

УДК 551.5

ИЗМЕНЕНИЯ СВЯЗАННОГО С АТМОСФЕРНЫМИ ЦИКЛОНАМИ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА ВО ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

© 2023 г. М. Г. Акперов^{а, *}, И. И. Мохов^{а, б}

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, Москва, 119017 Россия

^бМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119992 Россия

*e-mail: aseid@ifaran.ru

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.

После доработки 21.04.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

Получены количественные оценки сезонных и региональных особенностей, а также изменений циклонической активности в атмосфере Северного полушария с определением вклада внетропических циклонов в формирование соответствующих особенностей и изменений приземного ветра с использованием данных реанализа ERA5 для последних десятилетий (1979–2021 гг.). Согласно полученным оценкам вклад внетропических циклонов в формирование скорости ветра в областях их высокой повторяемости достигает 60% зимой и 50% летом. При этом наиболее сильный вклад связан с интенсивными циклонами (с интенсивностью более 15 гПа) — около 60% зимой, а летом — около 25%.

Ключевые слова: внетропические атмосферные циклоны, приземный ветер, Северное полушарие, данные реанализа, тренды

DOI: 10.31857/S0002351523040028, **EDN:** YMRDUQ

ВВЕДЕНИЕ

Циклоны играют важную роль в общей циркуляции атмосферы и формировании погодно-климатической изменчивости.

Особое значение имеют оценки перспектив ветроэнергетики с учетом глобальных и региональных изменений климата [Climate Change 2021; Третий оценочный..., 2022; Интенсивные вихри..., 2018; Neu 2013; Gulev et al., 2001; Бардин и Полонский, 2005; Акперов и др., 2022]. С наиболее мощными (интенсивными) циклонами связаны сильный ветер и ливневые осадки (сильные снегопады зимой и наводнения). Согласно данным Росгидромета (<https://www.meteorf.gov.ru/>) в российских регионах наибольшее количество опасных метеорологических явлений связано с сильным ветром и сильными осадками.

Глобальные и региональные изменения климата сопровождаются изменениями циклонической активности в атмосфере, в том числе их повторяемости, интенсивности, размеров и характерных

путей. Особенно это проявляется в теплые месяцы, т.к. при увеличении приповерхностной температуры растет и влагосодержание атмосферы. При этом следует ожидать формирования более мощных циклонов и связанных с ними экстремальных ветров [Climate Change 2021; Третий оценочный..., 2022; Интенсивные вихри..., 2018].

Процессы формирования циклонов и их влияние на ветровой режим в атмосфере зависят от разных факторов, в том числе от вертикальной температурной стратификации тропосферы и ее изменений [Мохов и др., 1992а, 1992б; Акперов, Мохов, 2013]. В последние десятилетия на фоне глобального потепления, сопровождающегося ростом влагоемкости атмосферы, проявляется тенденция уменьшения ее статической устойчивости с усилением конвективных процессов в атмосфере [Акперов и Мохов, 2006; Акперов и др., 2019; Akperov et al., 2020; Мохов и др., 2009; Мохов, 2022; Мохов, 2023]. Это проявляется, в том числе, в увеличении повторяемости конвективной облачности, конвективных осадков [Sun et al., 2001; Chernokulsky et al., 2011; Chernokulsky et al., 2019; Мохов, 2022; Чернокульский и др. 2022; Мохов, 2023]. Высокоэнергетические процессы конденсации водяного пара в более влагоемкой ат-

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

мосфере способствуют формированию более мощных циклонов с экстремальными скоростями ветра.

В прогностических оценках возможных последствий климатических изменений особо значимы соответствующие количественные оценки циклонической активности в атмосфере, с которой связаны ключевые региональные особенности погодно-климатической изменчивости, в том числе повторяемости интенсивных циклонов и экстремальных ветровых режимов.

Цель данной работы — количественные оценки вклада внетропических циклонов в формирование региональных режимов приземного ветра в разные сезоны с оценкой изменений для последних десятилетий.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Региональные и сезонные характеристики активности атмосферных циклонов и режимов приземного ветра в Северном полушарии (СП) определялись с использованием данных реанализа ERA5 [Hersbach, et al., 2020] с шагом по времени 6 ч. и горизонтальным пространственным разрешением 0.25° для периода 1979–2021 гг.

