

УДК 551.583

## ОЦЕНКИ ВКЛАДА МОД ЕСТЕСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ И ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ТРЕНДЫ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2022 г. И. И. Мохов<sup>a, b, \*</sup>, Д. А. Смирнов<sup>a, c, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, с. 2, ГСП-1, Москва, 119991 Россия

<sup>c</sup>Саратовский 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 18.08.2021 г.

После доработки 30.09.2021 г.

Принята к публикации 07.10.2021 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 Южного полушария на различных временных горизонтах с использованием данных наблюдений. На основе трехкомпонентных авторегрессионных моделей и данных с 19 в. оценена роль в формировании температурных трендов на разных временных горизонтах Атлантической мультисотлетней осцилляции, Эль-Ниньо/Южного колебания, Тихоокеанской междесятилетней осцилляции и Антарктической осцилляции. Отмечен существенный вклад в температурные тренды ключевых мод климатической изменчивости на сравнительно коротких интервалах длительностью в пределах двух-трех десятилетий – сопоставимый с вкладом парниковых газов и даже превышающий его. Сравняются оценки, характеризующие особенности полярных, средних и тропических широт в Южном (ЮП) и Северном (СП) полушариях. Согласно полученным оценкам на временных интервалах от полувека и более в формировании температурных трендов разных широтных зон и для Земли в целом доминирующий вклад связан с радиационным воздействием парниковых газов в атмосфере.

**Ключевые слова:** современные изменения климата, температурные тренды, естественные и антропогенные факторы, радиационное воздействие парниковых газов в атмосфере, Атлантическая мультисотлетняя осцилляция, Эль-Ниньо, Южное колебание, Тихоокеанская междесятилетняя осцилляция, Антарктическая осцилляция, авторегрессионные модели, оценки направленных связей

DOI: 10.31857/S0002351522010096

### ВВЕДЕНИЕ

Количественные оценки роли естественных и антропогенных факторов в формировании современных климатических изменений – в числе ключевых проблем XXI века. Общее увеличение глобальной приповерхностной температуры (ГПТ) по данным наблюдений с XIX века сопровождалось периодами ее более быстрого роста и периодами понижения. К началу XXI века проявилась тенденция уменьшения скорости потепления (“hiatus”). При этом значения ГПТ последних лет были в числе самых высоких по данным с XIX века. Согласно [1] более половины отмеченного увели-

чения ГПТ с середины 20 века связано с антропогенным увеличением содержания в атмосфере парниковых газов [1].

Оценки влияния роста содержания в атмосфере парниковых газов (особенно углекислого газа) на современное увеличение ГПТ получены во многих исследованиях различными методами с учетом разных естественных факторов – солнечной и вулканической активности, квазициклических процессов типа Эль-Ниньо/Южного колебания (El-Nino/Southern Oscillation – ENSO), Атлантической мультисотлетней осцилляции (АМО) и др. [1–33]. Естественные вариации кли-

мата могут существенно усилить или ослабить глобальное потепление. При этом периоды с более быстрым потеплением могут чередоваться с его замедлением и даже с временными интервалами понижения приповерхностной температуры не только региональной, но и глобальной, на фоне долгопериодной (вековой) тенденции потепления.

В [8], в частности, представлены оценки вклада антропогенного форсинга, явлений Эль-Ниньо, солнечной и вулканической активности, влиянием которых можно объяснить около трех четвертей дисперсии температурных изменений с конца 19 века. При этом отмечено, что на фоне доминирующей роли антропогенного форсинга на временных интервалах в несколько десятилетий с явлениями Эль-Ниньо связано увеличение глобальной приповерхностной температуры до  $0.2^{\circ}\text{C}$ , со значительными вулканическими извержениями – около  $0.3^{\circ}\text{C}$ , с вариациями в циклах солнечной активности – около  $0.1^{\circ}\text{C}$  (см. также [10, 11]). Во многих работах [2, 3, 8, 11–13, 18, 19, 21–23, 26, 27] подтверждается наличие и значимость воздействия парниковых газов на глобальную приповерхностную температуру (ГПТ) в сравнении с воздействием различных других факторов с использованием разных методов. Наряду с оценками вклада различных факторов в климатическую изменчивость необходимы соответствующие количественные оценки их вклада в температурные тренды для разных регионов на основе эмпирических данных. В [29, 30] сделаны количественные оценки вклада антропогенных воздействий, характеризуемых изменениями радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере, и Атлантической мультидесятилетней осцилляции (АМО), в тренды ГПТ и температуры разных широтных зон Северного полушария (СП) по данным инструментальных наблюдений с середины 19 в. на основе трехкомпонентных авторегрессионных моделей, получены характеристики воздействий обоих факторов на ГПТ. Согласно [30] на сравнительно коротких интервалах длительностью до трех десятилетий вклад АМО может быть сопоставим по абсолютной величине с вкладом парниковых газов и даже превышать его, а на интервалах более полувека вклад АМО в тренд ГПТ уже относительно небольшой. При этом для последних десятилетий относительный вклад парниковых газов больше в тренды ГПТ и приповерхностной температуры в тропиках СП и меньше – в тренды приповерхностной температуры средних и высоких широт СП.

Цель данной работы – количественно оценить вклад различных ключевых мод климатической изменчивости в температурные тренды разных широт Южного полушария (ЮП) на различных временных масштабах с использованием доступных эмпирических данных на фоне изменений

антропогенного форсинга, связанного с изменениями в атмосфере содержания парниковых газов, и в сопоставлении с соответствующими оценками для СП. Необходимы количественные оценки того, насколько существенно моды естественной климатической изменчивости, включая АМО, ENSO, IPO (Interdecadal Pacific Oscillation), AAO (Antarctic Oscillation), с характерными периодами до нескольких десятилетий могут усилить или ослабить скорость потепления в различных широтных зонах на разных временных горизонтах, в том числе в океанических широтах ЮП с относительно слабыми температурными трендами. Это необходимо, в частности, для количественного объяснения особенностей современных изменений приповерхностной температуры в различных широтах СП и ЮП, включая полярные и субполярные широты с очень разными изменениями протяженности арктических и антарктических морских льдов [1, 34].

