

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В РОССИИ, ВКЛЮЧАЯ АРКТИКУ

О. С. Попель<sup>1</sup>, С. Е. Фрид<sup>1</sup>, Н. В. Лисицкая<sup>1</sup>, А. Б. Тарасенко<sup>1</sup>, С. В. Киселева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН (Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2025 г.

### Для цитирования

Попель О. С., Фрид С. Е., Лисицкая Н. В. и др. Анализ энергетической эффективности использования ветроэнергетических ресурсов в России, включая Арктику // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 103—115. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-103-115.

На основе использования многолетних (2001–2023 гг.) рядов часовых скоростей ветра на различных высотах для трех типов перспективных для эксплуатации в составе централизованной и распределенной энергетики ветроустановок мощностью от 40 кВт до 2,5 МВт представлены результаты анализа энергетической эффективности использования ветровых потоков на всей территории Российской Федерации. В расчетах использованы мощностные характеристики ветроустановок Lagerwey L100, Kona1 KWT300 и GHRE Power FD16-40. Показано, что наибольшие значения коэффициента использования установленной мощности рассмотренных ветроустановок могут быть достигнуты в некоторых районах Арктической зоны (до 50% и выше). Для нескольких пунктов в Арктике приведены результаты анализа нестабильности генерации энергии. Представлен анализ изменчивости ветровых ресурсов на территории России, включая Арктику, за последние 23 года. Построенные карты распределения среднегодовых коэффициентов установленной мощности ветроустановок и трендов изменения среднегодовой скорости ветра с пространственным разрешением  $0,25 \times 0,25^\circ$  по широте и долготе могут быть полезны для предварительного выбора наиболее благоприятных для развития ветроэнергетики районов на территории России, включая Арктику.

**Ключевые слова:** арктическая энергетика, ветропотенциал, ветроэнергетические установки, коэффициент использования установленной мощности, изменение климата в Арктике, нестабильность генерации энергии.

### Введение

В последние два десятилетия развитие возобновляемой энергетики, базирующейся прежде всего на использовании солнечной и ветровой энергии, в мире осуществляется опережающими темпами, что обусловлено стремлением многих стран к переходу на экологически чистые источники энергии и значительным прогрессом в масштабном промыш-

ленном освоении новых энергетических технологий. Значительные успехи в этом направлении достигнуты и в России, где освоено производство современного фотоэлектрического и ветроэнергетического оборудования и при государственной поддержке осуществляется планомерный ввод в эксплуатацию в различных регионах страны солнечных и ветровых электростанций и энергокомплексов. При этом наиболее привлекательным с экономической и экологической точек зрения направлением представляется использование возобновляемых источников энер-

гии в составе распределенных и автономных систем энергоснабжения потребителей в отдаленных развивающихся районах, не располагающих собственными ресурсами ископаемого топлива, а доставка его в эти места сопряжена со значительными затратами и техническими трудностями. К таким районам в первую очередь относятся районы Арктики и Дальнего Востока.

Государственная программа социально-экономического развития Арктики<sup>1</sup> в качестве основной задачи предусматривает ускорение экономического развития территорий, входящих в состав Арктической зоны России, и увеличение их вклада в экономический рост и обороноспособность страны. Ее решение невозможно без опережающего развития энергетической инфраструктуры региона и наращивания энергетических мощностей. В настоящее время энергетическая система Арктики характеризуется наличием множества обособленных энергоузлов, разрозненностью потребителей энергоресурсов и необходимостью северного завоза топлива в отдаленные районы. При этом хрупкость арктической экосистемы обуславливает необходимость минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду, в том числе путем приоритетного использования экологически чистых источников энергии, среди которых наибольший интерес представляют возобновляемые [1; 2].

Арктика помимо России охватывает отдельные регионы еще семь стран: Норвегии, Швеции, Финляндии, США (Аляска), Канады, Дании (Гренландия) и Исландии с суммарным населением около 4 млн человек, из которых 2,6 млн проживают на российской территории. На сухопутную часть Арктической зоны России, относящуюся к 9 субъектам Федерации, приходится 11,6 млн км<sup>2</sup>, или 28% территории страны. Освоение арктических регионов в России и перечисленных странах представляет большой практический интерес в связи с огромными разведанными запасами ценных полезных ископаемых [3], и во всех этих странах развитию арктической возобновляемой энергетики и прежде всего ветроэнергетики уделяется большое внимание. Вместе с тем достичь значительного вклада ветроэнергетики в энергобалансы этих регионов пока не удастся. Так, несмотря на изобилие ветроэнергетических ресурсов вдоль береговой линии Аляски, за счет ветровой энергии обеспечивается лишь около 2,5% суммарной генерации региона [4]. Невысокие темпы освоения ветровых ресурсов Арктики обусловлены тем, что сооружение и эксплуатация ветростанций в арктических условиях сопряжены с рядом трудностей:

- В отличие от широко используемых во многих странах ветроустановок (ВЭУ), суммарная мощность которых в мире уже превысила 1000 ГВт, или около 15% всех электрогенерирующих мощностей, ветроустановки арктического назначения должны удовлетворять специальным требованиям к оборудованию, функционирующему в экстремальных климатических условиях. Низкие температуры обуславливают необходимость применения морозостойких материалов и смазок для подвижных и вращающихся механизмов, а также мер по предотвращению обледенения лопастей ротора, высокая вероятность чего характерна в периоды общей длительностью до трети года и отрицательно сказывается на эффективности выработки энергии и надежности работы оборудования.
- Удаленность арктических территорий и недостаточная развитость транспортной инфраструктуры значительно ограничивают возможности доставки ветроэнергетического оборудования и средств его монтажа, особенно для ветроустановок большой единичной мощности.
- Нестабильность генерации энергии вследствие стохастического изменения интенсивности ветровых потоков обуславливает необходимость использования в комбинации с ВЭУ маневренных резервных источников и/или накопителей энергии, обеспечивающих балансировку генерации энергии и ее потребления, и разработку эффективных систем автоматического управления и защиты для поддержания напряжения и частоты электрического тока в соответствии с требованиями к качеству и надежности энергоснабжения потребителей.

