

УДК 551.583

## ОЦЕНКА ВКЛАДА ПРЯМОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ИЗМЕНЕНИЯ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

© 2021 г. Член-корреспондент РАН В. А. Семенов<sup>1,2,\*</sup>, М. А. Алешина<sup>1,2</sup>

Поступило 07.12.2020 г.

После доработки 21.12.2020 г.

Принято к публикации 24.12.2020 г.

Выполнены оценки вклада прямого радиационного воздействия (ПРВ) в тренды приземной температуры над сушей Северного полушария (СП) в период 1979–2012 гг. с помощью анализа данных ансамблевых численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы с предписанными (по данным наблюдений) значениями температуры поверхности океана и концентрации морских льдов с постоянными и меняющимися со временем концентрациями парниковых газов и аэрозолей. Вклад ПРВ в средние по модельным ансамблям изменения температуры над сушей СП зимой и летом составляет около 30%, или 0.3°C и 0.2°C соответственно. Максимумы потепления, связанного с ПРВ, обнаружены, в частности, зимой и летом на востоке Европейской территории России. Результаты указывают, что отклик атмосферной циркуляции на ПРВ может приводить к нелинейному вкладу растущего радиационного воздействия на потепление в СП, в частности, приводя к замедлению роста температуры в зимний сезон.

*Ключевые слова:* изменения климата, тренды температуры, радиационное воздействие, модель атмосферы, атмосферная циркуляция

DOI: 10.31857/S2686739721040150

### ВВЕДЕНИЕ

За период с 1979 по 2012 г. среднегодовая приповерхностная температура над сушей Северного полушария (СП) выросла примерно на 1°C. Температура поверхности океана (ТПО) в СП за тот же период выросла примерно на 0.4°C. Такая разница в температурных трендах над сушей и океаном является следствием как большей, минимум на два порядка, теплоемкости деятельного слоя океана по сравнению с деятельным слоем суши, так и фундаментальными особенностями теплообмена между океаном и атмосферой над сушей. Испарение с поверхности океана, атмосферный перенос и конденсация водяного пара с выделением тепла над сушей всегда приводят к большим аномалиям температуры над сушей, чем вызвавшие их аномалии ТПО [1]. Оценки роста глобального теплосодержания верхних 2000 м океана в анализируемый период (около  $5 \times 10^{21}$  Дж/год) сравнимы с оценками антропогенного радиаци-

онного воздействия (около 1 Вт/м<sup>2</sup>) [2], что, с учетом в 2.5 раза более медленного нагрева океана, подразумевает скорее опосредованное влияние антропогенного радиационного воздействия на температуру над сушей через рост ТПО, чем через прямое радиационное воздействие.

Количественные оценки относительного вклада изменений ТПО и прямого (главным образом антропогенного, ввиду роста концентрации парниковых газов в атмосфере) радиационного воздействия (ПРВ) в потепление над сушей в современный период характеризуются значительной неопределенностью. Такие оценки, как правило, делаются на основе анализа результатов численных экспериментов с моделями общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с предписанными изменениями ТПО и концентрации морских льдов согласно данным наблюдений. Разброс при этом составляет от доминирующей роли ТПО (вклад 80–90%) [1, 2] до сравнимого вклада (около 40–50%) изменений ТПО и ПРВ [4, 5]. Результат при этом зависит от чувствительности моделей к радиационным воздействиям разной природы (вследствие изменений концентраций парниковых газов, аэрозолей, стратосферного озона), а также возможного отклика атмосферной циркуляции на радиационные воздействия. Задача

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

<sup>2</sup> Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: vasesmenov@ifaran.ru

усложняется и тем, что наблюдаемые изменения являются лишь одной реализацией земной климатической системы, которая может претерпевать значительные флуктуации и без внешнего радиационного воздействия вследствие внутренней стохастической динамики атмосферы и океана на различных временных масштабах [6].

