

Весенние атмосферные блокирования в северном полушарии: изменения в последние десятилетия (1992–2023 гг.)

И.И. Мохов^{1, 2, *} И.Р. Еремин^{1, †}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3

(Поступила в редакцию 27.04.2025; после доработки 25.05.2025; подписана в печать 09.06.2025)

В данной работе представлен анализ весенних атмосферных блокирований (ВАБ) в Северном полушарии (СП) в 1992–2023 гг. Результаты анализа свидетельствуют о значимом увеличении блокинговой активности в атмосфере СП в последние десятилетия. Отмеченная тенденция проявляется на фоне общего увеличения приповерхностной температуры СП в весенние сезоны. В исследовании использовались следующие параметры ВАБ: количество, средняя продолжительность, общая продолжительность, интенсивность и размер. Получены статистически значимые оценки увеличения общей продолжительности ВАБ, их количества и размеров при увеличении средневесенней приповерхностной температуры в СП.

PACS: 92.00.00 УДК: 551.583

Ключевые слова: атмосферные блокирования, блокинги, северное полушарие, изменения климата, весна.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2550901](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2550901)

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия характеризуются значимым ростом частоты погодно-климатических аномалий [1–3] на фоне глобального потепления. Число опасных метеорологических явлений в России по данным Росгидромета (<http://www.meteorf.ru>) с конца XX в. значимо увеличивалось в среднем почти на два десятка событий в год — на 45% за десятилетие [4]. Наибольшая скорость увеличения числа опасных метеорологических явлений в российских регионах по данным для периода 1998–2021 гг. выявлена для **летних** сезонов — в среднем более 8 событий в год (больше, чем на 40% за десятилетие), при этом наибольшая относительная скорость увеличения числа опасных метеорологических явлений отмечена для **весенних** месяцев — более чем на 50% за десятилетие (4–5 событий в год) [4]. Отмеченные тенденции связаны с увеличением вероятности меридиональных вторжений с севера и с юга при общем потеплении. Этому способствует увеличение извилистости квазизональных струйных течений в атмосфере, формирование продолжительных блокирований атмосферной циркуляции, усиление конвективной активности в атмосфере с экстремальными режимами гидрологического цикла, которые происходят из-за увеличения влагоёмкости более теплой атмосферы [1–4].

Опасные метеорологические явления со значимыми экологическими и социально-экономическими

последствиями в значительной степени связаны с атмосферными блокированиями (блокингами) [5–13]. Для российских регионов, согласно [14], с атмосферными блокированиями можно связать до 40% и более дисперсии межгодовых изменений площадей пожаров и потоков продуктов горения в атмосферу (см. также [15, 16]). В [17] отмечены особенности связи сезонной активности атмосферных блокирований с изменчивостью струйных течений. Согласно оценкам [18], около 60% зимних волн холода и около 80% летних волн тепла в Северном полушарии (СП) связаны с атмосферными блокированиями.

В данной работе представлены количественные оценки изменений ключевых характеристик весенних атмосферных блокирований в Северном полушарии и их связи с температурными изменениями последних десятилетий. Подобный анализ необходим, в частности, в связи с особой ролью возвратных весенних холодов (заморозков), происходящих из-за арктических вторжений и оказывающих сильнейшее влияние на сельское хозяйство и на природные экосистемы в целом.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Анализировались данные GCSG [25] для характеристик атмосферных блокингов в СП для периода 1992–2023 гг., в том числе для их количества (N), средней продолжительности (τ), общей продолжительности ($N\tau$), размера (L) и интенсивности (I) в весенние сезоны [10, 19] (см. также [12, 13, 20]). Ха-

* E-mail: mokhov@ifaran.ru, mokhov_ii@physics.msu.ru

† E-mail: EreminIR@my.msu.ru

характеристики атмосферных блокингов в базе данных GCCG [25] получены с использованием условий блокирования аналогично [10, 19] по данным реанализа (см. также [12, 13]). Использовались также данные Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA [26], характеризующие особенности атмосферной циркуляции режимов атмосферных блокингов.

Для количественной оценки температурного режима СП использовались данные CRU для аномалий (относительно периода 1961–1990 гг.) приповерхностной температуры для периода 1992–2023 гг. [24], а также данные GISS [27].

