

Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменение в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели

М. Г. Акперов*, А. В. Елисеев*^{***} ^{***},
И. И. Мохов*^{**}, В. А. Семенов*^{****},
М. Р. Парфенова*, Т. Кениг^{*****} ^{*****}

Получены количественные оценки изменений ветроэнергетических ресурсов в Арктике с использованием региональной климатической модели (РКМ) RСА4 при сценариях изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 для 2006—2099 гг. Проанализирована мощность ветроэнергетического потенциала, пропорциональная кубу скорости ветра. Для оценки мощности ветрового потока (МВП) применена процедура коррекции систематической ошибки модельной скорости приземного ветра с использованием данных ERA5 в качестве эталонных с последующей экстраполяцией скорости ветра на высоту турбины. По расчетам с помощью РКМ RСА4 для XXI в. при обоих сценариях антропогенных воздействий отмечено, в частности, заметное увеличение МВП над Баренцевым, Карским и Чукотским морями зимой. Летом проявляется общее увеличение МВП над Северным Ледовитым океаном. При этом изменения больше при сценарии RCP8.5 с сильными антропогенными воздействиями для XXI века. Согласно полученным модельным оценкам увеличение межсуточных вариаций МВП в целом не приводит к отклонениям скорости ветра до значений, при которых работа ветрогенераторов невозможна.

Ключевые слова: ветроэнергетические ресурсы, приземный ветер, морской лед, Арктика, изменение климата, моделирование климата, реанализ.

DOI: 10.52002/0130-2906-2022-6-18-29

Введение

Ускоренное потепление в Арктике сопровождается беспрецедентным сокращением площади морского льда [1, 2, 8, 26]. Изменения климата делают Арктику более доступной для экономического освоения: в арктических регионах упрощаются судоходство, добыча полезных ископаемых и

* Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук; e-mail: aseid@ifaran.ru (Акперов Мирсеид Габиль оглы).

**Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

***Казанский (Приволжский) федеральный университет.

****Институт географии Российской академии наук.

*****Шведский институт гидрологии и метеорологии, Норрчепинг, Швеция.

*****Центр климатических исследований им. Болина, Стокгольм, Швеция.

другие виды деятельности — в частности производство энергии из возобновляемых источников [4, 12]. Одним из наиболее доступных и востребованных источников энергии является ветроэнергетика. Энергию ветра относят к так называемой “чистой” или “зеленой” энергии, поскольку она характеризуется практически нулевым уровнем выбросов парниковых газов при генерации электроэнергии. Это создает предпосылки к активному освоению и использованию ветроэнергетических ресурсов Арктики. Вдоль арктического побережья активно строятся ветропарки, создается соответствующая инфраструктура [5, 11].

Исследование пространственной и временной изменчивости характеристик приземного ветра имеет особое значение для оценки ветроэнергетического потенциала Арктики и его возможных изменений в условиях продолжающегося потепления климата [9, 13, 25, 27, 30]. Изменения атмосферной циркуляции в результате климатических изменений, включая вихревую активность [7, 15], а также региональные условия, такие как стратификация атмосферы [6, 16], влияют на пространственную и временную изменчивость приземного ветра [3, 21]. Таким образом, количественная оценка изменчивости ветра на рабочей высоте турбин имеет особое значение при планировании постройки ветропарков и соответствующей инфраструктуры.

Одним из ключевых факторов, влияющих на изменение приземного ветра в Арктике, является сокращение протяженности морских льдов, которое воздействует на аэродинамическую шероховатость поверхности, теплообмен и стратификацию атмосферы, что, в свою очередь, влияет на режим приземного ветра. При этом вклад изменений режима морских льдов в региональную изменчивость скорости приземного ветра зависит от сезона.

При низкой плотности сети метеорологических станций в прибрежных зонах Арктики, а тем более при их отсутствии, в частности на шельфе, есть проблема адекватной оценки региональных ветроэнергетических ресурсов. Для оценки влияния климатических изменений на ветроэнергетические ресурсы Арктики в условиях ограниченной климатической информации можно использовать региональные климатические модели (РКМ). По сравнению с глобальными климатическими моделями РКМ характеризуются более высоким пространственным и временным разрешением и, следовательно, более детально описывают региональные процессы и их изменения. Это особенно важно для Арктического региона [14, 29].

В данной работе по результатам расчетов с применением региональной климатической модели RCA4 (Rossby Centre Regional Atmospheric Model, Шведский институт гидрологии и метеорологии) [22] получены количественные оценки влияния изменений климата в Арктике, ожидаемых в XXI в., на мощность ветрового потенциала — один из основных климатических показателей целесообразности развития инфраструктуры ветроэнергетики.