Характеристики атмосферных циклонов во внетропических широтах ($>20^\circ$) Северного полушария определялись на основе метода, описанного в [Бардин и Полонский, 2005; Акперов и др., 2007] (см. также [Акперов et al., 2019; Акперов et al., 2020]) с использованием данных для приземного давления по данным реанализа ERA5 для периода 1979–2021 гг. Циклоны определялись как области пониженного давления, ограниченные замкнутыми изобарами. Интенсивность (глубина) циклона характеризовалась разностью между минимальным давлением в циклоне и давлением на последней замкнутой изобаре. Интенсивность (глубина) циклона определялась разностью между минимальным давлением в циклоне и давлением на последней замкнутой изобаре. Размер (радиус) циклона оценивался средним расстоянием от центра циклона до последней замкнутой изобары. Характеристики циклонов, детектированных на основе данного метода, хорошо согласуются с характеристиками, полученными с использованием других методов идентификации циклонов [Акперов и др., 2010; Neu et al., 2013; Ulbrich et al., 2013; Интенсивные атмосферные вихри ..., 2018]. В числе различных характеристик циклонической активности анализировались также повторяемость циклонов (с интенсивностью выше 5 гПа; число циклоно-дней за сезон), повторяемость интенсивных циклонов (с интенсивностью более 15 гПа (90% распределения количества циклонов по их интенсивности), средняя по площади циклона скорость приземного

ветра. Экстремальные скорости ветра определялись как скорости приземного ветра, превышающие 90-й процентиль. Энергетика циклонов (кинетическая энергия) оценивалась аналогично [Голицын и др., 2007; Акперов и др., 2007; Simmonds and Keay, 2009] величиной, пропорциональной квадрату интенсивности (глубины) циклона.

Вклад циклонов в формирование скорости приземного ветра оценивалась отношением скорости приземного ветра внутри циклона (в пределах его радиуса) к общей скорости приземного ветра в данной области.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 (а–г) приведены широтно-долготные распределения повторяемости атмосферных циклонов и поля скоростей приземного ветра в атмосфере Северного полушария для зимы и лета в целом для периода 1979–2021 гг. по данным реанализа ERA5. Повторяемость циклонов определялась с учетом их размеров у поверхности. Наряду с характерными максимумами повторяемости циклонов и скоростей приземного ветра над Атлантическим и Тихим океанами в зимний и летний сезоны проявляются повышенные значения повторяемости циклонов и скорости приземного ветра над Средиземным морем и Северным Ледовитым океаном, в частности, над акваториями с морскими льдами.

На рис. 2 представлены пространственные распределения средних значений связанного с циклонической активностью скоростей приземного ветра и относительного вклада атмосферных циклонов в общее поле скоростей приземного ветра в Северном полушарии в зимний и летний сезоны по данным ERA5 в целом для периода 1979–2021 гг. Наибольшая скорость приземного ветра отмечается в регионах с повышенной циклонической активностью над океанами и континентами. Согласно полученным оценкам, средняя скорость приземного ветра, связанная с циклонами, достигает 14 м/с зимой и 10 м/с летом. При этом для большинства регионов вклад, связанный с внетропическими циклонами, в формирование скоростей приземного ветра превышает 30%, а для регионов с высокой повторяемостью циклонов достигает 60% зимой и 50% летом.

С наиболее мощными атмосферными циклонами связаны, естественно, наибольшие скорости приземного ветра. По данным для периода 1979–2021 гг. коэффициенты корреляции между интенсивностью внетропических циклонов в СП и скоростями приземного ветра в циклонах получены равными 0.57 для зимних сезонов, 0.55 — для летних сезонов и 0.54 — в целом за год.