Параметры чувствительности характеристик атмосферных блокингов к изменениям температурного режима оценивались с использованием соответствующих линейных регрессий аналогично [12, 13].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Весной 2025 г. в российских регионах отмечено сочетание аномально тёплых периодов и аномальных возвратных холодов. На фоне больших положительных температурных аномалий над существенной частью СП, в том числе и России, в марте (рис. 1), в первой половине апреля в целом ряде российских регионов отмечены возвратные похолодания с заморозками. Следует отметить, что первая половина весны 2025 г. характеризовалась повышенной блокинговой активностью, в частности над Евро-Атлантическим сектором (рис. 2).

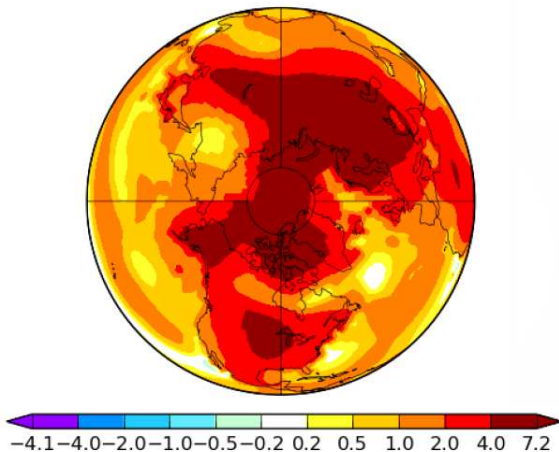


Рис. 1. Аномалии (относительно базового периода 1951–1980 гг.) приповерхностной температуры [K] в марте 2025 г. в Северном полушарии по данным GISS ([27])

На рис. 2 приведена диаграмма Ховмёллера для индекса атмосферного блокирования, характеризующая долготные области с атмосферным блокированием и их изменения во времени весной 2025 г. (до 26 апреля) по данным NOAA [26]. Интенсивность атмосферного блокирования характе-

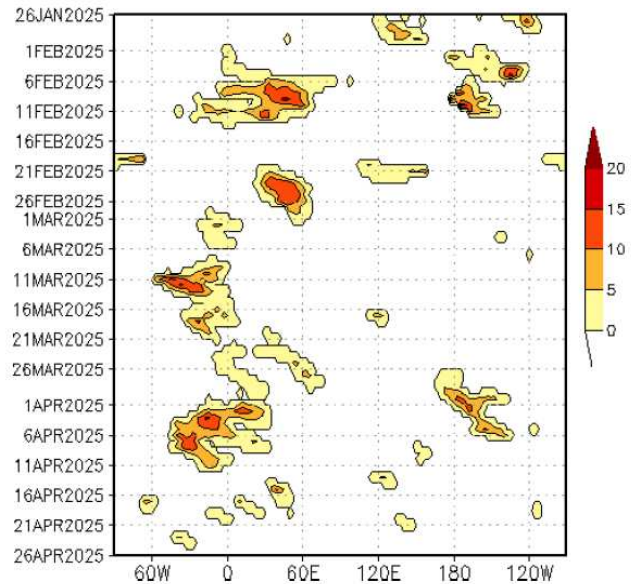


Рис. 2. Диаграмма Ховмёллера для индекса атмосферного блокирования [м/градус широты], характеризующая долготные области с атмосферным блокированием и их изменения во времени весной 2025 г. (до 26 апреля 2025 г.) по данным NOAA

ризовалась широтным градиентом геопотенциала на уровне 500 гПа в метрах на градус широты. Согласно рис. 2 на фоне общей блокинговой активности весной 2025 г. над Евро-Атлантическим сектором выделяется режим атмосферного блокирования в начале апреля с некоторым смещением областей с максимальными значениями индекса атмосферного блокирования из Восточного полушария в Западное. При этом над Тихоокеанским сектором вблизи границы между Восточным и Западным полушариями также диагностирована область атмосферного блокирования.

Рис. 3 характеризует особенности атмосферной циркуляции, в частности аномалии геопотенциала на уровне 500 гПа в атмосфере СП 26 апреля 2025 г. по данным NOAA [26]. При этом проявляются режимы атмосферного блокирования с блокирующими антициклонами в областях около 0° в.д. и 180° в.д.