Исходные данные и методы анализа

Анализировались поля данных о скорости приземного ветра с трехчасовым разрешением по расчетам с использованием РКМ RCA4 и по дан-

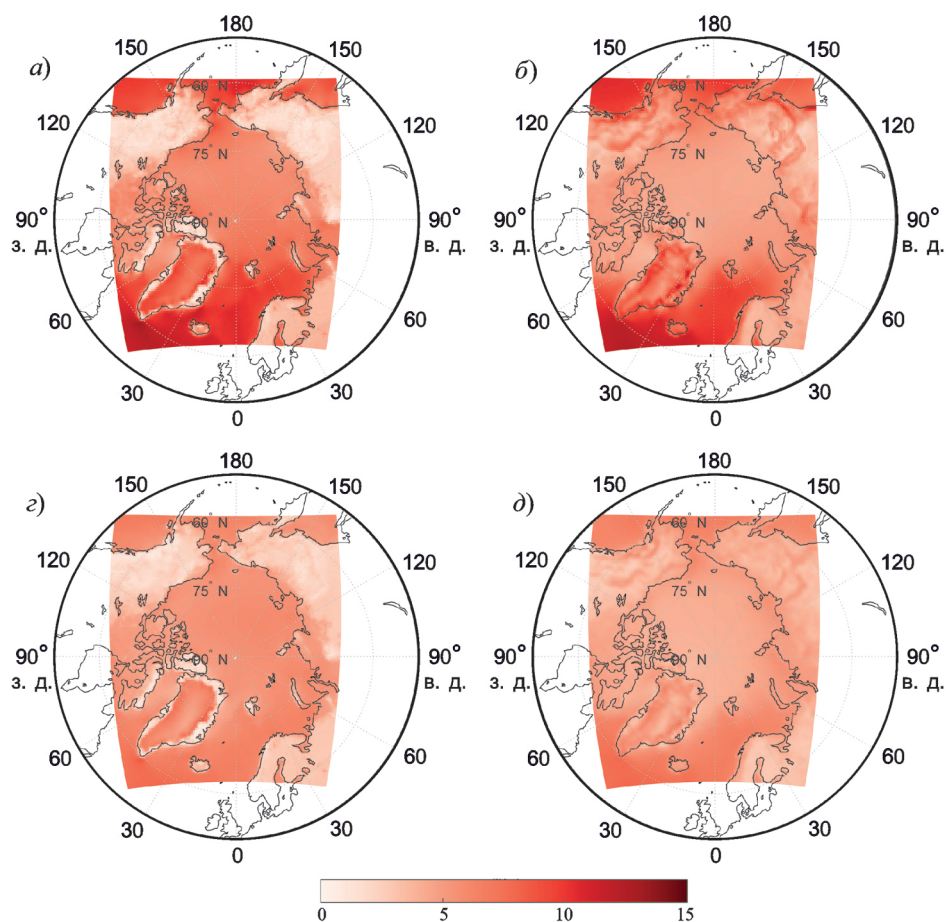
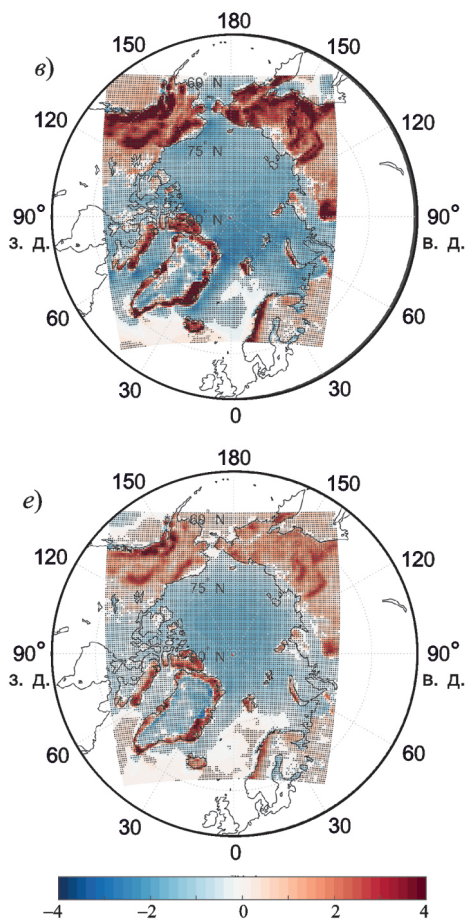


Рис. 1. Пространственное распределение модуля скорости приземного ветра (m/c) в Арктике по данным реанализа ERA5 (a, c) и по расчетам с моделью RCA4 (b, d), а также их разность (b, e) для зимы ($a-b$) и лета ($c-e$) для 1980—2005 гг.

Здесь и ниже на рис. 3—5 точками отмечены статистически значимые различия на уровне 95%.

ным реанализа ERA5 для Арктического региона (рис. 1) для холодного (декабрь — февраль) и теплого (июнь — август) сезонов. Взяты результаты численных расчетов с помощью РКМ RCA4 при разных граничных условиях на основе расчетов с использованием глобальных моделей международного проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5) — MPI-ESM-LR, EC-EARTH2.3, CanESM2, NorESM1-M. Выбор региональной модели RCA4 обусловлен адекватным воспроизведением с ее помощью климата и климатической изменчивости в Арктическом регионе в сопоставлении с данными наблюдений и с другими региональными климатическими моделями в рамках международного проекта Arctic-CORDEX [22]. В дальнейшем, если не оговорено обратное, результаты приводятся только для средних оценок по численным расчетам при четырех вариантах граничных условий. В работе использованы оценки по данным с суточным осреднением.