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

При анализе использовались многолетние данные (с 1880 г.) для приповерхностной температуры разных широтных зон [35, 36] (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/>). В сопоставлении с данными для тропических ( $0\text{--}30^{\circ}$  с.ш.), средних ( $30\text{--}60^{\circ}$  с.ш.) и арктических ( $60\text{--}90^{\circ}$  с.ш.) широт СП анализировались данные для разных широт ЮП – тропических ( $0\text{--}30^{\circ}$  ю.ш.), средних ( $30\text{--}60^{\circ}$  ю.ш.) и антарктических ( $60\text{--}90^{\circ}$  ю.ш.). В числе ключевых мод естественной климатической изменчивости при анализе трендов на разных временных интервалах до столетнего масштаба использовались индексы АМО с 1856 г. [37, 38] (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>), ENSO с 1870 г. [37] (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>), IPO с 1870 г. [39] (<https://psl.noaa.gov/data/timeseries/IPOTPI/>), и AAO (или Southern Annular Mode) для периода 1871–2012 гг. [40] ([https://psl.noaa.gov/data/20thC\\_Rean/timeseries/monthly/SAM/](https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/SAM/)). В данной работе представлены результаты анализа для периода 1880–2012 гг.

АМО (с характерным периодом около шести десятилетий) характеризовалась температурой поверхности Северной Атлантики в широтном поясе  $20\text{--}70^{\circ}$  с.ш. при исключенном тренде. В частности, при оценках использовались среднегодовые данные для индекса АМО со скользящим 10-летним осреднением, веса которого линейно уменьшались с удалением в прошлое (до нуля при десятилетнем лаге). В качестве индекса ENSO использовались аномалии температуры поверхности океана в области Niño3,4 в экваториальных широтах Тихого океана. IPO характеризовалась GPI-индексом (Tripole Index), определяемым разностью значений температуры поверхности центральной экваториальной области Тихого океана

и средней температуры поверхности его северо-западной и юго-западной областей. ААО характеризовалась разностью “стандартизованных” значений давления на уровне моря (т.е. приведенных к нулевому среднему и нормированных на стандартное отклонение для каждого месяца в период 1981–2010 гг. между 40° ю.ш. и 65° ю.ш.). Антропогенные воздействия характеризовались радиационным форсингом парниковых газов (с основным вкладом CO<sub>2</sub>) по данным [41] (<http://data.giss.nasa.gov/>).

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Вклад разных факторов в тренд приповерхностной температуры разных широтных зон оценивался на интервалах от 5 до 60 лет с использованием трехкомпонентных авторегрессионных (АР) моделей аналогично [29, 30] что в более общем виде обосновано в рамках концепции динамических эффектов как характеристик причинно-следственных связей между процессами [13, 42, 43]. Каждая модель для аномалий приповерхностной температуры  $T$  с учетом влияния парниковых газов (GHG) и одной из мод естественной климатической изменчивости  $\xi_n$  строилась в виде

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

где  $n$  – дискретное время (годы),  $\xi_n$  – шум (остаточные ошибки модели),  $I_{GHG}$  – радиационный форсинг парниковых газов,  $I_m$  – индекс климатической моды. Параметры оценивались по всему доступному интервалу наблюдений обычным методом наименьших квадратов, т.е. путем минимизации суммы квадратов остаточных ошибок  $\xi_n = T_n - a_0 - a_1 T_{n-1} - a_2 I_{GHG,n-1} - a_3 I_{m,n-1}$ . В данной статье представлены оценки на основе модели, полученной для всего анализируемого интервала 1880–2012 гг. При анализе трендов температуры каждой из широтных зон в качестве  $I_m$  использовались индексы  $I_{AMO}$  (медленная компонента индекса АМО),  $I_{ENSO}$  (индекс ENSO),  $I_{IPO}$  (индекс IPO),  $I_{AAO}$  (индекс ААО).

Для определения вклада антропогенного и естественного факторов в линейный тренд температуры каждой из широтных зон на данном временном интервале  $[L_{start}, L_{end}]$  длительностью  $L = L_{end} - L_{start}$  анализировались временные реализации АР модели (1) с гипотетическими режимами мод естественной климатической изменчивости и содержания в атмосфере парниковых газов, т.е. на “вход” модели (1) подавался вместо наблюдаемого ряда значений одного из факторов (например, моды естественной изменчивости  $I_{m,n}$ ) искусственно сгенерированный ряд (обозначим его  $\tilde{I}_{m,n}$ ). Начальное значение  $T$  (т.е. в 1880 г.) и ряд

