

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.5

## Ветроэнергетический потенциал высоких широт Северного полушария при современных климатических изменениях

М.Г. Акперов<sup>✉ 1</sup>, А.В. Елисеев<sup>1, 2, 3\*</sup>

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

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

<sup>3</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420097, г. Казань, ул. Товарищеская, 5

Поступила в редакцию 14.11.2022 г.;  
после доработки 23.12.2022 г.;  
принята к печати 23.01.2023 г.

Получены количественные оценки изменений ветроэнергетических ресурсов в высоких широтах Северного полушария с использованием данных реанализа ERA5 за 1979–2021 гг. При анализе оценивалась мощность ветроэнергетического потенциала (МВП). По данным реанализа ERA5, для современного климатического режима отмечено заметное увеличение МВП над Гренландским, Норвежским, Баренцевым, Карским и Чукотским морями, а также над европейской территорией России зимой, над Карским и Норвежским морями весной, а летом и осенью — общее увеличение МВП вдоль побережья Арктики, в частности над его российским сектором. Отмеченные изменения МВП достаточно хорошо коррелируют с отступлением морских льдов в Арктике, а также с индексом листовой поверхности, характеризующим шероховатость подстилающей поверхности в высоких широтах Северного полушария. Увеличение доли года, когда возможна работа ветрогенераторов, в Российской Арктике делает регион достаточно перспективным для использования и развития ветровой энергетики в условиях изменения климата.

**Ключевые слова:** ветроэнергетические ресурсы, морской лед, индекс листовой поверхности, Арктика, изменение климата, реанализ; wind energy resources, sea ice, leaf area index, Arctic, climate change, reanalysis.

### Введение

Глобальное потепление в последние десятилетия сопровождается беспрецедентным сокращением площади морского льда в Арктике [1–4], делая Арктику более доступной для экономического освоения. Таяние арктических ледников дает импульс развитию судоходства, рыболовства, добычи полезных ископаемых и других видов деятельности в регионе, в частности производства электрической энергии из возобновляемых источников [5, 6]. Одним из перспективнейших источников энергии является ветер. Энергию ветра относят к так называемой «чистой», или «зеленой», энергии, поскольку она характеризуется очень низким уровнем выбросов парниковых газов при генерации. Это создает предпосылки к активному освоению и использованию ветроэнергетических ресурсов высоких широт Северного полушария.

Пространственно-временная изменчивость характеристик ветра в высоких широтах Северного полушария зависит от изменений атмосферной циркуляции в результате климатических изменений, включая вихревую активность [7–9], а также от региональных условий, таких как стратификация атмосферы [10–12]. Одним из ключевых факторов изменения характеристик ветра над Северным ледовитым океаном является сокращение площади морских льдов, которое влияет на аэродинамическую шероховатость поверхности, теплообмен и стратификацию атмосферы, что, в свою очередь, влияет на режим ветра. При этом вклад изменений режима морских льдов в региональную изменчивость скорости приземного ветра зависит от сезона. Другой не менее важный фактор, который также влияет на аэродинамическую шероховатость подстилающей поверхности — растительный покров. Таким образом, количественная оценка изменчивости ветра на рабочей высоте турбин и его связь с изменениями площади морских льдов и растительного покрова имеет особое значение при планировании постройки ветропарков и соответствующей инфраструктуры [13, 14].

\* Мирсеид Габиль оглы Акперов (aseid@ifaran.ru);  
Алексей Викторович Елисеев (eliseev.alexey.v@gmail.com).

Цель данной работы — получить количественные оценки мощности ветрового потока в высоких широтах Северного полушария в последние десятилетия (1970–2021 гг.).

## Данные и методы

Анализировались часовые значения полей скорости ветра на высоте турбины (100 м) и месячные поля концентрации морских льдов по данным реанализа ERA5 [15] для высоких широт Северного полушария ( $> 60^\circ$  с.ш.) (рис. 1, цв. вкладка) зимой (декабрь — февраль), весной (март — май), летом (июнь — август) и осенью (сентябрь — ноябрь).

Для оценки потенциала ветровой энергии рассчитывалась мощность ветрового потока (МВП, Вт/м<sup>2</sup>) [16]:

$$\text{МВП} = \frac{1}{2} \rho U^3,$$

где  $U$  — скорость ветра на высоте 100 м, м/с;  $\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха на уровне моря.

