«Оптика атмосферы и океана», **36**, № 2 (2023)
DOI: 10.15372/AOO20230209

УДК 551.51

Атмосферные блокирования в Северном полушарии и связанные с ними природные пожары и эмиссии примесей в атмосферу в российских регионах

И.И. Мохов[1, 2]*

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3
[2] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1

Поступила в редакцию 4.10.2022 г.;
после доработки 10.11.2022 г.;
принята к печати 20.12.2022 г.

Проведен анализ атмосферных блокирований в регионах Северного полушария на фоне общего потепления в последние десятилетия. Получены оценки общего роста продолжительности летних атмосферных блокирований при увеличении полушарной приповерхностной температуры для периода 1969–2022 гг. с использованием данных наблюдений и реанализа. Отмечена значимая когерентность долгопериодных изменений интегрального индекса активности летних атмосферных блокирований для российских регионов и Северном полушарии в целом. Приведены оценки статистически значимой связи природных пожаров и соответствующих газовых и аэрозольных эмиссий в атмосферу в российских регионах с использованием спутниковых данных и данных реанализа. Представлены оценки статистически значимой связи аномалий содержания атмосферных примесей, в частности черного углерода, в арктических регионах с сибирскими пожарами.

Ключевые слова: атмосферные блокирования, изменения климата, природные пожары, газовые и аэрозольные эмиссии примесей в атмосферу, данные наблюдений и реанализа, спутниковые данные; atmospheric blocking, climate change, wildfire, gaseous and aerosol emission of impurities into the atmosphere, observation, satellite and reanalysis data.

Введение

На фоне глобальных климатических изменений последних десятилетий проявляются сильные региональные температурные, циркуляционные и гидрологические аномалии [1–3], включая сильнейшие погодно-климатические, которые связаны с формированием режимов продолжительных атмосферных блокирований. Наиболее опасные последствия потепления климата – природные пожары, существенно влияющие на региональные экосистемы и биоразнообразие, а также на углеродный цикл и региональный углеродный обмен между атмосферой и наземными экосистемами. В результате природных пожаров в атмосферу выбрасывается большое количество продуктов горения, в том числе аэрозольных частиц, CO, CO_2 [4–24]. Необходимость разностороннего анализа и адекватного учета рисков и последствий, связанных с природными пожарами, связана с выполнением условий «Парижского соглашения» 2015 г. об изменении климата с целью снижения содержания в атмосфере парниковых газов, тем более при увеличении вероятности пожароопасных условий, в частности в российских регионах, из-за глобального потепления [25–28].

Возникновению пожаров способствует то, что весной и летом в среднеширотных регионах Северной Евразии с ростом приповерхностной температуры общее количество осадков в целом уменьшается согласно результатам анализа многолетних данных [29]. При этом на фоне общего потепления риск появления природных пожаров усиливается при режимах атмосферного блокирования – в областях влияния блокирующих антициклонов (блокингов). С продолжительными атмосферными блокированиями в теплые месяцы связаны периоды аномально высокой приповерхностной температуры, отсутствие осадков, почвенная засуха и, как следствие, увеличение вероятности возникновения и развития массовых лесных пожаров. Атмосферные блокирования могут также способствовать дальнему переносу в атмосфере различных примесей, в том числе про-

* Игорь Иванович Мохов (mokhov@ifaran.ru).

© Мохов И.И., 2023

дуктов горения лесов. Существенно, что согласно модельным оценкам при общем потеплении, связанном с увеличением содержания парниковых газов в атмосфере, может значительно увеличиться роль атмосферных блокирований в формировании погодно-климатических аномалий и их последствий, в том числе увеличивается риск природных пожаров и их последствий в российских регионах [30–36].

Цель данной работы – анализ атмосферных блокирований в последние десятилетия в регионах (в частности сибирских) Северного полушария (СП) и связанных с ними природных пожаров и эмиссий пирогенных примесей в атмосферу.

Используемые данные и методы анализа

При анализе атмосферных блокирований использовались данные GCCG (http://solberg.snr.missouri.edu/gcc/) за период 1980–2018 гг. (см. [37]); для количественной оценки изменений температурного режима СП – многолетние данные GISS для аномалий (относительно периода 1951–1980 гг.) приповерхностной температуры (https://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v4/NH.Ts+dSST.txt) [38].

Режимы лесных пожаров анализировались на основе спутниковых данных, в том числе данных MODIS (на платформах Terra и Aqua) с 2000 по 2020 г. с пространственным разрешением 1×1 км (https://earthdata.nasa.gov) [39–41] (см. также [42, 43]).

