

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.5

Изменения циклонической активности и осадков в атмосфере внетропических широт Северного полушария в последние десятилетия по данным реанализа ERA5

М.Г. Акперов^{✉1}, И.И. Мохов^{1,2*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр.2

Поступила в редакцию 13.01.2023 г.;
после доработки 16.03.2023 г.;
принята к печати 20.03.2023 г.

На основе данных реанализа ERA5 за последние десятилетия (1979–2021 гг.) получены количественные оценки сезонных и региональных особенностей и изменений циклонической активности в атмосфере Северного полушария; определен вклад внетропических циклонов в формирование соответствующих особенностей и изменений режима осадков. Получено, что вклад внетропических циклонов в формирование общего количества осадков в целом превышает 60%, а для регионов с высокой повторяемостью циклонов достигает 75% зимой и 65% летом. При этом наибольший вклад вносят интенсивные циклоны — около 60% зимой и около 35% летом.

Ключевые слова: атмосферные циклоны, осадки, Северное полушарие, реанализ, тренды; atmospheric cyclone, precipitation, Northern Hemisphere, reanalysis, trend.

Введение

Внетропические циклоны играют значимую роль как в атмосферной циркуляции и энергетике, так и в формировании погодно-климатической изменчивости [1–4]. Наиболее интенсивные циклоны сопровождаются сильными ветром и осадками (сильные снегопады зимой и ливневые дожди, приводящие к наводнениям, летом) [5–7]. Согласно данным Росгидромета в российских регионах большинство опасных метеорологических явлений вызваны экстремальными осадками и ветром. При этом в последние десятилетия отмечено значительное увеличение повторяемости экстремальных погодно-климатических явлений, особенно в летние месяцы, существенно обусловленных изменениями вихревой активности в атмосфере и региональными режимами осадков [8, 9].

Особенностям и изменениям циклонической активности в атмосфере и режима осадков посвящен широкий круг разномасштабных исследований, от анализа конкретных событий и процессов до прогностических оценок на глобальном уровне [1–3, 10–19]. В ряде работ сделаны оценки вклада циклонов в формирование режимов атмосферных осадков [18, 20–28] с использованием разных подходов.

При этом оценки связи изменчивости режима осадков, в частности экстремальных, с характеристиками циклонической активности, с их региональными и сезонными особенностями зависят не только от используемых методов детектирования циклонов, но и от глобальных и региональных климатических режимов и их изменений.

Глобальные и региональные климатические изменения сопровождаются изменениями ключевых характеристик циклонической активности в атмосфере, в том числе интенсивности, повторяемости, размеров и характерных траекторий циклонов. В частности, при потеплении с увеличением влагоемкости атмосферы следует ожидать формирования более глубоких циклонов и более интенсивных осадков [3, 29].

Наряду с исследованиями изменчивости отдельных климатических переменных, например циклонической активности и режимов осадков в атмосфере, важное значение имеют оценки их связи, а также возможные изменения. Подобные оценки важны как для диагностики современных изменений климата, так и для определения степени адекватности результатов моделирования климатических изменений в будущем.

Процессы формирования циклонов и осадков в атмосфере зависят от разных факторов, в том числе от вертикальной температурной стратификации тропосферы и ее изменчивости. В последние десятилетия на фоне глобального потепления, сопровождающегося ростом влагоемкости атмосферы,

* Мирсеид Габиль оглы Акперов (aseid@ifaran.ru);
Игорь Иванович Мохов (mokhov@ifaran.ru).

наблюдается тенденция уменьшения статической устойчивости тропосферы с усилением конвективных процессов в атмосфере, особенно в летние месяцы [3, 8, 9, 30, 31]. Это проявляется, в том числе, в изменчивости циклонической и антициклонической активности, увеличении повторяемости конвективной облачности и конвективных осадков, в частности ливневых [8, 9, 19, 32–34]. Для определения возможных последствий климатических изменений необходимы соответствующие количественные оценки изменений циклонической активности, в том числе повторяемости, интенсивности и размеров циклонов, а также их роли в формировании региональных режимов осадков, включая экстремальных.

Цель данной работы – получить количественные оценки вклада внетропических циклонов в формирование режимов осадков для разных сезонов в различных регионах Северного полушария и их изменений за последние десятилетия. Новизна предлагаемого подхода по сравнению, например, с работами [24–27], заключается в учете изменений размеров циклонов в течение их жизненного цикла для уточнения количественных оценок вклада циклонов в формирование режима осадков.