где $\alpha = 0,14$ для океана и $\alpha = 0,2$ для континентов в соответствии с рекомендацией Международной электротехнической комиссии [25]:

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha,$$

где u_1 — скорость приземного ветра на высоте измерений z_1 ; u_2 — скорость ветра на высоте экстраполяции z_2 (традиционная рабочая высота ветрогенератора — 100 м).

Для расчетов МВП в соответствии с модельными сценариями проводилась соответствующая коррекция значений приземного ветра для использования модельных расчетов — с помощью метода квантильного преобразования на основе распределения Вейбулла [18, 23, 25]. Распределение Вейбулла для приземного ветра по модельным расчетам приводится к распределению по данным реанализа ERA5, далее определяются параметры масштабов и формы кумулятивного распределения Вейбулла для прошлого периода по расчетам с использованием РКМ, с одной стороны, и по данным реанализа ERA5 — с другой. Эти параметры используются для коррекции результатов модельных расчетов МВП на необходимой высоте.

Результаты анализа представлены для двух периодов (1950—2005 и 2006—2099 гг.) при сценариях умеренных и более сильных антропогенных воздействий для XXI в. — RCP4.5 и RCP8.5 соответственно [31].

Для оценки потенциала ветровой энергии рассчитывалась мощность ветрового потока (МВП, $Вт/м^2$) [10]:

$$МВП = \frac{1}{2} \rho U^3,$$

где U — скорость ветра ($м/с$) на заданной высоте (традиционная рабочая высота ветрогенераторов — 100 м); ρ — плотность воздуха на уровне моря ($\sim 1,23 кг/м^3$).

Для оценки МВП на разных высотах, в том числе на характерной высоте ветрогенераторов ~100 м, для модельных оценок скорости приземного ветра на уровне 10 м применялась специальная процедура экстраполяции с использованием данных реанализа ERA5. Эта экстраполяция выполнялась с использованием степенного закона изменения модуля скорости ветра с показателями

Выражение скорректированной скорости приземного ветра имеет следующий вид:

$$u_{\text{cor}} = c_{\text{ERA5}} \ln \left(1 + \frac{u_{\text{mod}}}{c_{\text{hist}}} \right)^{k_{\text{hist}} / k_{\text{ERA5}}},$$

где u_{cor} — скорректированная для необходимого уровня скорость приземного ветра для РКМ RCA4; u_{mod} — скорость приземного ветра по расчетам с использованием РКМ RCA4; c и k — соответственно параметры масштаба и формы кумулятивного распределения Вейбулла для скоростей ветра по данным реанализа ERA5 и по расчетам с использованием РКМ RCA4 для прошлого (hist) или будущего (scr) периодов.

Следует также отметить, что метод квантильного преобразования на основе распределения Вейбулла показывает наилучшие результаты при коррекции приземного ветра в сравнении с другими широко применяемыми методами коррекции [23].

В работе также использованы среднемесячные значения концентрации морского льда в Арктике по результатам численных расчетов с использованием моделей ансамбля CMIP5 (MPI-ESM-LR, EC-EARTH2.3, CanESM2, NorESM1-M) при сценариях RCP4.5 и RCP8.5. Для морского льда в Северном Ледовитом океане взяты результаты тех же модельных расчетов, что и для получения граничных условий для расчетов с использованием РКМ.

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

Все используемые в работе данные были интерполированы на сетку РКМ RCA4 (0,44°).

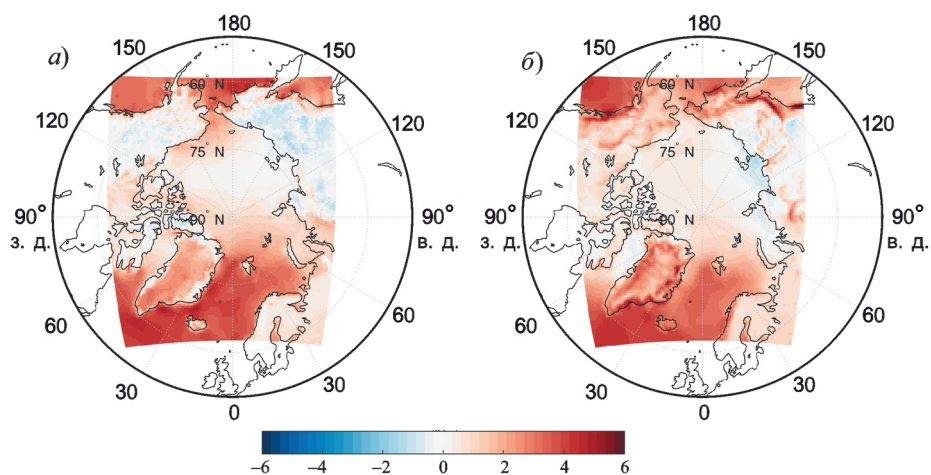


Рис. 2. Внутригодовые изменения приземного ветра (разность скорости приземного ветра зимой и летом, м/с) в Арктике по данным реанализа ERA5 (а) и по расчетам с моделью RCA4 (б) для 1980—2005 гг.