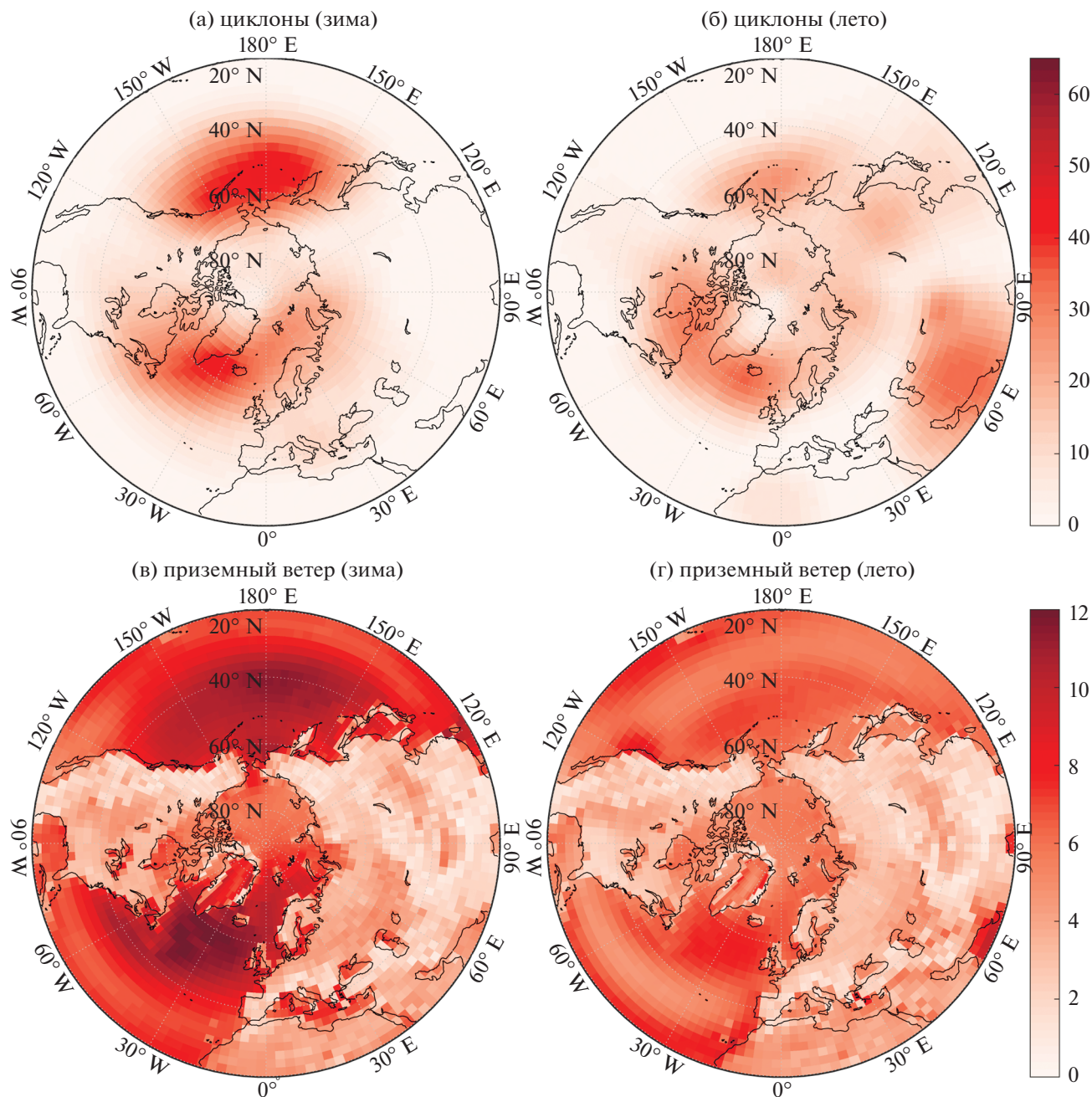


Рис. 1. Пространственные распределения средних значений повторяемости циклонической активности [циклонов/дни/сезон] (а, б) и приземного ветра [м/с] (в, г) в атмосфере Северного полушария для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов по данным реанализа ERA5 для периода 1979–2021 гг.

Рисунок 3 характеризует пространственные распределения средних значений относительного вклада интенсивных циклонов (циклонов с глубиной более чем 15 гПа) в общее поле скоростей приземного ветра в Северном полушарии зимой и летом по данным реанализа ERA5 для периода 1979–2021 гг. Наиболее сильный вклад в формирование режима скоростей приземного ветра связан с мощными циклонами. Согласно полученным оценкам, вклад в формирование режима скоростей приземного ветра циклонов с интен-

сивностью более чем 15 гПа около 60% зимой, для летних сезонов получена почти вдвое меньшая оценка – 25% (рис. 3). При этом вклад в формирование экстремальных скоростей приземного ветра интенсивных циклонов достигает 90% зимой и 50% летом.

На рис. 4 приведены пространственные распределения оценок трендов повторяемости циклонов и коэффициентов корреляции повторяемости циклонов и скоростей приземного ветра в

