern Oscillation – ENSO), Атлантической мультисотлетней осцилляции, Тихоокеанской десятилетней осцилляции, Тихоокеанской междесятилетней осцилляции и Антарктической осцилляции.

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Саратов, Россия

*E-mail: mokhov@ifaran.ru

**E-mail: smirnovda@yandex.ru

десятилетней осцилляции (Atlantic Multidecadal Oscillation – AMO), Тихоокеанской десятилетней осцилляции (Pacific Decadal Oscillation – PDO), Тихоокеанской междесятилетней осцилляции (Interdecadal Pacific Oscillation – IPO) и Антарктической осцилляции (Antarctic Oscillation – AAO) [1–20]. Цель данной работы – получение количественных оценок вклада антропогенных воздействий, связанных с изменениями в атмосфере содержания парниковых газов, и различных ключевых мод климатической изменчивости в температурные тренды разных широтных зон Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий и для Земли в целом на различных временных масштабах с использованием данных наблюдений.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

При анализе использовались многолетние данные для приповерхностной температуры разных широтных зон с 1880 г. (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/>). В сопоставлении с данными для тропических (0° – 30° с.ш.), средних (30° – 60° с.ш.) и арктических (60° – 90° с.ш.) широт СП анализировались данные для разных широт ЮП – тропических (0° – 30° ю.ш.), средних (30° – 60° ю.ш.) и антарктических (60° – 90° ю.ш.). В числе ключевых мод естественной климатической изменчивости при анализе трендов на разных временных интервалах до столетнего масштаба использовались индексы AMO с 1856 г. (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>), ENSO с 1870 г. (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>), PDO с 1854 г. (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>), IPO с 1870 г. (<https://psl.noaa.gov/data/timeseries/IPOTPI/>) и AAO (или Southern Annular Mode) для периода 1871–2012 гг. (https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/SAM/). Антропогенные воздействия характеризовались радиационным форсингом парниковых газов (с основным вкладом CO_2) по данным GISS (<http://data.giss.nasa.gov/>) для периода 1851–2012 гг.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для оценки вклада разных факторов в тренд приповерхностной температуры разных широтных зон на разных временных интервалах от 5 до 60 лет использовались трехкомпонентные авторегрессионные (АР) модели аналогично [17, 18]. Анализировались модели для аномалий приповерхностной температуры T с учетом влияния парниковых газов (GHG) и мод естественной климатической изменчивости следующего вида:

$$T_n = a_0 + a_1 T_{n-1} + a_2 I_{\text{GHG},n-1} + a_3 I_{m,n-1} + \xi_n, \quad (1)$$

где n – дискретное время (годы), ξ_n – шум (остаточные ошибки модели), I_{GHG} – радиационный форсинг парниковых газов, I_m – индекс климати-

ческой моды. Параметры моделей определялись методом наименьших квадратов, т.е. минимизацией суммы квадратов остаточных ошибок $\xi_n = T_n - a_0 - a_1 T_{n-1} - a_2 I_{\text{GHG},n-1} - a_3 I_{m,n-1}$, по данным наблюдений для периода 1880–2012 гг. В качестве величины T использовалась температура одной из широтных зон, в качестве I_m – индекс одной из мод: I_{AMO} (медленная компонента исходного индекса AMO, полученная его фильтрацией методом скользящего среднего с временной характеристикой фильтра, линейно спадающей до нуля на интервале 10 лет), I_{ENSO} (индекс ENSO), I_{PDO} (индекс PDO), I_{IPO} (индекс IPO) или I_{AAO} (индекс AAO).