Цель настоящей статьи — анализ показателей энергетической эффективности использования ветровых потоков на всей территории страны. Исследованиям возможностей и перспектив использования энергии ветра в России посвящено большое число публикаций и обзоров, среди которых проблемы развития арктической ветроэнергетики наиболее системно рассмотрены в [5; 6], ориентированных на труднодоступные территории соответственно восточного и западного секторов Арктической зоны. Особенностью настоящего исследования в отличие от [5; 6] является подход, базирующийся на анализе коэффициента использования установленной мощности ветроустановок (КИУМ, *capacity factor*), определяемого как отношение произведенной за заданный период электроэнергии к выработке за тот же период, если бы генерирующий объект все это время работал на установленной (паспортной) мощности. Рассматриваются не только конкретные географические точки, но и вся территория России, включая Арктику, с пространственным разрешением 0,25×0,25° по широте и долготе. Анализ выполнен для трех типов ВЭУ мощностью от 40 кВт до 2,5 МВт, перспективных для использования в локальных и централизованных сетях энергоснабжения потре-

<sup>1</sup> Постановление Правительства РФ «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» от 30 марта 2021 г. № 484. — URL: <http://static.government.ru/media/files/bIT1JdkAw1JWhBgHy1SAZIkBRlNmT3pG.pdf>.

бителей. Рассмотрены характеристики нестабильности генерации ими энергии за многолетний период (2001—2023 гг.), выявлены и представлены на карте России тенденции изменения интенсивности ветровых потоков в различных районах страны за 23-летний период.

### Методы исследования

Представленные ниже результаты расчетно-теоретических исследований базируются на следующих авторских подходах:

1. Реализация действующей в России программы развития возобновляемой энергетики и расширения районов строительства ветровых электростанций и ветроэнергетических комплексов требует разработки научно обоснованных подходов к выбору наиболее перспективных районов и мест использования ветроэнергетических установок. С этой целью авторы развивают методы моделирования ветровых электростанций и ветроэнергетических комплексов с охватом всей территории страны. В сотрудничестве со специалистами Лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова создается геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии России» (см. <https://gisre.ru>). Особенностью настоящей статьи является использование для расчетно-теоретических исследований многолетних последовательностей часовых метеорологических данных с пространственным разрешением  $0,25 \times 0,25^\circ$  по широте и долготы для всей территории России.

2. Анализ энергетической эффективности использования ветровых потоков базируется на расчете коэффициента использования установленной мощности ВЭУ, величина которого наряду с затратами на создание ВЭУ и ветроэнергетических комплексов определяющим образом влияет на экономические показатели эффективности применения ветроэнергетических технологий.

3. Выработка энергии и соответственно КИУМ в значительной степени зависят от высоты расположения ветроколеса ветроустановки, которая, в свою очередь, для известной номенклатуры ВЭУ определяется величиной их установленной мощности. Важным аспектом является уровень освоения производства ветроэнергетических установок отечественной промышленностью. Сегодня структурами Росатома локализовано производство лишь одного типа сетевых ВЭУ единичной мощностью 2,5 МВт. Использование именно этих установок в основном закладывается в среднесрочные программы развития сетевой ветроэнергетики России, и их мощностная характеристика использована в настоящем исследовании. Что касается ветровых установок малой мощности, то их отечественное производство пока не получило должного развития, и для создания ветроэнергетических комплексов для локального энергоснабжения потребителей, как правило, используется импортное ветроэнергетиче-

ское оборудование. Для настоящего исследования выбраны два зарубежных образца ВЭУ, по которым имеется информация об опыте их использования в России, в том числе с адаптацией к условиям Арктики.

4. Использование многолетних (2001—2023 гг.) последовательностей часовых метеорологических данных позволило авторам провести статистический анализ изменчивости ветроэнергетических ресурсов как в отдельных выбранных географических точках Арктики, так и на всей территории страны, а также попытаться выявить тенденции изменения ветроэнергетического потенциала, по-видимому, связанного с климатическими изменениями за рассмотренный период для различных районов России и в частности для Арктики.

### Выбор ветроустановок

Основными направлениями применения ВЭУ, как отмечалось выше, является их использование в централизованных (или локально централизованных, не имеющих связей с Объединенной энергосистемой России, но имеющих мощные опорные тепловые электростанции на органическом топливе или гидроэлектростанции) энергосистемах, а также в автономных энергокомплексах, в том числе ветродизельных.

В первом случае практически вся вырабатываемая ВЭУ электроэнергия может быть передана в электрическую сеть, при этом система управления ветрогенератором синхронизируется по частоте и напряжению с внешней электрической сетью, и работа ВЭУ в отсутствие внешней сети практически невозможна. Основной задачей эксплуатации ВЭУ в централизованной системе является как можно более полное использование энергии ветрового потока [7]. Для реагирования на возникающие в сети скачки мощности и напряжения обычно используется система активного управления углом атаки лопастей [8].

Во втором случае система управления адаптируется под взаимодействие с дизель-генераторной установкой или накопителем электрической энергии [9—11].

