

УДК: 551.583

## ОЦЕНКИ ВКЛАДА АТЛАНТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИДЕСЯТИЛЕТНЕЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ И ИЗМЕНЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО СОДЕРЖАНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ТРЕНДЫ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2018 г. Академик РАН И. И. Мохов<sup>1,2,\*</sup>, Д. А. Смирнов<sup>3,4</sup>

Поступило 05.12.2017 г.

Получены количественные оценки вклада антропогенных воздействий, характеризующихся изменениями концентрации парниковых газов в атмосфере, и естественной изменчивости, характеризующей Атлантическую мультидесятилетнюю осцилляцию, в тренды глобальной приповерхностной температуры по данным наблюдений с середины XIX века на основе трёхкомпонентных авторегрессионных моделей.

DOI: 10.7868/S0869565218130200

На фоне векового увеличения глобальной приповерхностной температуры (ГПТ) проявляются периоды её более быстрого роста с 1910-х до 1930-х годов и со второй половины 1970-х до 2000-х и замедления, и даже понижения ГПТ, с 1940-х до середины 1970-х и с начала 2000-х годов. Для установления причин современных изменений ГПТ и оценок возможных изменений в будущем необходимы количественные оценки вклада естественных и антропогенных факторов в изменения ГПТ на разных временных интервалах порядка нескольких десятилетий. Согласно [1], более половины отмеченного увеличения ГПТ с 1951 по 2010 г. очень вероятно (с вероятностью более 90%) связано с антропогенным увеличением атмосферной концентрации парниковых газов (КПГ).

Цель данной работы – оценить вклад изменений КПГ в атмосфере, в частности углекислого газа, и Атлантической мультидесятилетней осцилляции (АМО) в тренды ГПТ по данным инструментальных наблюдений с середины XIX в. Существенное влияние роста КПГ

(преимущественно углекислого газа) на рост ГПТ оценено во многих исследованиях различными методами, в том числе и при учёте АМО и других факторов (солнечной и вулканической активности, Эль-Ниньо–Южного колебания – ЭНЮК и др.) [2–13]. Количественные оценки относительного вклада различных факторов в тренд ГПТ на основе эмпирических данных систематически не проводились. В данной работе анализ ограничивается оценкой вклада АМО и парниковых газов. Это связано с тем, что другие ключевые факторы играют менее существенную роль на анализируемых в данной работе масштабах нескольких десятилетий и ими целесообразно пренебречь для уменьшения числа оцениваемых параметров при имеющемся ограниченном объёме данных наблюдений. Согласно полученным ранее оценкам, вклад вулканической активности и ЭНЮК в вариации ГПТ проявляется на временных масштабах не более нескольких лет (во внутридесятилетней изменчивости), влияние вариаций солнечной активности также относительно слабое на масштабах нескольких десятилетий [14, 15]. Оценки роли АМО и парниковых газов в изменениях ГПТ сопоставляются в данной работе с аналогичными оценками для температурных изменений различных широтных зон.

При анализе использованы среднегодовые данные для ГПТ в 1850–2017 г. (<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/>), радиационного форсинга парниковых газов (с основным вкладом CO<sub>2</sub>) в 1851–2012 г. (<http://data.giss.nasa.gov/>) и индекса АМО для периода 1856–2016 г. (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>). АМО характеризовалась

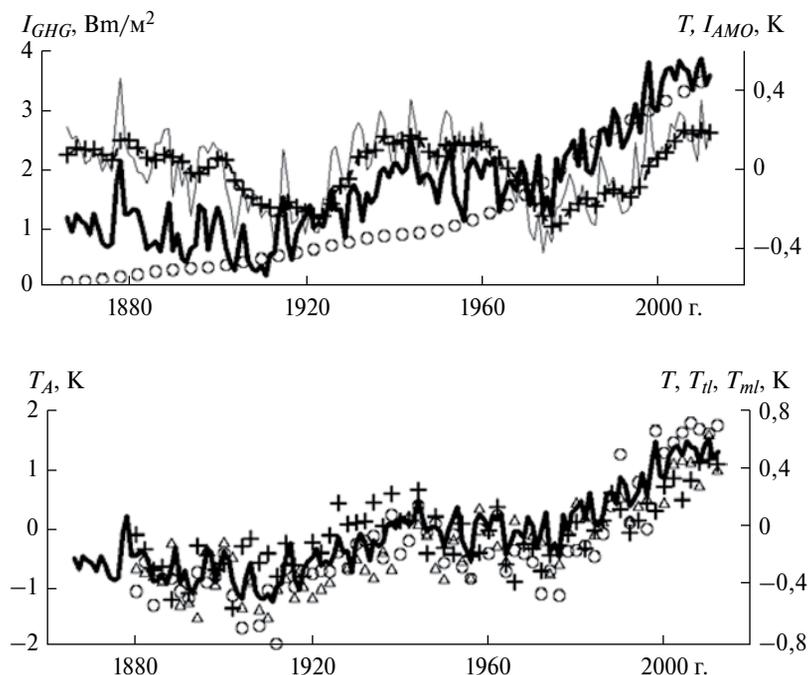
<sup>1</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>3</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской Академии наук