Результаты

На рис. 1 представлено пространственное распределение модуля скорости приземного ветра по данным реанализа ERA5 [19] и по расчетам с использованием ПКМ RCA4, а также их различия для зимы и лета в Арктике в 1980—2005 гг. Выбор реанализа ERA5 обусловлен тем, что его данные о приземном ветре наилучшим образом (по сравнению с другими системами реанализа) согласуются с данными наблюдений как для средних многолетних значений, так и для характеристик изменчивости [24, 28]. Модель RCA4 в целом достаточно хорошо воспроизводит пространственное распределение скорости приземного ветра над Арктикой с максимальной скоростью ветра над Европейско-Атлантическим сектором Арктики (регион наибольшей циклонической активности) и минимальной

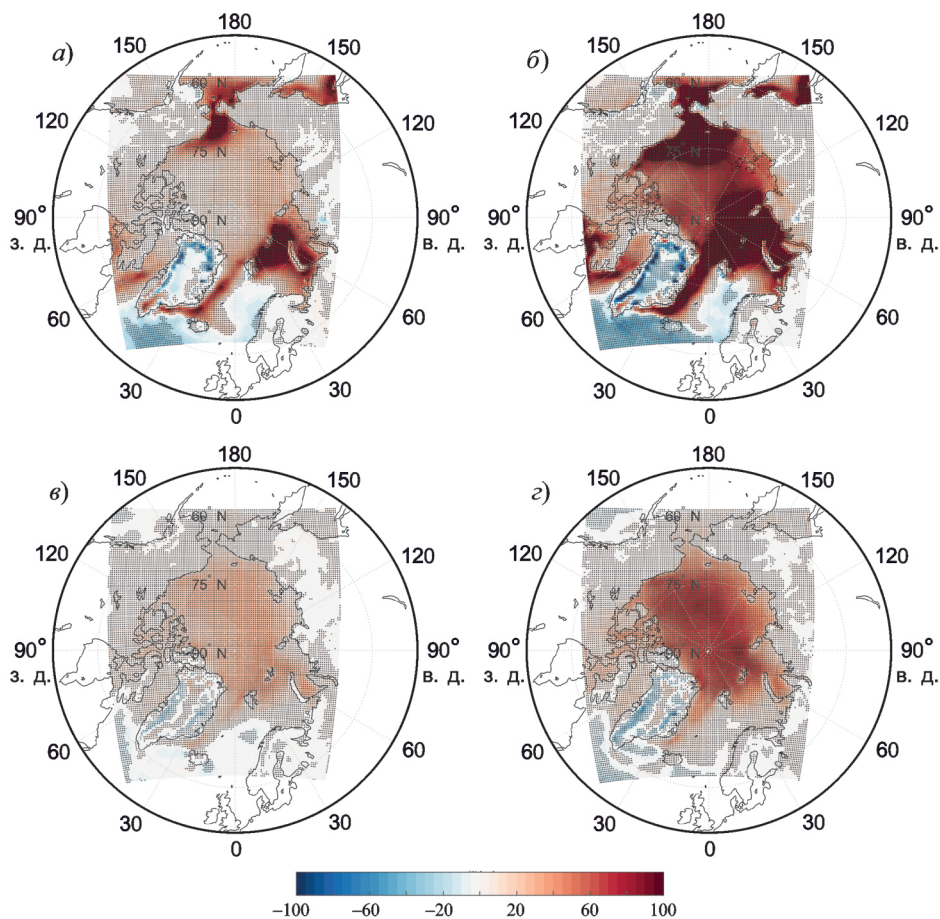


Рис. 3. Объясняемые линейным трендом изменения сезонных значений мощности ветрового потока ($Вт/м^2$ за 10 лет) в 2006—2100 гг. зимой (а, б) и летом (в, з) по расчетам с помощью модели RCA4 при сценариях антропогенных воздействий RCP4.5 (а, в) и RCP8.5 (б, з).