Содержание примесей в атмосфере, наряду с анализом режимов атмосферной циркуляции, определялось с помощью данных реанализа MERRA-2 с широтно-долготным разрешением $0{,}5° \times 0{,}625°$ (шагом по времени 1 и 3 ч) [44, 45]. Кроме того использовались спутниковые данные AIRS (на платформе Aqua) [46] (см. также [42, 43]) и данные, доступные через интернет-сервер Giovanni (https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni) [47]. На основе спутниковых данных вычислялись объемы эмиссий газовых и аэрозольных примесей в атмосферу [48] (см. также [23, 33]) модифицированным методом Сейлера–Крутцена с коррекцией для уточнения значений площадей, охваченных огнем, плотности распределения биомассы и ее сгоревшей части.

Для анализа региональных особенностей атмосферной циркуляции использовались данные NCEP/NCAR-реанализа, в том числе для геопотенциальной высоты 500 гПа с широтно-долготным разрешением $2{,}5° \times 2{,}5°$ и шагом по времени 6 ч (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html) [49].

Связь активности атмосферных блокирований в различных регионах и для СП в целом анализировалась с помощью нового индекса – интегрального индекса атмосферных блокирований I_I, характеризующего суммарную активность блокирований для разных регионов и временных интервалов [35] (см. также [34, 50]). Индекс I_I для долготного (λ) сектора $\Delta\lambda$ на временном интервале Δt (длительностью N_τ суток) определялся следующим образом:

$$I_I = \frac{\Sigma N_i(\lambda_i)}{N_\tau N_\lambda},$$

где $i = 1, 2, ..., N_\lambda$, $N_\lambda = \Delta\lambda/\delta\lambda$; $N_i(\lambda_i) = \sum n_{ij}(\lambda_i, t_j)$, n_{ij} – доля i-й долготной ячейки с выполнением локальных условий блокирования в j-й интервал времени (t_j), $j = 1, 2, ..., N_\tau$; $N_\tau = \Delta t/\delta t$, δt – шаг по времени. Для определения атмосферных блокирований можно использовать разные подходы (например, [51, 32]). В частности, блокирования западного переноса в тропосфере средних широт достаточно просто диагностируются с использованием подхода, предложенного в [52], и его модификации в [53].

Атмосферные блокирования анализировались в широтном поясе 40–75° с.ш. и отдельно в долготном секторе от 20 до 180° в.д. Анализировались также особенности режимов атмосферных блокирований в Евро-Атлантическом (60° з.д. – 60° в.д.) и Тихоокеанском (150° в.д. – 120° з.д.) секторах.

Результаты

На рис. 1 представлены межгодовые вариации (годы после 1969 г.) общей продолжительности летних атмосферных блокирований τ в СП по данным GCCG (http://solberg.snr.missouri.edu/gcc/) за 1969–2022 гг. Общий рост τ в последние десятилетия характеризуется линейным трендом $d\tau/dt = 1{,}5\ (\pm 0{,}2)$ сут/год, в скобках отмечено среднеквадратическое отклонение. Линейным трендом объясняется 43% дисперсии межгодовых вариаций τ для летних сезонов (коэффициент корреляции $r = 0{,}65$). При среднем за период 1969–2022 гг. значении $\tau = 71$ сут полученный линейный тренд с увеличением τ на 15 сут за десятилетие соответствует увеличению τ на 22% за 10 лет.

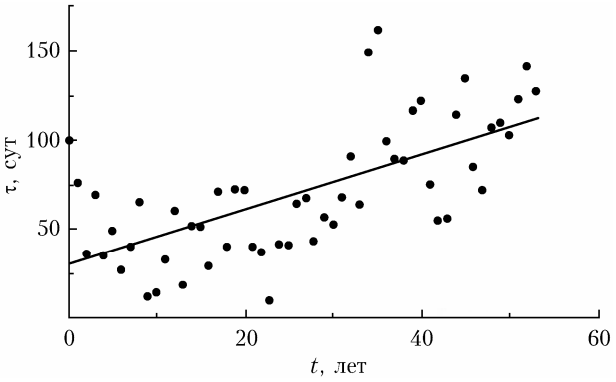


Рис. 1. Общая продолжительность летних атмосферных блокирований в СП в зависимости от времени (за начало отсчета взят 1969 г.); прямая линия – линейная регрессия

Введем параметр $d\tau/dT$ — параметр чувствительности τ к изменению температуры T, определяемый с использованием линейной регрессии

$$\tau = a_0 + a_1\delta T.$$

Рис. 2 характеризует зависимость вариаций τ в СП от аномалий приповерхностной температуры СП δT по данным GISS (https://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v4/NH.Ts+dSST.txt) за летние сезоны 1969–2022 гг. Соответствующий параметр чувствительности $d\tau/dT$, оцениваемый параметром линейной регрессии a_1, равен 63 ($\pm$ 9) сут/К (r = = 0,68). Это соответствует росту τ на 89% (более чем на 2 мес.) при увеличении приповерхностной температуры в СП на 1 К.