<sup>4</sup> Институт прикладной физики Российской Академии наук, Нижний Новгород

\*E-mail: [mokhov@ifaran.ru](mailto:mokhov@ifaran.ru)



**Рис. 1.** Анализируемые временные ряды: сверху – межгодовые вариации глобальной приповерхностной температуры  $T$  (жирная кривая), индекса АМО  $I_{AMO}$  (тонкая кривая) и радиационного форсинга парниковых газов  $I_{GHG}$  (кружки), крестиками показаны медленные (фильтрованные) изменения индекса АМО; внизу – межгодовые вариации приповерхностной температуры в различных широтных зонах: в Арктике  $T_A$  (крестики), средних  $T_{tl}$  (кружки) и тропических  $T_{tr}$  (треугольники) широтах и для Земли в целом  $T$  (ГПТ, жирная линия).

температурой поверхности Северной Атлантики в широтном поясе  $20^{\circ}$ – $70^{\circ}$  с.ш. с удалением тренда. Кроме того, анализировались среднегодовые данные для приповерхностной температуры в Арктике ( $60^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ), в средних широтах ( $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$ ) и в тропиках ( $0^{\circ}$ – $30^{\circ}$ ) Северного полушария (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/>). При оценках использованы исходные данные для АМО и данные с отфильтрованными внутридесятилетними вариациями. В том числе использовалось скользящее 10-летнее осреднение. Анализируемые временные ряды представлены на рис. 1.

При анализе использованы многокомпонентные авторегрессионные (АР) модели, на основе которых даны оценки причинности по Винеру–Грейнджеру (краткосрочные характеристики) и долгосрочные оценки изменений ГПТ, в том числе трендов на интервалах до 60 лет [14, 15]. Структура (состав слагаемых) АР-моделей определялась при последовательном добавлении индикаторов исследуемых процессов, начиная с характеризующихся наименьшими временными лагами (с условием остановки процедуры по минимуму критерия Шварца; см., например, [12]). Полученная оптимальная эмпирическая модель для связи ГПТ с АМО и парниковыми газами имеет вид

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

где  $T$  – ГПТ,  $n$  – дискретное время (годы),  $I_{GHG}$  – радиационный форсинг парниковых газов,  $I_{AMO}$  – медленная компонента индекса АМО,  $\xi_n$  – шум (остаточные ошибки модели), значения коэффициентов с 95%-ми доверительными интервалами:

$$a_0 = -0,21 \pm 0,07 \text{ К}; \quad a_1 = 0,45 \pm 0,17,$$

$$a_2 = 0,13 \pm 0,04 \text{ К}/(\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}); \quad a_3 = 0,21 \pm 0,16.$$

Краткосрочная оценка воздействия АМО на ГПТ на основе определения причинности по Винеру–Грейнджеру характеризовалась относительным уменьшением ошибки прогноза в модели (1) по сравнению с той же моделью без учёта АМО (аналогично для краткосрочной оценки воздействия парниковых газов). Согласно такому трёхкомпонентному анализу причинности по Винеру–Грейнджеру, влияние обоих факторов на всём анализируемом интервале (1866–2012 г.) статистически значимо, по крайней мере на уровне  $p < 0,05$ . Нормированное улучшение прогноза ГПТ (на год вперёд) составляет 17% для парниковых газов и 4% для АМО. При этом краткосрочная оценка воздействия парниковых газов более устойчива – она практически не меняется и без учёта АМО в АР-моделях, т.е. при двухкомпонентном анализе. Краткосрочная оценка воздействия АМО без учёта парниковых газов статистически незначима и проявляется лишь при их учёте, т.е. при трёхкомпонентном анализе.

