

## Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультидесятилетней осцилляции в тренды приповерхностной температуры

И. И. Мохов\*, \*\*, Д. А. Смирнов\*\*\*, \*\*\*\*

*Получены количественные оценки вклада радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультидесятилетней осцилляции (АМО) в тренды глобальной приповерхностной температуры (ГПТ) и приповерхностной температуры в разных широтных зонах. Использовались данные инструментальных наблюдений с середины XIX в. и трехкомпонентные авторегрессионные модели. Получены характеристики воздействий обоих факторов на ГПТ (причинность по Винеру — Грейнджеру). На сравнительно коротких интервалах времени (15—30 лет) вклад АМО оказался сопоставим по абсолютной величине с вкладом парниковых газов и мог даже превышать его, а на интервалах около 60 лет и более — уже незначим. При этом в последние десятилетия относительный вклад парниковых газов в тренды ГПТ и приповерхностной температуры в тропиках большие, а в тренды приповерхностной температуры в средних и высоких широтах — меньше.*

**Ключевые слова:** приповерхностная температура, тренды, атлантическая мультидесятилетняя осцилляция, парниковые газы, радиационное воздействие, причинность по Винеру — Грейнджеру.

### Введение

По данным наблюдений с середины XIX в., общее увеличение глобальной приповерхностной температуры (ГПТ) сопровождалось периодами ее более быстрого роста (с 1910-х до 1930-х годов и со второй половины 1970-х до 2000-х годов) и периодами ее понижения (с 1940-х до середины 1970-х годов). К началу XXI в. проявилась тенденция уменьшения скорости потепления. При этом значения ГПТ последних лет (2014—2017 гг.) были в числе самых высоких за 17 десятилетий. Количественная оценка вклада естественных и антропогенных факторов в изменения ГПТ — одна из ключевых современных проблем [2—4, 23]. Согласно [23], с середины XX в. более половины увеличения ГПТ с вероятностью более 90% связано с антропогенным ростом концентрации парниковых газов в атмосфере.

\* Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук; e-mail: tokhov@ifaran.ru.

\*\* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

\*\*\* Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук; e-mail: smirnovda@yandex.ru.

\*\*\*\* Институт прикладной физики Российской академии наук.

Оценки значимого влияния роста содержания в атмосфере парниковых газов (особенно диоксида углерода) на современное увеличение ГПТ получены во многих исследованиях с помощью разных методов, в том числе с учетом разных естественных факторов — солнечной и вулканической активности, квазициклических процессов типа Эль-Ниньо — южное колебание, атлантической мультидесятилетней осцилляции (АМО) и др. [1—23, 25—44]. В частности, в работах [28, 29] использовались методы множественной регрессии, а в работах [14, 16, 19—22, 25, 27, 33, 36—42] — оценки краткосрочного воздействия на основе авторегрессионных моделей или близкие к ним. При этом наряду с оценками относительного вклада разных факторов в изменчивость ГПТ необходимы соответствующие количественные оценки вклада в тренды ГПТ и приповерхностной температуры разных регионов на основе эмпирических данных. Цель работы — количественная оценка вклада естественных и антропогенных факторов в тренды ГПТ и приповерхностной температуры в разных широтных зонах на временных интервалах нескольких десятилетий по данным инструментальных наблюдений с середины XIX в.

### Используемые данные и методы анализа

При анализе использовались среднегодовые данные о глобальной приповерхностной температуре за 1850—2017 гг. (<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/>). Антропогенные воздействия характеризовались радиационным форсингом парниковых газов (с основным вкладом CO<sub>2</sub>) в 1851—2012 гг. (<http://data.giss.nasa.gov/>), который традиционно связан с возмущением радиационного баланса на верхней границе атмосферы. В качестве ключевой моды естественной климатической изменчивости при анализе трендов на временных интервалах от нескольких десятилетий до 100 лет использовался индекс атлантической мультидесятилетней осцилляции для периода 1856—2017 гг. (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>) [14]. Значения индекса АМО с периодом около 6 десятилетий характеризовались температурой поверхности Северной Атлантики в широтном поясе 20—70° с. ш. с удалением тренда. При оценках использовались исходные данные об АМО и данные с отфильтрованными внутридесятилетними вариациями, в том числе скользящее 10-летнее осреднение.