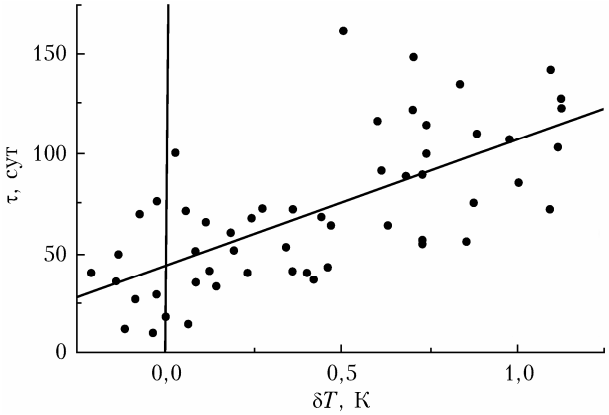


Рис. 2. Общая продолжительность атмосферных блокирований в СП в зависимости от аномалий (относительно базового периода 1951–1980 гг.) приповерхностной температуры δT для летних сезонов в 1969–2022 гг.; прямая линия — линейная регрессия

В какой степени тенденции изменений режимов атмосферных блокирований в СП проявляются в разных регионах, в частности в российских? Рис. 3 характеризует когерентность интегрального индекса блокирования (одномерная версия) для России и СП в летние сезоны для периода 1979–2018 гг. Согласно рисунку когерентность межгодовых вариаций значений индекса блокирования для России и СП различается для разных временных интервалов, при этом на временных интервалах около 10 лет и более отмечена значимая когерентность для последних десятилетий [35]. Судя по полученным результатам, значимая когерентность режимов атмосферного блокирования над территорией России и для СП проявляется для достаточно длительных междесятилетних климатических изменений. На относительно коротких интервалах времени для межгодовой изменчивости более значимо влияние региональных мод климатической изменчивости на фоне глобальных и полушарных изменений. При этом региональные особенности для долгопериодных изменений проявляются в фазовом сдвиге относительно изменений для полушария в целом.

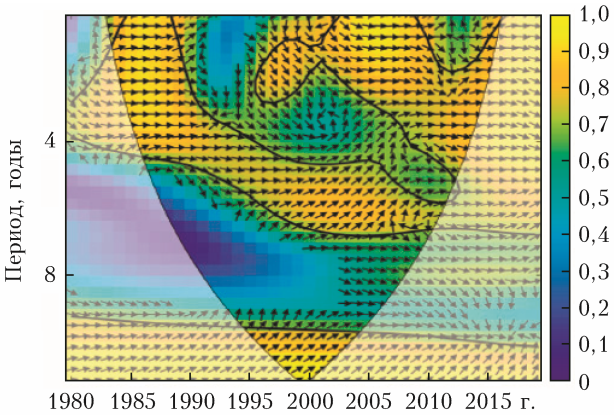


Рис. 3. Когерентность интегрального индекса блокирования для России и СП в летние сезоны 1979–2018 гг. Выделены области со значимой когерентностью (на уровне 95%), стрелки характеризуют фазовый сдвиг (стрелка вправо — синфазность, влево — противофазность), отмечены также области краевых эффектов (см. цветной рисунок на сайте http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.02)

Анализ атмосферных блокирований над территорией России, количества и площади пожаров выявил их значимую связь. С атмосферными блокированиями связаны и пирогенные эмиссии газовых и аэрозольных примесей в атмосферу [33, 34]. В частности, отмечена значимая корреляция количественных характеристик пожаров и пирогенных выбросов в атмосферу с интегральным индексом блокирований для российских регионов в пожароопасные сезоны в последние десятилетия.

На рис. 4 приведены зависимости от общей продолжительности атмосферных блокирований общей за год площади природных пожаров в российских регионах и связанных с ними суммарных за год эмиссий в атмосферу газовых и аэрозольных примесей по данным для 2001–2019 гг. Объемы эмиссий определялись модифицированным метод Сейлера–Крутцена (см. [33]).

Согласно результатам соответствующих линейных регрессий с увеличением общей продолжительности атмосферных блокирований на 10% площадь пожаров увеличивается примерно на 8%, а общие эмиссии в атмосферу CO_2, CO и мелкодисперсного аэрозоля возрастают примерно на 9%. Соответствующие коэффициенты корреляции с числом блокодней равны 0,62 для общей площади пожаров, 0,68 — для эмиссий CO_2, 0,65 — CO и 0,66 — аэрозоля. Связью с атмосферными блокированиями в пожароопасные сезоны объясняется до 40% дисперсии межгодовых вариаций общей протяженности российских пожаров и более 40% дисперсии межгодовых вариаций соответствующих эмиссий в атмосферу CO_2, CO и мелкодисперсного аэрозоля [33].