Для определения долгосрочных характеристик воздействия АМО (парниковых газов) на ГПТ можно анализировать временные реализации модели (1) при заданных гипотетических режимах АМО (парниковых газов). При этом реализации остаточных ошибок  $\xi_n$ , полученных при оценивании параметров АР-модели, характеризуют заданные внешние (шумовые) воздействия. Определялась разность  $\delta T_n$  между реальными значениями ГПТ и модельными при заданных (гипотетических) условиях. Вклад АМО (парниковых газов) в линейные тренды ГПТ на различных временных интервалах оценивался с использованием линейных трендов полученной разности  $\delta T_n$ . Тренды на интервале  $[L_{start}, L_{end}]$  длительностью  $L = L_{end} - L_{start}$  с варьированием в диапазоне от 5 до 60 лет оценивались разностью  $\delta T_{L_{end}} - \delta T_{L_{start}}$  и коэффициентом  $\alpha_{\delta T}$  линейной регрессии  $\delta T_n = \alpha_{\delta T} n + \beta$  с использованием метода наименьших квадратов. Результаты получены близкими, и далее приводятся результаты для второго подхода с заметно меньшими статистическими флуктуациями при малых трендах и малых  $L$ . Обозначим вклад АМО в тренд ГПТ через  $C_{AMO}$ , а вклад парниковых газов  $C_{GHG}$ . Для сопоставления с этими вкладами рассчитывались оценки тренда самой ГПТ по коэффициенту  $\alpha_T$  регрессии  $T_n = \alpha_T n + \beta$ . Наряду с этим оценивался относительный вклад АМО и парниковых газов следующим образом:

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

При определении вклада АМО в тренды ГПТ использовались, в частности, расчёты с АР-моделью (1) при постоянных (начиная с 1897 г.) значениях индекса АМО, равных среднему за весь исследуемый период. Вклад АМО в общий тренд ГПТ оценен около 0,1 К за десятилетие в 1925–1940 гг., –0,1 К за десятилетие в 1965–1980 гг. и 0,05 К за

десятилетие в 1980–2010 гг. Эти оценки характеризуются относительной погрешностью  $\pm 70\%$ , соответствующей погрешности оценки коэффициента  $a_3$  в АР-модели (1). Близкие результаты получены и при других гипотетических вариациях АМО, в частности, при постоянном индексе АМО с 1920 г. При варьировании ширины временных окон вклад АМО в тренд ГПТ меняется в пределах от –0,1 до 0,1 К/10 лет для 15-летних временных интервалов, в пределах 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. 2, 2). Следует отметить, что даже в широком временном окне в 60 лет проявляется ненулевой, хотя и заметно более слабый, вклад АМО в тренд ГПТ. Это связано с тем, что проявление АМО не строго периодически.

Аналогичные оценки получены и для вклада парниковых газов в тренды ГПТ. При условии стабилизации их радиационного форсинга на уровне 1950 г. величина ГПТ в 2010 г. согласно АР-модели (1) была бы ниже реальной на 0,6 К. Это свидетельствует о том, что вклад парниковых газов в рост ГПТ за последние 6 десятилетий был около 0,1 К за десятилетие. Если бы радиационный форсинг рос в 1950–2010 гг. с той же скоростью, что и до этого – в 1865–1950 гг., то согласно АР-модели (1) ГПТ была бы к середине 2010-х годов ниже на 0,4 К. Это значит, что в последние 6 десятилетий за счёт ускорения роста радиационного форсинга парниковых газов рост ГПТ ускорился на 0,07 К за десятилетие. Если бы форсинг парниковых газов не менялся с 1865 г., то согласно АР-модели (1) ГПТ была бы соответственно ниже на 0,8 К. Это соответствует среднему за весь анализируемый период (более полутора сотен лет) вкладу в тренд ГПТ примерно 0,02 К за десятилетие. При этом вклад парниковых газов составляет от 0,02 К/10 лет до 0,10–0,11 К/10 лет для скользящих интервалов в 60 лет, до 0,12–0,13 К/10 лет для интервалов в 30 лет и до