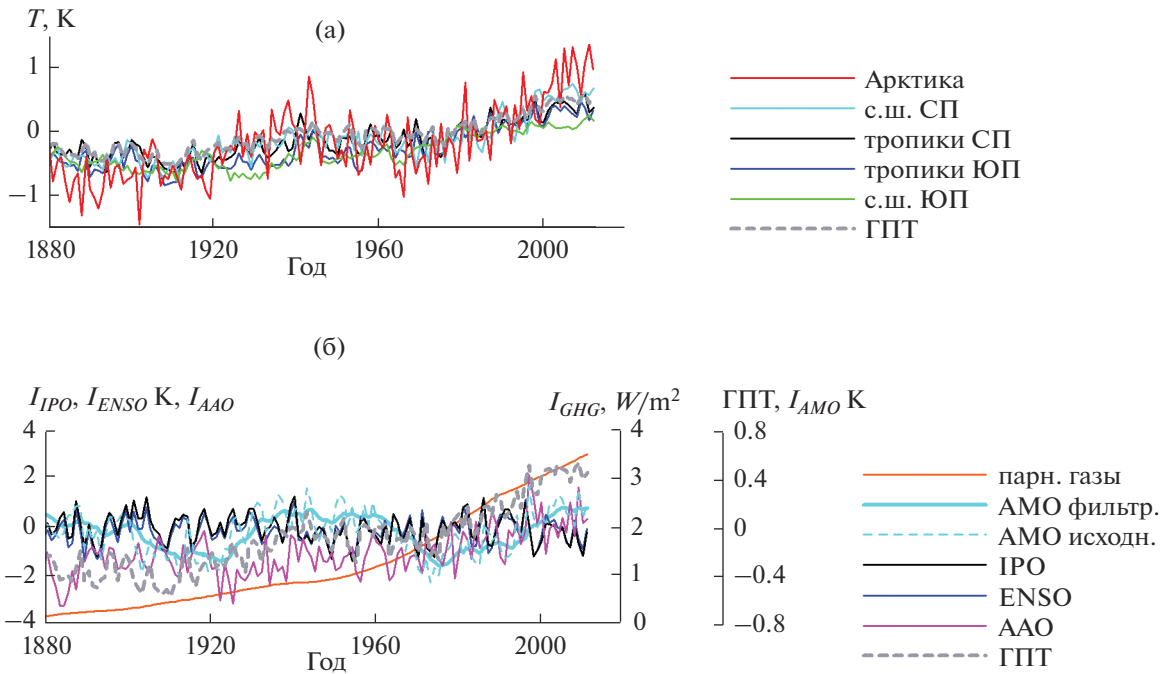
значений другого фактора на входе модели сохранялись прежними. Остаточные ошибки  $\xi_n$  брались теми, которые получились при минимизации их суммы квадратов, и характеризовали внешние (шумовые) воздействия. Рассчитывались значения температуры  $\tilde{T}_n$  на выходе модели (1) при таком альтернативном условии  $\tilde{I}_{m,n}$ . Поскольку отличие двух реализаций температуры состоит только в отличии временных реализаций фактора  $I_{m,n}$  на входе модели, то разница  $\delta T_n = T_n - \tilde{T}_n$  между реальными значениями  $T_n$  и модельными значениями  $\tilde{T}_n$  характеризует вклад этого фактора в значения  $T$ . Таким образом, предполагалось, что модель (1) применима и в условиях измененного поведения того или иного фактора. Вклад фактора в тренд температуры оценивался по разности линейных трендов  $T_n$  и  $\tilde{T}_n$ , которая равна линейному тренду разности температур  $\delta T_n$ . Тренд на каждом интервале  $[L_{start}, L_{end}]$  (длительность  $L$  менялась в 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.

Наряду с реальным трендом  $T$ , характеризующим коэффициентом  $\alpha_T$  регрессии  $T_n = \alpha_T n + \beta$ , оцененной по данным наблюдений на каждом интервале  $[L_{start}, L_{end}]$ , оценивались вклады в тренд парниковых газов  $C_{GHG}$ , ENSO  $C_{ENSO}$ , АМО  $C_{AMO}$ , IPO  $C_{IPO}$  и ААО  $C_{AAO}$ . Для оценки относительной роли разных факторов использовались соответствующие относительные характеристики  $C_{GHG}/\alpha_T$ ,  $C_{AMO}/\alpha_T$ ,  $C_{AMO}/C_{GHG}$ ,  $\tilde{C}_{GHG} = |C_{GHG}|/(|C_{GHG}| + |C_{AMO}|)$ ,  $\tilde{C}_{AMO} = |C_{AMO}|/(|C_{GHG}| + |C_{AMO}|)$ , и аналогично для ENSO вместо АМО, IPO вместо АМО, ААО вместо АМО.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены анализируемые временные ряды: межгодовые вариации приповерхностной температуры  $T$  для Земли в целом (серые штрихи) и для разных широтных зон ЮП и СП (на рис. 1а) и межгодовые вариации индексов АМО, ENSO, IPO и ААО на фоне соответствующих изменений радиационного форсинга парниковых газов (на рис. 1б). Температурные аномалии приведены относительно периода 1961–1990 гг. [<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/>]. Следует отметить ограниченность температурных данных для антарктических широт – для них представленные далее результаты носят скорее качественный (оценочный), чем количественный характер.

**Эмпирические АР-модели.** Оценки коэффициентов модели (1), характеризующие чувствительность температурных аномалий разных широт-



**Рис. 1.** Анализируемые временные ряды: (а) межгодовые вариации приповерхностной температуры  $T$  для Земли в целом (серые штрихи) и для разных широтных зон Северного и Южного полушарий; (б) межгодовые вариации индексов АМО (фильтрованный индекс – сплошная бирюзовая линия, нефильтранный индекс – бирюзовая штриховая линия), ENSO (синяя линия), IPO (черная линия) и ААО (пурпурная линия) на фоне соответствующих изменений радиационного форсинга парниковых газов (коричневая линия) и приповерхностной глобальной температуры (серые штрихи).

ных зон к изменению радиационного форсинга парниковых газов  $I_{GHG}$  и вариациям индексов различных мод естественной изменчивости  $I_m$  для периода 1880–2012 гг., приведены в табл. 1. Судя по оценкам значений коэффициентов связи, чувствительность к изменению парниковых газов температурного режима средних широт ЮП наименьшая (в 2.5 раза меньше, чем для тропиков СП). Это связано с наибольшей инерционностью термических процессов (с характерным временем в 2.5–3 раза большим, чем для тропиков СП) в широтах с большим покрытием океанами, что не-

обходимо учитывать при оценке вклада парниковых газов в температурные тренды разных широтных зон на разных временных интервалах.

*Оценки термической инерционности.* Оценки собственной инерционности температурных изменений характеризуются безразмерным коэффициентом  $a_1$ , соответствующим одному шагу дискретного времени  $n$ , равному здесь одному году. Чем меньше величина  $a_1$ , тем менее инерционен процесс. Чем ближе этот коэффициент к единице, тем больше характерное время релаксации

**Таблица 1.** Оценки коэффициентов эмпирических моделей (1) с 95%-ными интервалами ( $\Delta a$  – удвоенное значение соответствующего стандартного отклонения) для интервала 1880–2012 гг.