Атмосферные блокирования могут способствовать дальнему переносу атмосферных примесей, в том числе продуктов горения в результате природных пожаров. В [21, 54] проведен анализ аномального

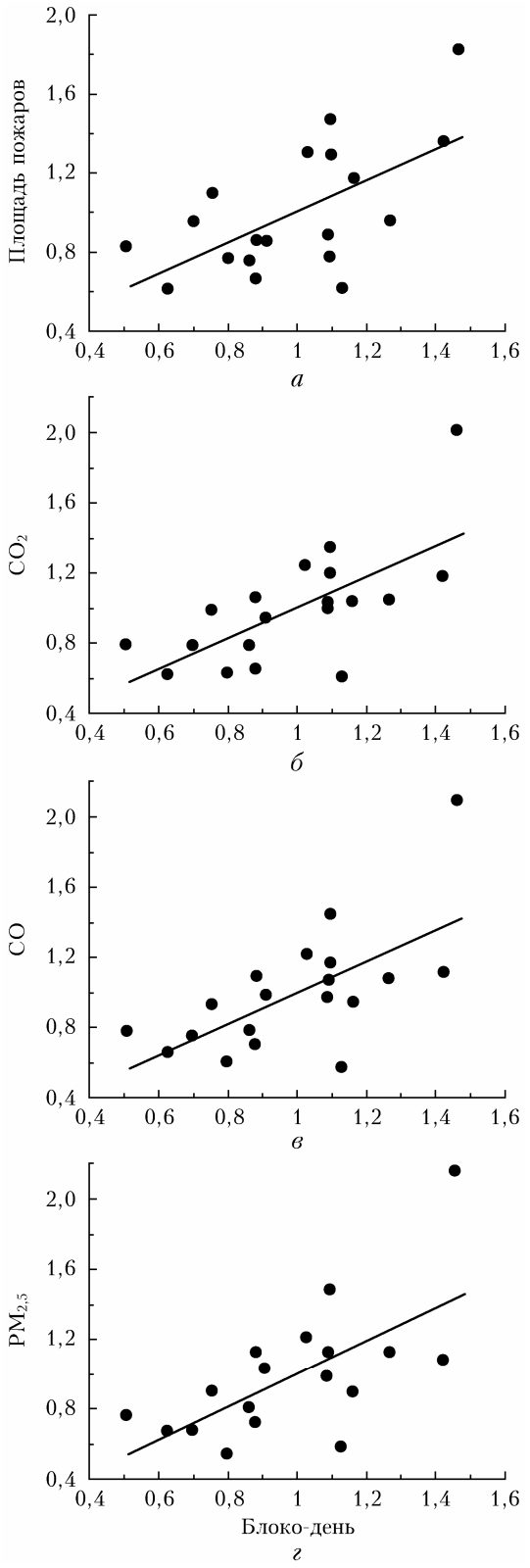


Рис. 4. Зависимость общей за год площади природных пожаров в российских регионах (*а*) и связанных с ними общих за год эмиссий в атмосферу CO_2 (*б*), CO (*в*) и аэрозоля $PM_{2,5}$ (*г*) от общей продолжительности атмосферных блокирований (числа блоко-дней) по данным за 2001–2019 гг. Все величины нормированы на средние значения. Прямые соответствуют линейным регрессиям

трансграничного переноса дымового аэрозоля и монооксида углерода от пожаров сибирских лесов в Европу летом 2016 г. Было показано, что дальнему переносу на запад продуктов горения в атмосфере способствовало преимущественное расположение над центром Евразии области высокого давления к северу от области низкого давления. Это характерно для атмосферного блокирования дипольного типа. С блокированиями связан также перенос атмосферных примесей из средних широт в арктические. Проведенный в [20] анализ сильного задымления атмосферы среднеширотных и высокоширотных регионов Северной Евразии в августе 2004 г. выявил, что причиной этого задымления был дальний перенос в западном направлении дымового аэрозоля от природных пожаров в Северной Америке. Как и в случае аномального переноса в июле 2016 г., перенос на запад продуктов горения в августе 2004 г. был связан с особенностями атмосферной циркуляции при блокировании дипольного типа.

Природные пожары являются источником черного углерода (black carbon – BC) – компонента мелкодисперсного аэрозоля, поглощающего солнечную радиацию в видимом диапазоне длин волн, что способствует нагреву и таянию снежно-ледового покрова и климатическим изменениям в Арктике. В работе [55] отмечена связь сезонных вариаций концентрации антропогенного аэрозоля над арктической Аляской с сезонными вариациями повторяемости и положения среднеширотных блокирующих антициклонов. При этом перенос аэрозоля в атмосфере с юга на север происходит по западной периферии квазистационарных антициклонов. Особенности связи загрязнения арктической атмосферы, в том числе черным углеродом и угарным газом, с сибирскими лесными пожарами отмечены в [42, 43].