При анализе характеристик весенних атмосферных блокингов по данным для последних десятилетий выявлены значимые изменения. На рис. 4 представлены межгодовые изменения нормированных значений общей продолжительности весенних атмосферных блокингов $N\tau$ (а) в СП, а также их количества N (б), средней продолжительности τ (в), размера L и интенсивности I с использованием данных GCCG [25] для периода 1992–2023 гг. Характеристики атмосферных блокингов y нормировались на их средние значения $\langle y \rangle$ для периода 1993–2023 гг.: $\langle N\tau \rangle = 102.9$ сут., $\langle N \rangle = 10.7$ сут., $\langle \tau \rangle = 9.5$ сут., $\langle L \rangle = 2.462$ км, $\langle I \rangle = 3.0$.

В табл. 1 приведены соответствующие оценки трендов характеристик весенних атмосферных

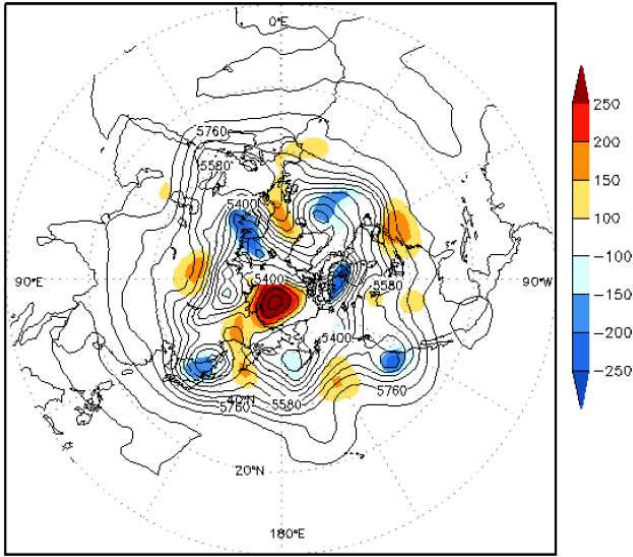


Рис. 3. Аномалии геопотенциала (гПа) на уровне 500 гПа в атмосфере северного полушария 26 апреля 2025 г. по данным NOAA ([26])

блокирований в СП. По данным для периода 1992–2023 гг. оценены значимые положительные тренды ключевых характеристик весенних атмосферных блокирований в СП: с течением времени увеличивается их количество, размер и общая продолжительность. При этом для роста продолжительности и интенсивности весенних атмосферных блокирований был признан статистически незначимым ($r = 0.28$ и $r = 0.26$ соответственно).

Согласно представленным результатам, общая продолжительность летних атмосферных блокирований в 1993–2023 гг. увеличивалась на 27% за десятилетие (более чем на четверть). Это связано с соответствующим ростом числа и средней продолжительности летних блокирований на 16% и 12%. При этом размеры и интенсивность атмосферных блокингов увеличивались на 11% и 9% соответственно.

Значимый рост ключевых характеристик атмосферных блокирований в СП весной отмечается на фоне быстрого потепления в последние десятилетия. По данным CRU [24] среднелетняя приповерхностная температура Северного полушария T увеличивалась в 1992–2023 гг. со скоростью $\frac{dT}{dt} = 0.29 \pm 0.2$ К/10 лет (рис. 5). Этим линейным трендом объясняется 84% межгодовой дисперсии T (коэффициент корреляции $r = 0.92$).

На рис. 6 представлены зависимости исследуемых параметров блокингов от аномалий (относительно базового периода 1961–1990 гг.) приповерхностной температуры северного полушария δT для периода 1992–2023 гг. В круглых скобках приведены СКО, в квадратных скобках — коэффициенты корреляции r .

Для оценки параметров чувствительности $\frac{d(y/\langle y \rangle)}{dT}$, нормированных на средние значения $\langle y \rangle$ характеристик весенних атмосферных блокиро-

ваний y в СП к изменению приповерхностной температуры δ (аналогично [13]) следующие линейные регрессии:

$$\frac{y}{\langle y \rangle} = a_0 + a_1 \delta T.$$

Здесь δ — аномалии приповерхностной температуры СП относительно базового режима 1961–1990 гг. Параметры чувствительности исследуемых характеристик к изменению приповерхностной температуры оценивались параметром линейной регрессии a_1 .