Анализировались также среднегодовые данные о приповерхностной температуре в Арктике (60—90 с. ш.), в средних широтах (30—60 с. ш.) и тропиках (0—30 с. ш.) Северного полушария (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/>).

Вклад разных факторов в изменения температуры оценивался с помощью построения по временным рядам эмпирических трехкомпонентных авторегрессионных моделей вида

$$T_n = a_0 + \sum_{i=1}^{d_1} T_{n-i} + \sum_{i=1}^{d_2} I_{\text{GHG}, n-i} + \sum_{i=1}^{d_3} I_{\text{AMO}, n-i} + \varepsilon_n, \quad (1)$$

где  $T$  — ГПТ;  $n$  — дискретное время (годы);  $I_{\text{GHG}}$  — радиационный форсинг парниковых газов;  $I_{\text{AMO}}$  — медленная составляющая индекса АМО;  $\varepsilon_n$  — шум (остаточные ошибки или невязки модели); величины  $d_i$  определяют порядок авторегрессионной модели, а коэффициенты  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$

оцениваются методом наименьших квадратов. Порядок модели желательно подбирать так, чтобы остаточные ошибки были дельта-коррелированными, но для приближенного выполнения этого условия на практике ограничиваются тем или иным формальным критерием. В данной работе слагаемые авторегрессионной модели (1) определялись путем построения авторегрессионных моделей все возрастающего порядка при последовательном добавлении слагаемых в модель. Слагаемые добавлялись начиная с характеризующихся наименьшим временным запаздыванием  $i$  и вплоть до выполнения условия минимума критерия Шварца, т. е. величины

$$\frac{N}{2} \ln \sigma^2 - \frac{P}{2} \ln N,$$

где  $N$  — длина временного ряда;  $P$  — число оцениваемых коэффициентов авторегрессионной модели;  $\sigma^2$  — средний квадрат остаточных ошибок модели (см., например, [14]). Краткосрочные характеристики воздействия АМО на ГПТ (на один временной шаг) определялись на основе оценок причинности по Винеру — Грейнджеру [24, 45] — это относительное уменьшение среднего квадрата остаточных ошибок  $\sigma^2$  (ошибок прогноза) в модели (1) по сравнению с той же моделью без учета АМО. Аналогично определялись краткосрочные оценки воздействия парниковых газов.

Оценивались также долгосрочные характеристики изменений ГПТ, в том числе тренды на интервалах до 60 лет [16, 33, 34]. При определении долгосрочных характеристик воздействия АМО (или парниковых газов) на ГПТ анализировались временные реализации модели (1) с заданными гипотетическими режимами АМО (парниковых газов). Остаточные ошибки  $\epsilon_n$ , полученные при оценивании параметров авторегрессионной модели, характеризовали внешние (шумовые) воздействия. Вклад АМО (парниковых газов) в линейные тренды ГПТ на разных временных интервалах оценивался с использованием линейных трендов разности  $T_n$  между реальными значениями ГПТ и модельными при заданных (гипотетических) условиях. Тренды на интервале  $[L_{\text{start}}, L_{\text{end}}]$  длительностью  $L = L_{\text{end}} - L_{\text{start}}$  в диапазоне от 5 до 60 лет оценивались разностью  $T_{L_{\text{end}}} - T_{L_{\text{start}}}$  и коэффициентом  $\beta_T$  линейной регрессии  $T_n = \beta_T n + \epsilon$  с использованием метода наименьших квадратов. Получены схожие результаты, и ниже приводятся лишь результаты с оценками трендов на основе линейной регрессии с заметно меньшими статистическими флуктуациями при малых трендах и малых значениях  $L$ . Наряду с трендом ГПТ, характеризовавшимся коэффициентом  $\beta_T$  линейной регрессии  $T_n = \beta_T n + \epsilon$ , оценивались вклады в тренд ГПТ парниковых газов ( $C_{\text{GHG}}$ ) и АМО ( $C_{\text{AMO}}$ ). Относительный вклад АМО и парниковых газов рассчитывали следующим образом:

$$\tilde{C}_{\text{AMO}} = \frac{C_{\text{AMO}}}{|C_{\text{AMO}}| + |C_{\text{GHG}}|}, \quad \tilde{C}_{\text{GHG}} = \frac{C_{\text{GHG}}}{|C_{\text{AMO}}| + |C_{\text{GHG}}|}.$$