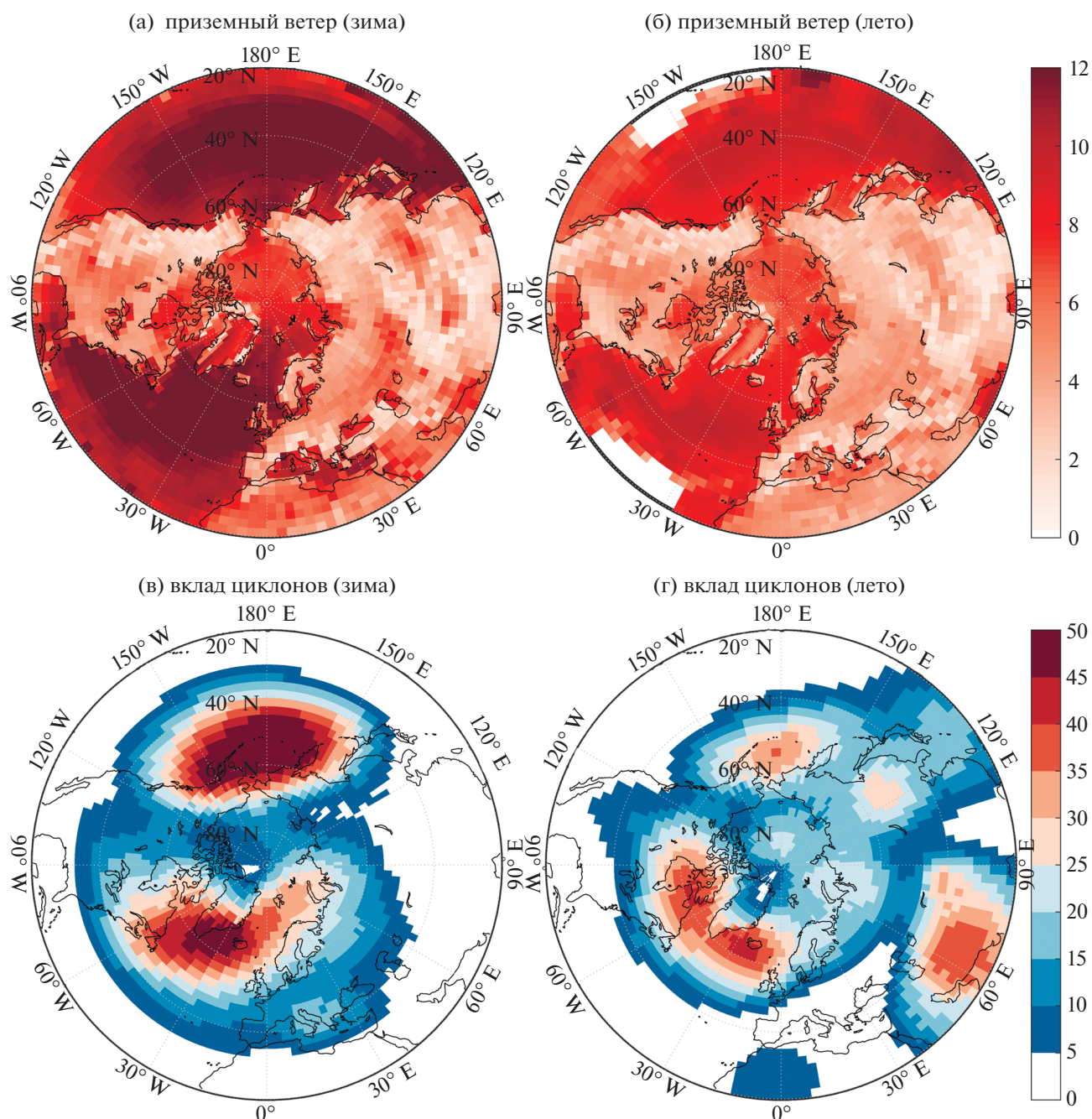


Рис. 2. Пространственные распределения средних значений связанной с циклонической активностью скорости приземного ветра [м/с] (а, б) и относительного вклада атмосферных циклонов [%] (в, г) в формирование режимов скорости приземного ветра (в, г) в атмосфере Северного полушария зимой и летом по данным ERA5 для периода 1979–2021 гг.

атмосфере внетропических широт Северного полушария зимой и летом по данным реанализа ERA5 для периода 1979–2021 гг. в целом. Согласно рис. 4, над обширными территориями проявляется высокая корреляция между повторяемостью циклонов и скоростями приземного ветра, в частности зимой.

Согласно рис. 5 наиболее заметные положительные изменения скорости приземного ветра

зимой, связанные с циклонами, проявляются по данным реанализа ERA5 для периода 1979–2021 гг. над обширными акваториями Атлантического океана, над Тихим океаном, над Северным Ледовитым океаном, над американским континентом, а отрицательные изменения — над европейской частью Евразии. Летом положительные изменения приземного ветра проявляются над Северным Ледовитым океаном, над континентами, включая российские регионы, а также над Тихим