Как и в прошлый раз, рост для средней продолжительности и интенсивности оказался статистически незначимым.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о значимом увеличении весенней блокинговой активности (в том числе общей продолжительности ВАБ) в атмосфере СП в последние десятилетия. Отмеченная тенденция проявляется на фоне быстрого увеличения приповерхностной температуры СП T в весенние сезоны со скоростью 0.3 К за десятилетие.

Наблюдаемые тенденции можно объяснить качественно с использованием модельных оценок для атмосферных блокирований зонального потока в тропосфере средних широт (см. [13, 21, 22]). Взаимосвязь ключевых характеристик блокинговой активности в атмосфере и их связь с изменениями температурного режима (T) можно оценить с использованием уравнения геострофического баланса:

$$U \sim \frac{g}{2\Omega \sin \varphi} \cdot \frac{I}{L}. \quad (1)$$

Здесь U — характерная скорость ветра, L и I — характерные горизонтальный масштаб и интенсивность (характеризуемая относительными аномалиями высоты геопотенциала на уровне 500 гПа) режимов блокирования. При этом характерный масштаб времени можно оценить по формуле:

$$\tau \sim \frac{L}{U}. \quad (2)$$

Из (1) следует, что

$$\frac{1}{U} \cdot \frac{dU}{dT} \sim \frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{dT} - \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT}, \quad (3)$$

а, согласно (2),

$$\frac{1}{\tau} \cdot \frac{d\tau}{dT} \sim \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT} - \frac{1}{U} \cdot \frac{dU}{dT}. \quad (4)$$

Вычитая из (4) уравнение (3), получаем

$$\frac{2}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \sim \frac{1}{\tau} \cdot \frac{d\tau}{dT} + \frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{dT}. \quad (5)$$

Таблица 1. Оценки трендов характеристик весенних блокирований y , нормированных на средние значения $\langle y \rangle$, по данным для 1993–2023 гг.: общей продолжительности блокирований $N\tau$, количества N , средней продолжительности τ , размера L и интенсивности I . В круглых скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО), а в квадратных — коэффициенты корреляции $[r]$

#	Характеристика (y) ВАБ 1992–2023 гг.				
	$N\tau$	N	τ	L	I
$\frac{d(y/\langle y \rangle)}{dt}$, %/10 лет	28.3	24.6	4.5	11.7	3.7
(СКО, %/10 лет)	(± 5.7)	(± 5.1)	(± 2.7)	(± 2.2)	(± 2.5)
Коэф. корреляции $[r]$	[0.67]	[0.66]	[0.28]	[0.69]	[0.26]
Изменение статистически значимо	✓	✓		✓	