Используемые данные и методы анализа

Для анализа региональных и сезонных характеристик атмосферных циклонов и связанных с ними осадков во внетропических широтах ($> 20^\circ$) Северного полушария использовались поля приземного давления и осадков по данным реанализа ERA5 [35, 36] с шагом по времени 6 ч и горизонтальным пространственным разрешением $0,25^\circ$ в 1979–2021 гг.

Эти данные сглаживались и затем использовались для идентификации атмосферных циклонов во внетропических широтах Северного полушария методом, описанным в [14, 15, 37]. Циклоны определялись как области пониженного давления, ограниченные замкнутыми изобарами. Интенсивность (глубина) циклона вычислялась как разность между давлением на последней замкнутой изобаре и минимальным давлением в циклоне. Энергетика циклонов (кинетическая энергия) оценивалась аналогично [15, 16, 38] величиной, пропорциональной квадрату интенсивности (глубины) циклона. Характерный размер (радиус) циклона определялся как среднее расстояние от центра циклона до последней замкнутой изобары. Характеристики циклонов, рассчитанные данным методом, хорошо согласуются с характеристиками, полученными другими методами идентификации циклонов [3, 10, 39, 40].

Мы анализировали несколько показателей циклонической активности: повторяемость циклонов (число циклоно-дней за сезон), повторяемость циклонов с интенсивностью выше 5 гПа, повторяемость интенсивных циклонов (с интенсивностью более 15 гПа (90-й перцентиль интенсивности осадков)), размеры (характерный радиус) циклонов. Для каждого циклона рассчитывалось осредненное по площади, занимаемой циклоном, количество накопленных за 6 ч осадков, аналогично работе [24].

Результаты и обсуждение

Рассмотрим распределения анализируемых показателей в Северном полушарии зимой и летом, построенные на основе данных реанализа ERA5 за 1979–2021 гг. (рис. 1–4, цв. вкладка). На рис. 1 представлены широтно-долготные распределения повторяемости циклонов и осадков. Повторяемость атмосферных циклонов определялась с учетом их площади. Наряду с максимумами количества циклонов и осадков над Атлантическим и Тихим океанами и зимой и летом можно отметить повышенную повторяемость циклонов и осадков в летние сезоны над континентальными регионами, в частности связанными с областями муссонной активности. При этом расположение областей наиболее сильных осадков меняется в разные сезоны в меньшей степени, чем интенсивность осадков.

На рис. 2 приведены пространственные распределения средних значений связанных с циклонической активностью осадков и относительного вклада атмосферных циклонов в формирование общего количества осадков в Северном полушарии. Наибольшее количество осадков выпадает в регионах с повышенной циклонической активностью над океанами. При этом количество осадков, связанных с циклонами, достигает 5 мм/день зимой и 3 мм/день летом, что согласуется с результатами, полученными в [23].

На рис. 3 показаны пространственные распределения средних значений относительного вклада интенсивных циклонов (с глубиной более 15 гПа) в формирование общего количества осадков в Северном полушарии. Почти во всех регионах более 60% общего количества осадков связано с внетропическими циклонами. Для регионов с высокой повторяемостью циклонов этот вклад достигает 75% зимой и 65% летом (см. рис. 2, в–г).

С наиболее интенсивными атмосферными циклонами связаны более интенсивные осадки. Получены достаточно высокие значения коэффициентов корреляции между интенсивностью внетропических циклонов и осадками в циклоне: 0,73 – для зимних сезонов, 0,76 – для летних сезонов и 0,74 в целом за год для периода 1979–2021 гг. При этом наибольший вклад в формирование осадков связан с интенсивными циклонами: согласно полученным оценкам циклоны с интенсивностью более 15 гПа ответственны за 60% осадков зимой; для летних сезонов это значение почти вдвое меньше – 35% (см. рис. 3).

Рис. 4 характеризует пространственные распределения оценок трендов повторяемости внетропических циклонов и коэффициентов корреляции между повторяемостью циклонов и количеством осадков. Согласно рис. 4, высокая корреляция между повторяемостью циклонов и осадками проявляется, в частности, в высоких широтах и над обширными областями Евразии как для зимы, так и для лета.