Определенные препятствия для монтажа крупных ВЭУ в арктических районах представляет наличие обширных территорий с вечномерзлыми грунтами. В этом случае необходимо обеспечить тепловую развязку между грунтом и массивной конструкцией ВЭУ. При этом монтаж и перевозка башен и лопастей крупных ВЭУ требуют специального транспорта и возможны не на всех имеющихся путях сообщения. Помимо широкого использования железобетона и металла некоторые разработчики пытаются внедрить конструкции на основе современных композитных материалов [12]. Дополнительным условием применения ВЭУ в Арктической зоне России является необходимость бескранового монтажа башни и самого ветрогенератора (ВЭГ), так как тя-

Таблица 1. Характеристики рассматриваемых ветроустановок  
Table 1. Characteristics of the wind turbines under consideration

Ветроустановка	Паспортная мощность, кВт	Высота башни, м
Lagerwey L100	2500	99
Komai KWT300	300	41,5
Ghrepower GHRE FD16-40	40	16, 30

Таблица 2. Географические точки расположения ветроустановок  
Table 2. Geographic locations of the wind turbines

Арктический район	Географические координаты размещения ВЭУ	Примечание
Кольский район, Мурманская область	68,90° с. ш., 34,84° в. д.	Кольская ВЭС (57 ВЭУ по 3,4 МВт)
Поселок Тикси, Республика Саха (Якутия)	71,64° с. ш., 128,86° в. д.	ВДЭС Тикси (3 ВЭУ по 300 кВт)
Мыс Обсервации, Чукотский автономный округ	64,77° с. ш., 177,55° в. д.	Анадырская ВЭС (10 ВЭУ по 250 кВт)
Поселок Амдерма, Ненецкий автономный округ	69,76° с. ш., 61,67° в. д.	ВДЭС поселок Амдерма (4 ВЭУ по 50 кВт)
Быков Мыс, Республика Саха (Якутия)	72,01° с. ш., 129,11° в. д.	ВЭС Быков Мыс (ВЭУ 40 кВт)

желые крупногабаритные краны не всегда могут работать на грунтах таких регионов. Необходимо учитывать и такие аспекты, как защита компонентов ВЭГ и всей установки от повышенных снеговых нагрузок, солевого тумана, обледенения в условиях близости океана. Достаточно подробно весь круг проблем, с которыми сталкиваются ВЭУ арктического исполнения, изложен в [13].

В данной работе рассматривались три типа ветроустановок, нашедших практическое применение в условиях арктического климата (табл. 1).

Выбор ветроустановки Lagerwey L100<sup>2</sup> мощностью 2,5 МВт, представляющей собой один из широко распространенных в мире видов сетевых ветроустановок, обусловлен тем, что производство этих ВЭУ по лицензионному соглашению с голландской компанией Lagerwey полностью локализовано в России АО «Росатом Возобновляемая энергия», и компания АО «ВетроОГК» осуществляет строительство и эксплуатацию ветроэлектростанций (ВЭС) на основе таких ВЭУ на территории России. Установка является типичным изделием для использования в составе крупных ветропарков, но малоприспособна для монтажа в условиях вечной мерзлоты и автономных энергосистем<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Lagerwey – Model L100-2.5MW – Wind Turbine. Available at: <https://www.energy-xprt.com/products/lagerwey-model-l100-25mw-wind-turbine-687066>.

<sup>3</sup> Ветроустановка 2,5 МВт. – URL: <https://rosatom-renewables.ru/production/vey25/>.

Ветроустановки Komai KWT300<sup>4</sup> (Япония) мощностью 300 кВт и Ghrepower GHRE FD16<sup>5</sup> (Китай) мощностью 30—50 кВт имеют варианты арктического исполнения и уже нашли применение в составе ветродизельных энергокомплексов в условиях российской Арктики. Установки GHRE FD16-50 с участием российских специалистов адаптированы к арктическим условиям [14] (монтаж методом ступенчатого подъема элементов на пневмоцилиндрах с использованием обычного автокрана, дополнительный обогрев критичных узлов и компонентов ВЭГ, защитные покрытия и др.). Установки типа Komai использовались в ряде проектов на Дальнем Востоке России, в том числе при создании ветродизельных комплексов в поселке Тикси (Якутия) и поселке Усть-Камчатск (Камчатский край).

Образцы ветроустановок мощностью 40 кВт, 300 кВт и 2,5 МВт перекрывают практически весь диапазон нужд централизованной и распределенной энергетики.

Расчетный анализ энергетической эффективности рассмотренных ветроустановок выполнен как для всей территории России, так и для конкретных мест арктических районов (табл. 2), выбранных совпадающими с местами уже действующих здесь установок, что позволяет сопоставить полученные расчетные данные с имеющимися экспериментальными. В первую очередь это относится к Кольской ВЭС мощностью 202 МВт — крупнейшей в мире сетевой ветровой электростанции за полярным кругом, ввод в эксплуатацию которой компанией «ЭЛ5-Энерго» осуществлен в 2023 г. на основе ветроустановок Siemens-Gamesa SG 3.4-132, результаты эксплуатации которых частично опублико-

<sup>4</sup> Komaihaltec Inc. Renewable Energy Business. KWT300. Available at: <https://www.komaihaltec.co.jp/env/english/wind/kwt300.html>.

<sup>5</sup> FD16-30/FD16-40/FD16-50. Best Model for Commercial Electricity Generation. Available at: <https://en.ghrepower.com/fd16-series/>.

ваны в [15]. Для Анадырской ВЭС, функционирующей в составе Анадырского энергорайона электроэнергетической системы Чукотского автономного округа, ветродизельных станций в поселках Тикси и Амдерма, а также ветростанции Быков Мыс систематизированные данные об их эксплуатации в литературе отсутствуют, и представленные в статье результаты расчета для аналогичных ВЭУ сходной мощности позволяют оценить эффективность их эксплуатации обслуживающими организациями.