Климатические моды	Оценки коэффициентов эмпирических моделей при учете разных мод (АМО, ENSO, IPO, ААО)					
	0–30° ю.ш.		30–60° ю.ш.		60–90° ю.ш.	
	$a_2 \pm \Delta a_2$ К · Вт <sup>-1</sup> · м <sup>2</sup>	$a_3 \pm \Delta a_3$	$a_2 \pm \Delta a_2$ К · Вт <sup>-1</sup> · м <sup>2</sup>	$a_3 \pm \Delta a_3$	$a_2 \pm \Delta a_2$ К · Вт <sup>-1</sup> · м <sup>2</sup>	$a_3 \pm \Delta a_3$
АМО	<b>0.17</b> ± 0.5	0.07 ± 0.18	<b>0.06</b> ± 0.03	0.00 ± 0.10	<b>0.08</b> ± 0.07	–0.05 ± 0.50
ENSO	<b>0.18</b> ± 0.06	<b>0.04</b> ± 0.05	<b>0.06</b> ± 0.03	–0.00 ± 0.03	<b>0.08</b> ± 0.07	– <b>0.11</b> ± 0.12
IPO	<b>0.17</b> ± 0.06	0.02 ± 0.05	<b>0.06</b> ± 0.03	0.00 ± 0.02	<b>0.08</b> ± 0.07	– <b>0.06</b> ± 0.12
ААО	<b>0.17</b> ± 0.05	– <b>0.02</b> ± 0.03	<b>0.05</b> ± 0.03	0.01 ± 0.02	<b>0.11</b> ± 0.09	– <b>0.05</b> ± 0.10

процесса  $\tau \approx 1/(1 - a_1)$  лет. Естественно, что инерционность широтных зон зависит от их площади и от доли покрытия океанами. Как уже указано выше, согласно полученным оценкам наиболее инерционны соответствующие процессы в средних широтах ЮП – собственное время релаксации для модели (1) порядка 5 лет, что связано с тем, что значительная часть этой широтной зоны покрыта океаном. Для сравнения, среднее время релаксации для тропических зон оценено около 1.7 года (для тропиков ЮП – 1.8 года, для тропиков СП – 1.5 года). Зона средних широт ЮП в любом варианте оценивания выделяется своей большей инерционностью. Для полярных зон время релаксации получено около 1.3 года. Термическая инерционность зоны средних широт в СП характеризуется временем 1.4 года в AP моделях с АМО. Отметим, что оценки термической инерционности для AP моделей (1) при учете разных климатических мод (АМО, ENSO, IPO, ААО) не сколько различаются.

*Оценки “шумов”.* Получены соответствующие оценки свойств остаточных ошибок AP моделей (1).

Дисперсия этих ошибок  $\sigma^2$  характеризует интенсивность “шумов” – воздействий на внутригодовых временных масштабах. Она минимальна в средних широтах ЮП ( $0.08 \text{ K}^2$ ), втрое выше в тропических зонах, в пять раз выше в средних широтах СП, в 25 раз выше в полярных широтах (в Антарктике чуть выше, чем в Арктике).

*Оценки коэффициента связи с парниковыми газами.* Согласно полученным оценкам коэффициента  $a_2$  (табл.1) влияние парниковых газов значимо на уровне  $p < 0.05$  (оценка коэффициента превосходит удвоенную ошибку) для всех широтных зон. Точнее говоря, оно гораздо более значимо: даже для средних широт ЮП в AP-модели (1) с ААО оно значимо на уровне  $p = 0.0005$  (оценка коэффициента превосходит стандартную ошибку, умноженную на 3.6). Наибольший коэффициент связи с парниковыми газами получен для арктических широт – с оценкой коэффициента  $0.35 \text{ K}/(\text{Вт м}^{-2})$ . При этом коэффициент связи для тропиков ЮП немного больше, чем для тропиков СП. Что касается средних и полярных широт ЮП, то для них этот коэффициент оказывается примерно в пять раз меньше. Для средних широт ЮП он меньше, чем для полярных. Для средних широт СП этот коэффициент немного меньше или немного больше, чем для тропических зон (в зависимости от учитываемой в модели моды  $I_m$ ).

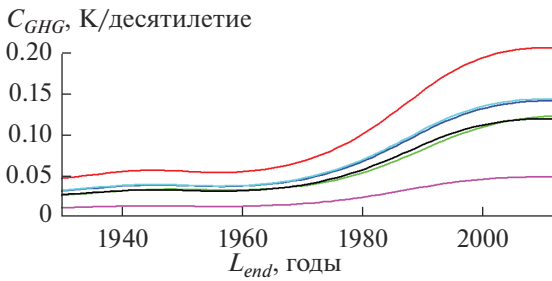
*Оценки коэффициента связи с АМО.* Согласно оценкам безразмерного коэффициента  $a_3$  (табл. 1) в AP модели (1) влияние АМО для всего анализируемого периода существенно только в СП и сильнее всего в арктических широтах – со значением коэффициента 0.7 (значимо на уровне  $p = 0.005$ ).

При этом оно в полтора раза меньше в средних широтах СП и в три раза меньше в тропических широтах СП. В тропических широтах ЮП влияние АМО на порядок слабее, чем в Арктике. При этом коэффициент  $a_3$  для тропиков ЮП незначим даже на уровне 0.1 – он формально “значим” лишь на уровне  $p = 0.44$ , но  $p > 1/3$  уже не стоит считать даже слабым признаком ненулевого значения, а  $p$  в диапазоне от 0.1 до 0.2 можно считать довольно слабым признаком ( $p$  от 0.2 до  $1/3$  – весьма и весьма слабым). Для средних и полярных широт ЮП признаки связи с АМО не выявлены даже на уровне  $p = 0.5$ .

*Оценки коэффициента связи с ENSO.* Согласно оценкам коэффициента  $a_3$  (табл. 1) в AP модели (1) влияние ENSO для всего анализируемого периода наиболее сильно в полярных широтах, хотя отличие его от нуля даже там имеет место лишь на уровне значимости  $p = 0.06$  (для Антарктики) и  $p = 0.12$  (для Арктики). При этом для температурных изменений антарктических широт коэффициент связи с ENSO получен с обратным знаком (с минусом) по сравнению с другими широтными зонами. Существенно, что для обеих тропических широтных зон в целом он в 2–3 раза меньше и еще менее значим ( $p = 0.14$  и  $0.15$  – слабый признак влияния), в средних широтах СП еще несколько слабее ( $p = 0.3$  – весьма и весьма слабый признак влияния), и совсем не проявляется в средних широтах ЮП. В целом получено, что оценки вклада ENSO в температурные изменения более существенны для полярных и тропических широт.