### Результаты

Согласно результатам анализа данных, оптимальная эмпирическая модель для связи ГПТ с АМО и парниковыми газами имеет вид (см. [14]):

$$T_n = a_0 + a_1 T_{n-1} + a_2 I_{\text{GHG}, n-1} + a_3 I_{\text{AMO}, n-1} + \varepsilon_n, \quad (2)$$

при этом в целом для анализируемого периода (1866—2012 гг.) значения коэффициентов в формуле (2) следующие (с 95%-ными доверительными интервалами):  $a_0 = -0,21 \pm 0,07$  К;  $a_1 = 0,45 \pm 0,17$ ;  $a_2 = 0,13 \pm 0,04$  К/(Вт м<sup>-2</sup>);  $a_3 = 0,21 \pm 0,16$ . Наличие ненулевой корреляции между индикаторами (например, АМО и ГПТ) на рассматриваемых интервалах времени учитывается при расчете доверительных интервалов и приводит к их увеличению. Это не препятствует применению метода и получению содержательных выводов в данном случае, так как доверительные интервалы остаются заметно удаленными от нуля. Влияние АМО и парниковых газов на всем анализируемом интервале с использованием трехкомпонентного анализа причинности по Винеру — Грейнджеру оценено как статистически значимое на уровне  $p < 0,05$ . При этом для парниковых газов нормированное улучшение прогноза ГПТ (на год вперед) оценено равным 17%, а для АМО — 4%. Краткосрочная оценка воздействия парниковых газов более устойчива — она практически не изменяется и без учета АМО в авторегрессионных моделях (при двухкомпонентном анализе). Краткосрочная оценка воздействия АМО без учета парниковых газов статистически незначима и проявляется лишь при их учете — при трехкомпонентном анализе.

Вклад АМО в тренды ГПТ оценивался с использованием авторегрессионной модели (2), в частности при постоянных (с 1897 г.) значениях индекса АМО, равных среднему за весь анализируемый период. При этом получен вклад АМО в общий тренд ГПТ около 0,1 К/10 лет для периода 1925—1940 гг., -0,1 К/10 лет для периода 1965—1980 гг. и 0,05 К/10 лет для периода 1980—2010 гг. Относительная погрешность этих оценок (70%) определяется соответствующей погрешностью оценки коэффициента  $a_3$  в авторегрессионной модели (2). Подобные результаты получены и при других гипотетических сценариях изменений АМО, в частности при постоянном индексе АМО с 1920 г. При варьировании ширины временных окон вклад АМО в тренд ГПТ меняется в диапазоне от -0,1 до 0,1 К/10 лет для 15-летних временных интервалов, в диапазоне от -0,06 до 0,06 К/10 лет для 30-летних интервалов, а для 60-летних интервалов — от -0,02 до 0,02 К/10 лет (рис. 1а, в). Отмечено, что даже при широком временном окне в 60 лет проявляется ненулевой, хотя и существенно более слабый вклад АМО в тренд ГПТ. Это связано с тем, что проявление АМО квази-периодично, а не строго периодично.

Соответствующие оценки получены и для вклада парниковых газов в тренды ГПТ. В частности, при стабилизации радиационного форсинга парниковых газов на уровне середины XX в. (1950 г.) величина ГПТ согласно авторегрессионной модели (2) была бы ниже реальной в 2010 г. на 0,6 К. Это значит, что для последних 6 десятилетий вклад парниковых газов в рост ГПТ был около 0,1 К/10 лет. Если бы радиационный форсинг рос в эти десятилетия (1950—2010 гг.) с той же скоростью, что и до середины XX в. (в 1865—1950 гг.), то согласно авторегрессионной модели (1) ГПТ была бы к середине 2010-х годов меньше на 0,4 К. Это свидетельствует о том, что за счет ускорения роста радиационного форсинга парниковых газов в последние 6 десятилетий рост ГПТ ускорился на 0,07 К за 10 лет.