*Исходные данные и допущения расчетно-теоретического анализа*

Исходными данными для расчета выработки энергии ветроустановками, КИУМ, а также для статистического анализа нестабильности генерации ими электроэнергии являются метеорологические данные за длительный период, относящиеся к высотам, на которых расположена ось ветроколеса, а также паспортные мощностные характеристики установок, представляющие собой зависимости вырабатываемой мощности от скорости ветра на высоте башни. Предпочтительными с точки зрения точности источниками данных о скорости ветра, температуре и влажности воздуха являются многолетние наземные наблюдения, однако для произвольных географических координат, высот над уровнем Земли, номенклатуры параметров и длительности рядов они недоступны, что обуславливает целесообразность использования данных спутниковых наблюдений и реанализа. В настоящей работе использованы данные реанализа Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (база данных ERA5 [16]) за 2001—2023 гг. Для расчетов использовались часовые последовательности скорости ветра на высотах 10 и 100 м с пространственным разрешением  $0,25 \times 0,25^\circ$  по широте и долготе. Скорость ветра на высоте оси ветроколеса перечисленных в табл. 1 ветроустановок определялась по степенному закону с использованием в качестве реперных точек скоростей ветра на высотах 10 и 100 м.

Расчет часовой выработки генератора сводился к пересчету скорости ветра на высоте башни в среднечасовую вырабатываемую мощность [17]. При этом учитывалось, что паспортные характеристики ВЭУ приводятся к плотности воздуха в потоке  $\rho_{\text{ref}} = 1,225 \text{ кг/м}^3$ , а реальная плотность воздуха под влиянием изменения температуры, давления и влажности со временем варьируется. Изменения плотности могут достигать 10—15%, соответственно изменяется и выработка ветроустановки.

Расчет выработки электроэнергии ветроустановкой выполнялся в соответствии с ГОСТ Р 54418.12.1-2011<sup>6</sup>, регламентирующим испытания ветроустано-

вок. Для ВЭУ с активным управлением мощностью (что характерно для современных ВЭУ с поворотными лопастями) учет влияния изменения плотности воздуха производился путем пересчета скорости ветра:

$$w_{\text{ref}} = w \left( \frac{\rho}{\rho_{\text{ref}}} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где  $w$  — текущая скорость ветра, м/с;  $\rho$  — текущая плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $w_{\text{ref}}$  — расчетная скорость ветра, м/с;  $\rho_{\text{ref}} = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ; скорость  $w_{\text{ref}}$  подставлялась в характеристику ветроустановки.

При расчете плотности воздуха рассматривался как смесь идеальных газов: сухого воздуха и водяного пара. Его плотность определялась как

$$\rho = \frac{1}{T} \left[ \frac{B}{R_0} - P_w \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right], \quad (2)$$

где  $B$  — атмосферное давление, Па;  $T$  — температура, К;  $R_0$  — газовая постоянная сухого воздуха 287,05 Дж/(кг·К),  $R_w$  — газовая постоянная водяного пара 461,5 Дж/(кг·К);  $P_w$  — давление водяного пара при температуре точки росы, Па.

Последнее рассчитывалось по формуле, позволяющей находить  $P_w$  при температурах  $t$  (°C) как выше, так и ниже нуля [18; 19]:

для  $t \geq 0$ :

$$P_w = 611,21 \exp \left[ \frac{(18,678 - t / 234,5)t}{257,14 + t} \right], \quad (3)$$

для  $t < 0$ :

$$P_w = 611,15 \exp \left[ \frac{(23,036 - t / 333,7)t}{279,82 + t} \right]. \quad (4)$$

Существуют и более точные формулы расчета  $P_w$ , но ввиду небольшой величины «влажностного» члена в формуле (2) по сравнению с  $B/R_0$ , практического смысла более точный расчет не имеет.

Мощностные характеристики ветроустановок аппроксимировались кумулятивным распределением Вейбулла [20]:

$$\frac{P}{P_{\text{max}}} = A \left[ 1 - e^{-(kw)^d} \right], \quad (5)$$

где  $P$  — текущая мощность, кВт;  $P_{\text{max}}$  — паспортная мощность установки, кВт;  $w$  — скорость ветра, м/с;  $A$ ,  $d$  и  $k$  — коэффициенты, с/м.

Вместе с паспортной мощностью, высотой башни  $h$  и максимальной допустимой скоростью ветра  $w_{\text{max}}$ , при превышении которой ветроустановки выводятся из режима генерации, значения коэффициентов  $A$ ,  $d$  и  $k$  для рассмотренных ветроустановок приведены в табл. 3. Графическое представление энергетических характеристик ветроустановок при-

<sup>6</sup> ГОСТ Р 54418.12.1-2011. Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. — Ч. 12-1: Измерение мощности, вырабатываемой ветроэлектрическими установками. — М.: Стандартинформ, 2013. — 79 с. — URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/52091/>,

Таблица 3. Параметры ветроустановок  
Table 3. Parameters of the wind turbines

ВЭУ	$P_{max}$ , кВт	$h$ , м	$w_{max}$ , м/с	$A$	$d$	$k$ , с/м
Lagerwey L100	2500	99	25	1,01	4,216	0,1
Komai KWT 300	300	41,5	25	1	3,873	0,1
GHRE Power FD16-40	40	16; 30	25	1	3,886	0,119