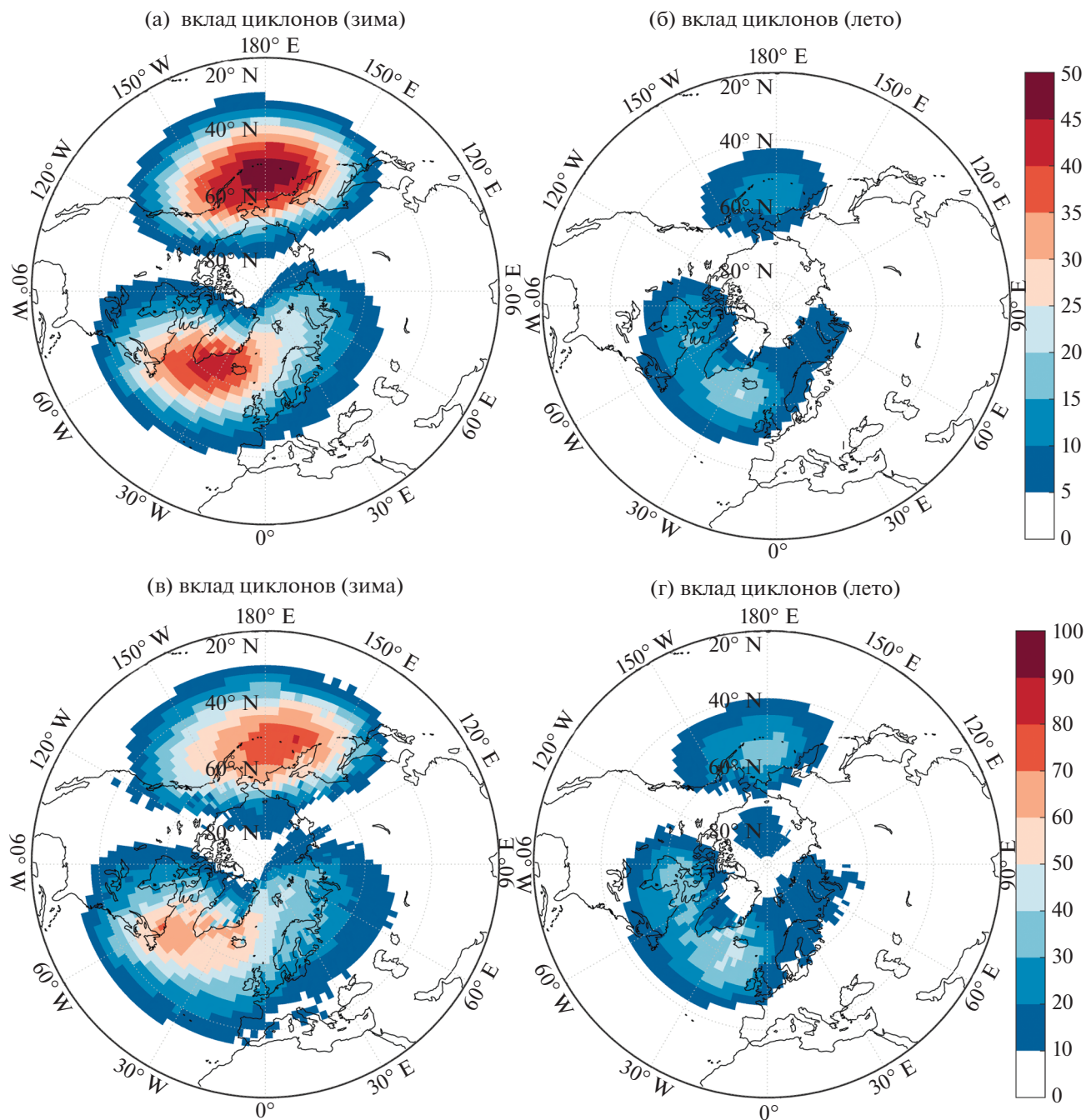


Рис. 3. Пространственные распределения средних значений относительного вклада [%] интенсивных циклонов (≥ 15 гПа) в формирование режимов скорости приземного ветра (а, б) и экстремальных скоростей ветра (90% перцентиль) (в, г) в атмосфере Северного полушария зимой (а) и летом (б) по данным реанализа ERA5 для периода 1979–2021 гг.

океаном, а отрицательные — над Атлантическим океаном и над рядом континентальных регионов Северного полушария. При этом пространственная структура изменений приземного ветра, связанных с интенсивными циклонами, во многом подобна пространственной структуре изменений характерные для более слабых циклонов с заметными различиями в величине трендов (рис. 5в, 5г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены количественные оценки вклада внетропических циклонов Северного полушария в формирование режима скоростей приземного ветра в разные сезоны для периода 1979–2021 гг. с использованием данных реанализа ERA5. Отмечены особенности связанных с циклонической