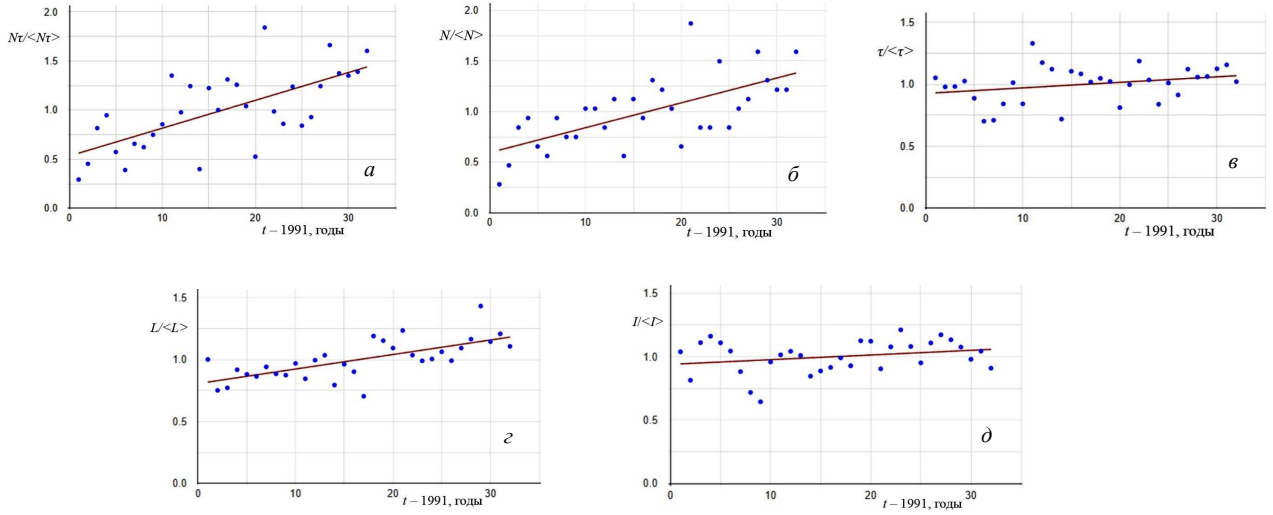


Рис. 4. Межгодовые изменения нормированных значений общей продолжительности весенних атмосферных блокирований $N\tau$ (а) в СП, а также их количества N (б), средней продолжительности τ (в), размера L (г) и интенсивности I (д) с использованием данных GCCG [25] для периода 1992–2023 гг.

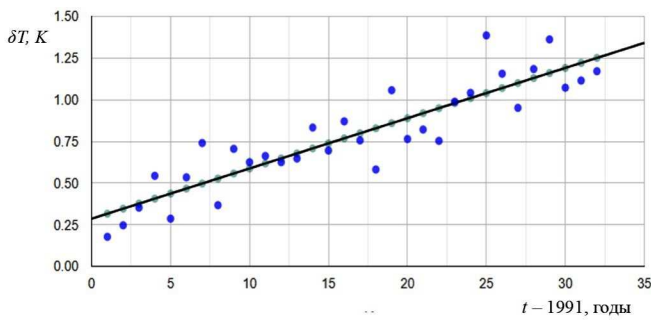


Рис. 5. Аномалии (относительно базового периода 1961–1990 гг.) весенней приповерхностной температуры СП δT [K] в СП в зависимости от времени t (годы относительно 1991 г.) для периода 1992–2023 гг. Прямая линия соответствует линейной регрессии

Характерный масштаб области блокирования (L), определяемый характерным масштабом блокирующего антициклона, можно оценить аналогично [13] масштабом Обухова для баротропной атмосферы ($\sim 3 \cdot 10^3$ км) с корневой зависимостью от температуры: $L_0 \sim \sqrt{T}$. При этом продолжительность

атмосферных блокирований τ в более теплой тропосфере с $\frac{dL}{dT} > 0$ увеличивается при ослаблении зональной циркуляции (ЗЦ) в тропосфере [23]. При глобальном потеплении ослаблению ЗЦ в тропосфере способствует уменьшение меридионального температурного градиента в тропосфере средних широт. При $\frac{dL}{dT} > 0$, в соответствии с (5),

$$\frac{1}{\tau} \cdot \frac{d\tau}{dT} > -\frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT}. \quad (6)$$

Согласно (5) условие $\frac{d\tau}{dT} > 0$ соответствует условию

$$\frac{2}{L} \cdot \frac{dL}{dT} > \frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{dT}, \quad (7)$$

а условие $\frac{dI}{dT} > 0$ соответствует условию

$$\frac{2}{L} \cdot \frac{dL}{dT} > \frac{1}{\tau} \cdot \frac{d\tau}{dT}. \quad (8)$$

Эмпирические оценки для характеристик весенних атмосферных блокирований в табл. 2 подтверждают выполнимость модельных неравенств (6–8).

В случае ослабления зональной циркуляции в тропосфере средних широт увеличивается риск