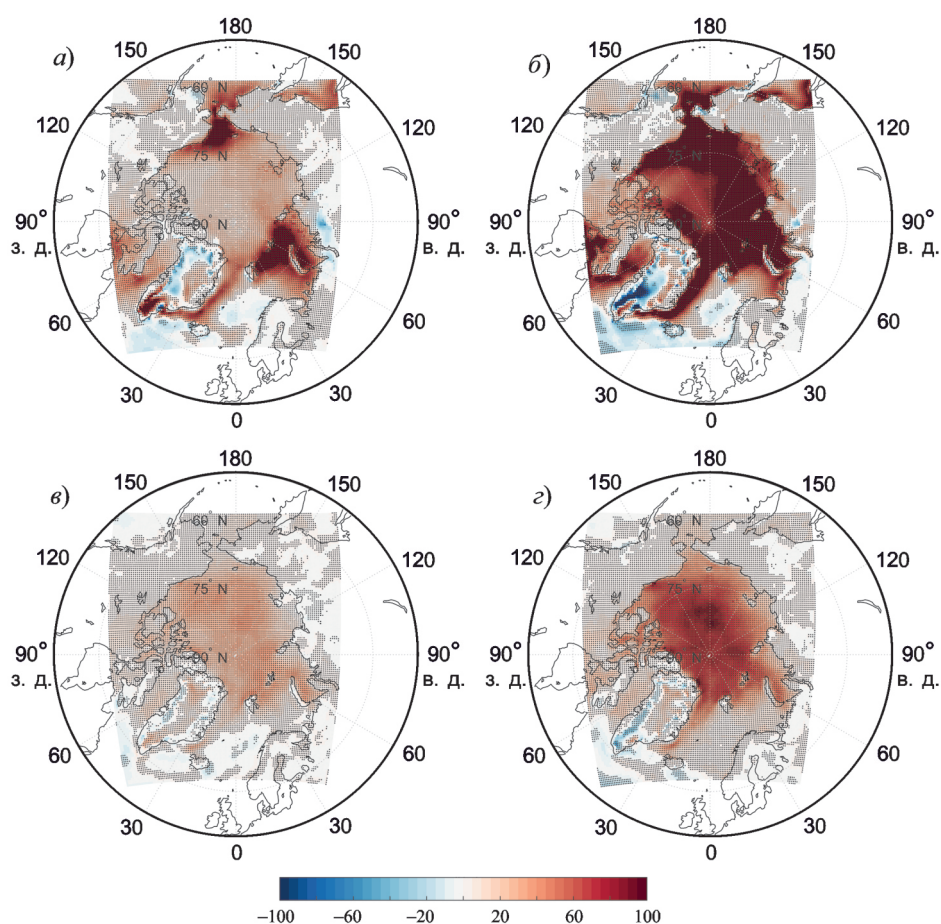


Рис. 4. Объясняемые линейным трендом изменения сезонных межсуточных значений среднеквадратических отклонений мощности ветрового потока (Wm^2 за 10 лет) в 2006—2100 гг. зимой (а, б) и летом (в, з) при сценариях антропогенных воздействий RCP4.5 (а, в) и RCP8.5 (б, з).

— над континентами для всех сезонов. При этом региональная модель также хорошо воспроизводит внутригодовую изменчивость, хотя несколько завышает скорость приземного ветра над континентами и занижает над Северным Ледовитым океаном. Модельная внутригодовая изменчивость оценивалась разностью скорости приземного ветра зимой и летом в сравнении с данными реанализа ERA5 (рис. 2). Для оценки эффективности метода коррекции результатов расчетов с помощью РКМ RCA4 приземного ветра использовались коэффициенты пространственной корреляции для средних многолетних значений приземного ветра для зимы и лета (рис. 2). Коэффициенты пространственной корреляции R для скорости приземного ветра между отдельными (при выборе одного из вариантов граничных условий) расчетами с использованием RCA4 и данными ERA5 получены в диапазоне от 0,71 до 0,75 для зимы и от 0,65 до 0,74 для лета.

Модель	RCA4-CanESM2	RCA4-EC-EARTH	RCA4-MPI	RCA4-NorESM1
Зима	0,71/0,99	0,74/0,99	0,75/0,99	0,71/0,99
Лето	0,74/0,99	0,68/0,99	0,65/0,99	0,65/0,99

В числителе указаны коэффициенты корреляции до проведения коррекции систематической ошибки, в знаменателе — после нее. Корректирующая процедура для приземного ветра, позволяющая значительно увеличить соответствующие коэффициенты корреляции, целесообразна для получения возможных изменений мощности ветра.

На рис. 3 представлены возможные изменения сезонных значений МВП по расчетам с помощью модели RCA4 при двух сценариях антропогенных воздействий (RCP4.5 и RCP8.5) для 2006—2099 гг. Зимой области значительного увеличения МВП проявляются над Баренцевым, Карским и