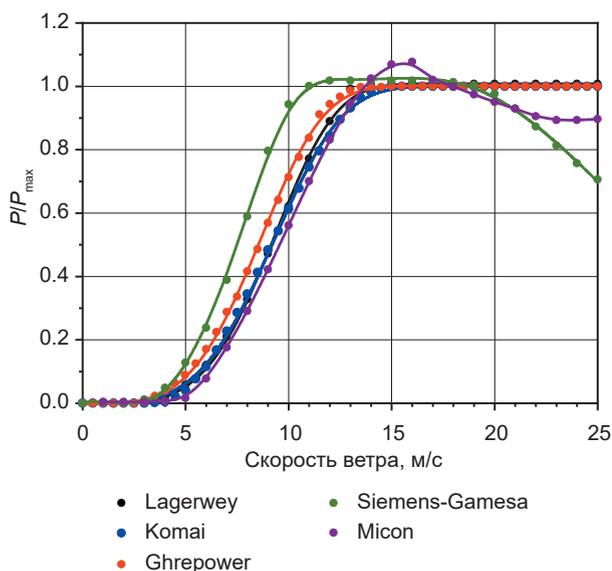


Рис. 1. Энергетические характеристики ветроустановок. Составлено авторами с использованием данных [14; 16; 17]  
Fig. 1. Energy characteristics of the wind turbines. Compiled by the authors using data from [14; 16; 17]

ведено на рис. 1. Следует отметить, что при малых скоростях ветра генерация энергии отсутствует. Так называемая «скорость страгивания» современных ветроустановок составляет обычно 3—3,5 м/с. Ветроустановки характеризуются также максимальной рабочей скоростью ветра  $w_{max}$ , при которой они выводятся из режима генерации. Для всех рассмотренных установок паспортное значение  $w_{max}$  равно 25 м/с.

**Результаты расчетно-теоретических исследований и их обсуждение**

На рис. 2 приведены результаты расчета средних за период 2001—2023 гг. годовых значений КИУМ ветроустановки Lagerwey L100 для всей территории России. Видно, что высокая эффективность преобразования энергии ветрового потока в электроэнергию (КИУМ более 20%) возможна в некоторых районах юга европейской части России, юга Западной Сибири, в отдельных районах Дальнего Востока. При этом регионы, где возможно достижение экстремально высоких значений КИУМ (до 50% и бо-

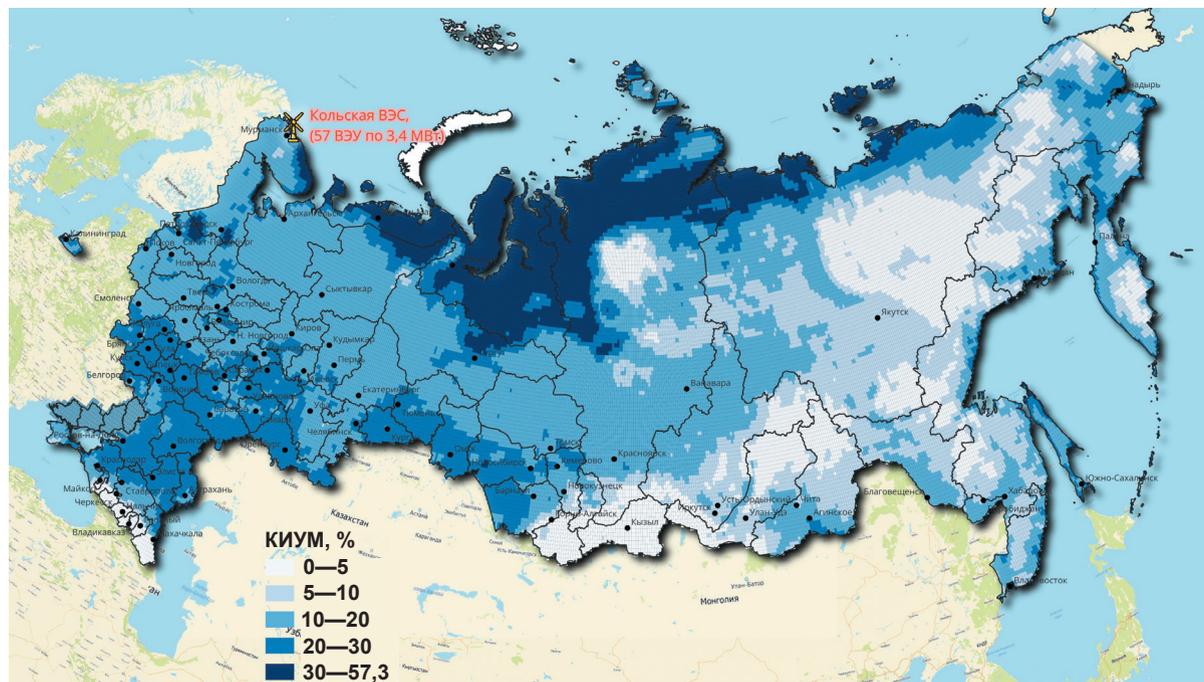


Рис. 2. Распределение среднегодовых значений КИУМ ветроустановки Lagerwey L100 по территории России. Составлено авторами  
Fig. 2. Distribution of average annual values of the capacity factor of the Lagerwey L100 wind turbine across the territory of Russia. Compiled by the authors



Рис. 3. Распределение среднегодовых КИУМ ветроустановок Komai KWT300 по территории России. Составлено авторами  
 Fig. 3. Distribution of average annual capacity factors of Komai KWT300 wind turbines across Russia. Compiled by the authors

лее), относятся к большой части Арктической зоны России (темно-синий цвет).