*Оценки коэффициента связи с IPO.* Оценки коэффициента  $a_3$  (табл. 1) в AP модели (1), характеризующие влияние IPO для всего анализируемого периода, примерно вдвое меньше, чем характеризующие влияние ENSO. Наиболее (хотя все равно весьма слабо) значимые коэффициенты связи с температурными изменениями получены для полярных широт ( $p = 0.36$  для антарктических и  $p = 0.18$  для арктических широт), с практически отсутствующим влиянием на температурные изменения в других широтных зонах. В целом получено, что оценки вклада IPO в температурные изменения наиболее существенны для полярных широт.

*Оценки коэффициента связи с ААО.* Согласно оценкам коэффициента  $a_3$  (табл. 1) в AP модели (1) наиболее значимо влияние ААО для всего анализируемого периода проявляется в тропических широтах СП ( $p = 0.05$ ), при этом более значимо, чем влияние ENSO и IPO. В тропических широтах ЮП коэффициент связи с ААО значительно меньше ( $p = 0.31$ ). При этом знак коэффициента связи температурных аномалий обеих тропических зон с ААО – отрицательный, а с ENSO и IPO – положительный. Весьма слабо проявляется влияние



**Рис. 2.** Оценки вклада роста концентрации парниковых газов в тренды температуры различных широтных зон для 50-летних скользящих интервалов при учете влияния АМО. Различным широтным зонам соответствуют линии разного цвета, как на рис. 1а и рис. 3.

ААО на температурные аномалии антарктических широт для всего анализируемого периода ( $p = 0.31$ ), но знак этого коэффициента связи с ААО такой же, как и с ENSO и IPO (отрицательный). Следует отметить, что все эти коэффициенты практически незначимо отличаются от нуля. При этом связь температуры средних широт ЮП формально наиболее значима с ААО — с  $p = 0.42$ , для других мод значимость еще ниже. В целом, согласно полученным оценкам, коэффициент связи с ААО для всего анализируемого периода наиболее существен для температурных изменений в тропических широтах СП, а также для тропических и полярных широт ЮП.

**Оценки вклада парниковых газов в температурные тренды.** С использованием AP моделей (1) получены оценки вклада в тренды температуры различных широтных зон роста содержания в атмосфере парниковых газов для разных временных интервалов — длиной от 10 до 60 лет. На рис. 2 представлены оценки вклада парниковых газов в температурные тренды разных широтных зон в скользящих 50-летних окнах на основе AP модели (1) учетом АМО (при учете ENSO или других мод графики в данном масштабе аналогичны).

При получении количественных оценок на основе AP моделей (1) температурные изменения по данным наблюдений сравнивались с модельными при условии постоянного содержания пар-

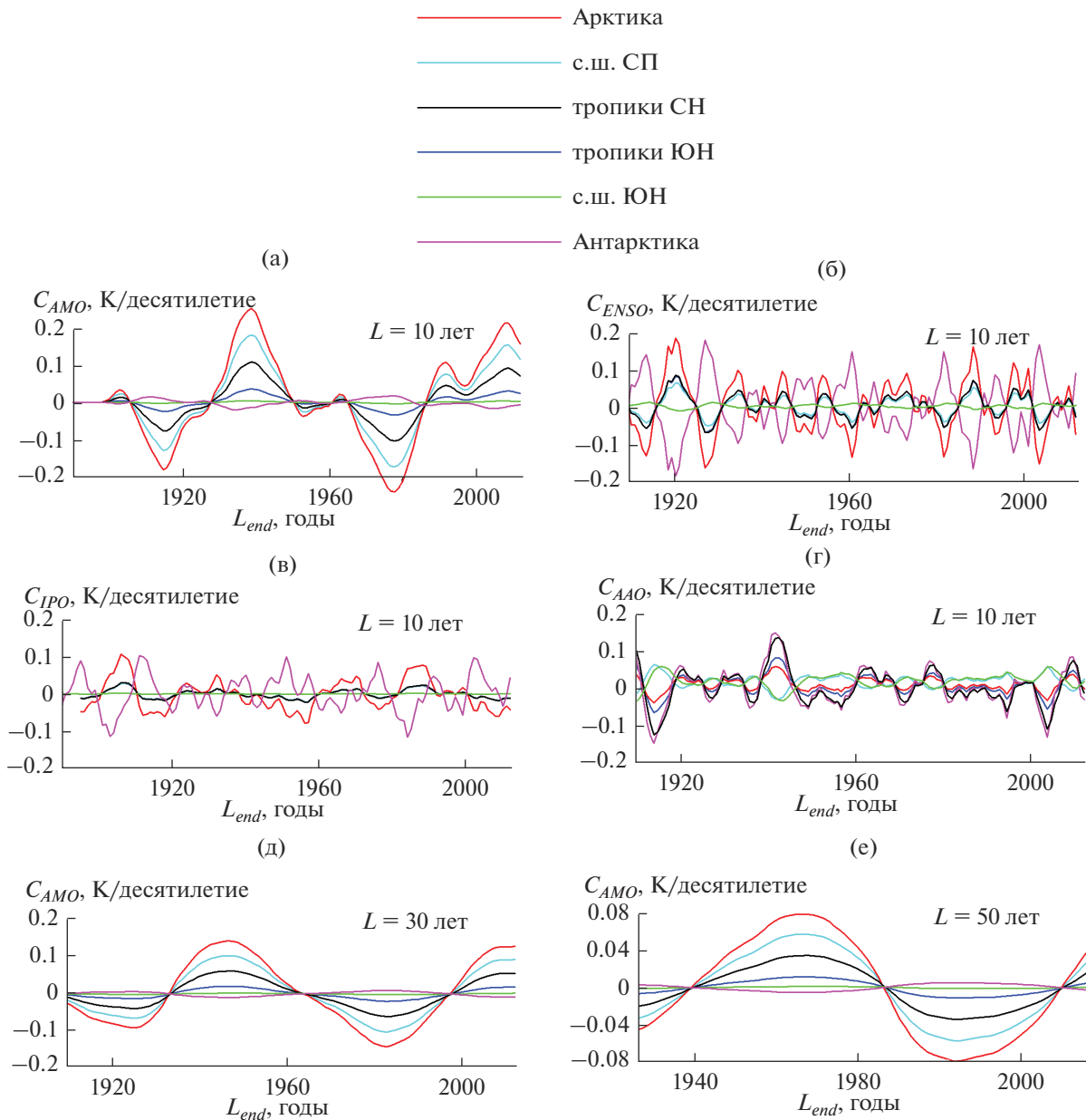
никовых газов в атмосфере на уровне 1880 года. Наибольшие значения компоненты тренда приповерхностной температуры, связанной с ростом в атмосфере содержания парниковых газов, получены для арктических широт — около 0.2 К/десятилетие и более в последние десятилетия, наименьшие — для антарктических широт. Для тропических широт ЮП, как и для средних широт СП, получены максимальные значения соответствующих оценок температурных трендов — около 0.15 К/десятилетие, для средних широт ЮП и для тропических широт СП — несколько меньше. Соотношения этой компоненты температурных трендов для разных широтных зон различаются для разных временных интервалов.