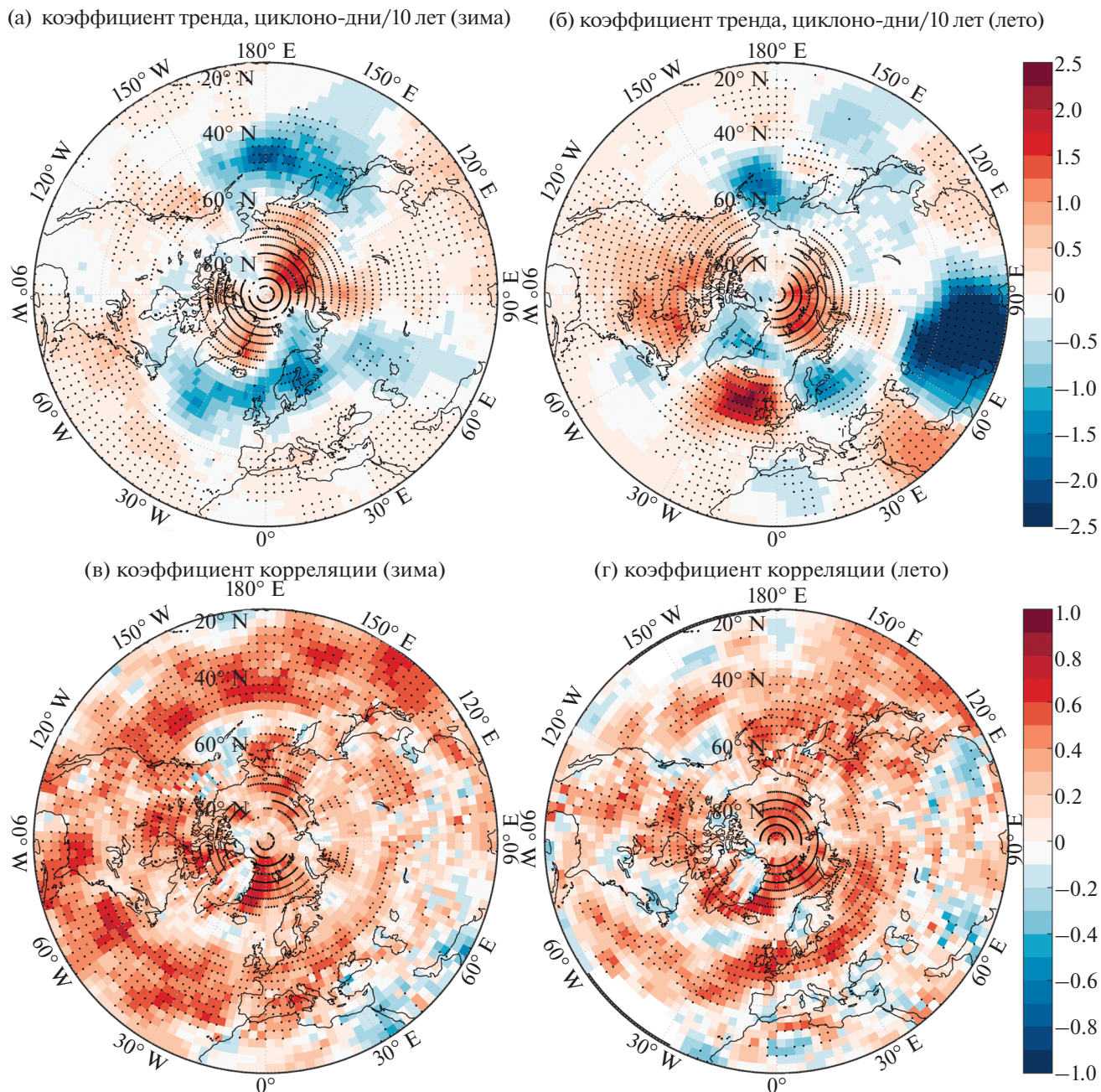


Рис. 4. Пространственные распределения оценок трендов повторяемости циклонов [циклоно-дни/10 лет] (а, б) и коэффициентов корреляции между повторяемостью циклонов и скоростью приземного ветра в атмосфере Северного полушария зимой (а, в) и летом (б, г) по данным реанализа ERA5 для периода 1979–2021 гг. Точками выделены области со статистически значимыми (на уровне 95%) изменениями.

активностью регионов над Атлантическим и Тихим океанами с наибольшими скоростями приземного ветра. Высокая корреляция между повторяемостью циклонов и скоростями приземного ветра и зимой и летом проявляется для европейских регионов и в высоких широтах Северного полушария. Для регионов с высокой повторяемостью циклонов их вклад в формирование режима скоро-

стей приземного ветра достигает 60% зимой и 50% летом. При этом наиболее сильный вклад связан с интенсивными циклонами — около 60% для зимних сезонов и около 25% для летних сезонов.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН). Оценки характери-