В данной работе анализируются данные численных экспериментов с МОЦА с предписанными значениями ТПО и концентраций морских льдов с постоянным и меняющимся радиационным воздействием в период 1979–2012 гг. Используются ансамблевые расчеты с идентичными данными на нижней границе атмосферы и радиационным воздействием, но с разными начальными условиями. Большое количество членов ансамбля (30) позволяет эффективно отфильтровать изменения, связанные с внутренней изменчивостью атмосферы и выделить сигнал, связанный с граничными условиями и радиационным воздействием.

#### ПОСТАНОВКА МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

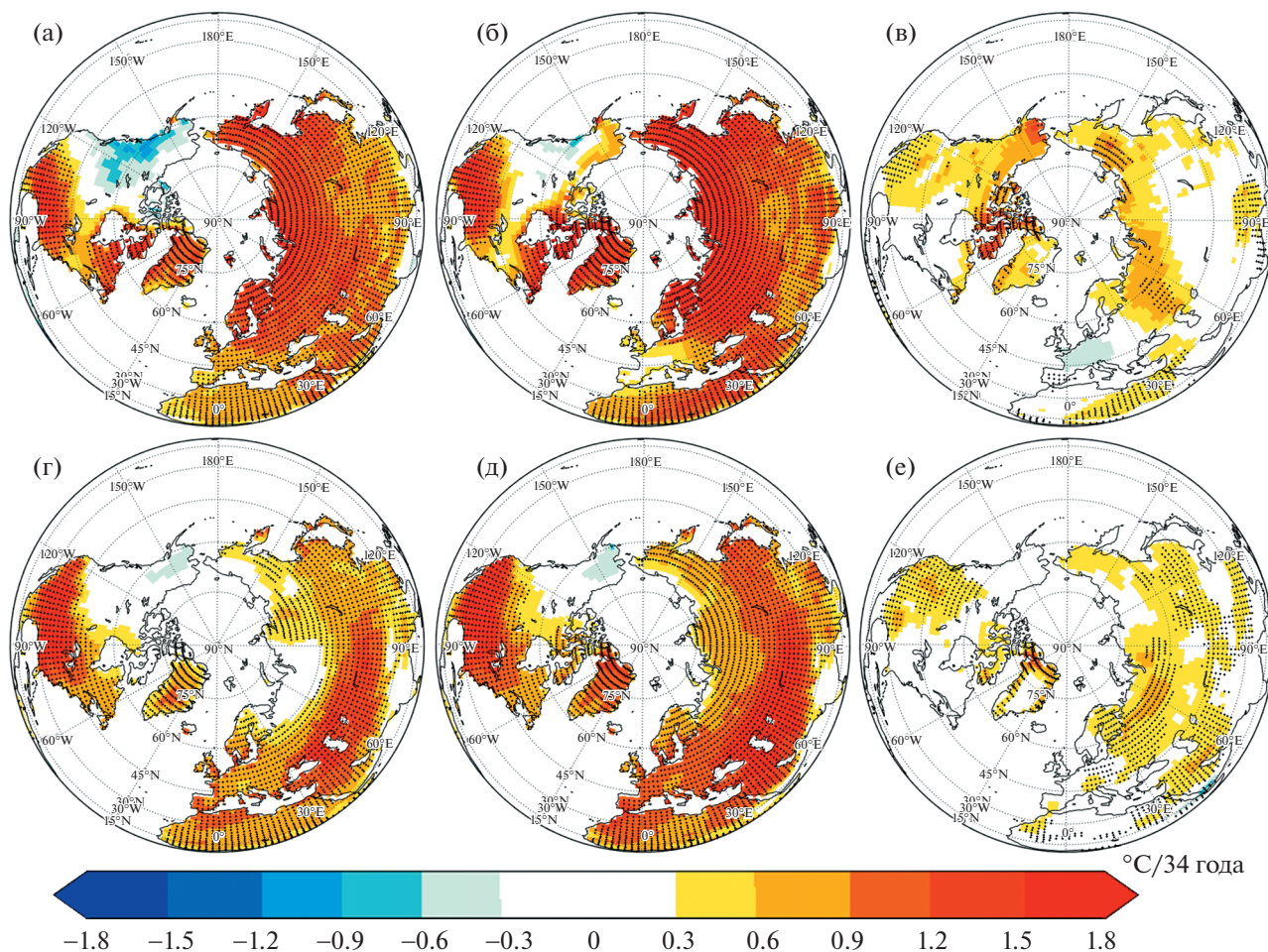
Анализируемые численные эксперименты выполнялись с моделью общей циркуляции атмосферы (МОЦА) ECHAM5 [7]. МОЦА имеет спектральное горизонтальное разрешение T63 (примерно  $1.8^\circ \times 1.8^\circ$  по широте и долготе) и 31 вертикальный уровень. В каждом численном эксперименте в модели задавались граничные условия на нижней границе атмосферы – поля температуры поверхности океана (ТПО) и концентрации морского льда (КМЛ, доля модельной ячейки, покрытая морским льдом) по данным объективного анализа наблюдений HadISST1.1 Центра Гадлея (Великобритания) [8] за период 1979–2012 гг. Выбор такого периода связан с наличием непрерывных спутниковых данных по КМЛ с 1979 г. Было выполнено два ансамбля численных экспериментов. В первом ансамбле (A1) концентрации парниковых газов в модели были постоянными для всех экспериментов (концентрация  $\text{CO}_2$  348 ppm, метана 1.64 ppm, что соответствует глобальным концентрациям в середине анализируемого периода). Все остальные параметры внешнего воздействия на атмосферу (орбитальные параметры, характеристики солнечной радиации и др.) соответствовали стандартным для современного климата значениям и были постоянными. В другом ансамбле (A2) концентрации радиационно активных газовых примесей и аэрозолей изменялись со временем согласно эмпирическим оценкам (до 2005 г.) и сценарию RCP8.5 (для 2006–2012 гг.) согласно протоколу международного проекта сравнения климатических моделей CMIP5 [9]. Единственным различием между индивидуальными экспе-