Представленные в данной работе оценки получены при условии, что работа ветрогенераторов невозможна при скорости ветра менее 3 или более 20 м/с [17].

Полный индекс листовой поверхности  $L$ , м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>, характеризующий меру изменчивости шероховатости подстилающей поверхности, рассчитывался как

$$L = c_n \cdot L_n + c_v \cdot L_v,$$

где  $L_n$  ( $L_v$ ) — индекс листовой поверхности для травяной (древесной) растительности, м<sup>2</sup>;  $c_n$  ( $c_v$ ) — площадь нижнего (верхнего) растительного покрова, м<sup>2</sup>.

## Результаты

На рис. 1 показано пространственное распределение среднего многолетнего модуля скорости ветра на высоте 100 м по данным реанализа ERA5 [15] в высоких широтах Северного полушария в 1979–2021 гг. Выбор реанализа ERA5 обусловлен тем, что его данные по скорости ветра наилучшим образом (по сравнению с другими системами реанализа) согласуются с данными наблюдений как для средних многолетних значений, так и для характеристик изменчивости [18, 19]. Скорость ветра на высоте 100 м в высоких широтах Северного полушария имеет максимум над Евро-Атлантическим сектором Арктики (регион наибольшей циклонической активности) и минимум над континентами во все сезоны. На рис. 2 (цв. вкладка) представлено ее внутригодовое среднеквадратичное отклонение. В целом наиболее сильная изменчивость отмечается над Евро-Атлантическим сектором Арктики и в районе Чукотского моря.

Рис. 3 (цв. вкладка) дает представление о трендах изменений сезонных МВП по данным реанализа ERA5 за 1979–2021 гг. Зимой области значительного увеличения МВП проявляются над Гренландским, Норвежским, Баренцевым, Карским и Чукотским

морями, а также над европейской территорией России. Слабое уменьшение МВП наблюдается над континентами. Весной наиболее сильное увеличение МВП отмечается над Карским и Норвежским морями, а также над обширными континентальными областями. Заметное уменьшение МВП проявляется над Гренландским морем. Летом МВП увеличивается вдоль побережья Арктики, в частности над его российским сектором и над территорией РФ и Аляской. Слабое уменьшение МВП мы видим над Восточной Сибирью. Осенью картина представляется более хаотичной, при этом заметный рост МВП наблюдается в районе пролива Дэвиса, а его уменьшение — в северной части Норвежского моря; также отмечается рост МВП вдоль побережья арктических морей.

Такие изменения МВП достаточно хорошо коррелируют с прогнозируемым отступлением морских льдов в Арктике (рис. 4, цв. вкладка). Сокращение их площади влияет на аэродинамическую шероховатость поверхности, тепло- и влагообмен и стратификацию атмосферы [20] и, таким образом, оказывает заметное влияние на МВП [21].

На скорость ветра также может влиять изменение растительного покрова на континентах в высоких широтах Северного полушария через изменение ее шероховатости [22]. Одним из параметров, характеризующих растительный покров, является индекс листовой поверхности — отношение суммарной площади односторонней поверхности листьев на участке к площади участка. В зимнее время он характеризуется высокой изменчивостью относительно других сезонов. Поэтому связь ветра на высоте 100 м с этим индексом анализируется лишь для зимнего сезона.

На севере европейской территории России, в Скандинавии и на севере Северной Америки проявляются положительный и статистически значимый тренд индекса листовой поверхности и положительная корреляция между ним и скоростью ветра (рис. 5, цв. вкладка). Это может быть связано с влиянием увеличения продуктивности наземной растительности на высоту шероховатости. Так, удлинение вегетационного периода при потеплении климата в этих регионах [23, 24] и эффект фертилизации наземной растительности углекислым газом атмосферы [23, 25] приводят к интенсификации биологической продукции с соответствующим увеличением биомассы в наземной растительности. С учетом аллометрических соотношений, связывающих высоту кустарников с индексом листовой поверхности [26] (следует иметь в виду, что для таежных пород, распространенных в данных регионах, годовой ход листового индекса практически не выражен), накопление биомассы приводит к увеличению высоты древостоя с соответствующим увеличением высоты шероховатости.