Как отмечалось выше, производство ВЭУ мегаваттного уровня мощности освоено российской промышленностью, и они применяются для создания ветропарков в составе централизованных систем энергоснабжения. По данным Ассоциации развития ветроэнергетики (АРВЭ) [21], на конец 2024 г. в регионах России, среди которых лидерами являются Ставропольский край, Ростовская и Астраханская области, а также Калмыкия, эксплуатируется 26 ВЭС суммарной мощностью около 2,5 ГВт. По итогам 2023—2024 гг. усредненный по всем ВЭС на территории России годовой КИУМ составил около 30%. Отметим, что по данным ветроэнергетической программы Международного энергетического агентства IEA Wind TCP [22], в ранее упомянутых странах с высокоразвитой ветроэнергетической отраслью средние КИУМ действующих ВЭС составляют: в Дании — 31,4%, в Швеции — 25,5%, в Норвегии — 32,3%, в Канаде — 29,7%, в Финляндии — 28,9%. Таким образом, по уровню КИУМ сетевых ветроустановок наша страна находится на мировом уровне. Выработка Кольской ВЭС в соответствии с пресс-релизом ПАО «ЭЛС-Энерго» [14] в 2023 г. составила 497 ГВт·ч, а в 2024 г. — 539 ГВт·ч, что соответствует КИУМ 28—30%.

На рис. 3 и 4 приведены распределения среднегодовых за 2001—2023 гг. КИУМ для ветроустановок Komai KWT300 и GHRE Power FD16-40 с высотами башен соответственно 41,5 и 16 м. Ветроустановки типа Komai эксплуатируются в составе ветродизель-

ной ВЭС Тикси, а ветроустановки типа GHRE Power FD16 — в составе ветродизельного комплекса в поселке Амдерма и ВЭС Быков Мыс. В поселке Амдерма установлены 4 ветроустановки АВЭ-250 мощностью 250 кВт (производитель «Южмаш») с высотой башни 28,8 м и 6 установок Micon 630 (Дания) такой же единичной мощности с высотой башни 30 м. Энергетические характеристики ветроустановок Micon 630 и Komai KWT300 (см. рис. 1) близки друг к другу, в связи с чем результаты расчета КИУМ на рис. 3 представлены лишь для установки KWT300.

На рис. 5а представлены результаты расчета годовых значений КИУМ ветроустановки Lagerwey L100 в течение 2001—2023 гг. в месте, близком к координатам расположения Кольской ВЭС (см. рис. 2), и их линейной аппроксимации. Вариации годовых КИУМ в рассмотренный 23-летний период относительно линейной аппроксимации достигают 25—30%, при этом за 23 года отмечается тенденция небольшого снижения годовых КИУМ примерно на 6%, что, видимо, связано с климатическими изменениями.

Места расположения ветроустановок Komai KWT300 и GHRE Power FD16-40 отмечены на рис. 3 и 4. Для этих географических точек на рис. 5б—5д приведены результаты расчета среднегодовых КИУМ за 2001—2023 гг. Среднегодовые значения КИУМ ВЭУ в районах Тикси, Быкова Мыса и Анадыря меньше, чем в районе Кольской ВЭС и в Амдерме. Преимущества ветроустановки Lagerwey L100 определяются большей высотой расположения ветроколеса (высота башни — 100 м), с ростом кото-



Рис. 4. Распределение среднегодовых КИУМ ветроустановок GHRE Power FD16-40 по территории России. Составлено авторами  
 Fig. 4. Distribution of average annual capacity factors of GHRE Power FD16-40 wind turbines across Russia. Compiled by the authors