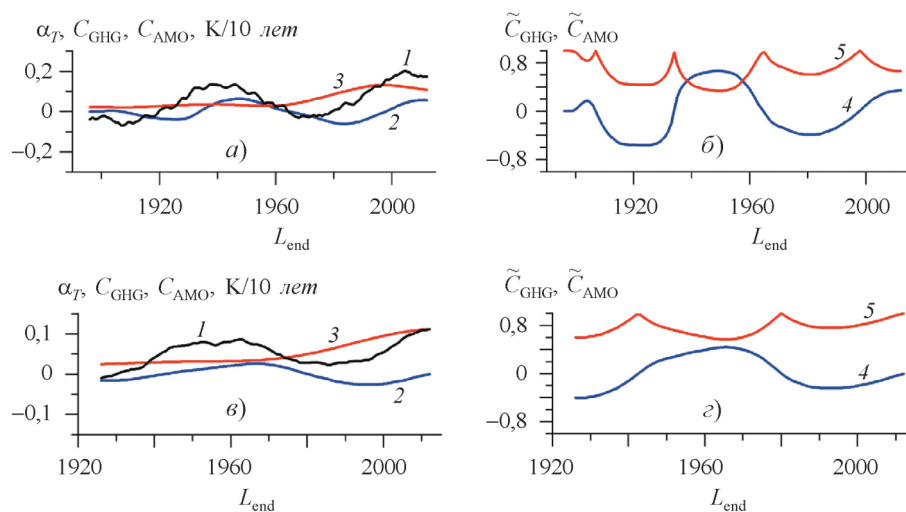


Рис. 1. Оценки трендов ГПТ и вклада разных факторов в скользящем 30-летнем (а, б) и 60-летнем (в, з) окнах в зависимости от конечной границы временного окна  $L_{end}$ .

$\alpha_T, C_{GHG}, C_{AMO}, K/10 лет$  — тренды ГПТ  $T(t)$  (1) и вклад, связанный с медленной составляющей АМО  $C_{AMO}$  (2) и радиационным форсингом содержания в атмосфере парниковых газов  $C_{GHG}$  (3); б, з — относительный вклад АМО  $\tilde{C}_{AMO}$  (4) и парниковых газов  $\tilde{C}_{GHG}$  (5) в тренд ГПТ.

При неизменности радиационного форсинга парниковых газов (с 1865 г.) ГПТ согласно модели (2) была бы меньше реальной в 2010 г. на 0,8 К. Это соответствует среднему за весь анализируемый период вкладу парниковых газов в тренд ГПТ около 0,02 К/10 лет. При этом для скользящих интервалов в 60 лет вклад парниковых газов составляет от 0,02 до 0,10—0,11 К/10 лет, для интервалов в 30 лет — до 0,12—0,13 К/10 лет и до 0,14 К/10 лет для интервалов в 15 лет (рис. 1а, в, кривые 3). В сопоставлении с общим трендом ГПТ (рис. 1а, в, кривые 1) отмечено, что в последние десятилетия вклад парниковых газов доминирует, особенно при оценке в более широком временном окне. Согласно оценкам  $\tilde{C}_{AMO}$  и  $\tilde{C}_{GHG}$  (рис. 1б, з), на отдельных временных интервалах два фактора вносят в тренд ГПТ сравнимый по абсолютной величине вклад.

В дополнение к результатам анализа в скользящих окнах фиксированной ширины на рис. 2 представлены аналогичные оценки тренда ГПТ и вклада в этот тренд АМО и парниковых газов в скользящем временном окне  $[L_{start}, 2012]$  в зависимости от начала окна  $L_{start}$  при фиксированном конце (2012 г.). Согласно полученным оценкам, на интервалах более 5 десятилетий ( $L_{start} < 1960$  г.) доминирует вклад парниковых газов, а для последних 15—20 лет ( $L_{start}$  — около 1995—2000 гг.) оценки вкладов АМО и парниковых газов близки.

Оценка роли естественных и антропогенных факторов в формировании трендов температуры была проведена для разных широтных зон: арктических, средних и тропических широт Северного полушария. Вариации приповерхностной температуры в арктических широтах наибольшие. При оценках для разных широтных зон использовались авторегрессионные мо-