Заметим, что в Европе южнее примерно  $65^\circ$  с.ш. соответствующие коэффициент тренда и коэффициент корреляции отрицательны. В этих регионах высота шероховатости, по-видимому, менее значима для величины модуля скорости ветра по сравнению

с другими факторами (например, горизонтальным градиентом давления).

Скорости ветра на уровне 100 м, которые необходимы для оптимальной работы ветрогенераторов, оцениваются в диапазоне от 10 до 20 м/с. Они примерно соответствуют диапазону МВП от 600 до 1900 Вт/м<sup>2</sup>. Согласно данным реанализа ERA5 зимой отмечается уменьшение скоростей ветра на высоте 100 м над Скандинавским полуостровом и увеличение их повторяемости над Сибирью. Весной в целом везде уменьшается повторяемость неблагоприятных дней, включая арктическое побережье России. Летом количество неблагоприятных дней растет. Соответствующий коэффициент линейного тренда достигает 4 м/с за декаду (10 лет) над континентами. Осенью количество дней, непригодных для работы ветрогенераторов, незначительно увеличивается, но уменьшается на Дальнем Востоке.

Таким образом, можно сделать вывод о перспективном использовании и развитии ветровой энергетики в прибрежных районах Российской Арктики и более южных регионов с учетом климатических изменений.

## Заключение

В работе проведена оценка мощности ветроэнергетического потенциала в высоких широтах Северного полушария с использованием данных реанализа ERA5 за 1979–2021 гг. Согласно полученным результатам увеличивается МВП заметно зимой над Гренландским, Норвежским, Баренцевым, Карским и Чукотским морями, а также над европейской территорией России, над Карским и Норвежским морями весной, а летом и осенью наблюдается общее увеличение МВП вдоль побережья Арктики, в частности его российского сектора. Отмеченные изменения МВП достаточно хорошо коррелируют с областями сокращения площади морских льдов в Арктике, в частности в морях Российской Арктики. Это связано с уменьшением шероховатости поверхности океана, вызванным переходом от ледяного покрова к открытой воде, а также снижением устойчивости атмосферы, что приводит к уменьшению скорости ветра в Арктике.

На скорость ветра также влияет изменение растительного покрова на континентах в высоких широтах Северного полушария путем изменения ее шероховатости поверхности. На севере европейской территории России, в Скандинавии и на севере Северной Америки проявляются значимый положительный тренд индекса листовой поверхности и положительная корреляция между ним и скоростью ветра. Это может быть связано с влиянием увеличения продуктивности наземной растительности на высоту шероховатости, в том числе из-за удлинения вегетационного периода при потеплении климата и эффекта фертилизации наземной растительности углекислым газом атмосферы.

Отмеченное увеличение доли года, когда возможна работа ветрогенераторов, над Российской

Арктикой делает регион достаточно перспективным для использования и развития ветровой энергетики в условиях изменения климата.

**Финансирование.** Исследования проведены при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-27-00780).

## Список литературы

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1535 с.
2. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1. С. 32–41.
3. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь протяженности антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979–2020 гг. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496, № 1. С. 71–77.
4. Previdi M., Smith K.L., Polvani L.M. Arctic amplification of climate change: A review of underlying mechanisms // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16, N 9. DOI: 10.1088/1748-9326/ac1c29.
5. Пустовалов К.Н., Харюткина Е.В., Корольков В.А., Нагорский П.М. Изменчивость ресурсов солнечной и ветровой энергии в российском секторе Арктики // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 11. С. 908–914; Pustovalov K.N., Kharyutkina E.V., Korolkov V.A., Nagorskiy P.M. Variations in resources of solar and wind energy in the Russian sector of the Arctic // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 3. P. 282–288.
6. Кислов А.В., Суркова Г.В. Влияние глобального потепления на климатические ресурсы России // Экономика. Налоги. Право. 2021. Т. 14, № 4. С. 6–14.
7. 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.
8. Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Matthes H., Semenov V.A., Adakudlu M., Cassano J., Christensen J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Glisan J., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiema O., Scinocca J.F., Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Cyclone activity in the Arctic from an ensemble of regional climate models (Arctic CORDEX) // J. Geophys. Res.: Atmos. 2018. DOI: 10.1002/2017JD027703.
9. Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Parfenova M.R., Matthes H., Adakudlu M., Boberg F., Christensen 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., Sobolowski S., Winger K., 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. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.103005.
10. Khon V., Mokhov I.I., Pogarskiy F., Babanin A., Dethloff K., Rinke A., Matthes H. Wave heights in the 21st century Arctic Ocean simulated with a regional climate model // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, N 8. P. 2956–2961. DOI: 10.1002/2014GL059847.
11. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика / под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чехтиани. М.: ГЕОС, 2018. 482 с.