Результаты анализа тенденций изменения пожарной активности в последние десятилетия свидетельствуют о регулярном проявлении природных пожаров, в частности в сибирских лесах, на фоне сильной межгодовой и внутригодовой изменчивости. На этом фоне отмечен статистически незначимый слабый рост общего количества пожаров N_f и их суммарной радиационной мощности I_Σ. При этом получены статистически значимые оценки многолетних тенденций радиационной мощности среднего пожара I_m (отношения I_Σ к N) [42, 43].

В общей статистике лесных пожаров доминируют очаги с низкой радиационной мощностью. При этом для российских регионов в [22] выявлено уменьшение повторяемости более слабых пожаров с запада на восток с увеличением частоты более интенсивных пожаров. Полученные результаты свидетельствуют о статистически значимом увеличении в последние десятилетия количества сибирских пожаров мощностью более 500 МВт. Для пожаров мощностью менее 100 МВт значимых изменений не выявлено.

В целом ряде исследований природных пожаров в связи с атмосферными блокированиями анализировался дальний перенос в атмосфере пирогенных

примесей, в том числе в Арктику (см., например, [20, 21, 23, 33, 34, 42, 43, 54]). Совместный анализ вариаций количества сибирских пожаров и аномалий содержания BC, CO и аэрозоля в арктической атмосфере свидетельствует об их тесной связи [42, 43]. В частности, максимумам распространения пожаров в 2002, 2003, 2008, 2012 и 2019 гг. сопутствует повышенное содержание продуктов горения в атмосфере арктических регионов. На рис. 5 приведены вариации среднемесячных значений плотности содержания BC в столбе атмосферы δn_{BC} (кг/м^2) в арктической области 66–90° с.ш., 30–180° в.д. площадью 9,2 млн км^2 в зависимости от вариаций числа сибирских лесных пожаров δN_f (50–75° с.ш., 60–140° в.д., площадь 11,3 млн км^2) по данным для пожароопасных сезонов (с апреля по сентябрь) 2000–2019 гг. Отмеченная связь δn_{BC} с δN_f статистически значима (на уровне 95%). На основе соответствующей линейной регрессии оценен параметр чувствительности $dn_{BC}/dN_f = 2 \cdot 10^{-11}$ кг · м^2 ($r = 0{,}70$).

В частности, из-за крупных сибирских пожаров летом 2019 г. отмечена сильнейшая аномалия содержания BC над Российским сектором Арктики. При этом особенности переноса пирогенных примесей в арктическую атмосферу были связаны с атмосферным блокированием. На рис. 6 приведены пространственные распределения геопотенциала на уровне 500 гПа в средней тропосфере и лесных пожаров для иллюстрации механизма переноса пирогенных примесей от сибирских пожаров в арктическую атмосферу в первой декаде августа 2019 г. При атмосферном блокировании в этот период была отмечена сильнейшая положительная аномалия содержания черного углерода над Российским сектором Арктики.

В пространственном распределении геопотенциала на уровне 500 гПа на рис. 6 проявляется

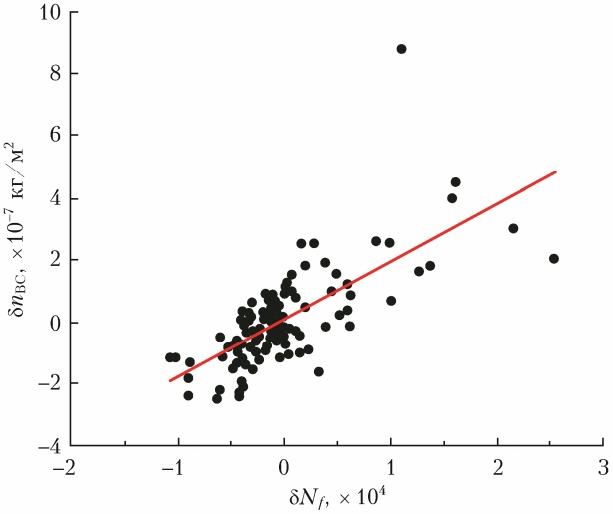


Рис. 5. Вариации среднемесячных значений плотности содержания BC в столбе атмосферы в Арктике в зависимости от вариаций числа сибирских лесных пожаров по данным для пожароопасных сезонов (с апреля по сентябрь) 2000–2019 гг.; вариации δn_{BC} и δN_f определялись относительно соответствующих средних значений за 2000–2019 гг. Прямая линия соответствует линейной регрессии

квазистационарная аномалия высокого давления над центральной частью Сибири и две аномалии низкого давления над Северным Уралом и Дальним Востоком. Эти особенности в поле геопотенциала характерны для атмосферной циркуляции при блокировании омега-типа. Как видно из рис. 6, наибольшее количество пожаров зафиксировано в области блокирующего антициклона. При этом к западу от его центра зональный поток (с запада на восток) отклонялся далеко на север с захватом и переносом пирогенных примесей от сибирских пожаров в Арктику, а восточнее центра блокирующего антициклона – на юг.