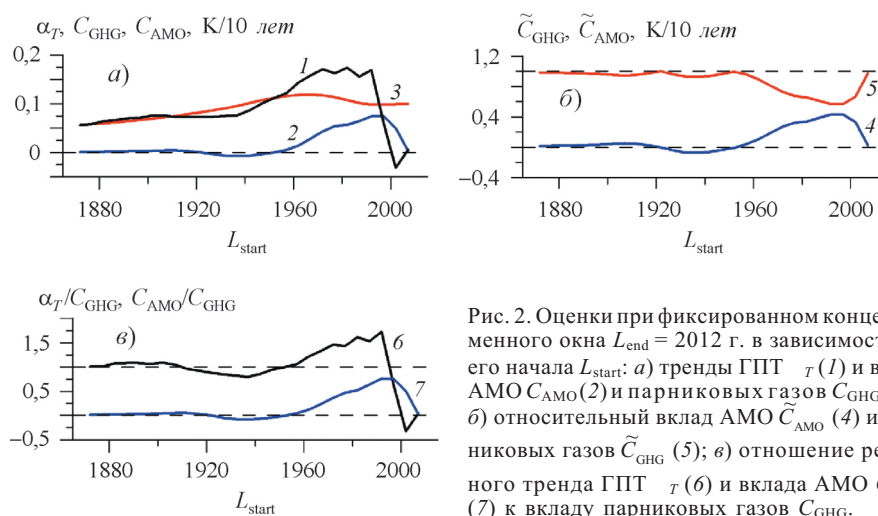


Рис. 2. Оценки при фиксированном конце временного окна  $L_{end} = 2012$  г. в зависимости от его начала  $L_{start}$ : а) тренды ГПТ  $\alpha_T$  (1) и вклад АМО  $C_{AMO}$  (2) и парниковых газов  $C_{GHG}$  (3); б) относительный вклад АМО  $\tilde{C}_{AMO}$  (4) и парниковых газов  $\tilde{C}_{GHG}$  (5); в) отношение реального тренда ГПТ  $\alpha_T$  (6) и вклада АМО  $C_{AMO}$  (7) к вкладу парниковых газов  $C_{GHG}$ .

дели со структурой, аналогичной структуре модели, использованной при анализе трендов ГПТ. При общем подобии временных рядов можно ожидать, что при индивидуальном подборе структуры авторегрессионной модели для разных широтных зон результаты качественно не изменяются [14].

Согласно результатам анализа в скользящих окнах фиксированной ширины, наиболее значим вклад АМО и парниковых газов в изменения температуры в арктических широтах — примерно в полтора раза больше, чем в средних широтах, и вдвое больше, чем в тропических широтах и для земного шара в целом. В арктических широтах вклад АМО в тренд температуры для 30-летних временных окон достигает  $0,15 \text{ K}/10 \text{ лет}$ , а вклад парниковых газов —  $0,22 \text{ K}/10 \text{ лет}$ . Относительный вклад парниковых газов  $\tilde{C}_{GHG}$  одинаков для земного шара и тропиков и меньше для средних широт и Арктики. Согласно полученным результатам, относительная роль АМО  $\tilde{C}_{AMO}$  больше в высоких и средних широтах, а относительная роль парниковых газов  $\tilde{C}_{GHG}$  — в тропиках и глобально.

На рис. 3 приведены результаты для временных окон с фиксированным концом и скользящим началом для разных широтных зон. Итоговые выводы те же: по абсолютной величине вклад обоих факторов в тренд ГПТ практически совпадает с их вкладом в тренд приповерхностной температуры в тропиках, больше вклад в тренд приповерхностной температуры средних широт, еще больше — для арктических широт (рис. 3а, б). Оценки относительного вклада  $\tilde{C}_{AMO}$  близки для глобальной температуры и тропиков (соответственно кривые 4 на рис. 3г, д). Близкие оценки  $\tilde{C}_{AMO}$  получены для высоких и средних широт (соответственно кривые 1, 2 на рис. 3г, д). При этом вариации общего тренда температуры относительно его составляющей, связанной с ростом содержания парниковых газов, на рис. 3е больше для Арктики, чем для других широтных зон.