Для определения вклада каждого (антропогенного или естественного) фактора в линейный тренд температуры разных широтных зон на временном интервале $[L_{\text{start}}, L_{\text{end}}]$ длительностью $L = L_{\text{end}} - L_{\text{start}}$ анализировались две временные реализации АР модели (1), соответствующие реальному и гипотетическому режимам этого фактора. При этом на “вход” модели (1) подавался вместо наблюдаемого ряда значений анализируемого фактора (например, моды естественной изменчивости $I_{m,n}$) искусственно сгенерированный ряд (обозначим его $\tilde{I}_{m,n}$). Начальное значение T и ряд значений другого фактора (в данном примере этот другой фактор – I_{GHG}) на входе модели (1) сохранялись теми же, что и для анализируемых данных наблюдений. Временной ряд остаточных ошибок ξ_n на входе модели определялся условием минимума их суммы квадратов и характеризовал внешние шумовые воздействия (внутригодовую изменчивость). Рассчитывались значения температуры \tilde{T}_n на “выходе” модели (1) при таком альтернативном условии $\tilde{I}_{m,n}$. Отличие двух реализаций температуры состоит только в отличии временных реализаций фактора I_m на входе модели и разница $\delta T_n = T_n - \tilde{T}_n$ между реальными значениями T_n и модельными значениями \tilde{T}_n характеризует вклад анализируемого фактора в вариации T . Вклад анализируемого фактора в тренд температуры оценивался как соответствующая разность линейных трендов T_n и \tilde{T}_n , которая равна линейному тренду разности температур δT_n . Тренд на каждом интервале $[L_{\text{start}}, L_{\text{end}}]$ (длительность L менялась диапазоне от 5 до 60 лет) оценивался коэффициентом $\alpha_{\delta T}$ линейной регрессии $\delta T_n = \alpha_{\delta T} n + \beta$ с использованием метода наименьших квадратов.

На основе данных наблюдений на каждом интервале $[L_{\text{start}}, L_{\text{end}}]$ оценивались вклады в тренд в единицах К/десятилетие каждого из рассматриваемых факторов – парниковых газов (обозначим этот вклад C_{GHG}), ENSO (C_{ENSO}), AMO (C_{AMO}),

Таблица 1. Оценки относительного вклада парниковых газов в тренды приповерхностной температуры C_{GHG}/α_T для периодов разной продолжительности относительно современного режима (2012 г.)

Широты	90° с.ш.–90° ю.ш. (СП + ЮП)	0°–30° СП (ЮП)	30°–60° СП (ЮП)	60°–90° СП (ЮП)
Период (годы)				
20	0.58	0.61 (1.00)	0.41 (1.38)	0.33 (–0.52)
30	0.62	0.71 (1.22)	0.44 (1.86)	0.41 (–0.68)
50	0.82	0.86 (0.95)	0.68 (1.15)	0.64 (1.87)

ИРО (C_{IPO}) и ААО (C_{AAO}). Для сопоставления на каждом интервале оценивался также реальный тренд T , характеризуемый коэффициентом α_T регрессии $T_n = \alpha_T n + \beta$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием данных для периода 1880–2012 гг. получены оценки коэффициентов моделей (1), характеризующие чувствительность температурных аномалий разных широтных зон к изменению радиационного форсинга парниковых газов I_{GHG} и вариациям индексов различных мод естественной климатической изменчивости I_m . Доверительные интервалы и уровни статистической значимости выводов о ненулевых значениях коэффициентов связи a_3 оценены обычным образом в предположении белого шума ξ_n на основе формализма множественной регрессии, используемого для оценки самих коэффициентов моделей (1). Коэффициент связи с парниковыми газами получен отличным от нуля на уровне значимости (вероятности случайной ошибки) $p < 0.05$ и менее для всех шести исследуемых широтных зон. Коэффициенты связи с АМО значимы на уровне $p < 0.05$ для трех широтных зон СП и незначимы даже на уровне $p < 0.2$ для широтных зон ЮП. Коэффициенты связи с ENSO значимы на уровне $p < 0.2$ для всех широт, кроме средних широт обоих полушарий.

С использованием построенных АР моделей (1) получены оценки вклада в тренды температуры различных широтных зон роста содержания в атмосфере парниковых газов для разных временных интервалов. В частности, проведен анализ для последних десятилетий при фиксированном конце анализируемых временных интервалов (2012 г.) и скользшем начале. Уровень значимости вывода о ненулевом вкладе фактора в тренд тот же, что и для вывода о ненулевом значении соответствующего коэффициента связи a_3 в модели (1). В табл. 1 для разных широтных зон СП и ЮП и для Земли в целом представлены полученные количественные оценки отношения тренда

приповерхностной температуры C_{GHG} , связанного с ростом содержания в атмосфере парниковых газов, к величине суммарного тренда приповерхностной температуры α_T при учете АМО (при учете ENSO, PDO, IPO и ААО результаты очень близки) для интервалов разной длительности (20, 30 и 50 лет), заканчивающихся в 2012 г. Согласно этим оценкам с радиационным воздействием парниковых газов в атмосфере связан основной вклад в формирование температурного тренда глобальной приповерхностной температуры (наибольшее отношение C_{GHG}/α_T), увеличивающийся с увеличением временного горизонта от 0.58 (58%) для 20-летнего интервала (1993–2012 гг.) до 0.82 (82%) для 50-летнего интервала (1963–2012 гг.).