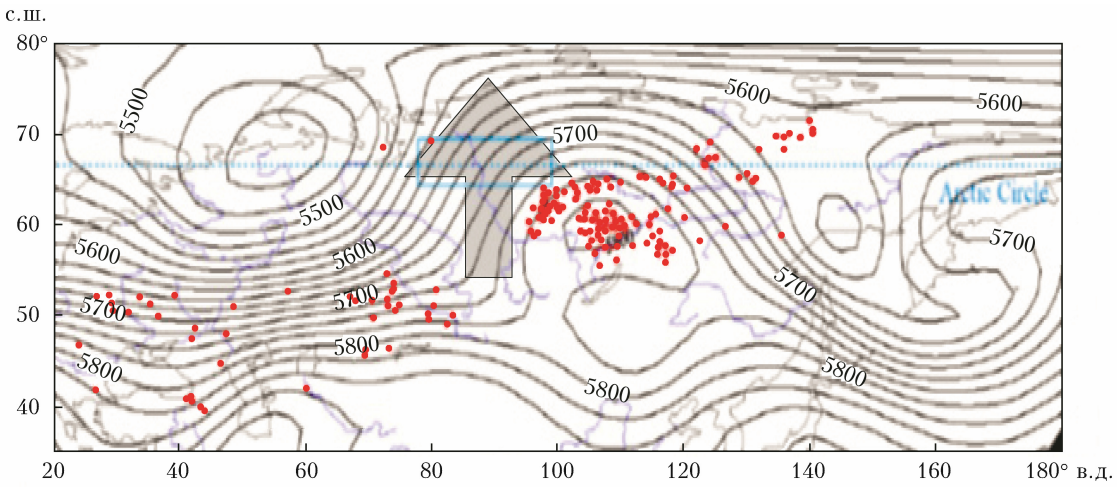


Рис. 6. Пространственное распределение геопотенциала (гПм) на уровне 500 гПа в средней тропосфере (изолинии) и лесных пожаров (кружки) для периода 5–9 августа 2019 г. Стрелка характеризует направление потока продуктов горения в Арктику через выделенную область в окрестности Северного полярного круга (см. цветной рисунок на сайте http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.02)

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о значимых изменениях продолжительности атмосферных блокирований в регионах СП за последние десятилетия. Отмечено общее увеличение продолжительности летних атмосферных блокирований в СП на основе данных за 1969–2022 гг. Выявлена значимая когерентность наиболее долгопериодных (междесятилетних) вариаций интегрального индекса активности атмосферных блокирований над территорией России и СП в целом для летних сезонов. Наряду с оценками значимой корреляции площади природных пожаров в российских регионах и связанных с ними газовых и аэрозольных эмиссий в атмосферу с продолжительностью атмосферных блокирований выявлены особенности аномального трансграничного переноса в атмосфере пирогенных примесей, в том числе статистически значимая связь аномалий содержания атмосферных примесей в арктических регионах при режимах атмосферного блокирования с сибирскими пожарами.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (соглашение № 075-15-2020-776).