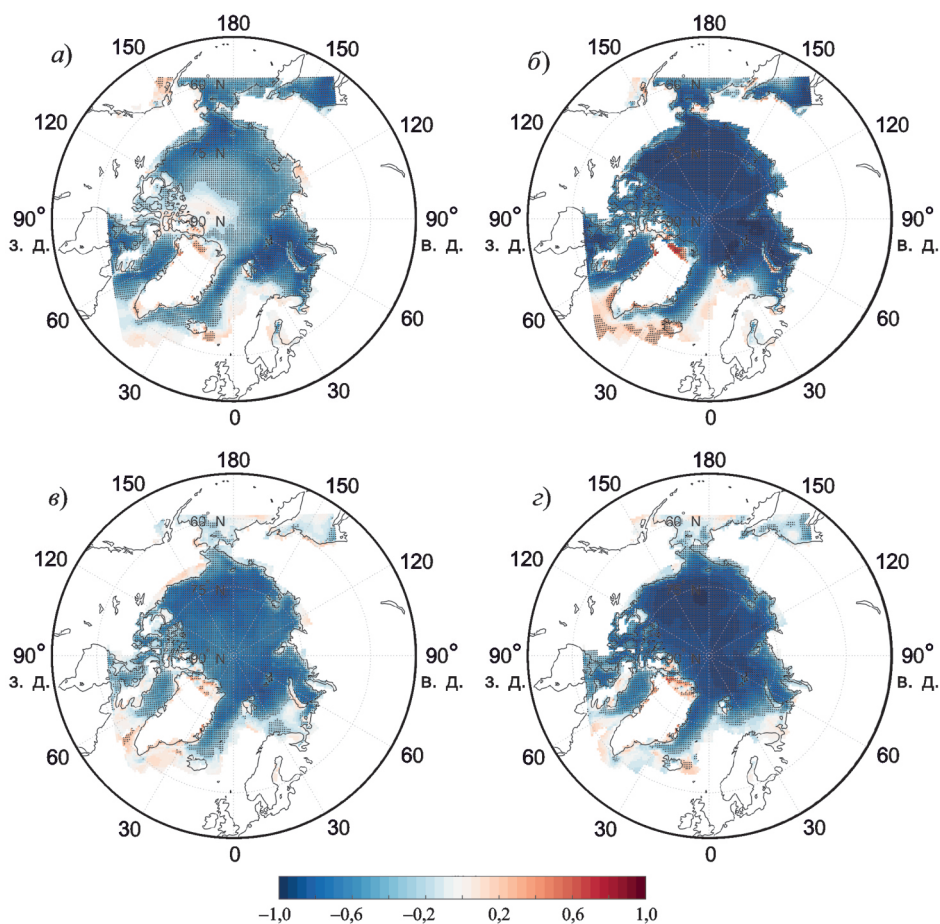


Рис. 5. Коэффициенты корреляции в 2006—2100 гг. приземного ветра по данным РКМ RCA4 с концентрацией морского льда по данным CMIP5 (межмодельное среднее): а, б — зима; в, г — лето; расчет при сценариях антропогенных воздействий RCP4.5 (а, в) и RCP8.5 (б, г).

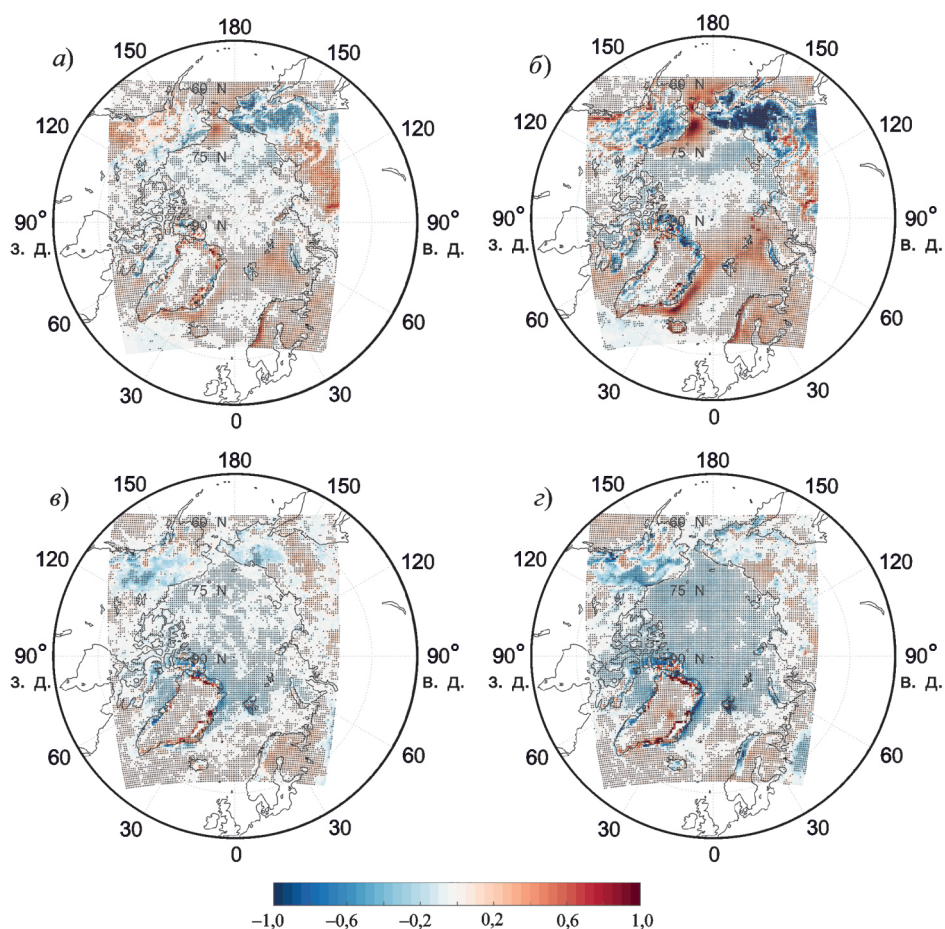


Рис. 6. Объясняемые линейным трендом изменения числа дней (за 10 лет) со значениями скорости ветра (менее 3 м/с и более 20 м/с), при которых работа ветрогенераторов невозможна, зимой (а, б) и летом (в, г) при сценариях антропогенных воздействий RCP4.5 (а, в) и RCP8.5 (б, г).