В СП наиболее значимый вклад, связанный с увеличением содержания в атмосфере парниковых газов, получен для широтного пояса 0°–30° с.ш.: 0.61 для 20-летнего периода, 0.71 для 30-летнего периода, 0.86 для 50-летнего периода. Для среднеширотного пояса 30°–60° с.ш. вклад влияния парниковых газов оценен меньшим – 0.5 (т.е. 50%) для сравнительно коротких временных интервалов (0.41 для 20-летнего периода, 0.44 для 30-летнего), но уже для 50-летнего интервала оценен равным 0.68, т.е. превышающим 2/3 реального тренда. Наименьший вклад в тренд приповерхностной температуры, связанный с парниковыми газами, получен для высокоширотного пояса 60°–90° с.ш.: 0.33 для 20-летнего периода, 0.41 для 30-летнего и 0.64 для 50-летнего.

Для широтных поясов ЮП оценки вклада антропогенных воздействий, связанных с ростом содержания в атмосфере парниковых газов, в формирование трендов приповерхностной температуры существенно отличаются от полученных для широтных поясов СП. При этом получены количественные оценки $C_{\text{GHG}}/\alpha_T > 1$, а для высоких широт ЮП и отрицательные значения. Значения $C_{\text{GHG}}/\alpha_T > 1$ означают, что суммарный вклад других факторов (мод естественной изменчивости) и внешних шумов (ξ) в тренд температуры на анализируемом временном интервале отри-

Таблица 2. Оценки относительного вклада ключевых мод естественной климатической изменчивости (АМО, ENSO, PDO) в тренды приповерхностной температуры в СП для периодов разной продолжительности относительно современного режима (2012 г.)

Период (годы)	Тропические широты ENSO (АМО, PDO)	Средние широты ENSO (АМО, PDO)	Высокие широты ENSO (АМО, PDO)
20	-0.13 (0.45, -0.01)	-0.06 (0.42, -0.03)	-0.10 (0.33, -0.06)
30	-0.04 (0.36, -0.01)	-0.02 (0.31, -0.02)	-0.03 (0.28, -0.05)
50	0.00 (0.10, -0.00)	0.00 (0.12, -0.00)	-0.00 (0.11, -0.00)

Таблица 3. Оценки относительного вклада ключевых мод естественной климатической изменчивости (ENSO, IPO, ААО) в тренды приповерхностной температуры в ЮП для периодов разной продолжительности относительно современного режима (2012 г.)

Период (годы)	Тропические широты ENSO (IPO, ААО)	Средние широты ENSO (IPO, ААО)	Высокие широты ENSO (IPO, ААО)
20	-0.18 (-0.12, -0.15)	0.04 (-0.01, 0.20)	-0.67 (-0.49, 0.44)
30	-0.06 (-0.08, -0.14)	0.01 (-0.01, 0.25)	-0.25 (-0.31, 0.40)
50	0.00 (0.00, -0.09)	-0.00 (0.00, 0.12)	0.02 (-0.01, -0.98)

цательный и реальные значения тренда меньше оценок тренда за счет роста содержания парниковых газов в атмосфере согласно модели (1).

Для широтного пояса 0° – 30° ю.ш. тренд приповерхностной температуры, связанный с радиационным воздействием парниковых газов, получен равным реальному тренду ($C_{\text{GHG}}/\alpha_T = 1$) для 20-летнего периода, превышающим реальный тренд ($C_{\text{GHG}}/\alpha_T = 1.22$) для 30-летнего периода и близким к реальному ($C_{\text{GHG}}/\alpha_T = 0.95$) для 50-летнего периода. Для среднеширотного пояса 30° – 60° ю.ш. тренд приповерхностной температуры, связанный с радиационным воздействием парниковых газов, оценен превышающим реальный тренд для временных интервалов от двух десятилетий до полувека. При этом наибольшее превышение ($C_{\text{GHG}}/\alpha_T = 1.86$) получено для 30-летнего периода, а наименьшее ($C_{\text{GHG}}/\alpha_T = 1.15$) для полувекового. Для высокоширотного пояса 60° – 90° ю.ш. полученные отрицательные значения C_{GHG}/α_T свидетельствуют о том, что для более коротких 20-летних и 30-летних интервалов тренды приповерхностной температуры, согласно анализировавшимся данным, были противоположны соответствующим трендам, связанным с влиянием парниковых газов. Для полувекового интервала тренд, связанный с ростом содержания

в атмосфере парниковых газов, и реальный тренд уже однонаправленны.