риментами каждого ансамбля являлись начальные условия (состояние атмосферы на 1 января 1979 г.), которые задавались как мгновенные состояния атмосферы в различные 12-часовые интервалы в декабре 1978 г. Всего было выполнено по  $M = 30$  экспериментов с идентичными граничными и различными начальными условиями для каждого ансамбля. В такой постановке экспериментов изменения со временем средних по ансамблю климатических характеристик атмосферы являются оценкой воздействия изменений ТПО и КМЛ для ансамбля A1 и ТПО, КМЛ плюс меняющегося внешнего радиационного воздействия для ансамбля A2. Таким образом, разница между средними для ансамблей A2 и A1 величинами является оценкой отклика исключительно внешнего радиационного воздействия. Относительно большое число членов ансамблей в нашем случае позволяет эффективно фильтровать внутреннюю стохастическую изменчивость атмосферы и снизить отношения сигнал–шум для получения статистически значимых оценок. В схожих по постановке экспериментах [4, 5, 10] количество членов ансамбля составляло не более 4. Далее анализируются линейные тренды за 34-летний период 1979–2012 гг. приземной температуры воздуха (ПТВ) над сушей и давления на уровне моря средние для зимы СП (декабрь–февраль) и лета (июнь–август) с оценкой их статистической значимости на уровне 0,05.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Тренды средней по ансамблям A1 и A2 ПТВ над сушей СП для зимы и лета за период 1979–2012 гг., а также разности между этими трендами показаны на рис. 1. Ввиду того, что температура поверхности океана была предписана, значения ПТВ над океанами не показаны. Зимой модель, как отклик исключительно на изменения ТПО и КМЛ (рис. 1а), воспроизводит статистически значимое потепление над сушей СП практически для всех регионов за исключением северо-западной части Северной Америки, где отмечаются (статистически незначимые) отрицательные тренды ПТВ. Над территорией Евразии тренды ПТВ статистически значимы и в целом характеризуются большими значениями в северных регионах и над территорией России. Отсутствие потепления в северо-восточной части Северной Америки может быть связано с тенденцией к переходу к отрицательной фазе Тихоокеанской десятилетней осцилляции в анализируемый период, сопровождающейся адвекцией арктических воздушных масс в этот регион.