Соответствующие оценки получены для вклада разных климатических мод для разных временных интервалов (окон). На рис. 3 представлены оценки вклада АМО, ENSO, IPO и ААО в тренды температуры различных широтных зон для 10-летних скользящих интервалов, а также АМО для 30-летних и 50-летних скользящих интервалов. Наибольшие значения температурного тренда на десятилетних временных интервалах характерны для арктических широт, достигая и превышая 0.2 К/десятилетие.

Более детальный анализ проведен для последних десятилетий, в том числе при фиксированном конце анализируемых временных интервалов (2012 г.) и со скользящим началом (см. табл. 2–4). В табл. 2 представлены полученные отношения компоненты трендов приповерхностной температуры  $C_{GHG}$ , связанной с ростом содержания в атмосфере парниковых газов, к величине тренда приповерхностной температуры  $\alpha_T$  разных широтных зон на основе AP моделей (1) при учете АМО, ENSO, IPO и ААО. Согласно полученным результатам оценки  $C_{GHG}/\alpha_T$  меньше 0.5 только для относительно коротких временных интервалов (2–3 десятилетия) и только для внетропических широт СП. На временных горизонтах более полувека с ростом содержания в атмосфере парниковых газов связан доминирующий вклад в температурные тренды разных широтных зон. При этом значения больше 1 означают, что суммарный вклад других факторов (мод естественной изменчивости) и внеш-

**Таблица 2.** Оценки  $C_{GHG}/\alpha_T$  на основе AP моделей (1) при учете АМО, ENSO, IPO и ААО.

Климатические моды	Оценки на основе AP моделей (1) при учете разных мод для временных интервалов разной длины — 20, 30, 50, 130 лет — с концом на 2012 г.		
	0–30° ю.ш.	30–60° ю.ш.	60–90° ю.ш.
АМО	1.00, 1.22, 0.95, 1.01	1.38, 1.86, 1.15, 1.02	–0.52, –0.68, 1.87, 1.38
ENSO	0.99, 1.21, 0.95, 1.00	1.38, 1.86, 1.16, 1.02	–0.54, –0.70, 1.93, 1.42
IPO	1.01, 1.23, 0.96, 1.02	1.39, 1.86, 1.16, 1.02	–0.49, –0.65, 1.77, 1.30
ААО	1.07, 1.32, 1.02, 1.08	1.26, 1.70, 1.06, 0.93	–0.71, –0.94, 2.58, 1.90



**Рис. 3.** Оценки вклада АМО (а), ENSO (б), IPO (в) и ААО (г) в тренды температуры различных широтных зон для 10-летних скользящих интервалов, а также вклада АМО для 30-летних (д) и 50-летних (е) скользящих интервалов.

них шумов  $\xi$  в тренд температуры на данном временном интервале отрицательный и реальные значения тренда меньше оценок тренда за счет роста содержания парниковых газов в атмосфере согласно модели (1).

В табл. 3 представлены оценки вклада климатических мод  $C_{AMO}$ ,  $C_{ENSO}$ ,  $C_{IPO}$ ,  $C_{AAO}$  в температурные тренды  $\alpha_T$  для разных широтных зон. Согласно полученным оценкам, отношения  $C_{AMO}/\alpha_T$ ,  $C_{ENSO}/\alpha_T$ ,  $C_{IPO}/\alpha_T$ ,  $C_{AAO}/\alpha_T$  не превышают 0.5 для различных временных интервалов и разных широтных зон за

исключением антарктических широт с нерепрезентативными долгосрочными данными. В целом наиболее существенный вклад климатических мод в температурные тренды разных широтных зон проявляется на относительно коротких временных интервалах в 2–3 десятилетия. Заметный по величине вклад в температурные тренды средних широт ЮП связан с ААО, хотя статистически он мало значим, как обсуждалось выше в связи с табл.1. Максимальные значения оценки вклада климатических мод в температурные тренды получены для вклада АМО в широтных зонах СП.

**Таблица 3.** Оценки отношений  $C_{AMO}/\alpha_T$ ,  $C_{ENSO}/\alpha_T$ ,  $C_{IPO}/\alpha_T$ ,  $C_{AAO}/\alpha_T$ 

Климатические моды	Оценки отношений $C_{AMO}/\alpha_T$ , $C_{ENSO}/\alpha_T$ , $C_{IPO}/\alpha_T$ , $C_{AAO}/\alpha_T$ для временных интервалов разной длины – 20, 30, 50, 130 лет – с концом на 2012 г.		
	0–30° ю.ш.	30–60° ю.ш.	60–90° ю.ш.
$C_{AMO}/\alpha_T$	0.20, 0.17, 0.03, 0.01	0.03, 0.03, 0.00, 0.00	0.14, 0.13, –0.09, –0.01
$C_{ENSO}/\alpha_T$	–0.18, –0.06, 0.00, 0.01	0.04, 0.01, –0.00, –0.00	–0.67, –0.25, 0.02, –0.05
$C_{IPO}/\alpha_T$	–0.12, –0.08, 0.00, –0.01	–0.01, –0.01, 0.00, –0.00	–0.49, –0.31, –0.01, 0.10
$C_{AAO}/\alpha_T$	–0.15, –0.14, –0.09, –0.07	0.20, 0.25, 0.12, 0.08	0.44, 0.40, –0.98, –0.50