Заключение

Получены новые количественные оценки вклада циклонов в формирование общего количества осадков в атмосфере внетропических широт Северного

полушария для разных сезонов по данным реанализа ERA5 за 1979–2021 гг. Выявлены регионы с наибольшим количеством осадков, связанных с циклонической активностью над Атлантическим и Тихим океанами. Высокая корреляция между повторяемостью циклонов и осадками и зимой, и летом отмечена для европейских регионов и в высоких широтах Северного полушария. Согласно полученным оценкам, для большинства регионов вклад внутритропических циклонов в формирование общего количества осадков превышает 60%, что заметно больше оценки, сделанной в работе [24]. Различия могут быть связаны с разными условиями фильтрации циклонов. Для регионов с высокой повторяемостью циклонов этот вклад достигает 75% зимой и 65% летом. Наибольший вклад в формирование атмосферных осадков связан с интенсивными циклонами: около 60% для зимних сезонов и около 35% для летних. Эти оценки совпадают с полученными в работе [24].

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-27-00780).

Список литературы

1. *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: Cambridge University Press, 2021. 2409 p.
2. *Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
3. *Интенсивные атмосферные вихри и их динамика* / под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чехтиани. М.: ГЕОС, 2018. 482 с.
4. Акперов М.Г., Елисеев А.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р., Кениг Т. Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменение в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели // *Метеорол. и гидрол.* 2022. № 6. С. 18–29.
5. Voskresenskaya E., Vyshekvarkova E. Extreme precipitation over the Crimean peninsula // *Quatern. Int.* 2016. V. 409. P. 75–80.
6. Пичугин М.К., Гурвич И.А., Баранюк А.В. Анализ экстремального ветра в интенсивных внутритропических циклонах над северной частью Тихого океана на основе измерений со спутника SMAP // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19, № 5. С. 287–299. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-287-299.
7. Бардин М.Ю., Платова Т.В. Изменения сезонных показателей экстремумов температуры воздуха в Москве и центральных областях европейской части России // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 7. С. 20–35.
8. Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // *Вестн. РАН*. 2022. Т. 92, № 1. С. 3–14.
9. Мохов И.И. Сезонные особенности изменений повторяемости экстремальных погодно-климатических явлений в российских регионах в последние десятилетия // *Метеорол. и гидрол.* 2023. (в печати).
10. 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, N 4. P. 529–547.
11. Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р. Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 1992. Т. 28, № 1. С. 11–26.
12. Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р. О влиянии облачности на вихревую активность атмосферы при изменениях климата // *Метеорол. и гидрол.* 1992. № 1. С. 5–11.
13. 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, N 10. P. 795–809.
14. Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2005. Т. 41, № 2. С. 3–13.
15. 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. Физ. атмосф. и океана*. 2007. Т. 43, № 6. С. 764–772.
16. 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.
17. Акперов М.Г., Мохов И.И. Оценки чувствительности циклонической активности в тропосфере внутритропических широт к изменению температурного режима // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2013. Т. 49, № 2. С. 129–136.
18. Messmer M., Simmonds I. Global analysis of cyclone-induced compound precipitation and wind extreme events // *Weather Clim. Extremes*. 2021. V. 32. P. 100324.
19. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швец Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // *Метеорол. и гидрол.* 2022. № 5. С. 27–41.
20. Berry G., Reeder M.J., Jakob C. A global climatology of atmospheric fronts // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L04809. DOI: 10.1029/2010GL046451.
21. Simmonds I., Keay K., Bye J. Identification and climatology of Southern Hemisphere mobile fronts in a modern reanalysis // *J. Clim.* 2011. V. 25. P. 1945–1962.
22. Catto J.L., Jakob C., Berry G., Nicholls N. Relating global precipitation to atmospheric fronts // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L10805. DOI: 10.1029/2012GL051736.
23. Hawcroft M.K., Shaffrey L.C., Hodges K.I., Dacre H.F. How much northern hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones? // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L24809.
24. Hawcroft M., Walsh E., Hodges K., Zappa G. Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical cyclones // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13, N 12. P. 124006.
25. Hawcroft M.K., Shaffrey L.C., Hodges K.I., Dacre H.F. Can climate models represent the precipitation associated with extratropical cyclones? // *Clim. Dyn.* 2016. V. 47, N 3–4. P. 679–695. DOI: 10.1007/s00382-015-2863-z.