12. 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.
13. Писарев А.Е. Использование ветроэнергетики в Арктике // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. 2020. № 1. С. 441–444.
14. Лыжин Д.Н. Ветроэнергетика: возможности для Арктики // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2021. № 1. С. 64–68. DOI: 10.51823/74670\_2021\_1\_64.
15. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Mucoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati 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 P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
16. Николаев В.Г. Национальный Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения / В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов; Научно-информационный центр «Атмограф», Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского и ОАО ПАО «ЕЭС России». М.: Атмограф, 2008. 581 с.
17. Carvalho D., Rocha A., Costoya X., deCastro M., Gyme-Gesteira M. Wind energy resource over Europe under CMIP6 future climate projections: What changes from CMIP5 to CMIP6 // Renew. Sust. Energ. Rev. 2021. V. 151. P. 111594. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111594.
18. Ramon J., Lledy L., Torralba V., Soret A., Doblas-Reyes F.J. What global reanalysis best represents near-surface winds? // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2019. V. 145, N 724. P. 3236–3251. DOI: 10.1002/qj.3616.
19. Minola L., Zhang F., Azorin-Molina C., Pirooz A.A.S., Flay R.G.J., Hersbach H., Chen D. Near-surface mean and gust wind speeds in ERA5 across Sweden: Towards an improved gust parametrization // Clim. Dyn. 2020. V. 55, N 3. P. 887–907. DOI: 10.1007/s00382-020-05302-6.
20. Akperov M., Semenov V.A., Mokhov I.I., Dorn W., Rinke A. Impact of Atlantic water inflow on winter cyclone activity in the Barents Sea: Insights from coupled regional climate model simulations // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15, N 2. P. 24009. DOI: 10.1088/1748-9326/ab6399.
21. Jakobson L., Vihma T., Jakobson E. Relationships between sea ice concentration and wind speed over the Arctic Ocean during 1979–2015 // J. Clim. 2019. V. 32, N 22. P. 7783–7796. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0271.1.
22. Akperov M., Zhang W., Miller P.A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Matthes H., Smith B., Rinke A. Responses of Arctic cyclones to biogeophysical feedbacks under future warming scenarios in a regional Earth system model // Environ. Res. Lett. 2021. DOI: 10.1088/1748-9326/ac0566.
23. Елисеев А.В. Глобальный цикл CO<sub>2</sub>: основные процессы и взаимодействие с климатом // Фундамент. и прикл. климатол. 2017. Т. 4. С. 9–31.
24. Canadell J.G., Monteiro P.M.S., Costa M.H., Cotrim da Cunha L., Cox P.M., Eliseev A.V., Henson S., Ishii M., Jaccard S., Koven C., Lohila A., Patra P.K., Piao S., Rogelj J., Syampungani S., Zaehle S., Zickfeld K. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks // Clim. Change. 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelek O., Yu R., Zhou B. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 673–816. DOI: 10.1017/9781009157896.007
25. Franks P.J., Adams M.A., Anthor J.S., Barbour M.M., Berry J.A., Ellsworth D.S., Farquhar G.D., Ghanoun O., Lloyd J., McDowell N., Norby R.J., Tissue D.T., von Caemmerer S. Sensitivity of plants to changing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration: From the geological past to the next century // New Phytologist. 2013. V. 197, N 4. P. 1077–1094.
26. Enquist B., Brown J., West G. Allometric scaling of plant energetics and population density // Nature. 1998. V. 395. P. 163–166.