Добавление антропогенного радиационного воздействия приводит в целом к увеличению трендов зимних температур (рис. 1б). Увеличение происходит неравномерно (рис. 1в) и статистиче-



**Рис. 1.** Тренды (1979–2012 гг.) приповерхностной температуры воздуха (в  $^{\circ}\text{C}/34$  г.) зимой (верхний ряд) и летом (нижний ряд) средние для ансамбля A1 (а, г) и A2 (б, д), а также разница A2–A1 (в, е). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды и их разности отмечены точками.

ски значимо лишь в отдельных регионах: в восточной части Европейской территории России, где вклад ПРВ превышает  $0.6^{\circ}\text{C}/34$  г., что составляет более 40% величины среднего по ансамблю A2 тренда температуры (рис. 1б), на северо-западе Канады и в северо-восточной Сибири. Добавление ПРВ также приводит к статистически значимому увеличению трендов ПТВ в Южной Азии, Северной Африке и на востоке центральной части Северной Америки. Следует отметить отсутствие статистически значимого потепления в Европе как отклика на совместное воздействие ТПО, КМЛ и ПРВ в ансамбле A2 (рис. 1в).

Летом (рис. 1г–е) эффект ПРВ выражается в статистически значимом увеличении роста температуры в большинстве регионов суши с максимальным ростом в регионе Северного Урала и на востоке Северной Америки. Картина отклика модельной ПТВ над сушей на изменения ТПО, КМЛ и ПРВ характеризуется максимальными трендами в субтропических широтах.

Изменения ПТВ вследствие прямого радиационного воздействия могут происходить не только из-за изменения радиационного баланса поверхности и нижней атмосферы, но и в результате отклика атмосферной циркуляции на ПРВ. Оценки такого отклика и отклика на изменения ТПО и КМЛ (аналогично оценкам изменений ПТВ на рис. 1) приведены на рис. 2. Видно, что изменения исключительно ТПО и КМЛ зимой приводят главным образом к сильной положительной аномалии давления над Северным Тихим океаном (рис. 2а). Добавление ПРВ приводит также к значительному повышению давления над северной частью Северной Атлантики и статистически значимому росту давления на юге центральной Сибири (рис. 2б,в). В целом такая пространственная структура с тремя центрами положительных аномалий давления качественно согласуется с аномалиями давления для начала XXI века по данным наблюдений (см., напр., [11]). Проведенные эксперименты показывают, что повышение дав-