26. Booth J.F., Naud C.M., Willison J. Evaluation of extratropical cyclone precipitation in the North Atlantic basin: An analysis of ERA-Interim, WRF, and two CMIP5 models // *J. Climate*. 2018. V. 31, N 6. P. 2345–2360. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0308.1.
27. Zhang Z., Colle B.A. Changes in extratropical cyclone precipitation and associated processes during the twenty-first century over eastern North America and the Western Atlantic using a cyclone-relative approach // *J. Climate*. 2017. V. 30, N 21. P. 8633–8656. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0906.1.
28. Pfahl S., Wernli H. Quantifying the relevance of cyclones for precipitation extremes // *J. Climate*. 2012. V. 25, N 19. P. 6770–6780. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00705.1.
29. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч. Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2003. Т. 39, № 2. С. 150–165.
30. Мохов И.И., Акперов М.Г. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2006. Т. 42, № 4. С. 467–475.
31. 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 // *Метеорол. и гидрол.* 2019. № 2. С. 19–27.
32. Sun B., Groisman P.Ya., Mokhov I.I. 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.
33. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6. P. 035202.
34. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. P. 045001–17.
35. Hersbach H.B., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Bijaoui G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hylm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villeneuve S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. P. 1999–2049.
36. Lavers D.A., Simmons A., Vamborg F., Rodwell M.J. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2022. V. 148. P. 3152–3165.
37. Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Parfenova M.R., Matthes H., Adakudlu M., Boberg F., Christensenefn J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiema O., Sein D., Zhang W. 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.
38. 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. P. L19715. DOI: 10.1029/2009GL039810.
39. Акперов М.Г., Мохов И.И. Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2010. Т. 46, № 5. С. 620–637.
40. Ulbrich U., Leckebusch G.C., Grieger J., Schuster M., Akperov M., Bardin 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, N 1. P. 61–68.

M.G. Akperov, I.I. Mokhov. Changes in cyclone activity and precipitation in the extratropical latitudes of the Northern Hemisphere in recent decades according to ERA5 reanalysis data.

We quantified the seasonal/regional patterns and changes in cyclone activity in the atmosphere of the Northern Hemisphere and determined the contribution of extratropical cyclones to the formation of corresponding patterns and precipitation changes. It is established that the contribution of extratropical cyclones to the total amount of precipitation exceeds 60% on the whole; for regions with a high cyclone occurrence, it attains 75% in winter and 65% in summer. The strongest contribution is related to intense cyclones: 60% in winter and 35% in summer.