Чукотским морями при сценарии RCP4.5. Еще больше значимы эти изменения при сценарии RCP8.5 с более сильными антропогенными воздействиями в XXI в. Летом при сценарии RCP4.5 МВП в целом увеличивается над Северным Ледовитым океаном, и эти изменения еще сильнее проявляются при сценарии RCP8.5. Отмечено увеличение межсуточных среднеквадратических отклонений для МВП (рис. 4), при этом области их наиболее сильных изменений соответствуют областям изменений среднесезонных значений МВП. Отмеченные изменения МВП достаточно хорошо коррелируют с прогнозируемым отступлением морских льдов в Арктике (рис. 5). Сокращение протяженности морских льдов в Арктике влияет на аэродинамическую шероховатость поверхности, тепло- и влагообмен и стратификацию атмосферы и, таким образом, оказывает заметное влияние на приземный ветер [20].

Скорость ветра, необходимая для оптимальной работы ветрогенераторов на уровне 100 м, оценивается в диапазоне от 10 до 20 м/с. Эти значения скорости соответствуют диапазону МВП 600—1900 Вт/м². На фоне отмеченного по модельным расчетам увеличения межсуточных среднеквадратических отклонений МВП проявляется небольшой рост числа дней с ветром, когда работа ветрогенераторов невозможна (рис. 6). При этом в целом возможность работы ветрогенераторов не нарушается. Арктические регионы, в которых согласно рис. 3, прогнозируются изменения МВП на 100 Вт/м² за десятилетие, достаточно перспективны для развития ветроэнергетики.

Заключение

Проведен сравнительный анализ результатов расчетов скорости приземного ветра на основе РКМ RCA4 с данными реанализа ERA5. С использованием модели RCA4 в целом адекватно воспроизводится пространственное распределение скорости приземного ветра над Арктикой. Отмечено, что региональная модель достаточно хорошо воспроизводит и внутrigодовую изменчивость, хоть и с некоторым общим завышением скорости приземного ветра над континентами и ее занижением над Северным Ледовитым океаном.

Сделаны модельные оценки мощности ветроэнергетического потенциала в Арктике. Для анализа МВП на разных высотах, в том числе на характерной высоте ветрогенераторов, использована процедура коррекции систематической ошибки модельной скорости приземного ветра по сравнению с данными ERA5 в качестве эталонных и с последующей экстраполяцией скорости ветра на высоту турбины.

Получены модельные оценки изменений мощности ветроэнергетического потенциала в Арктическом регионе при сценариях RCP4.5 и RCP8.5 антропогенных воздействий для XXI в. Согласно полученным результатам проявляется заметное увеличение МВП над Баренцевым, Карским и Чукотским морями зимой, а летом — общее увеличение МВП над Северным Ледовитым океаном. Более значимо проявляются изменения при сценарии RCP8.5 с сильными антропогенными воздействиями для XXI в. При этом отмеченное увеличение межсуточных среднеквадратических отклонений МВП в целом не приводит к отклонениям скорости ветра до значений, при которых работа ветрогенераторов невозможна.

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

Литература

1. **Алексеев Г. В., Радионов В. Ф., Александров Е. И. и др.** Изменения климата Арктики при глобальном потеплении. — Проблемы Арктики и Антарктики, 2015, № 1(103), с. 32—41.
2. **Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М., Росгидромет, 2014, 1535 с.
3. **Интенсивные** атмосферные вихри и их динамика. /Под ред. И. И. Мохова, М. В. Курганского, О. Г. Чхетиани. — М., ГЕОС, 2018, 482 с.
4. **Кислов А. В., Суркова Г. В.** Влияние глобального потепления на климатические ресурсы России. — Экономика. Налоги. Право, 2021, т. 14, № 4, с. 6—14.
5. **Лыжин Д. Н.** Ветроэнергетика: возможности для Арктики. — Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения, 2021, № 1(5), с. 64—68; doi: 10.51823/74670_2021_1_64.
6. **Мохов И. И., Акперов М. Г.** Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006, т. 42, № 4, с. 467—475.
7. **Мохов И. И., Мохов О. И., Петухов В. К., Хайруллин Р. Р.** Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1992, т. 28, № 1, с. 11—26.
8. **Мохов И. И., Парфенова М. Р.** Связь протяженности антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979—2020 гг. — Доклады АН. Науки о Земле, 2021, т. 496, № 1, с. 71—77.
9. **Мохов И. И., Хон В. Ч., Чернокульский А. В.** Климатические ресурсы российских регионов и их изменения. /В сб.: Стратегические ресурсы и условия устойчивого развития Российской Федерации и ее регионов. Под ред. В. М. Котлякова, А. А. Тишкова. — М., ИГ РАН, 2014, с. 48—56.
10. **Николаев В. Г., Ганага С. В., Кудряшов Ю. И.** Национальный Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. — М., Атмограф, 2008, 581 с.
11. **Писарев А. Е.** Использование ветроэнергетики в Арктике. — Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм, 2020, № 1 (2), с. 441—444.
12. **Пустовалов К. Н., Харюткина Е. В., Корольков В. А., Нагорский П. М.** Изменчивость ресурсов солнечной и ветровой энергии в российском секторе Арктики. — Оптика атмосферы и океана, 2019, т. 32, № 11, с. 908—914; doi: 10.15372/AOO20191105.
13. **Суркова Г. В., Крылов А. А.** Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века. — Арктика и Антарктика, 2018, № 3, с. 26—36; doi: 10.7256/2453-8922.2018.3.27395.
14. **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., and Zhang W.** Cyclone activity in the Arctic from an ensemble of regional climate models (Arctic CORDEX). — J. Geophys. Res. Atmos., 2018; <https://doi.org/10.1002/2017JD027703>.
15. **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., and Zhang W.** Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX). — Global and Planetary Change, 2019, vol. 182; <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103005>.
16. **Akperov M., Semenov V. A., Mokhov I. I., Dorn W., and 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, vol. 15, No. 2, 24009; <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6399>.