В табл. 2 и 3 представлены оценки вклада естественных климатических мод в температурные тренды α_T для разных широтных зон СП и ЮП. В табл. 2 даны оценки относительного вклада АМО, ENSO и PDO для различных широтных зон СП и периодов разной продолжительности относительно современного режима (2012 г.). Наибольший вклад в тренды приповерхностной температуры на временных интервалах от двух десятилетий и более связан с АМО. В тропических широтах СП оценки $C_{\text{АМО}}$ достигают почти половины величины реального тренда для 20-летнего интервала ($C_{\text{АМО}}/\alpha_T = 0.45$) и превышают треть его ($C_{\text{АМО}}/\alpha_T = 0.36$) для 30-летнего интервала, но для полувекового интервала величина $C_{\text{АМО}}$ уже на порядок меньше реального тренда α_T ($C_{\text{АМО}}/\alpha_T = 0.10$). В средних и высоких широтах с АМО также связан существенный вклад в температурные тренды для сравнительно короткопериодных 20-летних ($C_{\text{АМО}}/\alpha_T = 0.42$ и $C_{\text{АМО}}/\alpha_T = 0.33$ соответственно) и 30-летних ($C_{\text{АМО}}/\alpha_T = 0.31$ и $C_{\text{АМО}}/\alpha_T = 0.28$ соответственно) интервалов. Для временных интервалов более полувека соответствующий вклад на порядок меньше.

Вклад PDO в тренды приповерхностной температуры статистически незначим. Что касается численных значений его оценок, в тропических широтах СП, как и в средних и высоких, для временных интервалов от двух до пяти десятилетий он оценен слабым. Наибольшие по абсолютной величине оценки C_{PDO}/α_T (-0.06 и -0.05 для 20- и 30-летних интервалов соответственно) отмечены в высоких широтах. При этом значения температурных трендов, связанных с PDO, получены противоположными по знаку по отношению к реальным трендам. Максимальный вклад Эль-Ниньо в тренды приповерхностной температуры оценен для тропических ($C_{ENSO}/\alpha_T = -0.13$) и высоких широт ($C_{ENSO}/\alpha_T = -0.10$) для 20-летних интервалов, для более длительных интервалов он еще меньше.

В табл. 3 представлены оценки относительно вклада ENSO, IPO и ААО в тренды приповерхностной температуры различных широтных зон ЮП для периодов разной продолжительности (значимы на уровне $p < 0.2$ только для ENSO в тропических и полярных широтах). Согласно этим оценкам в тропических широтах связанные с ENSO, IPO и ААО тренды приповерхностной температуры для 20-летних и более долгопериодных интервалов противоположны реальным. Наибольшие по абсолютному значению вклады естественных мод получены для 20-летнего интервала: $C_{ENSO}/\alpha_T = -0.18$, $C_{IPO}/\alpha_T = -0.12$, $C_{AAO}/\alpha_T = -0.15$. Оценки для средних и высоких широт ЮП существенно отличаются от оценок для тропических широт. В средних широтах ЮП наибольшие значения вклада в тренд приповерхностной температуры отмечены в связи с ААО, при этом они однонаправлены с реальными трендами. Величина C_{AAO}/α_T оценена равной 0.20, 0.25 и 0.12 для 20-, 30- и 50-летних интервалов соответственно. Влияние ENSO и IPO на формирование температурных трендов на временных интервалах около двух десятилетий и более оценено слабым.