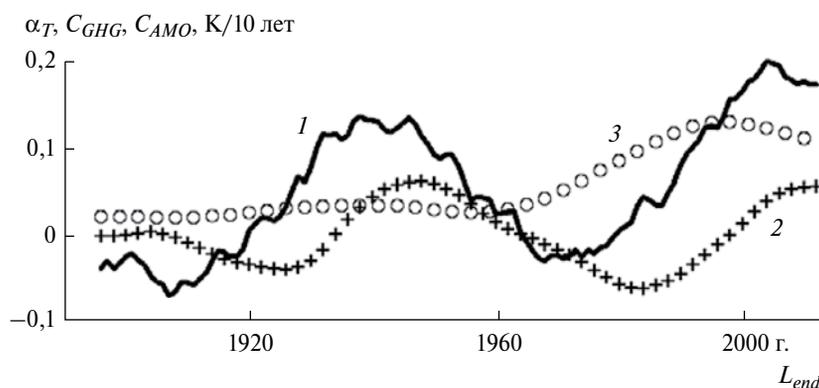
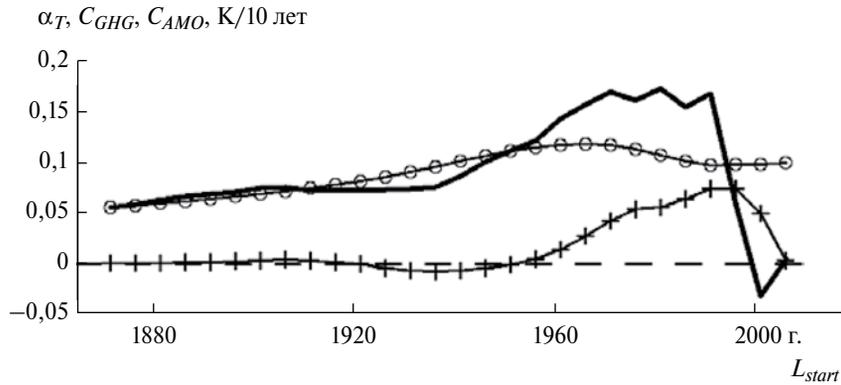


Рис. 2. Оценки трендов ГПТ и вклада разных факторов в скользящем 30-летнем окне в зависимости от конечной границы временного окна  $L_{end}$ : тренды ГПТ  $\alpha_T$  (1) и оценки вкладов, связанных с медленной компонентой АМО  $C_{AMO}$  (2) и радиационным форсингом содержания в атмосфере парниковых газов  $C_{GHG}$  (3).



**Рис. 3.** Оценки при фиксированном конце временного окна  $L_{end}$  (2012 г.) в зависимости от его начала  $L_{start}$ : температурные тренды ГПТ  $\alpha_T$  (жирная кривая) и вклад АМО  $C_{AMO}$  (крестики) и парниковых газов  $C_{GHG}$  (кружки).

0,14 К/10 лет для интервалов в 15 лет (рис. 2, 3). В сопоставлении с общим трендом ГПТ (рис. 2, 1) отмечено, что в последние десятилетия вклад парниковых газов доминирует, особенно при оценке в более широком временном окне. Согласно оценкам  $\tilde{C}_{AMO}$  и  $\tilde{C}_{GHG}$  на отдельных временных интервалах два фактора вносят в тренд ГПТ примерно одинаковый по абсолютной величине вклад.