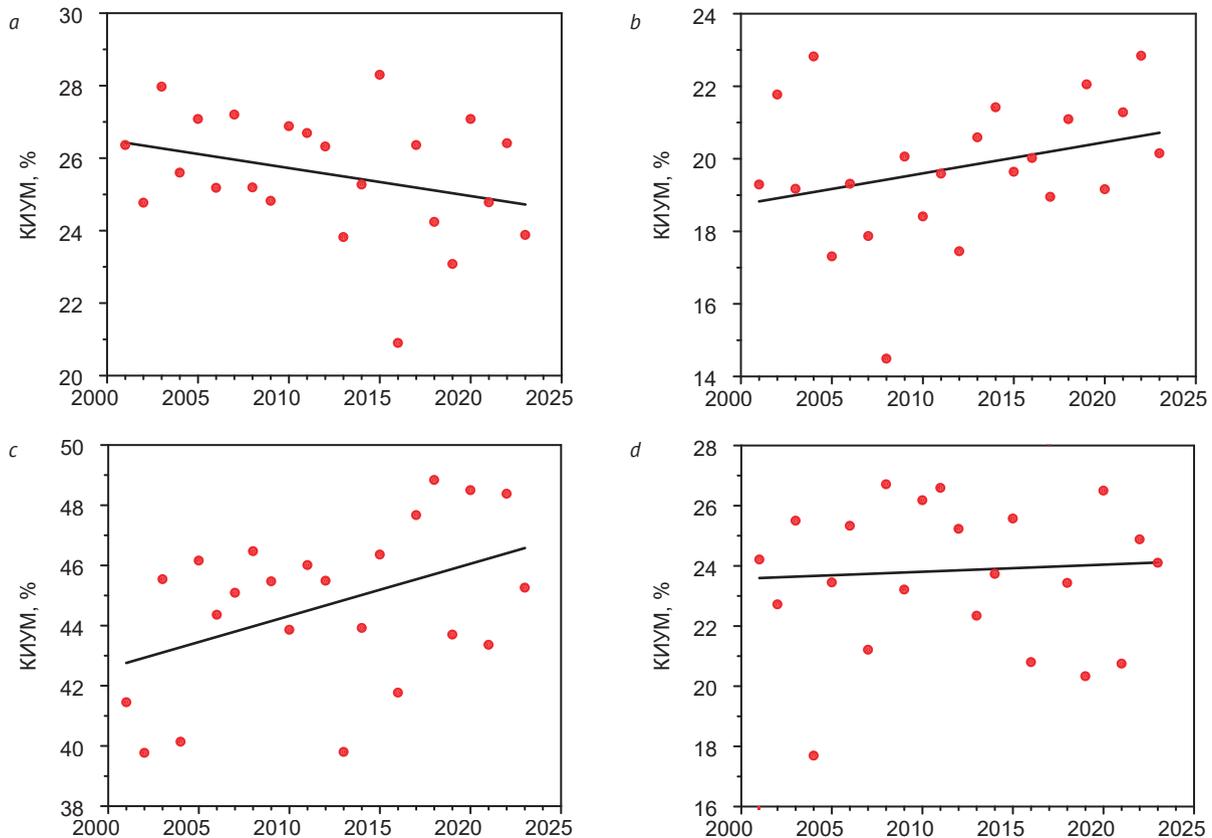
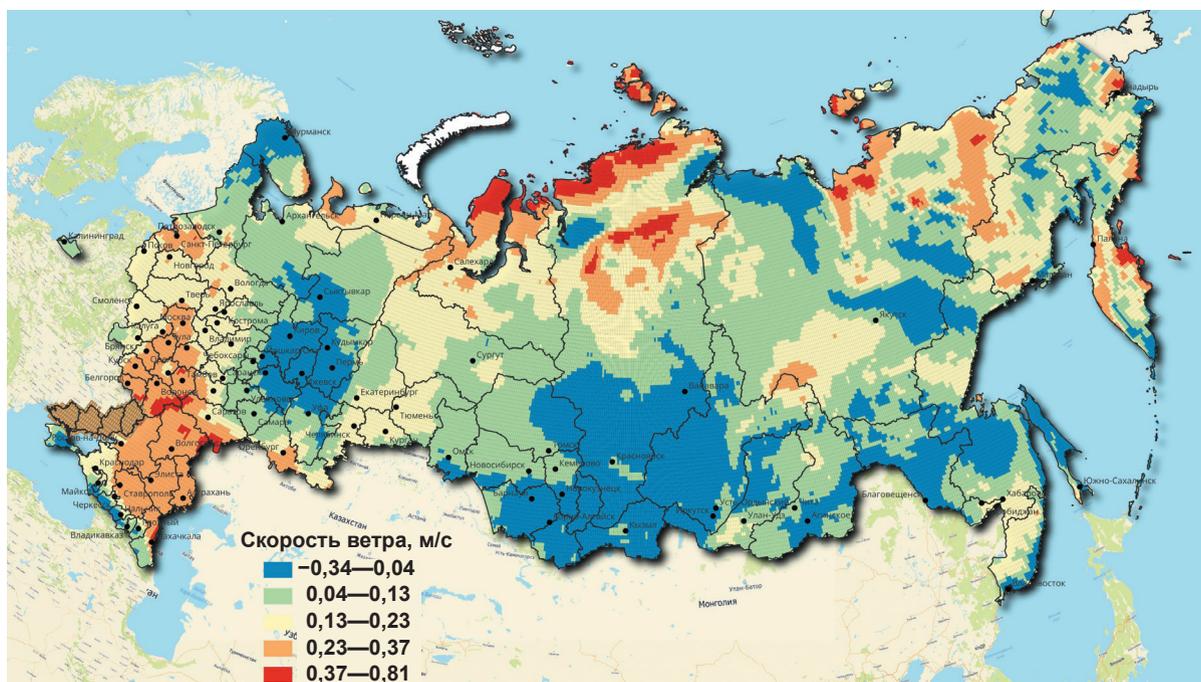


Рис. 5. Годовые КИУМ ветроустановок в течение 2001–2023 гг.: Lagerwey L100 в месте расположения Кольской ВЭС (а), Komai KWT300 в месте расположения Анадырской ВЭС (b), GHRE Power FD16-40 в местах расположения ВЭС в поселке Амдерма (с) и Быков Мыс (d) и их аппроксимация. Составлено авторами  
 Fig. 5. Annual capacity factors of wind turbines during 2001–2023: Lagerwey L100 at the location of the Kola WPP (a), Komai KWT300 at the location of the Anadyr WPP (b), GHRE Power FD16-40 at the locations of the Amderma (c) and Bykov Cape WPPs (d) and their approximation. Compiled by the authors



**Рис. 6. Тренды изменения среднегодовой скорости ветра на высоте 100 м за период 2001–2023 гг. на территории России. Составлено авторами**  
**Fig. 6. Change trends of average annual wind speed at a height of 100 m for the period 2001–2023 in Russia. Compiled by the authors**

рой мощность ветрового потока и соответственно КИУМ обычно увеличиваются. Более высокая производительность установки GHRE Power FD16-40 с высотой башни всего 16 м в поселке Амдерма обусловлена расположением ВЭС в районе с более интенсивными ветрами. Обращает на себя внимание и тот факт, что в отличие от района Кольской ВЭС в других рассмотренных местах отмечается тенденция увеличения среднегодовых значений КИУМ за 2001–2023 гг. (см. рис. 5b–5d), причем в районе Амдермы этот рост достигает около 9% за 23 года. Вариации годовых КИУМ в рассмотренный 23-летний период относительно линейной аппроксимации достигают также, как и для района Кольской ВЭС, 25–30%.