**Таблица 4.** Оценки отношений  $\tilde{C}_{AMO} = |C_{AMO}|/(|C_{GHG}| + |C_{AMO}|)$ ,  $\tilde{C}_{ENSO} = |C_{ENSO}|/(|C_{GHG}| + |C_{ENSO}|)$ ,  $\tilde{C}_{IPO} = |C_{IPO}|/(|C_{GHG}| + |C_{IPO}|)$ ,  $\tilde{C}_{AAO} = |C_{AAO}|/(|C_{GHG}| + |C_{AAO}|)$ 

Климатические моды	Оценки отношений $\tilde{C}_{AMO}$ , $\tilde{C}_{ENSO}$ , $\tilde{C}_{IPO}$ , $\tilde{C}_{AAO}$ для временных интервалов разной длины – 20, 30, 50, 130 лет – с концом на 2012 г.		
	0–30° ю.ш.	30–60° ю.ш.	60–90° ю.ш.
AMO	0.17, 0.12, 0.03, 0.01	0.02, 0.02, 0.00, 0.00	0.22, 0.16, 0.05, 0.01
ENSO	0.16, 0.05, 0.00, 0.01	0.03, 0.01, 0.00, 0.00	0.56, 0.26, 0.01, 0.03
IPO	0.11, 0.06, 0.00, 0.01	0.01, 0.00, 0.00, 0.00	0.50, 0.32, 0.01, 0.07
AAO	0.12, 0.10, 0.08, 0.06	0.14, 0.13, 0.10, 0.07	0.38, 0.30, 0.28, 0.21

В табл. 4 представлены оценки относительного вклада климатических мод ( $C_{AMO}$ ,  $C_{ENSO}$ ,  $C_{IPO}$ ,  $C_{AAO}$ ) в температурные тренды в сравнении с вкладом парниковых газов ( $C_{GHG}$ ), т.е. отношения  $\tilde{C}_{AMO} = |C_{AMO}|/(|C_{GHG}| + |C_{AMO}|)$ ,  $\tilde{C}_{ENSO} = |C_{ENSO}|/(|C_{GHG}| + |C_{ENSO}|)$ ,  $\tilde{C}_{IPO} = |C_{IPO}|/(|C_{GHG}| + |C_{IPO}|)$ ,  $\tilde{C}_{AAO} = |C_{AAO}|/(|C_{GHG}| + |C_{AAO}|)$ . Значения этих отношений оценены наибольшими для сравнительно коротких временных интервалов. В частности, значения  $\tilde{C}_{AMO}$  наибольшие в СП, достигают и даже превышают 0.5 для средних и полярных широт СП на интервалах времени около двух десятилетий. Для ЮП значения  $\tilde{C}_{AMO}$  существенно меньше. Соответствующие оценки роли ENSO наиболее значимы не только для тропических широт, но и для полярных. Для полярных широт выявлено значимое влияние и IPO. Следует отметить значительное влияние AAO в формировании температурных трендов в ЮП не только на масштабах двух-трех десятилетий, но и на полувековом масштабе, хотя статистическая значимость этого вывода не столь велика, как уже обсуждалось в связи с табл. 1.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно полученным результатам, вклад ключевых мод климатической изменчивости на срав-

нительно коротких временных интервалах в пределах трех десятилетий достигает и может превышать (по модулю)  $\pm 0.2$  К/десятилетие, а на интервалах около полувека и более их вклад в тренды приповерхностной температуры разных широт уже незначителен на фоне общего роста вклада радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере. Вклад парниковых газов в тренды приповерхностной температуры разных широтных зон в целом увеличивается и для последних десятилетий достигает и превышает 0.2 К/десятилетие. При этом вклад парниковых газов существенно преобладает на временных интервалах около полувека и более, а часто и на более коротких интервалах.

Эти оценки особенно важны для сравнения современных трендов приповерхностной температуры в разных широтах ЮП и СП с оценкой относительной роли ключевых мод естественной изменчивости на разных временных горизонтах. В частности, общее увеличение площади антарктических морских льдов в последние десятилетия (вплоть до последних лет) по спутниковым данным (доступным только с 1970-х годов), сопровождающееся глобальным потеплением и быстрым уменьшением площади арктического морского льда, связано с общим понижением температуры поверхности в субантарктических широтах с 1970-х до 2016 г., когда было замечено быстрое уменьшение площади морских льдов в Южном океане. Это связано с региональными проявлениями естественных колеба-



ний климата с периодами до нескольких десятилетий на фоне векового глобального потепления и относительно слабого тренда температуры поверхности в океанических широтах ЮП. 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 (см., напр., [34]). При этом, в частности, согласно полученным оценкам, вклад ААО в тренд приповерхностной температуры разных широт ЮП и тропических широт СП проявляется не только на временных масштабах двух-трех десятилетий, но и на временных интервалах около полвека и более. Это следует учитывать при прогностических оценках региональных изменений климата на основе климатических моделей. Современные модели способны воспроизводить многие моды климатической изменчивости, но не все значимые моды изменчивости климата моделируются достаточно хорошо [44]. Необходимо адекватное воспроизведение моделями естественной изменчивости климата и ее вклада в региональные тренды температуры на различных временных горизонтах.