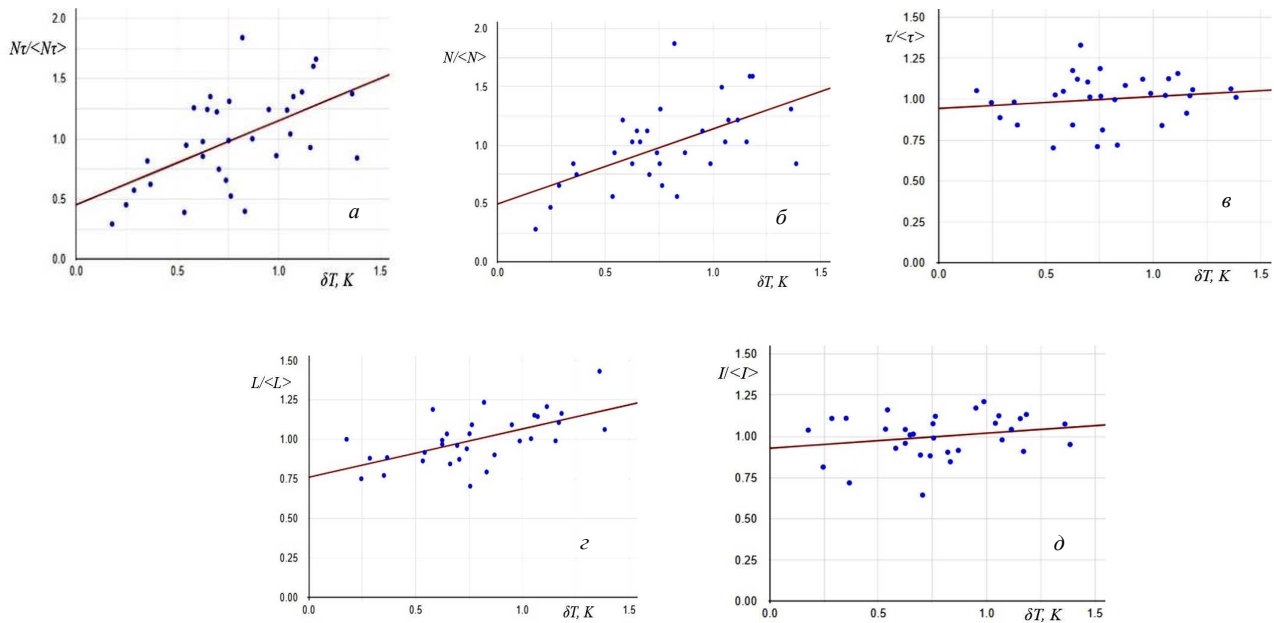


Рис. 6. Нормированные значения общей продолжительности весенних атмосферных блокировок $N\tau$ (а) в СП, а также их количества N (б), средней продолжительности τ (в), размера L (г) и интенсивности I (д) с использованием данных GCCG [25] в зависимости от вариаций приповерхностной температуры СП по данным CRU [24] для весенних сезонов 1992–2023 гг.

Таблица 2. Оценки параметров чувствительности к изменениям приповерхностной температуры СП характеристик весенних атмосферных блокировок y , нормированных на средние значения, по данным для 1993–2023 гг.: общей продолжительности блокировок $N\tau$, количества N , средней продолжительности τ , размера L и интенсивности I . В круглых скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО), а в квадратных — коэффициенты корреляции $[r]$

#	Характеристика (y) ВАБ 1992–2023 гг.				
	$N\tau$	N	τ	L	I
$\frac{d(y/\langle y \rangle)}{dT}$, %/10 лет	70.0	64.3	7.3	30.6	9.1
(СКО, %/10 лет)	(± 18.9)	(± 16.4)	(± 8.4)	(± 6.2)	(± 6.3)
Коеф. корреляции $[r]$	[0.56]	[0.58]	[0.16]	[0.61]	[0.22]
Изменение статистически значимо	✓	✓		✓	

прорыва теплого воздуха из субтропических широт и холодных масс воздуха из арктических широт, что способствует увеличению изменчивости климата [13, 18, 19]. Следует также отметить, что глобальное потепление и климатические вариации в связи с квазициклическими процессами типа Северо-Атлантического колебания, Эль-Ниньо, Атлантической мультисекулярной и Тихоокеанской десятилетней осцилляций могут сопровождаться усилением зональной циркуляции в тропосфере в отдельных широтных зонах из-за выхолаживания стратосферы и мезосферы и усиления струйного течения. Это может содействовать тенденциям уменьшения характерного времени и характерного размера для блокировок или увеличения их интенсив-

ности [12, 13].

Согласно полученным оценкам, для ключевых характеристик весенних атмосферных блокировок и тенденций их изменения в атмосфере СП при продолжении глобального потепления следует ожидать значимое увеличение количества весенних атмосферных блокировок, их общей продолжительности и размеров. С отмеченными тенденциями связаны соответствующие изменения в режимах региональных возвратных похолоданий и волн жары в весенние сезоны, что существенно, в частности, для сельского хозяйства.