Список литературы

1. *Climate* Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p.
2. *Второй* оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
3. *Мохов И.И.* Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестн. РАН. 2022. Т. 92, № 1. С. 3–14.
4. *Stocks B.J., Fosberg M.A., Lynham T.J., Mearns L., Wotton B.M., Yang Q., Jin J.-Z., Lawrence K., Hartley G.R., Mason J.A., McKenney D.W.* Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests // Clim. Change. 1998. V. 38, N 1. P. 1–13.
5. *Andreae M.O., Merlet P.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // Global Biogeochem. Cycles. 2001. V. 15, N 4. P. 955–966.
6. *Kasischke E.S., Hyer E.J., Novelli P.C., Bruhwiler L.P., French N.H.F., Sukhinin A.I., Hewson J.H., Stocks B.J.* Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide // Global Biogeochem. Cycles. 2005. V. 19. GB1012. DOI: 10.1029/2004GB002300.
7. *Westerling A.L., Hidalgo H.G., Cayan D.R., Swetnam T.W.* Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity // Science. 2006. V. 313, N 5789. P. 940–943.
8. *Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I.A.* Multiyear circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION // Intern. J. Remote Sens. 2007. V. 28. P. 1397–1404.
9. *Groisman P.Ya., Sherstyukov B.G., Razuvaev V.N., Knight R.W., Enloe J.G., Stroumentova N.S., Whitfield P.H., Forland E., Hannsen-Bauer I., Tuomenvirta H., Alexandersson H., Mescherskaya A.V., Karl T.R.* Potential forest fire danger over Northern Eurasia: Changes during the 20th century // Global Planet. Change. 2007. V. 56. P. 371–386.
10. *Vygodskaya N.N., Groisman P.Ya., Tchebakova N.M., Kurbatova J.A., Panfyorov O., Parfenova E.I., Sogachev A.F.* Ecosystems and climate interactions in the boreal zone of northern Eurasia // Environ. Res. Lett. 2007. V. 2, N 4. P. 045033.
11. *Van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R.S., Jin Y., van Leeuwen T.T.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural and peat fires (1997–2009) // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 11707–11735.
12. *Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максютов Ш.Ш., МкКаллум И., Лакида И.П.* Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Докл. РАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
13. *Marlon J.R., Bartlein P.J., Gavin D.G. Long C.J., Anderson R.S., Briles C.E., Brown K.J., Colombaroli D., Hallett D.J., Power M.J., Scharf E.A., Walsh M.K.* Long-term perspective on wildfires in the western USA // PNAS. 2012. V. 109, N 9. P. E535–E543.
14. *MacDougall A.S., McCann K.S., Gellner G., Turkington R.* Diversity loss with persistent human disturbance increases vulnerability to ecosystem collapse // Nature. 2013. V. 494. P. 87–89.
15. *Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
16. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В.* Влияние низовых и торфяных пожаров на эмиссии CO_2 в атмосферу // Докл. РАН. 2014. Т. 459, № 4. С. 496–500.
17. *Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V.* An ensemble approach to simulate CO_2 emissions from natural fires // Biogeosci. 2014. V. 11, N 12. P. 3205–3223.
18. *Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н.* Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 482–487; *Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N.* Anomalous wildfires in 2010 and 2012 on the territory of Russia and supply of black carbon to the Arctic // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 545–550.
19. *Abatzoglou J.T., Williams A.P.* Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2016. V. 113, N 42. P. 11770–11775.
20. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Аномальный трансграничный перенос продуктов горения от североамериканских лесных пожаров в северную Евразию // Докл. РАН. 2017. Т. 475, № 3. С. 320–324.
21. *Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И.* Связь задымления атмосферы европейской территории России летом 2016 года с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Докл. РАН. 2017. Т. 472, № 4. С. 456–461.
22. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Сравнительный анализ характеристик пожаров в бореальных лесах Евразии и северной Америки по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 2. С. 21–37.
23. *Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А.* Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // Докл. РАН. 2020. Т. 492, № 1. С. 99–106.