**M.G. Akperov, A.V. Eliseev. Wind energy potential of the high latitudes of the Northern Hemisphere under modern climatic changes.**

Quantitative estimates of changes in wind energy resources in the high latitudes of the Northern Hemisphere are obtained using ERA5 reanalysis data for 1979–2021. The wind energy potential (WEP) was estimated during the analysis. According to the ERA5 reanalysis data, a marked increase in the WEP over the Greenland, Norwegian, Barents, Kara, and Chukchi Seas, as well as over the European territory of Russia in winter, over the Kara and Norwegian Seas in spring, and a general increase in WEP along the Arctic coast, in particular over its Russian sector in summer and autumn, are noted under the current climate regime. The noted changes in WEP quite well correlate with the retreat of sea ice in the Arctic, as well as with the leaf area index, which characterizes the roughness of the underlying surface in the high latitudes of the Northern Hemisphere. The increase in the proportion of the year when wind generators are capable to operate over the Russian Arctic makes the region quite promising for the use and development of wind power in the context of the climate change.

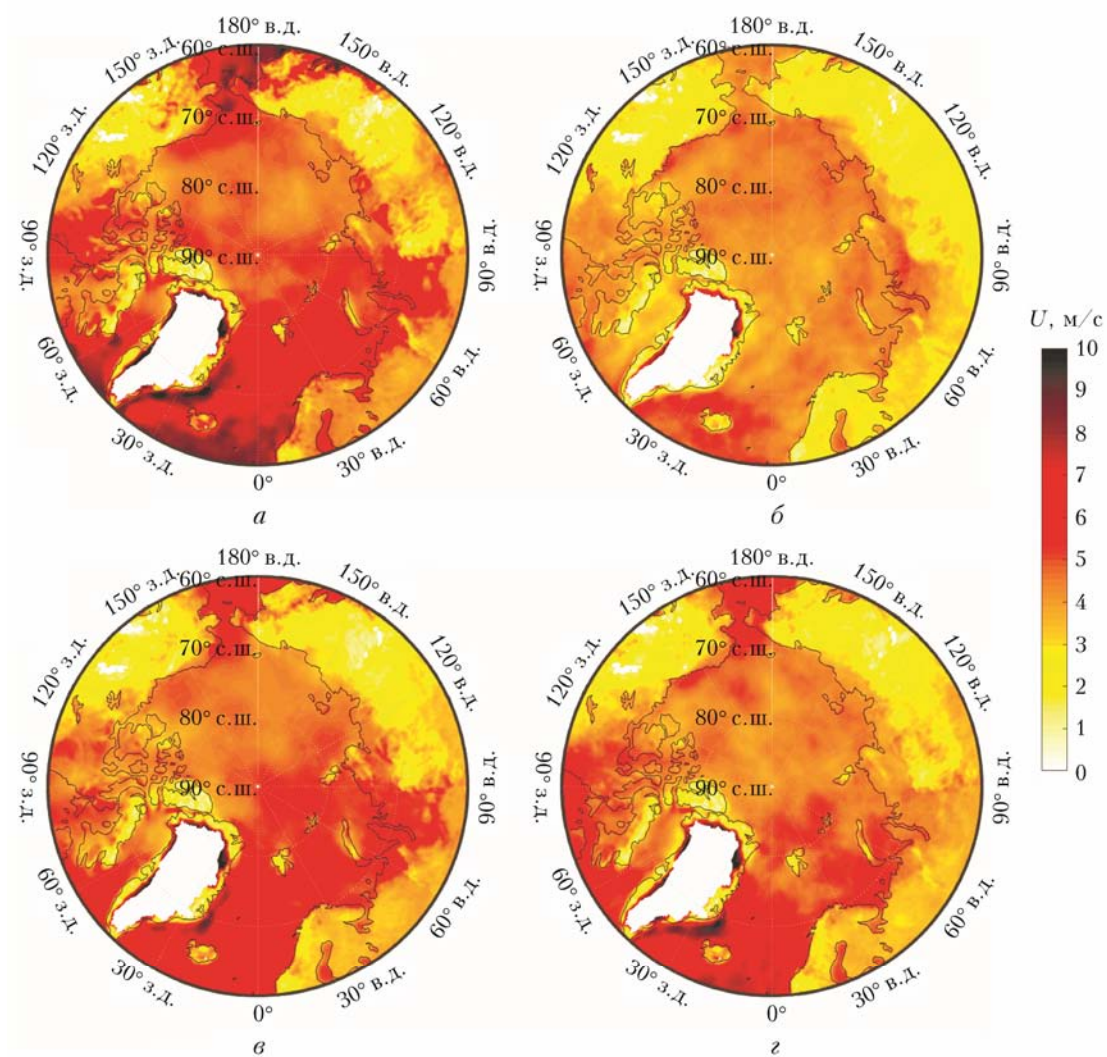


Рис. 1. Пространственное распределение модуля скорости ветра на высоте 100 м в высоких широтах Северного полушария по данным реанализа ERA5 для разных сезонов 1979–2021 гг.: *а* – зима; *б* – лето; *в* – весна; *г* – осень

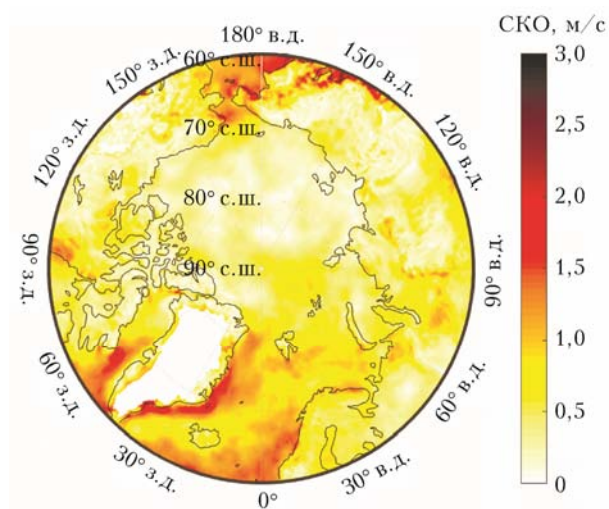
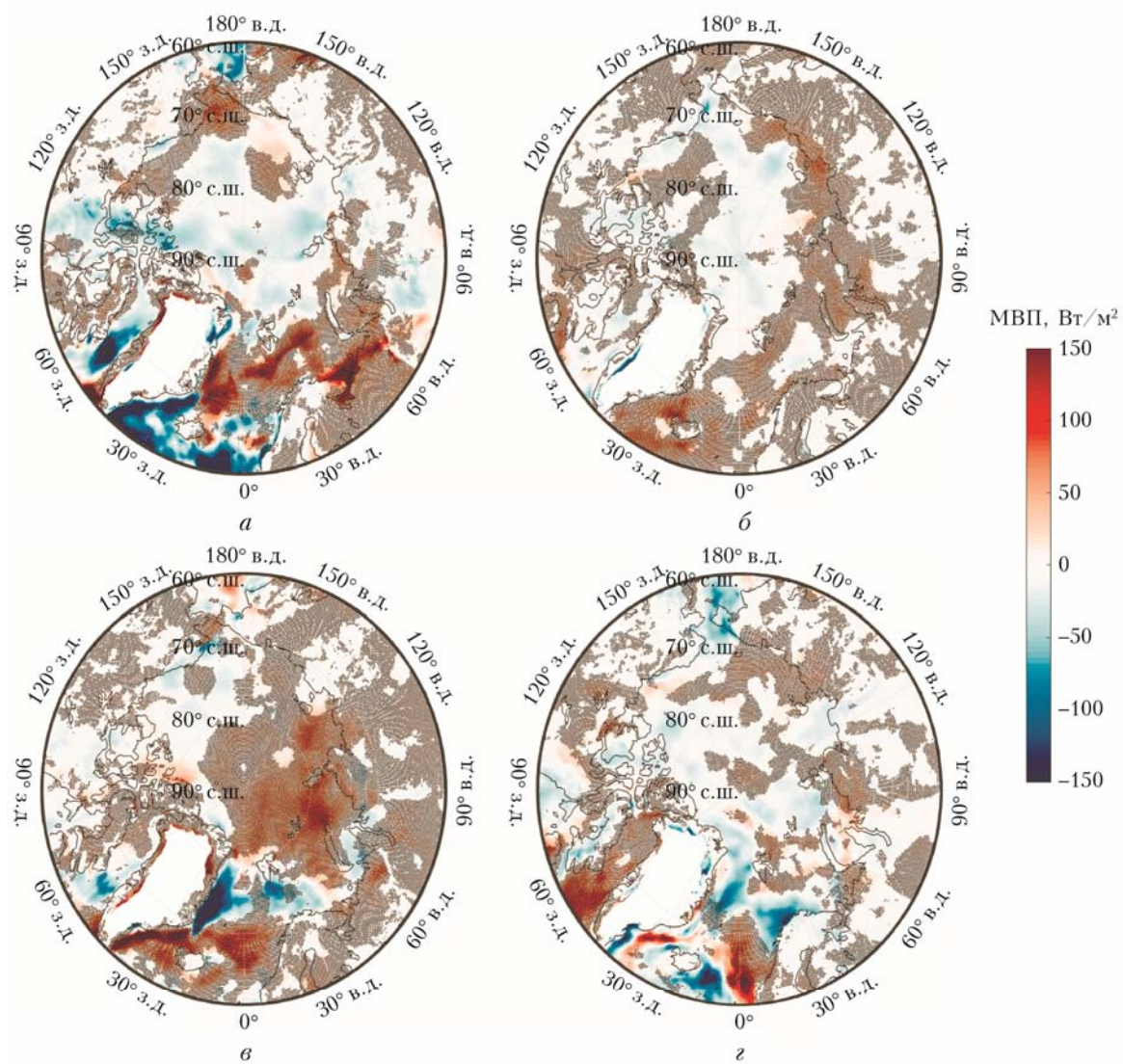