17. **Carvalho D., Rocha A., Costoya X., deCastro M., and Gomez-Gesteira M.** Wind energy resource over Europe under CMIP6 future climate projections: What changes from CMIP5 to CMIP6. — *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 151 (July); <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111594>.
18. **Haas R., Pinto J. G., and Born K.** Can dynamically downscaled windstorm footprints be improved by observations through a probabilistic approach? — *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2014, vol. 119, No. 2, pp. 713—725; <https://doi.org/10.1002/2013JD020882>.
19. **Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horanyi A., Munoz-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., Holm E., Janiskova M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., and Thepaut J.-N.** The ERA5 global reanalysis. — *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, No. 730, pp. 1999—2049; <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
20. **Jakobson L., Vihma T., and Jakobson E.** Relationships between sea ice concentration and wind speed over the Arctic Ocean during 1979—2015. — *J. Climate*, 2019, vol. 32, No. 22, pp. 7783—7796; <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0271.1>.
21. **Khon V., Mokhov I. I., Pogarskiy F., Babanin A., Dethloff K., Rinke A., and Matthes H.** Wave heights in the 21st century Arctic Ocean simulated with a regional climate model. — *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, No. 8, pp. 2956—2961; doi: 10.1002/2014GL059847.
22. **Koenigk T., Berg P., and Doscher R.** Arctic climate change in an ensemble of regional CORDEX simulations. — *Polar Res.*, 2015, vol. 34, pp. 1—19; <https://doi.org/10.3402/polar.v34.24603>.
23. **Li D., Feng J., Xu Z., Yin B., Shi H., and Qi J.** Statistical bias correction for simulated wind speeds over CORDEX-East Asia. — *Earth and Space Science*, 2019, vol. 6, No. 2, pp. 200—211; <https://doi.org/10.1029/2018EA000493>.
24. **Minola L., Zhang F., Azorin-Molina C., Pirooz A. A. S., Flay R. G. J., Hersbach H., and Chen D.** Near-surface mean and gust wind speeds in ERA5 across Sweden: Towards an improved gust parametrization. — *Climate Dynamics*, 2020, vol. 55, No. 3, pp. 887—907; <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05302-6>.
25. **Moemken J., Meyers M., Feldmann H., and Pinto J. G.** Future changes of wind speed and wind energy potentials in EURO-CORDEX ensemble simulations. — *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2018, vol. 123, No. 12, pp. 6373—6389; <https://doi.org/10.1029/2018JD028473>.
26. **Previdi M., Smith K. L., and Polvani L. M.** Arctic amplification of climate change: A review of underlying mechanisms. — *Environ. Res. Lett.*, 2021, vol. 16, No. 9; <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>.
27. **Pryor S. C., Schoof J. T., and Barthelmie R. J.** Empirical downscaling of wind speed probability distributions. — *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2005, vol. 110, No. D19; <https://doi.org/10.1029/2005JD005899>.
28. **Ramon J., Lledo L., Torralba V., Soret A., and Doblas-Reyes F. J.** What global reanalysis best represents near-surface winds? — *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2019, vol. 145, No. 724, pp. 3236—3251; <https://doi.org/10.1002/qj.3616>.
29. **Shkolnik I. M. and Efimov S. V.** Cyclonic activity in high latitudes as simulated by a regional atmospheric climate model: Added value and uncertainties. — *Environ. Res. Lett.*, 2013, vol. 8, No. 4, 045007; <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/045007>.
30. **Surkova G. and Krylov A.** Extremely strong winds and weather patterns over Arctic seas. — *Geogr., Environ., Sustainability*, 2019, vol. 12, No. 3, pp. 34—42; <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-22>.
31. **Taylor K. E., Stouffer R. J., and Meehl G. A.** An overview of CMIP5 and the experiment design. — *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2012, vol. 93, No. 4, pp. 485—498; <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.