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. *Bindoff N.L., Stott P.A., AchutaRao K.M. et al.* Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional / In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K.* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge/New York, NY. 2013. P. 867–952.
2. *Tol R.S.J., de Vos A.F.* Greenhouse statistics – time series analysis // *Theor. Appl. Climatol.* 1993. V. 48. P. 63–74.
3. *Kaufmann R.K., Stern D.I.* Evidence for human influence on climate from hemispheric temperature relations // *Nature.* 1997. V. 388. P. 39–44.
4. *Santer B.D., Wigley T.M.L., Doutriaux C. 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.
5. *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.
6. *Kaufmann R., Kauppi H., Stock J.* Emissions, concentrations, & temperature: A time series analysis // *Clim. Change.* 2006. V. 77(3). P. 249–278.
7. *Verdes P.F.* Global warming is driven by anthropogenic emissions: A time series analysis approach // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99, 048501.
8. *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.
9. *Lockwood M.* Recent changes in solar outputs and the global mean surface temperature. III. Analysis of contributions to global mean air surface temperature rise // *P. Roy. Soc. A: Math. Phys.* 2008. V. 464(2094), 1387–1404.
10. *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.
11. *Lean J.L., Rind D.H.* How will Earth's surface temperature change in future decades? // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36, L15708.
12. *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.
13. *Smirnov D.A., Mokhov I.I.* From Granger causality to “long-term causality”: application to climatic data // *Phys. Rev. E.* 2009. V. 80(1), 016208.
14. *Foster G., Rahmstorf S.* Global temperature evolution 1979–2010 // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6, 044022.
15. *Kopp G., Lean J.* A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38, L01,706.
16. *Kaufmann R., Kauppi H., Mann M., Stock J.* Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008 // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2011. V. 108(29), 11 790.
17. *Loehle C., Scafetta N.* Climate change attribution using empirical decomposition of climatic data // *Open. Atmos. Sci. J.* 2012. V. 5. P. 74–86.
18. *Attanasio A., Triacca U.* Detecting human influence on climate using neural networks based Granger causality // *Theor. Appl. Climatol.* 2011. V. 103(1–2). P. 103–107.
19. *Kodra E., Chatterjee S., Ganguly A.R.* Exploring Granger causality between global average observed time series of carbon dioxide and temperature // *Theor. Appl. Climatol.* 2011. V. 104(3–4). P. 325–335.
20. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 2012. 194 с.
21. *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 // *Доклады АН.* 2012. Т. 443. № 2. С. 225–231.
22. *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.

23. *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.
24. *Zhou J., Tung K.K.* Deducing multidecadal anthropogenic global warming trends using multiple regression analysis // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70. P. 3–8.
25. *Stern D.I., Kaufmann R.K.* Anthropogenic and natural causes of climate change // *Clim. Change*. 2014. V. 122. P. 257–269.
26. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Взаимосвязь вариаций глобальной приповерхностной температуры с процессами Эль-Ниньо/Ла-Нинья и Атлантическим долгопериодным колебанием // Доклады АН. 2016. Т. 467. № 5. С. 580–584.
27. *Stips A., Macias D., Coughlan C. et al.* On the causal structure between CO<sub>2</sub> and global temperature // *Sci. Rep.* 2016. V. 6, 21691.
28. *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.
29. *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.
30. *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.
31. *Kajtar J.B., Collins M., Frankcombe L.M. et al.* Global mean surface temperature response to large-scale patterns of variability in observations and CMIP5 // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 2232–2241.
32. *Мохов И.И.* Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56. № 4. С. 1–21.
33. *McBride L.A., Hope A.P., Canty T.P. et al.* 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.
34. *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.
35. *Huang B., Banzon V.F., Freeman E. et al.* Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 4 (ERSST.v4): Part I. Upgrades and intercomparisons // *J. Climate*. 2014. V. 28. P. 911–930.
36. *Liu W., Huang B., Thorne P.W. et al.* Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 4 (ERSST.v4): Part II. Parametric and structural uncertainty estimations // *J. Climate*. 2014. V. 28. P. 931–951.
37. *Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J.* The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 2077–2080.
38. *Rayner N.A., Parker D.E., Horton E. B. et al.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108 (D14), 4407.
39. *Henley B.J., Gergis J., Karoly D.J. et al.* A Tripole Index for the Interdecadal Pacific Oscillation // *Clim. Dyn.* 2015. V. 45(11–12). P. 3077–3090.
40. *Gong D., Wang S.* Definition of Antarctic Oscillation index // *Geophys. Res. Lett.* 1999. 26 (4). P. 459–462.
41. *Miller R.L., Schmidt G.A., Nazarenko L.S. et al.* CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS ModelE2 // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2014. V. 6(2). P. 441–477.
42. *Smirnov D.A.* Quantifying causal couplings via dynamical effects: A unifying perspective // *Phys. Rev. E*. 2014. V. 90, 062921.
43. *Smirnov D.A., Mokhov I.I.* Relating Granger causality to long-term causal effects // *Phys. Rev. E*. 2015. V. 92(4), 042138.
44. *Flato G., Marotzke J., Abiodun B. et al.* Evaluation of climate models / In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K.* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge/New York, NY. 2013. P. 741–882.

## Estimates of Contributions of Natural Climate Variability Modes and Greenhouse Gases to Surface Temperature Trends in Southern Hemisphere from Observation Data

I. I. Mokhov<sup>1, 2, \*</sup> and D. A. Smirnov<sup>1, 3, \*\*</sup>

<sup>1</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky 3, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1–2, GSP-1, Moscow, 119991 Russia*

<sup>3</sup>*Saratov Branch, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Zelenaya 38, Saratov, 410019 Russia*

\*e-mail: mokhov@ifaran.ru

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

We have quantitatively estimated contributions of the anthropogenic influence, characterized by variations of atmospheric greenhouse gases radiative forcing, and key natural climate variability modes to the trends of surface air temperatures at different latitudes of Southern Hemisphere on different temporal horizons based on observation data. With trivariate autoregressive models and the data since the 19th century, we have estimated roles of Atlantic Multidecadal Oscillation, El-Nino/Southern Oscillation, Interdecadal Pacific Oscillation,

and Antarctic Oscillation in creation of those temperature trends. We note essential contributions of the key natural climate variability modes to the temperature trends on comparatively short intervals of about two or three decades which are comparable to the contribution of the greenhouse gases and even exceed the latter. We compare the estimates characterizing polar, middle, and tropical latitudes of Southern and Northern Hemispheres. According to these estimates, a dominating contribution to the temperature trends at different latitudes and for the Earth as a whole on the intervals about half a century and longer is made by the radiative forcing of the atmospheric greenhouse gases.

**Keywords:** current climate changes, temperature trends, natural and anthropogenic factors, radiative forcing of greenhouse gases in the atmosphere, Atlantic Multidecadal Oscillation, El Niño/Southern Oscillation, Interdecadal Pacific Oscillation, Antarctic Oscillation, autoregressive models, estimates of directional couplings