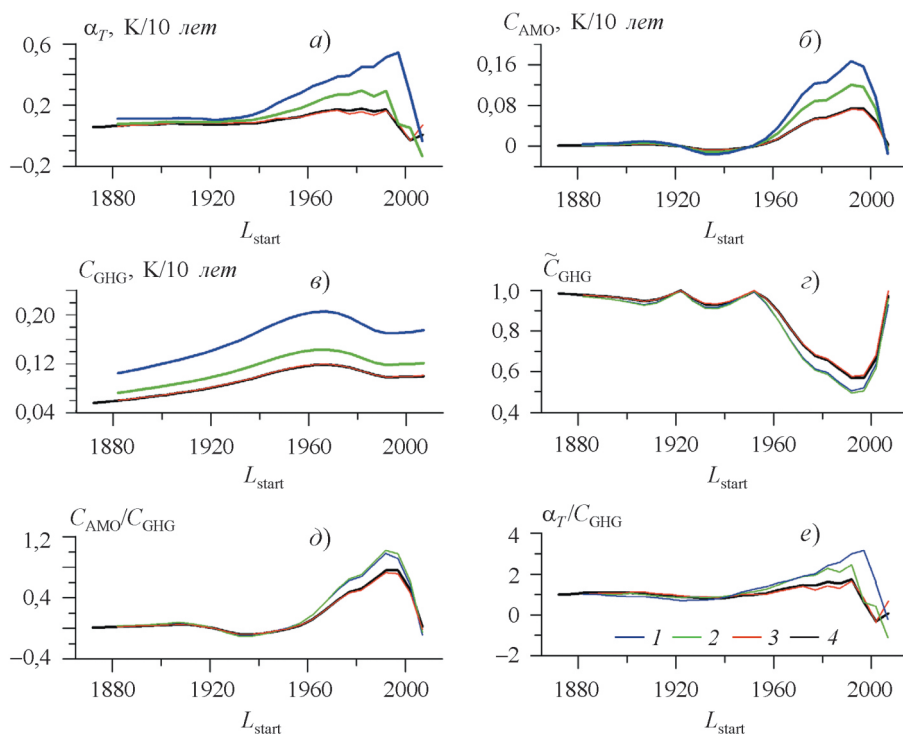


Рис. 3. Оценки трендов приповерхностной температуры  $\alpha_T$  (а) в арктических (1), средних (2) и тропических (3) широтах и ГПТ (4) и соответствующих вкладов в них АМО  $C_{\text{АМО}}$  (б) и парниковых газов  $C_{\text{ГНГ}}$  (в), а также относительного вклада парниковых газов  $\tilde{C}_{\text{ГНГ}}$  (г); отношение вклада АМО к вкладу парниковых газов  $C_{\text{АМО}}/C_{\text{ГНГ}}$  (д) и отношение тренда температуры к вкладу парниковых газов  $\alpha_T/C_{\text{ГНГ}}$  (е).

### Заключение

Согласно полученным результатам, вклад атлантической мультidesятилетней осцилляции в тренд глобальной приповерхностной температуры на интервалах 15—30 лет достигает  $\pm 0,1$  K/10 лет, а на интервалах около 60 лет значимый вклад АМО в тренд ГПТ уже отсутствует. Вклад парниковых газов для последних 6—7 десятилетий оценен в диапазоне 0,1—0,14 K/10 лет на временных интервалах от 15 до 60 лет. Вклады АМО и парниковых газов в 15-летний тренд ГПТ в последние годы близки по величине, причем вклад АМО в тренд ГПТ на интервалах длительностью 15—30 лет может быть даже больше вклада вариаций концентрации парниковых газов (в частности для интервала 1920—1950 гг.). Для надежных выводов о роли парниковых газов в формировании долгопериодных изменений температуры необходимо использовать интервалы времени не менее полувека. В последние десятилетия, согласно полученным оценкам, отношение вклада парниковых газов в тренды температуры к вкладу АМО больше для земного шара в целом и тропиков и меньше — для средних и высоких широт.

Оцененный вклад АМО в тренды ГПТ примерно в полтора раза меньше, чем на основе простой регрессии, аналогичной использованной в работе [28]. В полученных ранее оценках не учитывалась собственная динамика ГПТ, в частности, характеризуемая авторегрессионным членом с ко-

эффицентом  $a_1$  в модели (2). Существенно, что статистическая связь между АМО и ГПТ может быть обусловлена не только влиянием АМО на ГПТ, но и влиянием ГПТ на АМО. В проведенном в данной работе анализе это учитывается с использованием авторегрессионных моделей.

Анализ роли АМО в изменениях ГПТ выполнен при поддержке Правительства РФ (соглашение № 14.Z50.31.0033 с ИПФ РАН). Исследование трендов температуры в разных широтных зонах проведено с использованием результатов, полученных в рамках программ РАН и проектов, поддержанных Министерством образования и науки РФ (грант 14.616.21.0078 (RFMEFI61617X0078)) и РФФИ.