24. *Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л.* Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 1–15.
25. *Мохов И.И., Чернокульский А.В., Школьник И.М.* Региональные модельные оценки пожароопасности при глобальных изменениях климата // Докл. РАН. 2006. Т. 411, № 6. С. 808–811.
26. *Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надёжина Е.Д., Семиошина А.А., Салль И.А., Хлебникова Е.И., Шкляревич О.Б.* Анализ изменения пожароопасной обстановки в лесах России в XX и XXI веках на основе моделирования климатических условий // Метеорол. и гидрол. 2007. № 3. С. 14–24.
27. *Школьник И.М., Молькентин Е.К., Надёжина Е.Д., Семиошина А.А., Салль И.А., Хлебникова Е.И., Шкляревич О.Б.* Экстремальность термического режима в Сибири и динамика пожароопасной обстановки в 21-м веке: оценки с помощью региональной климатической модели ГГО // Метеорол. и гидрол. 2008. № 5. С. 5–15.
28. *Мохов И.И., Чернокульский А.В.* Региональные модельные оценки риска лесных пожаров в азиатской части России при изменениях климата // Геогр. и природ. ресурсы. 2010. № 2. С. 120–126.
29. *Мохов И.И., Дюфрен Ж.-Л., Ле Трет Э., Тихонов В.А., Чернокульский А.В.* Изменения режимов засух и биопродуктивности наземных экосистем в регионах Северной Евразии по расчетам с глобальной климатической моделью с углеродным циклом // Докл. РАН. 2005. Т. 405, № 6. С. 810–814.
30. *Lupo A.R., Oglesby R.J., Mokhov I.I.* Climatological features of blocking anticyclones: A study of Northern Hemisphere CCM1 model blocking events in present-day and double CO2 concentration atmospheres // Clim. Dyn. 1997. V. 13. P. 181–195.
31. *Mokhov I.I., Timazhev A.V., Lupo A.R.* Changes in atmospheric blocking characteristics within Euro-Atlantic region and Northern Hemisphere as a whole in the 21st century from model simulations using RCP anthropogenic scenarios // Glob. Planet. Change. 2014. V. 122. P. 265–270.
32. *Мохов И.И., Тимажев А.В.* Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорол. и гидрол. 2019. № 6. С. 5–16.
33. *Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С.* Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокированиями // Докл. РАН. 2020. Т. 495, № 2. С. 61–66.
34. *Мохов И.И., Ситнов С.А., Цидилина М.Н., Воронова О.С.* Эмиссии в атмосферу NO_2 при лесных пожарах на территории России в связи с атмосферными блокированиями // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 6. С. 395–399; *Mokhov I.I., Sitnov S.A., Tsidilina M.N. and Voronova O.S.* Relation between pyrogenic NO_2 emissions from wildfires in Russia and atmospheric blocking events // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 5. P. 503–506.
35. *Мохов И.И., Тимажев А.В.* Интегральный индекс активности атмосферных блокирований в Северном полушарии в последние десятилетия // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2022. Т. 58, № 6. С. 1–10.
36. *Мохов И.И., Ситнов С.А.* Связь природных пожаров в российских регионах с атмосферными блокированиями // Метеорол. и гидрол. 2023. (принято в печать).
37. *Lupo A.R., Jensen A.D., Mokhov I.I., Timazhev A.V., eichler T., Efe B.* Changes in global blocking character during recent decades // Atmosphere. 2019. V. 10, N. 2. P. 92. DOI: 10.3390/atmos10020092.
38. *GISTEMP* Team. GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies. URL: https://data.giss.nasa.gov/gistemp/ 2022.
39. *Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Remote Sens. Environ. 2003. V. 87. P. 273–282.
40. *Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.M.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sens. Environ. 2010. V. 114. P. 168–182.
41. *Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sens. Environ. 2016. V. 178. P. 31–41.
42. *Mokhov I.I., Sitnov S.A.* Siberian forest fires: Anomalies and trends from satellite data (2000–2019) // arXiv. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2206.09240.
43. *Sitnov S.A., Mokhov I.I.* Transport of biomass burning products from Siberian wildfires into the Arctic // IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 2022. V. 1040. P. 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/1040/1/012005.
44. *Gelaro R., McCarty W.J., Suarez M.J. Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B.* The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Clim. 2017. V. 30. P. 5419–5454.
45. *Журавлева Т.Б., Артюшина А.В., Виноградова А.А., Воронина Ю.В.* Черный углерод в приземной атмосфере вдали от источников эмиссий: сравнение результатов измерений и реанализа MERRA-2 // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 4. С. 250–260; *Zhuravleva T.B., Artyushina A.V., Vinogradova A.A., Voronina Yu.V.* Black carbon in the near-surface atmosphere far away from emission sources: Comparison of measurements and MERRA-2 reanalysis data // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 6. P. 591–601.
46. *Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., Goldberg M.D., Kalnay E., McMillin L.M., Revercomb H., Rosenkranz Ph.W., Smith W.L., Staelin D.H., Strow L.L., Susskind J.* AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. V. 41. P. 253–264.
47. *Acker J.C., Leptoukh G.* Online analysis enhances use of NASA Earth science data // Eos Trans. AGU. 2007. V. 88. P. 14–17.
48. *Бондур В.Г.* Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35. DOI: 10.7868/ S0205961415060032.
49. *Kistler R., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M.* The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2001. V. 82. P. 247–268.
50. *Mokhov I.I., Timazhev A.V.* Integral index of blocking activity in the atmosphere of Northern Hemisphere

during last decades // Research Activities in Earth System Modelling / E. Astakhova (ed.). 2021. Rep. 51. S. 2. P. 15–16.
51. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорол. и гидрол. 2010. № 11. С. 5–18.
52. *Lejenas H., Okland H.* Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data // Tellus A. 1983. V. 35. P. 350–362.
53. *Tibaldi S., Molteni F.* On the operational predictability of blocking // Tellus. 1990. V. 42A. P. 343–365.
54. *Ситнов С.А., Мохов И.И., Джола А.В.* Влияние сибирских пожаров на содержание моноксида углерода в атмосфере над европейской территорией России летом 2016 г. // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 146–152.
55. *Iversen T., Joranger E.* Arctic air pollution and large scale atmospheric flows // Atmos. Environ. 1985. V. 19. P. 2099–2108.

I.I. Mokhov. **Atmospheric blockings in the Northern Hemisphere and associated wildfires and emissions of impurities into the atmosphere in Russian regions under climate changes during recent decades.**

The results of the analysis of atmospheric blockings in the regions of the Northern Hemisphere (NH) under general warming during recent decades are presented. In particular, estimates of the total increase in the duration of summer atmospheric blockings in the NH with an increase in the hemispheric surface air temperature for the period 1969–2022 are obtained using observations and reanalysis data. Significant coherence of the most long-term changes of the integral index of summer atmospheric blocking activity for the Russian regions and for the NH as a whole is noted. A statistically significant correlation of the duration of atmospheric blockings of the area of wildfires in the Russian regions with related gas and aerosol emissions into the atmosphere is estimated based on satellite and reanalysis data. Estimates of the correlation of the Siberian fires with anomalies in the content of atmospheric impurities, including black carbon, in the Arctic regions are presented.