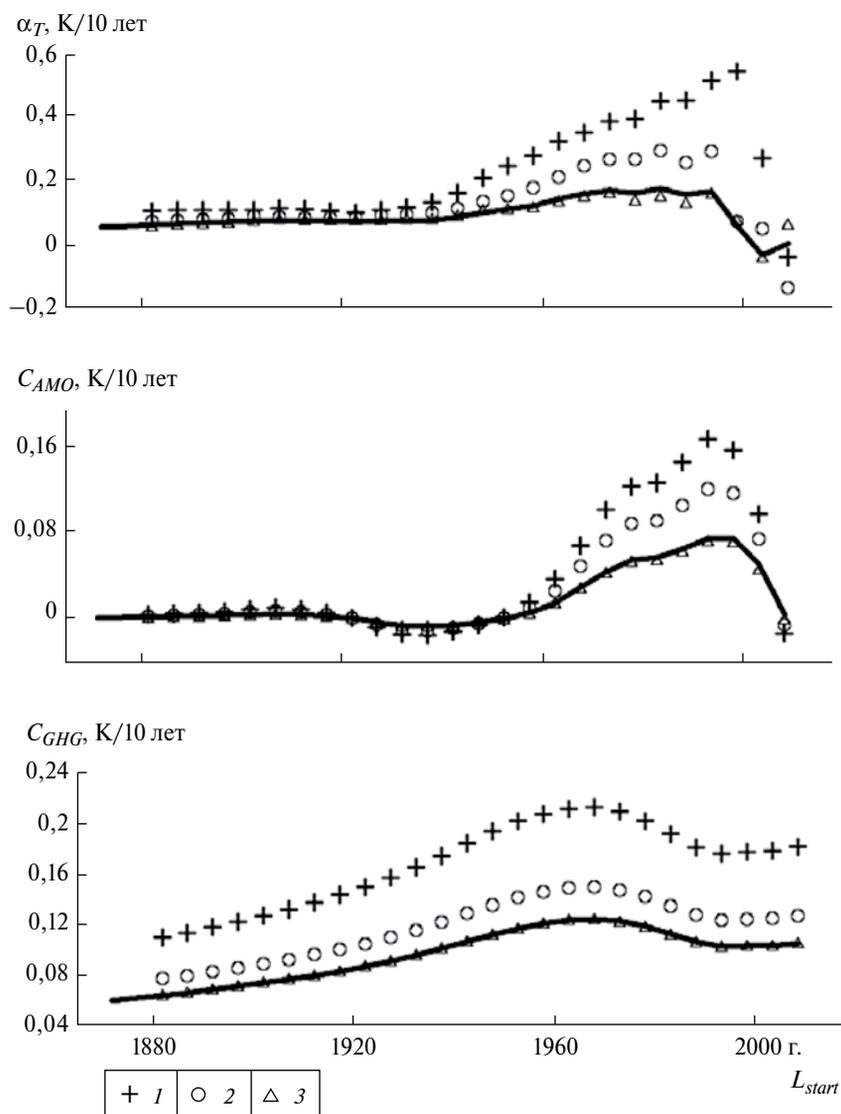
В дополнение к анализу в скользящем окне фиксированной ширины на рис. 3 приведены оценки тренда ГПТ (1) и вклада в этот тренд АМО (2) и парниковых газов (3) в скользящем временном окне  $[L_{start}, 2012]$  в зависимости от начала окна  $L_{start}$  при фиксированном конце (2012 г.). Полученные оценки, а также величины нормированного вклада АМО и парниковых газов в тренд ГПТ и отношения реального тренда ГПТ и вклада АМО к вкладу парниковых газов свидетельствуют о том, что на интервалах длиннее 50 лет ( $L_{start} < 1960$  г.) доминирует вклад парниковых газов, а на интервале последних 15–20 лет ( $L_{start}$  около 1995–2000 гг.) оценки вклада обоих факторов почти одинаковы.

Аналогичный анализ по оценке роли естественных и антропогенных факторов в формировании температурных трендов был проведён для разных регионов. На рис. 1 представлены соответствующие межгодовые вариации приповерхностной температуры в различных широтных зонах: в Арктике, в средних и тропических широтах Северного полушария, а также для Земли в целом. Вариации приповерхностной температуры в арктических широтах наиболее сильные, и на рис. 1 они характеризуются отдельной шкалой. Для единообразия при оценке для разных широтных зон использовалась полученная при анализе трендов ГПТ структура АР-модели. Общее подобие временных рядов на рис. 1 даёт основания ожидать, что при индивидуальном подборе структуры АР-модели для разных широтных зон результаты принципиально не изменятся.

При оценивании в скользящих окнах фиксированной ширины наиболее сильный вклад АМО и парниковых газов в температурные изменения проявляется в арктических широтах — примерно в полтора сильнее, чем в средних широтах, и вдвое сильнее, чем в тропических широтах и для Земли в целом. В арктических широтах вклад АМО в температурный тренд для 30-летних временных окон достигает 0,15 К/10 лет, а вклад парниковых газов — 0,22 К/10 лет. Относительный вклад парниковых газов в сравнении с вкладом АМО одинаков для ГПТ и тропиков и меньше для средних широт и Арктики. Полученные результаты свидетельствуют: относительная роль АМО сильнее в средних и высоких широтах, а относительная роль парниковых газов сильнее в тропиках и глобально.