## Литература

1. Алексеев Г. В. Арктическое измерение глобального потепления. — Лед и снег, 2014, т. 54, № 2, с. 58—64.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М., Росгидромет, 2014, 1008 с.
3. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. — Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 2012, 194 с.
4. Мохов И. И. Российские климатические исследования в 2011—2014 гг. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2017, т. 53, № 5, с. 624—640.
5. Мохов И. И. Современные изменения климата Арктики. — Вестник РАН, 2015, т. 85, № 5—6, с. 478—484.
6. Мохов И. И., Безверхний В. А., Елисеев А. В., Карпенко А. А. Взаимосвязь изменений глобальной приповерхностной температуры с изменениями солнечной активности по данным наблюдений и реконструкций для XVII—XX веков и по модельным расчетам. — Доклады АН, 2006, т. 409, № 1, с. 115—119.
7. Мохов И. И., Безверхний В. А., Елисеев А. В., Карпенко А. А. Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке при различных сценариях солнечной и вулканической активности и антропогенных воздействий. — Космические исследования, 2008, т. 46, № 4, с. 363—367.
8. Мохов И. И., Безверхний В. А., Елисеев А. В., Карпенко А. А. Модельные оценки глобальных климатических изменений в XXI веке с учетом различных сценариев вариаций солнечной активности. — Доклады АН, 2006, т. 411, № 2, с. 250—253.
9. Мохов И. И., Карпенко А. А. Моделирование потепления в районе Антарктического полуострова. — Проблемы Арктики и Антарктики, 2007, № 76, с. 7—13.
10. Мохов И. И., Карпенко А. А., Стотт П. А. Наибольшая скорость регионального потепления климата в последние десятилетия с оценкой роли естественных и антропогенных причин. — Доклады АН, 2006, т. 406, № 4, с. 538—543.
11. Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч., Погарский Ф. А. Тенденции климатических изменений в высоких широтах Северного полушария: диагностика и моделирование. — Лед и снег, 2013, т. 53, № 2, с. 53—62.
12. 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.
13. Мохов И. И., Смирнов Д. А. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и глобальной приповерхностной температуры Земли. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2008, т. 44, № 3, с. 283—293.
14. Мохов И. И., Смирнов Д. А. Оценки вклада Атлантической мультисекулярной осцилляции и изменений атмосферного содержания парниковых газов в тренды приповерхностной температуры по данным наблюдений. — Доклады АН, 2018, т. 480, № 1, с. 97—102.
15. Мохов И. И., Смирнов Д. А. Трехкомпонентный анализ сезонных особенностей взаимосвязи между явлениями Эль-Ниньо, североатлантическим колебанием и индийским муссоном. — Метеорология и гидрология, 2016, № 12, с. 18—32.
16. Мохов И. И., Смирнов Д. А. Эмпирические оценки воздействия антропогенных и естественных факторов на глобальную приповерхностную температуру. — Доклады АН, 2009, т. 426, № 5, с. 679—684.
17. Мохов И. И., Смирнов Д. А., Карпенко А. А. Связь изменений глобальной приповерхностной температуры с различными естественными и антропогенными факторами: оценки на основе данных наблюдений. — Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2011, т. 24, с. 71—82.
18. Смирнов Д. А., Мохов И. И. Эмпирическая оценка взаимодействия климатических процессов: эффект редкой выборки рядов анализируемых данных. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2013, т. 49, № 5, с. 530—539.