Данная работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24-17-00211 с использованием результатов, полученных в рамках проекта РНФ № 23-47-00104.

- Climate Change. V. Masson-Delmotte et al. (eds.). Cambridge Univ. Press. (2021).
- [2] Мохов И.И. // Вестник РАН. **92**, № 1. 3 (2022).
- [3] Мохов И.И. // В: Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Под ред. И.И. Мохова, А.А. Макоско, А.В. Чернокульского. М.: РАН. 14. (2024).
- [4] Мохов И.И. // Метеорология и гидрология. № 11. 50. (2023).
- [5] Обухов А.М., Курганский М.В., Татарская М.С. // Метеорология и гидрология. № 10. 5 (1984).
- [6] Бардин М.Ю. // Метеорология и гидрология. № 2. 5 (2007).
- [7] Мохов И.И. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. **47**, № 6. 709 (2011).
- [8] Sitnov S.A. et al. // Atmos. Environ. **164**. 180 (2017).
- [9] Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Dervyatova E.V., Martynova Yu.V. // Atmosphere. **9**. 72 (2018).
- [10] Lupo A.R. et al. // Atmosphere. **10**(2). 92 (2019).
- [11] Kurgansky M.V. // Theor. Appl. Climatol. **147**. 65 (2022).
- [12] Мохов И.И. // ДАН. Науки о Земле. **508**, № 1. 132 (2023).
- [13] Мохов И.И. // ДАН. Науки о Земле. **521**, № 1. 135 (2025).
- [14] Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С. // ДАН. **495**, № 2. 61 (2020).
- [15] Мохов И.И. // Оптика атмосферы и океана. **36**, № 2. 140 (2023).
- [16] Мохов И.И., Ситнов С.А. // Метеорология и гидрология. № 7. 94 (2023).
- [17] de Vries H., Woolings T., Anstey J. et al. // Clim. Dyn. **41**. 2643 (2013).
- [18] Timazhev A.V., Mokhov I.I. // Research Activities in Earth System Modelling. (edited by E. Astakhova). Rep. 51. S. 2. 23. (2021).
- [19] Wiedenmann J.M. et al. // J. Climate. 2002. **15**. 3459. (2002).
- [20] Lupo A.R. et al. // Clim. Dyn. **13**. 181 (1997).
- [21] Mokhov I.I., Petukhov V.K., Senatorsky A.O. // Publ. Acad. Finland. Painatuskaskus. **6/95**. 438 (1995).
- [22] Мохов И.И., Петухов В.К. // ДАН. **357**, № 5. 687 (1997).
- [23] Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. **28**, № 1. 11 (1992).
- [24] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis_nh.txt
- [25] Global Climate Change Group: <http://solberg.snr.missouri.edu/gcc/>
- [26] National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/>
- [27] NASA Goddard Institute for Space Studies: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

Spring Atmospheric Blockings in the Northern Hemisphere: Changes in Recent Decades (1993–2023)

I. I. Mokhov^{1,2,a}, J. R. Eremin^{1,b}

¹Department of Physics of Atmosphere, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences
Moscow, 119017, Russia

E-mail: ^amokhov@ifaran.ru, ^bEreminIR@my.msu.ru

This paper presents an analysis of the spring atmospheric blockages in the Northern Hemisphere (NH) in 1992–2023. The results of the analysis indicate a significant increase in blocking activity in the atmosphere of the joint venture in recent decades. The noted trend is manifested against the background of a general increase in the near-surface temperature of the NH in the spring seasons. The following SAB parameters were used in the study: quantity, average duration, total duration, intensity, and size. There were obtained estimates of the statistically significant increase in the total duration of the SAB, their number and size with an increase in the average spring near-surface temperature in the NH.

PACS: 92.00.00

Keywords: atmospheric blockings, northern hemisphere, climate changes, spring.

Received 27 April 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. 5. Pp. .

Сведения об авторах

1. Мохов Игорь Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, академик РАН, зав. кафедрой физики атмосферы, научный руководитель ИФА им. А.М. Обухова РАН.
2. Еремин Иван Романович — студент физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; e-mail: EreminIR@my.msu.ru.