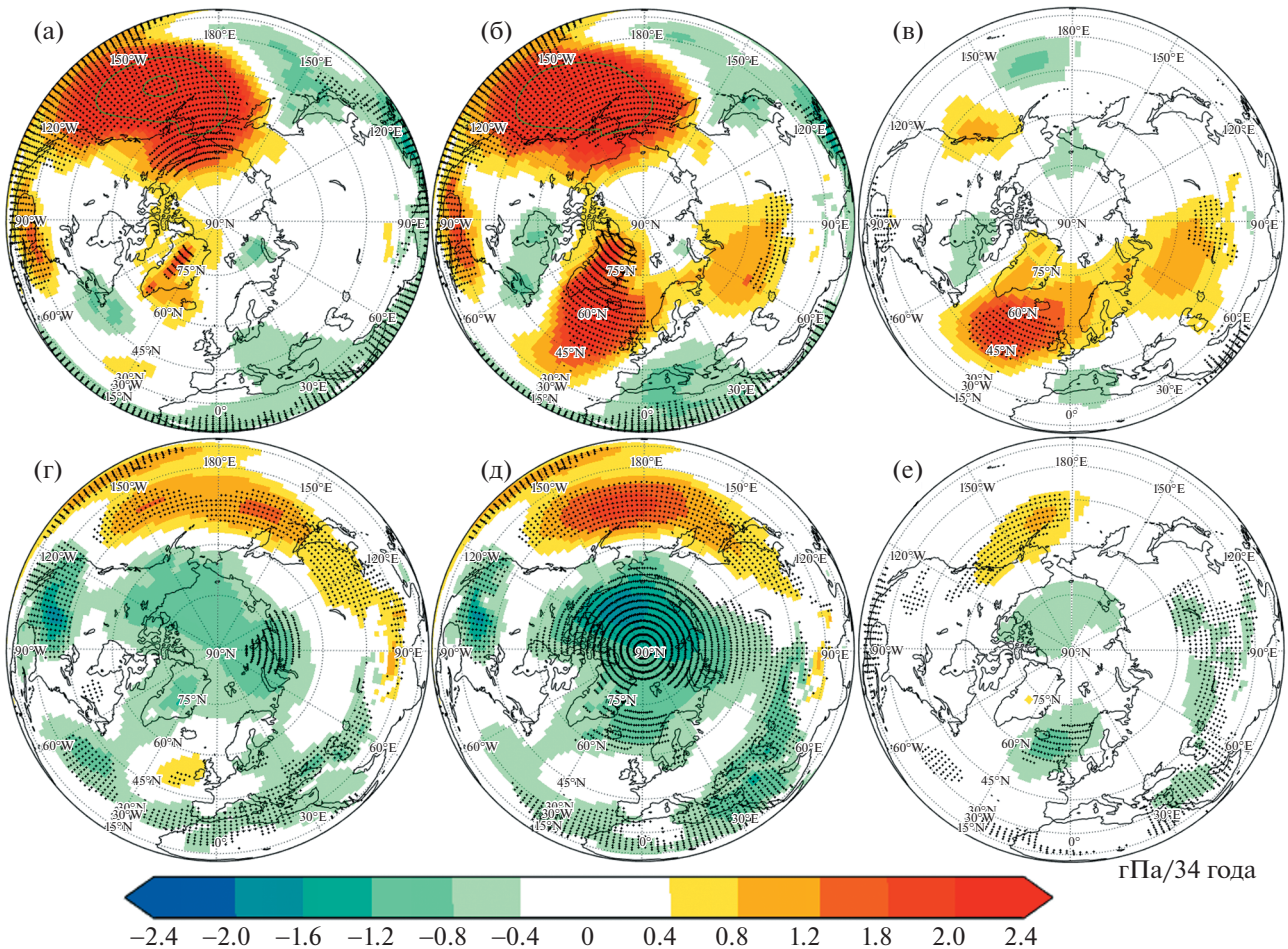


Рис. 2. Аналогично рис. 1, но для давления воздуха на уровне моря (тренды в гПа/34 г.).

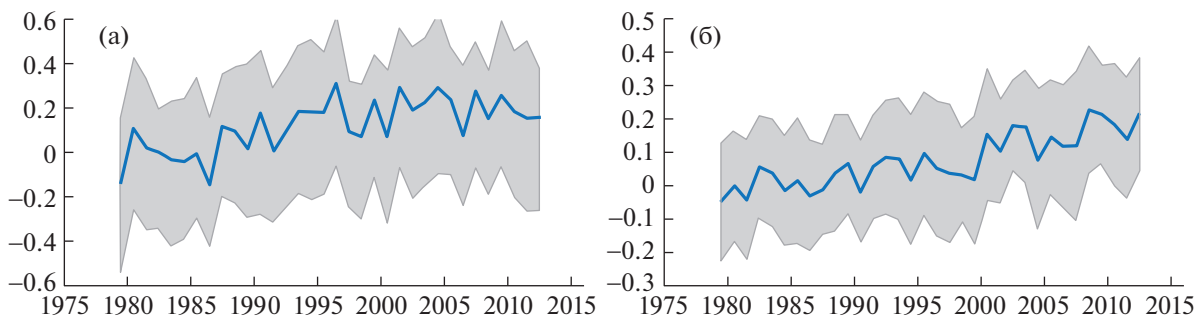


Рис. 3. Разности между средними по ансамблям А2 и А1 значениями приземной температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) над сушей СП для (а) зимы и (б) лета. Серой штриховкой показан 95%-ный доверительный интервал внутриансамблевых изменений.

ления в Тихом океане происходит при изменении только ТПО и КМЛ, в то время как рост давления в атлантическом секторе и на юге Сибири является откликом на ПРВ.

Летом отклик на изменения ТПО и КМЛ проявляется в понижении давления в Арктике и в субтропическом секторе от  $120^{\circ}$  з.д. до  $90^{\circ}$  в.д. с повышением давления над севером Северного Тихого океана (рис. 2г). Добавление ПРВ, в отли-

чие от зимы, не меняет пространственной структуры трендов и приводит в целом к усилению величины трендов, как отрицательных над Арктикой и в обозначенной субтропической зоне, так и положительных над Северным Тихим океаном (рис 2д, 2е).