- 19. Attanasio A.** Testing for linear Granger causality from natural/anthropogenic forcings to global temperature anomalies. — *Theor. Appl. Climatol.*, 2012, vol. 110, No. 1—2, pp. 281—289.
- 20. Attanasio A., Pasini A., and Triacca U.** A contribution to attribution of recent global warming by out-of-sample Granger causality analysis. — *Atmos. Sci. Lett.*, 2012, vol. 13, No. 1, pp. 67—72.
- 21. Attanasio A., Pasini A., and Triacca U.** Granger causality analyses for climatic attribution. — *Atmos. Clim. Sci.*, 2013, vol. 3, pp. 515—522.
- 22. Attanasio A. and Triacca U.** Detecting human influence on climate using neural networks based Granger causality. — *Theor. Appl. Climatol.*, 2011, vol. 103, No. 1—2, pp. 103—107.
- 23. Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. (eds.). — Cambridge, New York, Cambridge Univ. Press, 2013, 1535 p.
- 24. Granger C. W. J.** Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. — *Econometrica*, 1969, vol. 37, No. 3, pp. 424—438.
- 25. Imbers J., Lopez A., Huntingford C., and Allen M. R.** Testing the robustness of the anthropogenic climate change detection statements using different empirical models. — *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, vol. 118, pp. 3192—3199.
- 26. Kaufmann R. K. and Stern D. I.** Evidence for human influence on climate from hemispheric temperature relations. — *Nature*, 1997, vol. 388, pp. 39—44.
- 27. Kodra E., Chatterjee S., and Ganguly A. R.** Exploring Granger causality between global average observed time series of carbon dioxide and temperature. — *Theor. Appl. Climatol.*, 2011, vol. 104, No. 3—4, pp. 325—335.
- 28. Lean J. L. and Rind D. H.** How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. — *Geophys. Res. Lett.*, 2008, vol. 35, L18701.
- 29. Lean J. L. and Rind D. H.** How will Earth's surface temperature change in future decades? — *Geophys. Res. Lett.*, 2009, vol. 36, L15708.
- 30. Pasini A., Triacca U., and Attanasio A.** Evidence of recent causal decoupling between solar radiation and global temperature. — *Environ. Res. Lett.*, 2012, vol. 7, No. 3, 034020.
- 31. Pithan F. and Mauritsen T.** Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. — *Nature Geosci.*, 2014, vol. 7, pp. 181—184.
- 32. Reichel R., Thejll P., and Lassen K.** The cause-and-effect relationship of solar cycle length and the Northern Hemisphere air surface temperature. — *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, No. A8, pp. 15635—15641.
- 33. Smirnov D. A. and Mokhov I. I.** From Granger causality to “long-term causality”: Application to climatic data. — *Phys. Rev. E*, 2009, vol. 80, No. 1, 016208.
- 34. Smirnov D. A. and Mokhov I. I.** Relating Granger causality to long-term causal effects. — *Phys. Rev. E*, 2015, vol. 92, No. 4, 042138.
- 35. Stern D. I. and Kaufmann R. K.** Anthropogenic and natural causes of climate change. — *Climatic Change*, 2014, vol. 122, pp. 257—269.
- 36. Stips A., Macias D., Coughlan C., Garcia-Gorriz E., and San Liang X.** On the causal structure between CO<sub>2</sub> and global temperature. — *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, 21691.
- 37. Sun L. and Wang M.** Global warming and global dioxide emission: An empirical study. — *J. Environ. Management*, 1996, vol. 46, pp. 327—343.
- 38. Tol R. S. J. and de Vos A. F.** A Bayesian statistical analysis of the enhanced greenhouse effect. — *Clim. Change*, 1998, vol. 38, pp. 87—112.
- 39. Tol R. S. J. and de Vos A. F.** Greenhouse statistics—time series analysis. — *Theor. Appl. Climatol.*, 1993, vol. 48, pp. 63—74.
- 40. Triacca U.** Is Granger causality analysis appropriate to investigate the relationship between atmospheric concentration of carbon dioxide and global surface air temperature? — *Theor. Appl. Climatol.*, 2005, vol. 81, pp. 133—135.
- 41. Triacca U.** On the use of Granger causality to investigate the human influence on climate. — *Theor. Appl. Climatol.*, 2001, vol. 69, pp. 137—138.
- 42. Triacca U., Attanasio A., and Pasini A.** Anthropogenic global warming hypothesis: Testing its robustness by Granger causality analysis. — *Environmetrics*, 2013, vol. 24, No. 4, pp. 260—268.
- 43. Verdes P. F.** Assessing causality from multivariate time series. — *Phys. Rev. E*, 2005, vol. 72, 026222.
- 44. Verdes P. F.** Global warming is driven by anthropogenic emissions: A time series analysis approach. — *Phys. Rev. Lett.*, 2007, vol. 99, 048501.
- 45. Wiener N.** Theory of prediction. /In: *Modern Mathematics for the Engineer*. E. F. Beckenbach (ed.). — New York, McGraw-Hill, 1956, pp. 166—186.