Сопоставление результатов для временных окон с фиксированным концом и скользящим началом представлено на рис. 4. По абсолютной величине вклад парниковых газов и АМО в изменения ГПТ совпадает с их вкладом в изменения тропической температуры, сильнее влияние обоих факторов на изменения температуры средних широт, еще сильнее — в арктических. Согласно полученным оценкам, относительный вклад АМО и парниковых газов близок для глобальной температуры и тропиков. Подобные оценки получены также для средних и высоких широт. При этом вариации общего тренда температуры (относительно его компоненты, связанной с ростом парниковых газов) больше для Арктики, чем для других широтных зон.

В целом, согласно полученным результатам, вклад АМО на интервалах 15–30 лет достигает  $\pm 0,1$  К/10 лет, а на интервалах около 60 лет значимый вклад АМО в тренд ГПТ уже отсутствует. Вклад парниковых газов в последние 60–70 лет оценен в диапазоне 0,1–0,14 К/10 лет на временных интервалах от 15 до 60 лет. До 1950 г. вклад парниковых газов оценен около 0,02 К/10 лет. Вклады АМО и парниковых газов в 15-летний



**Рис. 4.** Оценки трендов приповерхностной температуры  $\alpha_T$  в арктических (1), средних (2) и тропических (3) широтах и ГПТ (жирные линии) и соответствующие оценки вклада в них АМО  $C_{AMO}$  и парниковых газов  $C_{GHG}$ .

тренд ГПТ в последние годы уменьшались, будучи положительными и близкими друг к другу по величине – около 0,08 К/10 лет для АМО и 0,1 К/10 лет для парниковых газов. Вклад АМО в тренд ГПТ на интервалах длительностью 15–30 лет время от времени становится сопоставимым по абсолютной величине с вкладом вариаций атмосферной концентрации парниковых газов. Иногда вклад АМО даже больше, например на интервале 1920–1950 гг. Для надёжных выводов о вкладе парниковых газов в тренд ГПТ необходимо использовать достаточно большие интервалы времени – около полувека и более. Согласно полученным оценкам, в последние десятилетия относительно больший вклад парниковые газы вносят в тренды ГПТ и приповерхностной температуры в тропиках

и меньший – в тренды приповерхностной температуры средних и высоких широт.

Следует отметить, что вклад АМО в тренды ГПТ на основе простой регрессии (аналогично использованной в [5]) оценен примерно в полтора раза большим, чем в данной работе. Это связано с тем, что в полученных ранее оценках не учитывалась собственная динамика ГПТ (в частности, характеризуемая авторегрессионным членом с коэффициентом  $a_1$  в АР-модели), а статистическая связь между АМО и ГПТ может быть обусловлена не только зависимостью ГПТ от АМО, но и влиянием ГПТ на АМО. Это учитывается при использованном в данной работе анализе с использованием АР-моделей.

Анализ воздействий на глобальную температуру проведён при поддержке Правительства РФ (соглашение № 14.Z50.31.0033 с ИПФ РАН). Исследование температурных трендов в различных широтных зонах выполнено в рамках проектов, поддержанных Министерством образования и науки РФ (14.616.21.0078) с использованием результатов, полученных в рамках проектов РФФИ и программ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2013: 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 Eds. Cambridge; N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
2. Мохов И.И., Карпенко А.А., Стотт П.А. // ДАН. 2006. Т. 406. № 4. С. 538–543.
3. Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. // ДАН. 2006. Т. 411. № 2. С. 250–253.
4. Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. // Космич. исслед. 2008. Т. 46. № 4. С. 363–367.
5. Lean J.L., Rind D.H. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L18701.
6. Lean J.L., Rind D.H. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L15708.
7. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ–МЦД, 2012. 194 с.
8. Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А. // ДАН. 2012. Т. 443. № 2. С. 225–231.
9. Imbers J., Lopez A., Huntingford C., Allen M.R. // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 3192–3199.
10. Stern D.I., Kaufmann R.K. // Clim. Change. 2014. V. 122. P. 257–269.
11. Мохов И.И. // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 5/6. С. 478–484.
12. Мохов И.И., Смирнов Д.А. // ДАН. 2016. Т. 467. № 5. С. 580–584.
13. Мохов И.И. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 624–640.
14. Мохов И.И., Смирнов Д.А. // ДАН. 2009. Т. 426. № 5. С. 679–684.
15. Smirnov D.A., Mokhov I.I. // Phys. Rev. E. 2009. V. 80. 016208.