Рис. 2. Внутригодовое среднеквадратичное отклонение скорости ветра (м/с) на уровне 100 м в высоких широтах Северного полушария по данным реанализа ERA5 за 1979–2021 гг.





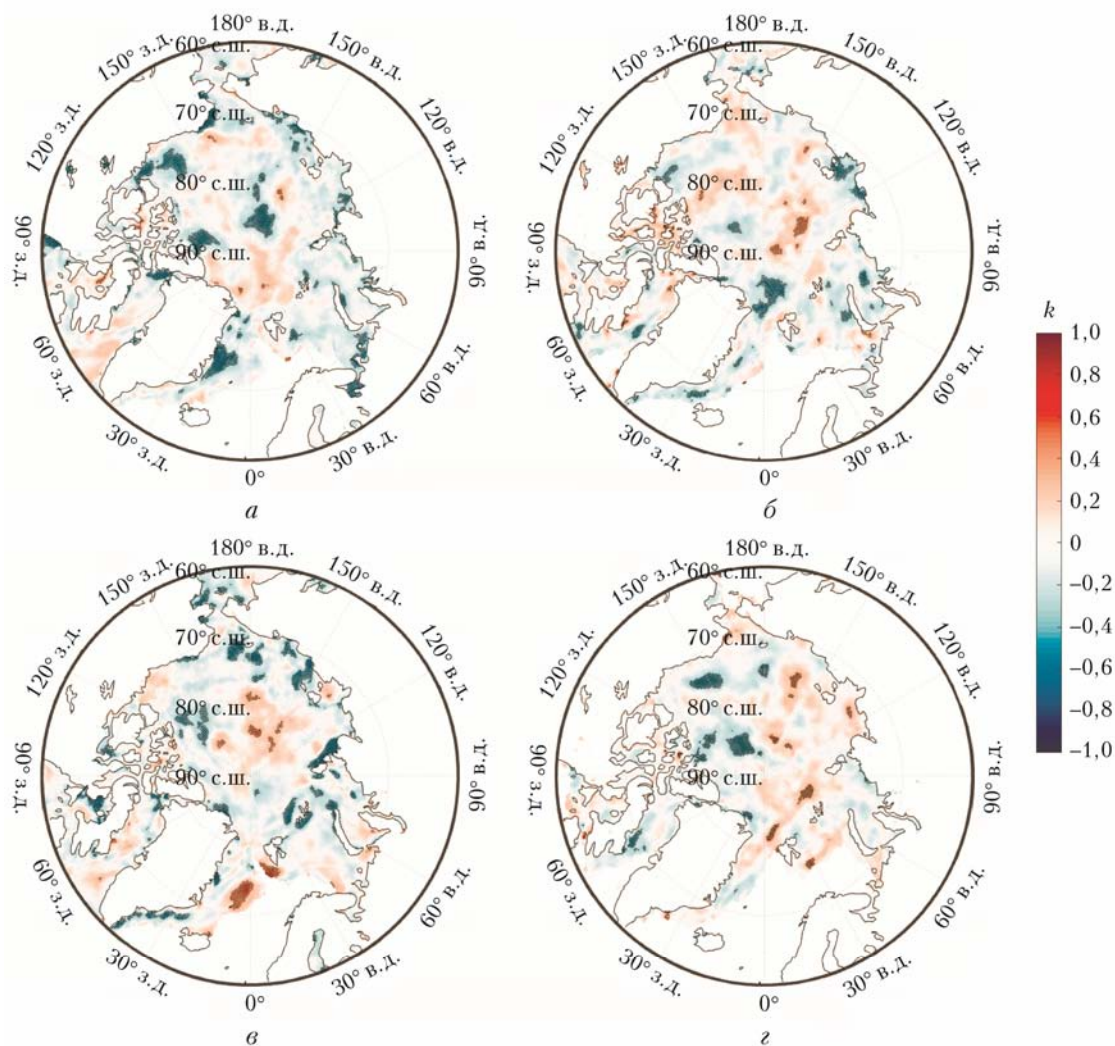


Рис. 4. Коэффициенты корреляции ветра на высоте 100 м с концентрацией морского льда по данным