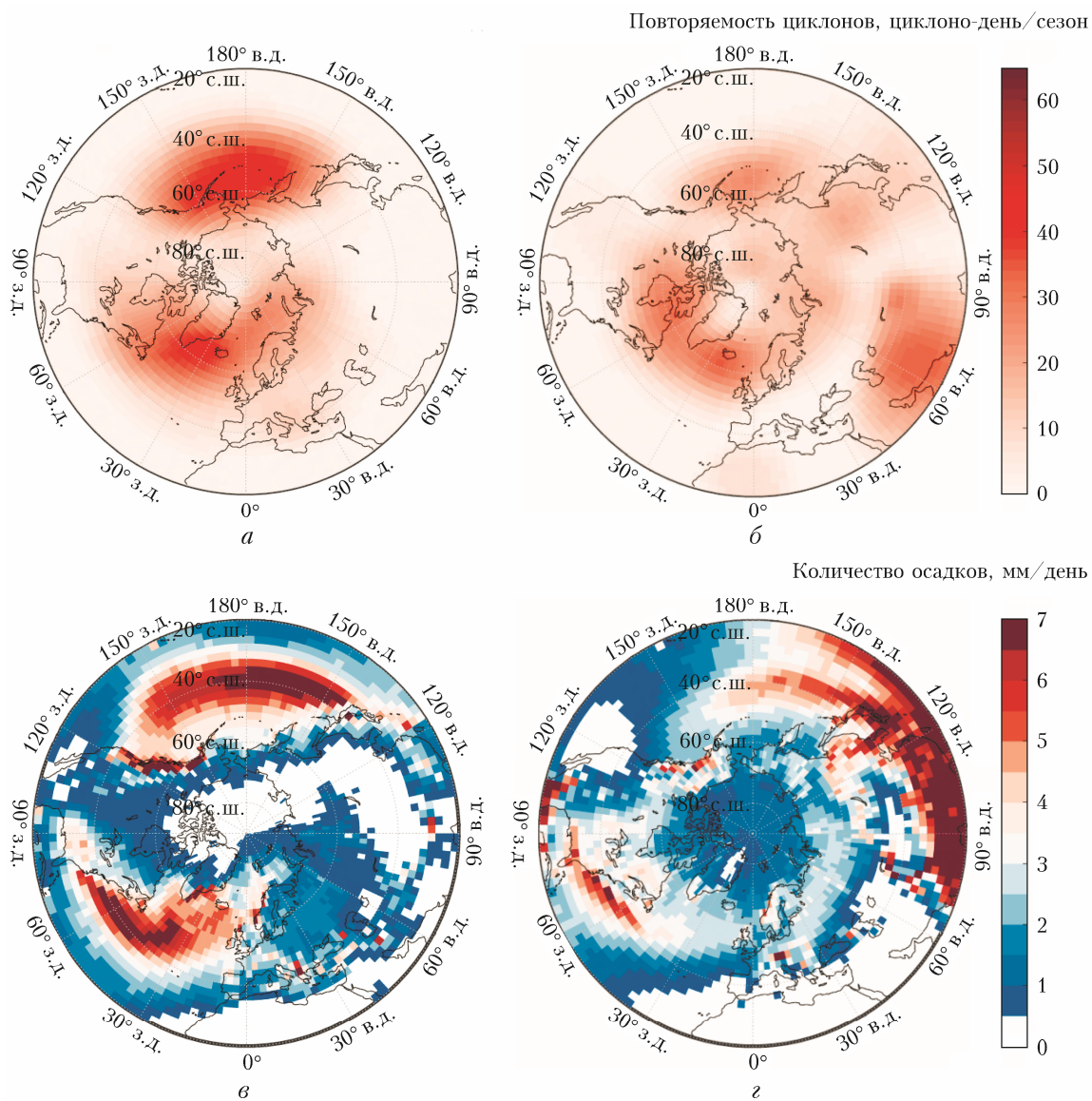


Рис. 1. Пространственные распределения средних значений повторяемости циклонической активности (а, б) и осадков в атмосфере Северного полушария для зимы (а, в) и лета (б, г) по данным реанализа ERA5 за период 1979–2021 гг.