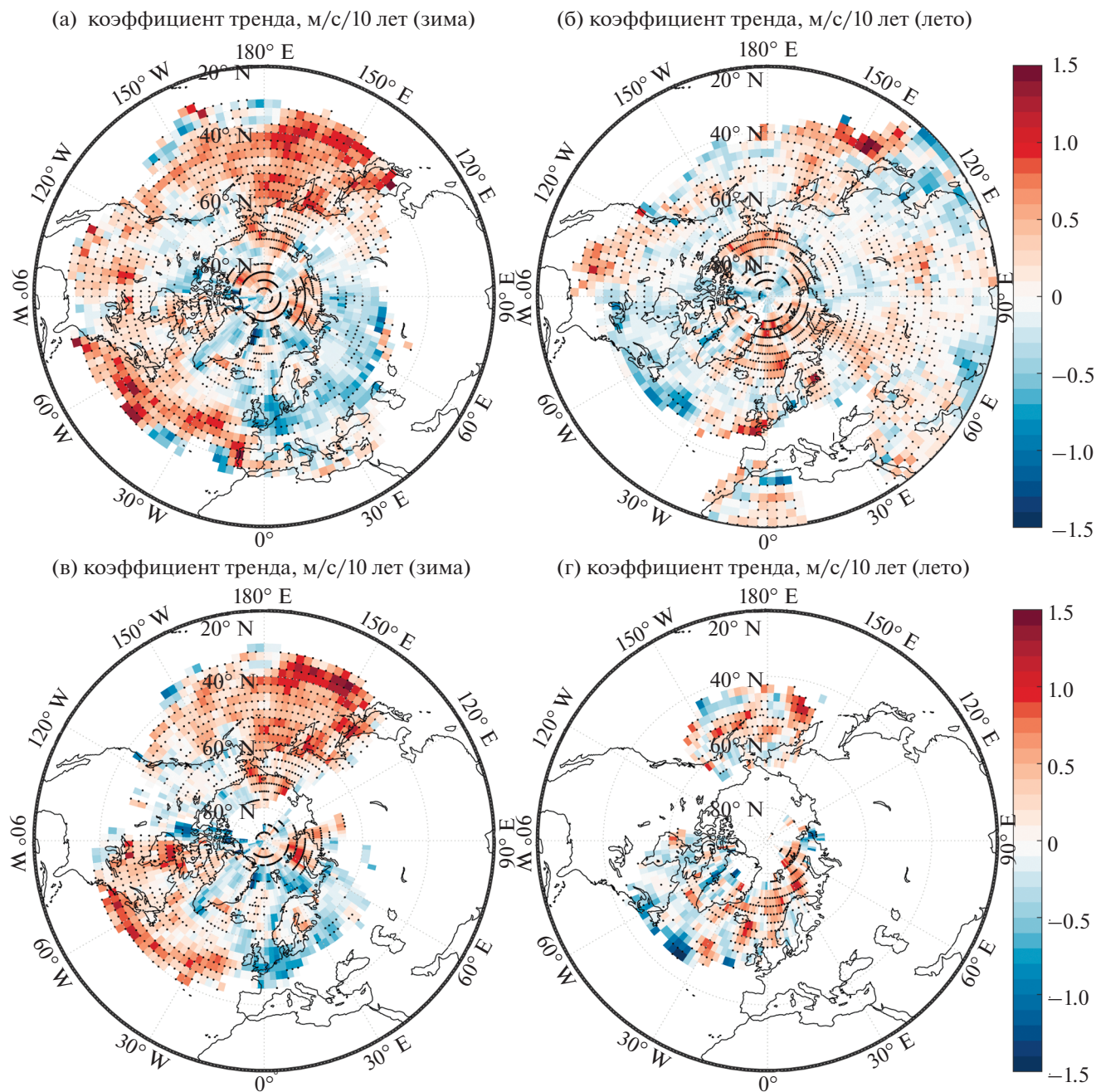


Рис. 5. Пространственные распределения оценок трендов скорости приземного ветра [м/с/10 лет], связанного со всеми циклонами (а, б) и с интенсивными циклонами (в, г) в атмосфере Северного полушария зимой (а, в) и летом (б, г) по данным реанализа ERA5 для периода 1979–2021 гг. Точками выделены области со статистически значимыми (на уровне 95%) изменениями.

стик внетропических циклонов получены в рамках проекта РНФ № 23-47-00104. Региональные особенности атмосферной циркуляции и их изменения анализировались в рамках проекта РНФ № 19-17-00240. Вклад внетропических циклонов в формирование приземного ветра выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-934).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А., Парфенова М.Р., Ринке А. Особенности температурной стратификации и ее изменений в тропосфере арктических широт по данным реанализа и модельным расчетам // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 19–27.
- Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М., Голицын Г.С., Мохов И.И. Функции распределения вероятностей