Осредненный для суши СП вклад ПРВ в изменения приземной температуры по данным модельных расчетов для зимы и лета показан на рис. 3. По

данным ансамбля A1 в результате изменений ТПО и КМЛ тренд температуры зимой составил  $0.72^{\circ}\text{C}/34$  г., а с добавлением ПРВ (ансамбль A2) вырос до  $1.00^{\circ}\text{C}/34$  г., что хорошо согласуется с трендом по данным наблюдений (CRU TS v.4.03 [12])  $1.06^{\circ}\text{C}/34$  г. Летом ПРВ увеличивает температурный тренд с  $0.59$  до  $0.82^{\circ}\text{C}/34$  г. при наблюдаемом тренде  $1.01^{\circ}\text{C}/34$  г. Таким образом, и зимой и летом вклад ПРВ в модельные изменения трендов температуры над сушей составляет около 30% или  $0.3^{\circ}\text{C}$  и  $0.2^{\circ}\text{C}$  соответственно. Следует отметить, что если рост температуры вследствие ПРВ летом происходил практически линейно, то зимой рост прекратился в середине 1990-х годов. Это, по всей видимости, связано с вызванным ПРВ откликом атмосферной циркуляции, в частности с повышением давления в атлантическом секторе (рис. 2г, д).

## ВЫВОДЫ

Проведен анализ данных ансамблевых численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы ЕНСАМ5 с предписанными (по данным наблюдений) значениями ТПО и КМЛ в период 1979–2012 гг. с постоянными и меняющимися со временем концентрациями парниковых газов и аэрозолей. Каждый ансамбль состоял из 30 численных экспериментов с одинаковыми граничными условиями и радиационным воздействием, но с разными начальными условиями, что позволяло, усредняя по членам ансамбля, оценить относительный вклад изменений ТПО, КМЛ и прямого радиационного воздействия (ПРВ) в тренды температуры над сушей Северного полушария.

Результаты показывают, что вклад ПРВ в модельные изменения трендов приземной температуры зимой и летом составляет около 30% от совместного эффекта ТПО, КМЛ и ПРВ, или  $0.3^{\circ}\text{C}$  и  $0.2^{\circ}\text{C}$  соответственно. Наибольшее потепление (превышающее  $0.6^{\circ}\text{C}/34$  г.), связанное с ПРВ над континентами СП, обнаружено зимой в ограниченных регионах на востоке Европейской территории России, в регионе Канадского архипелага и на Аляске. Летом область статистически значимого вклада ПРВ больше и охватывает северо-западные части континентов и их субтропические зоны.

ПРВ в модели оказывает значимое влияние и на тренды давления на уровне моря, приводя к повышению давления зимой на севере Атлантики и в центральной части Южной Сибири, в то время как повышение давления над северным Тихим океаном связано с изменениями ТПО и КМЛ. Летом вклады ТПО и КМЛ и, отдельно, ПРВ, атмосферы, и приводят к понижению давления над Арктикой и в субтропиках над континентами СП и повышению давления над Тихим океаном.

Изменения атмосферной циркуляции зимой оказывают влияние на тренды температуры. Результаты указывают, что отклик атмосферной циркуляции может приводить к нелинейному вкладу растущего радиационного воздействия на потепление в СП, в частности, приводя к замедлению роста температуры в зимний сезон. Повышение давления над северной Атлантикой и югом центральной Сибири как отклик на ПРВ качественно согласуется с наблюдаемой аномалией в начале XXI века [11], связанной с формированием аномально холодных зим в Северной Евразии [13], что указывает на возможный вклад ПРВ.

Следует также отметить, что при анализе численных экспериментов с МОЦА с предписанными изменениями ТПО согласно данным наблюдений на временном масштабе, больше десятилетия, изменения ТПО связаны с динамикой океана и могут рассматриваться как независимое внешнее воздействие, в то время как на меньшем временном масштабе атмосфера может сама формировать аномалии ТПО [14]. Использование таких аномалий в качестве внешнего (по отношению к атмосфере) воздействия может приводить к качественно схожему с наблюдаемым отклику, но это не является свидетельством влияния ТПО на наблюдаемые изменения (см., например, [15]).