реанализа ERA5 для 1979–2021 гг.: *a* – зима; *б* – лето; *в* – весна; *г* – осень

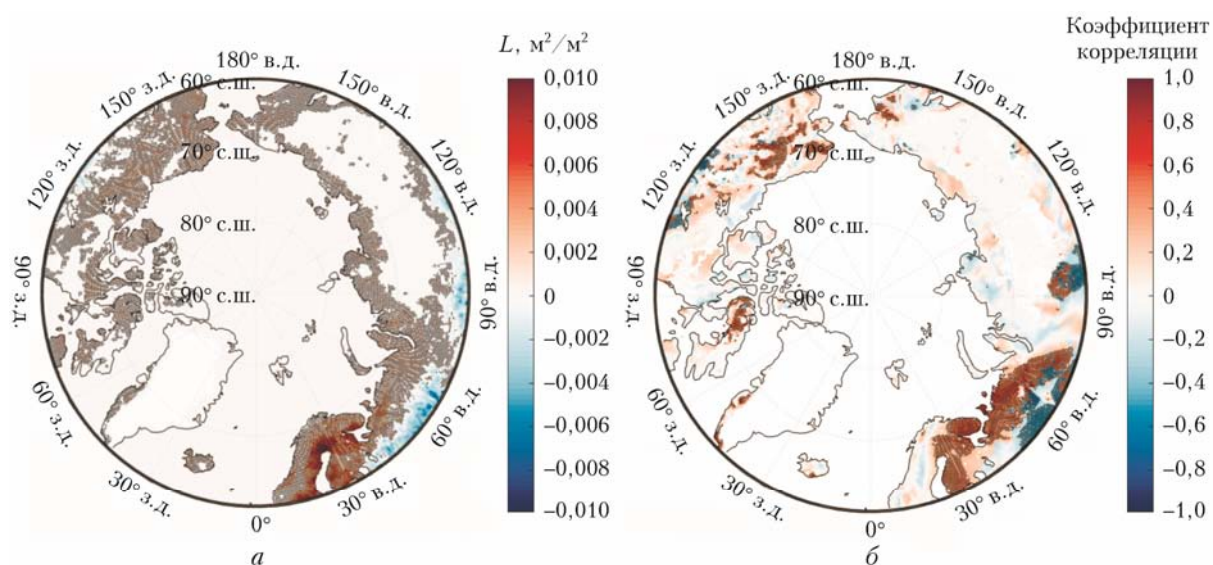


Рис. 5. Коэффициент тренда листового индекса за 10 лет (*a*) и коэффициенты его корреляции со скоростью ветра на высоте 100 м (*б*) по данным реанализа ERA5 для зимних сезонов 1979–2021 гг.