- циклонов и антициклонов по данным реанализа и модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 6. С. 764–772.
- Акперов М.Г., Елисеев А.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р., Кениг Т. Потенциал ветровой энергии в арктических и субарктических широтах и его изменение в XXI в. по расчетам с использованием региональной климатической модели // Метеорология и гидрология, 2022. № 6. С. 18–29.
- Акперов М.Г., Мохов И.И. Оценки чувствительности циклонической активности в тропосфере внетропических широт к изменению температурного режима // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 2. С. 129–136.
- Акперов М.Г., Мохов И.И. Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 620–637.
- Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 3–13.
- Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю. Функции распределения вероятности для циклонов и антициклонов в период 1952–2000 гг.: инструмент для определения изменений глобального климата // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 254–256.
- Интенсивные атмосферные вихри и их динамика. / Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС., 2018. 482 с.
- Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14.
- Мохов И.И., Акперов М.Г. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 467–475.
- Мохов И.И. Сезонные особенности изменений повторяемости экстремальных погодно-климатических явлений в российских регионах в последние десятилетия // Метеорология и гидрология. 2023 (в печати).
- Мохов И.И., Чернокульский А.В., Акперов М.Г., Дюфрен Ж.-Л., Трет Э.Ле. Изменения характеристик циклонической активности и облачности в атмосфере внетропических широт северного полушария по модельным расчетам в сопоставлении с данными реанализа и спутниковыми данными // Докл. РАН. 2009. Т. 424. № 3. С. 393–397.
- Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р. Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1992а. Т. 28. № 1. С. 11–26.
- Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р. О влиянии облачности на вихревую активность атмосферы при изменениях климата // Метеорология и гидрология. 1992б. № 1. С. 5–11.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. СПб.: Научные технологии. 2022. 676 с.
- Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27–41.
- Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I. et al. Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX) // Glob. Planet. Change. 2019. V. 182. P. 103005
- Akperov M., Semenov V., Mokhov I., Dorn W. and Rinke A. (2020) Impact of Atlantic water inflow on winter cyclone activity in the Barents Sea: Insights from coupled regional climate model simulations // Environ. Res. Lett. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6399>
- Chernokulsky A.V. et al. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6. 035202.
- Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O. et al. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. 045001–17.
- Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte et al. (eds.). Cambridge Univ. Press., 2021.
- Gulev S.K., Zolina O., Grigoriev S. Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data // Clim. Dyn. 2001. V. 17. № 10. P. 795–809.
- Hersbach H.B. et al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146. P. 1999–2049.
- Neu U., Akperov M.G., Benestad R., Blender R., Caballero R., Cocozza A., Dacre H., Feng Y., Grieger J., Gulev S., Hanley J., Hewson T., Hodges K., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Kindem I., Leckebusch G.C., Liberato M., Lionello P., Mokhov I.I., Pinto J.G., Raible C.C., Reale M., Rudeva I., Schuster M., Simmonds I., Sinclair M., Sprenger M., Tilinina N.D., Trigo I.F., Ulbrich S., Ulbrich U., Wang X.L., Wernli H., Xia L. IMILAST – a community effort to intercompare cyclone detection and tracking algorithms: quantifying method-related uncertainties // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2013. V. 94(4). P. 529–547.
- Simmonds I., Keay K. Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979–2008 // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L19715. <https://doi.org/10.1029/2009GL039810>
- Sun B. et al. Recent changes in cloud type frequency and inferred increases in convection over the United States and the Former USSR // J. Climate. 2001. V. 14. P. 1864–1880.
- Ulbrich U., Leckebusch G.C., Grieger J., Schuster M., Akperov M., Bardina M.Yu., Feng Y., Gulev S., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Liberato M.L.R., Lionello P., Mokhov I.I., Neu U., Pinto J.G., Raible C.C., Reale M., Rudeva I., Simmonds I., Tilinina N.D., Trigo I.F., Ulbrich S., Wang X.L., Wernli H. and the IMILAST team. Are Greenhouse Gas Signals of Northern Hemisphere winter extra-tropical cyclone activity dependent on the identification and tracking algorithm? // Meteorologische Zeitschrift. 2013. V. 22. № 1. P. 61–68.

Changes in the Surface Wind Associated with Atmospheric Cyclones at Extra-Tropical Latitudes of the Northern Hemisphere in Recent Decades

M. G. Akperov^{1, *} and I. I. Mokhov^{1, 2}

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119992 Russia*

**e-mail: aseid@ifaran.ru*

We obtained quantitative estimates of seasonal and regional features and changes in cyclone activity in the atmosphere of the Northern Hemisphere and determined the contribution of extratropical cyclones to the formation of corresponding features and changes in the surface wind, using ERA5 reanalysis data for recent decades (1979–2021). According to these estimates, the contribution of extratropical cyclones to surface wind speeds in the regions of their high occurrence reaches 60% in winter and 50% in summer. The strongest contribution is related to intense cyclones: about 60% in winter and about 25% in summer.

Keywords: atmospheric cyclones, surface wind, Northern Hemisphere, reanalysis data, trends