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dommengot D.* The Ocean's Role in Continental Climate Variability and Change // *Journal of Climate* // 2009. V. 22 (18). P. 4939–4952.
2. *Stocker T., ed.* Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2014.
3. *Compo G.P., Sardeshmukh P.D.* Oceanic Influences on Recent Continental Warming // *Climate Dynamics*. 2009. V. 32. P. 333–342.
4. *Folland C.K., Sexton D.M.H., Karoly D.J., Johnson C.E., Rowell D.P., Parker D.E.* Influences of Anthropogenic and Oceanic Forcing on Recent Climate Change // *Geophysical Research Letters*. 1998. V. 25. P. 353–356.
5. *Andrews T.* Using an AGCM to Diagnose Historical Effective Radiative Forcing and Mechanisms of Recent Decadal Climate Change // *Journal of Climate*. 2014. V. 27 (3). P. 1193–1209.
6. *Демченко П.Ф., Семенов В.А.* Оценка неопределенности климатических трендов приповерхностной температуры, связанной с внутренней динамикой атмосферы // *ДАН*. 2017. Т. 476. № 3. С. 339–342.
7. *Roeckner E., Bauml G., Bonaventura L.* The Atmospheric General Circulation Model ECHAM5. Part I:

- Model Description, Rep. 349. Hamburg: Max Planck Inst. for Meteorol. 2003. 140 p.
8. 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 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003. V. 108. № D14. P. 4407.
  9. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. V. 93. № 4. P. 485–498.
  10. Deser C., Phillips, A.S. Atmospheric Circulation Trends, 1950-2000: Relative Roles of Sea Surface Temperature Forcing and Direct Atmospheric Radiative Forcing // *Journal of Climate*. 2009. V. 22. P. 396–413.
  11. Semenov V.A., Latif M. Nonlinear Winter Atmospheric Circulation Response to Arctic Sea Ice Concentration Anomalies for Different Periods During 1966–2012 // *Environmental Research Letters*. 2015. V. 10. № 5. P. 054020.
  12. Harris I. P. D. J., Jones P. D., Osborn T. J., Lister D. H. Updated High-resolution Grids of Monthly Climatic Observations—the CRU TS3. 10 Dataset // *International journal of climatology*. 2014. V. 34. № 3. P. 623–642.
  13. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 2. С. 16–28.
  14. Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., Park W., Koltermann K.P. North Atlantic Ocean Control on Surface Heat Flux on Multidecadal Timescales // *Nature*. 2013. V. 499. P. 464–467.
  15. Bretherton C.S., Battisti D.S. An Interpretation of the Results from Atmospheric General Circulation Models Forced by the Time History of the Observed Sea Surface Temperature Distribution // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 767–770.

## ESTIMATES OF DIRECT RADIATIVE FORCING IMPACT ON SURFACE AIR TEMPERATURE CHANGES IN THE MODERN PERIOD

Corresponding member of the RAS V. A. Semenov<sup>a,b,#</sup> and M. A. Aleshina<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>#</sup> E-mail: vasesmenov@ifaran.ru

Estimates of a direct radiative forcing (DRF) contribution to the surface air temperature trends over Northern Hemisphere (NH) continents during 1979–2012 period are obtained based on ensemble simulations with an atmosphere general circulation model using prescribed historical sea surface temperature and sea ice concentration data with and without time-varying concentrations of greenhouse gases and aerosols in the atmosphere. Contribution of DRF to the simulated ensemble mean temperature changes in winter and summer is about 30% or 0.3°C and 0.2°C, respectively. Maximal warming associated with DRF in both winter and summer is found in particular over the eastern part of European Territory of Russia. The results show that the atmosphere circulation response to DRF may lead to a non-linear DRF contribution to the NH temperature change, in particular mitigating the warming in winter season.

*Keywords:* climatic trends, internal atmospheric variability, atmosphere model