В высоких широтах ЮП, согласно полученным оценкам, с естественными климатическими модами ENSO, IPO и ААО связан значительный вклад в тренды приповерхностной температуры, сопоставимый с оценками реального тренда. Для 20- и 30-летних интервалов получено $C_{ENSO}/\alpha_T = -0.67$, $C_{IPO}/\alpha_T = -0.49$, $C_{AAO}/\alpha_T = 0.44$ и $C_{ENSO}/\alpha_T = -0.25$, $C_{IPO}/\alpha_T = -0.31$, $C_{AAO}/\alpha_T = 0.40$ соответственно. Связанные с ААО тренды получены однонаправленными с реальными трендами, тогда как связанные с ENSO, IPO – противоположно направленными по отношению к реальным трендам. При этом для полувекового интервала значения C_{ENSO}/α_T и C_{IPO}/α_T оценены

малыми, а величина C_{AAO}/α_T получена отрицательной и близкой к -1 , т.е. влияние ААО существенно проявляется в оценках температурных трендов и на полувековых временных интервалах. Полученные в табл. 3 результаты и их сравнение с результатами в табл. 1 свидетельствуют о существенной роли ключевых мод естественной изменчивости в ЮП в определении даже знака трендов приповерхностной температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о существенной роли изменений радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере в формировании температурного тренда глобальной приповерхностной температуры, усиливающейся с увеличением временного горизонта. При этом отмечены значительные различия для широтных зон ЮП и СП, связанные с влиянием разных мод естественной климатической изменчивости, на фоне долгопериодных температурных трендов, связанных с антропогенными воздействиями. При более слабых температурных трендах в широтных зонах ЮП с большим покрытием океанами, чем в СП, вследствие естественных колебаний климата могут проявляться отрицательные тренды приповерхностной температуры на интервалах в несколько десятилетий на общем фоне долгопериодного глобального потепления.

С отмеченными глобальными и региональными особенностями температурных изменений связана одна из ключевых климатических проблем последних лет. Наиболее яркий пример современного глобального потепления – большая скорость уменьшения площади арктических морских льдов. При этом до последних лет отмечался общий рост, хотя и статистически незначимый, площади антарктических морских льдов на фоне глобального потепления. Это связано с тем, что наиболее полные и детальные данные о протяженности морских льдов по спутниковым данным доступны только с конца 1970-х гг. Как отмечено в [20], в областях формирования антарктических морских льдов в приантарктических широтах с 1970-х гг. до последних лет отмечалось общее понижение температуры у поверхности (в 2016 г. было диагностировано быстрое уменьшение площади морских льдов в Южном океане). Кросс-корреляционный и кросс-вейвлетный анализы свидетельствуют о значимой когерентности и отрицательной корреляции температуры у поверхности и протяженности морских льдов в последние десятилетия не только в Арктике, но и в Антарктике [20]. Отмеченные особенности связаны с региональными проявлениями естественных колебаний климата с периодами до нескольких десятилетий на фоне векового глобального

потепления и относительно слабого тренда температуры поверхности в океанических широтах ЮП.