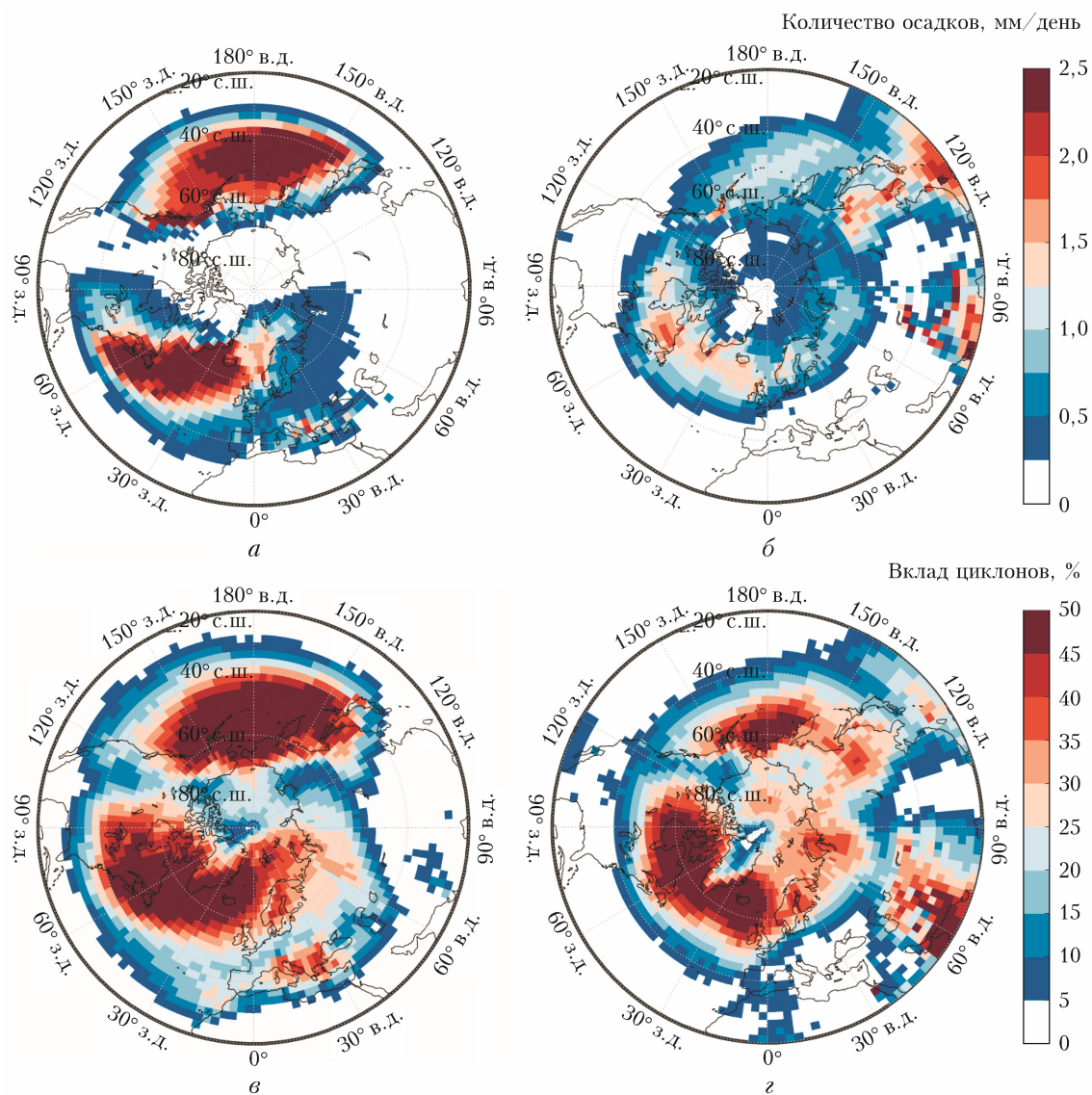


Рис. 2. Пространственные распределения средних значений связанного с циклонической активностью количества осадков (а, б) и относительного вклада атмосферных циклонов в формирование общего количества осадков (в, г) в Северном полушарии зимой и летом по данным ERA5 за период 1979–2021 гг.

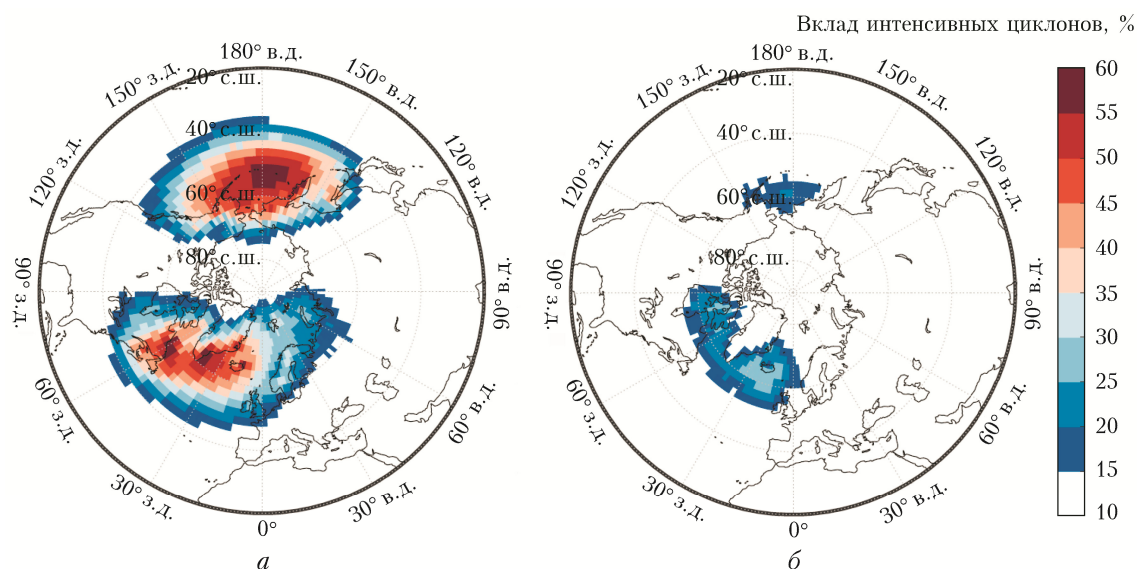


Рис. 3. Пространственные распределения средних значений относительного вклада интенсивных циклонов (≥ 15 гПа) в формирование общего количества осадков в Северном полушарии зимой (*a*) и летом (*б*) по данным реанализа ERA5 за период 1979–2021 гг.