Для получения адекватных количественных оценок возможных глобальных и региональных изменений климата и его межгодовой и более долгопериодной изменчивости в связи с антропогенными воздействиями необходимы количественные оценки того, насколько существенно ключевые моды естественной климатической изменчивости с характерными периодами до нескольких десятилетий могут увеличить или уменьшить скорость современных климатических изменений в различных регионах и на разных временных горизонтах.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (№ 19-17-00240) с использованием результатов об особенностях изменчивости климата в средних и высоких широтах Северного полушария, полученных в рамках соглашения с Минобрнауки Российской Федерации (договор № 075-15-2020-776).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaufmann R.K., Stern D.I. Evidence for Human Influence on Climate from Hemispheric Temperature Relations // *Nature*. 1997. V. 388. P. 39–44.
2. Allen M.R., Gillett N.P., Kettleborough J.A., et al. Quantifying Anthropogenic Influence on Recent Near-surface Temperature Change // *Surv. Geophys.* 2006. V. 27. P. 491–544.
3. Verdes P.F. Global Warming is Driven by Anthropogenic Emissions: A Time Series Analysis Approach // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99. L048501.
4. Lean J.L., Rind D.H. How Natural and Anthropogenic Influences Alter Global and Regional Surface Temperatures: 1889 to 2006 // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L18701.
5. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и глобальной приповерхностной температуры Земли // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44. № 3. С. 283–293.
6. Lean J.L., Rind D.H. How Will Earth's Surface Temperature Change in Future Decades? // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L15708.
7. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Эмпирические оценки воздействия антропогенных и естественных факторов на глобальную приповерхностную температуру // *ДАН*. 2009. Т. 426. С. 679–684.
8. Smirnov D.A., Mokhov I.I. From Granger Causality to “Long-term Causality”: Application to Climatic Data // *Phys. Rev. E*. 2009. V. 80 (1). L016208.
9. Loehle C., Scafetta N. Climate Change Attribution Using Empirical Decomposition of Climatic Data // *Open. Atmos. Sci. J.* 2012. V. 5. P. 74–86.
10. 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 // *ДАН*. 2012. Т. 443. № 2. С. 225–231.
11. Imbers J., Lopez A., Huntingford C., Allen M.R. Testing the Robustness of the Anthropogenic Climate Change Detection Statements Using Different Empirical Models // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 3192–3199.
12. Triacca U., Attanasio A., Pasini A. Anthropogenic Global Warming Hypothesis: Testing its Robustness by Granger Causality Analysis // *Environmetrics*. 2013. V. 24 (4). P. 260–268.
13. Zhou J., Tung K.K. Deducing Multidecadal Anthropogenic Global Warming Trends Using Multiple Regression Analysis // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70. P. 3–8.
14. Stern D.I., Kaufmann R.K. Anthropogenic and Natural Causes of Climate Change // *Clim. Change*. 2014. V. 122. P. 257–269.
15. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Взаимосвязь вариаций глобальной приповерхностной температуры с процессами Эль-Ниньо/Ла-Нинья и Атлантическим долгопериодным колебанием // *ДАН*. 2016. Т. 467. № 5. С. 580–584.
16. Stolpe M.B., Medhaug I., Knutti R. Contribution of Atlantic and Pacific Multidecadal Variability to Twentieth-century Temperature Changes // *J. Clim.* 2017. V. 30. P. 6279–6295.
17. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Оценки вклада Атлантической мультидесятилетней осцилляции и изменений атмосферного содержания парниковых газов в тренды приповерхностной температуры по данным наблюдений // *ДАН*. 2018. Т. 480. № 1. С. 97–102.
18. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультидесятилетней осцилляции в тренды приповерхностной температуры // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 9. С. 5–13.
19. Smirnov D.A., Mokhov I.I. Relating Granger Causality to Long-term Causal Effects // *Phys. Rev. E*. 2015. V. 92 (4). L042138.
20. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь протяженности антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979–2020 гг. // *ДАН*. 2021. Т. 496. № 1. С. 71–77.

EMPIRICAL ESTIMATES OF THE CONTRIBUTION OF GREENHOUSE GASES AND NATURAL CLIMATIC VARIABILITY TO NEAR-SURFACE TEMPERATURE TRENDS FOR DIFFERENT LATITUDES

Academician of the RAS **I. I. Mokhov^{a,b,#}** and **D. A. Smirnov^{a,c,##}**

^a*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

^c*Saratov Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russian Federation*

[#]*E-mail: mokhov@ifaran.ru*

^{##}*E-mail: smirnovda@yandex.ru*

We have obtained quantitative estimates of the contribution of the anthropogenic influence, characterized by the changes in the radiative forcing of greenhouse gases in the atmosphere, and of the key modes of natural climate variability to the surface air temperature trends in different latitudinal zones of the Northern and the Southern Hemispheres on different temporal horizons from observation data. In particular, with the aid of trivariate autoregressive models and the data since the 19th century, we have estimated the role of Atlantic Multidecadal Oscillation, El-Nino/Southern Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, Interdecadal Pacific Oscillation, and Antarctic Oscillation in forming the temperature trends. Results of the analysis evidence an essential role of the changes in the radiative forcing of the greenhouse gases in the atmosphere in forming the global surface temperature trend, and this role increases with an increasing temporal horizon. Furthermore, we have noted essential differences between latitudinal zones of the SH and the NH related to the influences of the different modes of natural climate variability. At weaker temperature trends in the latitudinal zones of the SH with greater area of the oceans than in the NH and due to natural climate oscillations, there may be manifested and are manifested negative trends of the surface air temperature on the intervals of several decades under the general long-period global warming. Those global and regional features of the temperature variations relate to a key climate problem of the last years, i.e. to that of mutually contrarily directed trends in the extents of the Antarctic and the Arctic sea ice.

Keywords: modern climate change, temperature trends, Atlantic Multidecadal Oscillation, El-Nino/Southern Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, Interdecadal Pacific Oscillation, Antarctic Oscillation, autoregressive models