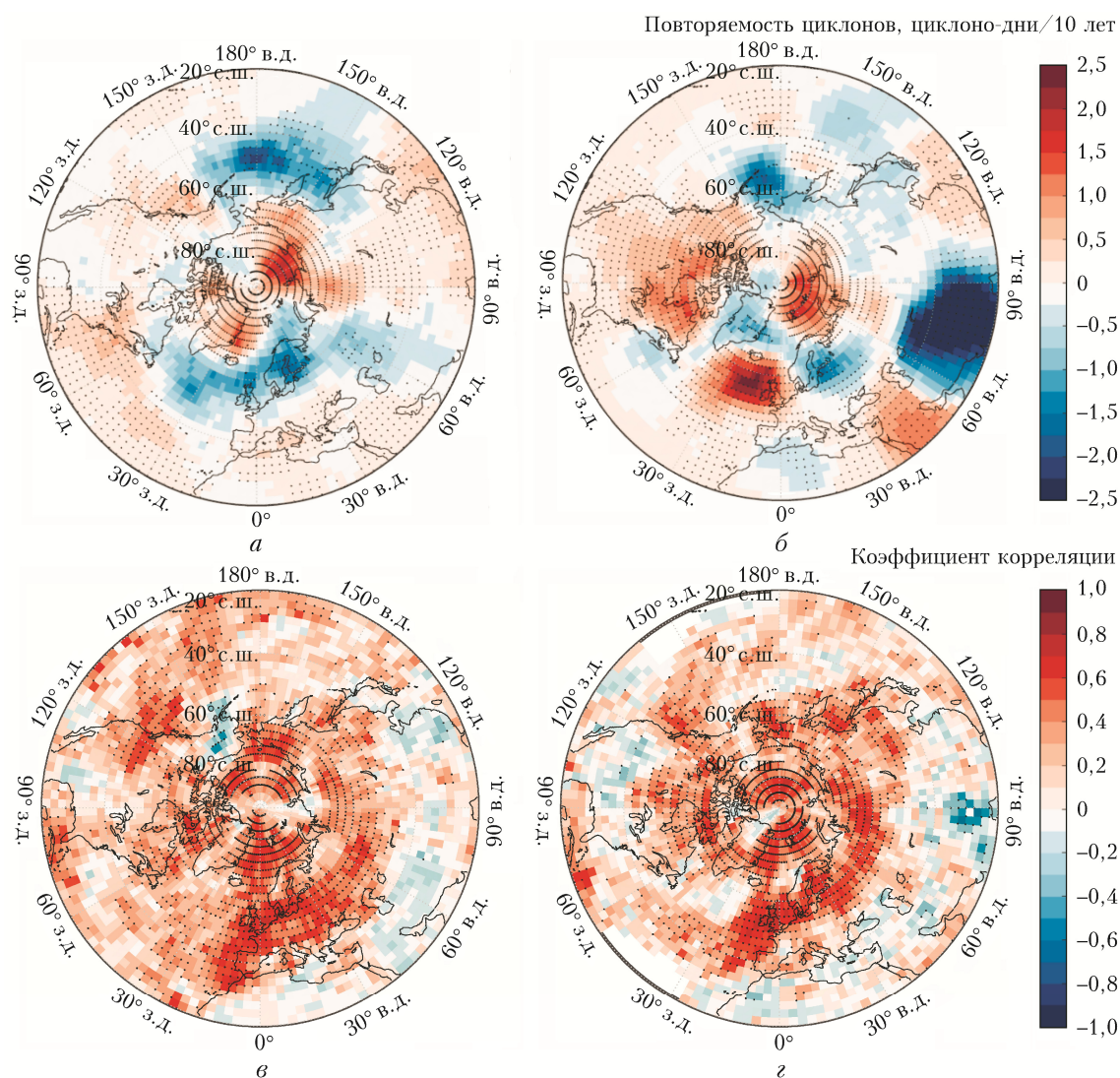


Рис. 4. Пространственные распределения оценок трендов повторяемости циклонов (*a*, *б*) и коэффициентов корреляции между повторяемостью циклонов и осадками в атмосфере Северного полушария зимой (*a*, *в*) и летом (*б*, *г*) по данным реанализа ERA5 за период 1979–2021 гг. Точками отмечены статистически значимые на уровне 95% региональные оценки