Тенденции изменения ветровых условий на всей территории России на высоте 100 м в терминах величины среднегодовой скорости ветра представлены на рис. 6. Видно, что наибольшее увеличение интенсивности ветра за рассмотренные 23 года (до 0,8 м/с) относится к ряду арктических районов (красный цвет) и к южным районам Европейской части России (до 0,4 м/с, коричневый цвет). Районы страны, в которых наблюдается небольшое снижение интенсивности ветровых потоков, окрашены в синий цвет.

Впервые построенные на основе расчетно-теоретических исследований карты распределения среднегодовых КИУМ и трендов изменения среднегодовой скорости ветра, а также результаты анализа

изменчивости среднегодовых КИУМ для ветроустановок различной мощности за многолетний период представляются полезными при предварительном укрупненном анализе наиболее благоприятных для развития ветроэнергетики районов на территории России, включая Арктическую зону. При этом принятие конкретных решений об использовании тех или иных ВЭУ в составе централизованных систем энергоснабжения или в составе гибридных энергокомплексов должно базироваться на углубленном анализе особенностей графиков нагрузок, предусматривать разработку эффективных методов балансировки генерации и потребления энергии, а также использование систем автоматического управления и защиты для поддержания напряжения и частоты электрического тока в соответствии с требованиями к качеству и надежности энергоснабжения потребителей.

### Выводы

На основе использования созданной в Объединенном институте высоких температур РАН базы многолетних (2001–2023 гг.) среднечасовых последовательностей скоростей ветра на высотах 10 и 100 м и других метеорологических характеристик с пространственным разрешением 0,25×0,25° по широте и долготе в сочетании с разработанными расчетными инструментами выполнен анализ энергетической эффективности использования ветровых потоков для производства электроэнергии на всей

территории России, что обеспечивает возможность предварительного выбора наиболее благоприятных для развития ветроэнергетики районов. Построенные по результатам расчета карты с ранжированием территории страны по диапазонам КИУМ для нашедших практическое применение ветроустановок единичной мощностью 40, 300 и 2500 кВт представляют интерес при принятии решений о строительстве новых ВЭС и ветродизельных энергокомплексов на территории страны.

Показано, что экстремально высокие коэффициенты использования установленной мощности рассмотренных трех типов ветроустановок, предназначенных для работы в составе как централизованных систем энергоснабжения, так и автономных энергокомплексов, могут быть достигнуты в отдельных районах Арктической зоны. При демонстрируемом сегодня эксплуатируемыми сетевыми ВЭС среднем годовом КИУМ на уровне 30% в ряде арктических районов возможно достижение значений этого показателя до 50% и выше, что сопоставимо с КИУМ современных тепловых электростанций.

Анализ тенденций изменения среднегодовых скоростей ветра на высоте 100 м за 23-летний период показал наличие в стране регионов, в которых наблюдается как увеличение, так и снижение среднегодовых скоростей ветра и соответственно КИУМ ВЭУ, что, вероятно, связано с изменением климата. Наибольшая тенденция увеличения интенсивности ветровых потоков относится к арктическому побережью Карского моря. При этом для рассмотренных конкретных географических точек в Арктической зоне страны вариации генерации от года к году достигают 25—30%, что значительно выше отмеченных тенденций изменения среднегодовых скоростей ветра.

Выполненные расчетно-теоретические исследования позволили провести и более детальный статистический анализ изменчивости показателей генерации энергии ветроустановками, включая анализ вероятности и продолжительности «затиший» в генерации в различные периоды года, обусловленных снижением интенсивности ветровых потоков, анализ повторяемости скоростей ветра на различных высотах, а также сезонных и среднемесячных показателей нестабильностей генерации. Эти характеристики крайне важны для разработки конкретных технических решений при проектировании и создании ВЭС и гибридных энергокомплексов и выборе средств и алгоритмов автоматического управления качеством электроэнергии, поставляемой потребителям в соответствии с характерными графиками нагрузок, средств аварийной защиты энергосистем и энергокомплексов, а также резервных маневренных мощностей и накопителей энергии. Результаты этих исследований являются предметом отдельной статьи.

Авторы готовы предоставить заинтересованным организациям более детализированную информа-

цию по результатам расчетно-теоретических исследований, которую невозможно было включить в статью в связи с ограничениями по ее объему.

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России (государственное задание № 075-00269-25-00). Результаты работы использованы в рамках научно-методического и информационно-аналитического обеспечения реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»<sup>7</sup> (ВИП ГЗ).

### Благодарность

Авторы выражают признательность В. П. Шакуну за подготовку картографических материалов к статье.

### Литература/References

1. Бердин В. Х., Кокорин А. О., Юлкин Г. М., Юлкин М. А. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики. — М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. — 80 с. — URL: <http://www.priroda.ru/lib/detail.php?ID=11760>.
2. Berdin V. Kh., Kokorin A. O., Yulkin G. M., Yulkin M. A. Renewable energy sources in isolated settlements of the Russian Arctic. Moscow, World Wildlife Fund (WWF), 2017, 80 p. Available at: <http://www.priroda.ru/lib/detail.php?ID=11760>. (In Russian).
3. Попель О. С., Киселева С. В., Моргунова М. О. и др. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в Арктической зоне Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 1 (17). — С. 64—69. — URL: <http://arctica-ac.ru/docs/journals/17/ispolzovanie-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-dlya-energосnabjениya-potrebite.pdf>.
4. Popel O. S., Kiseleva S. V., Morgunova M. O., Gabderakhmanova T. S., Tarasenko A. B. Use of renewable energy sources for energy supply to consumers in the Arctic zone of the Russian Federation. Arctic: Ecology and Economy, 2015, no. 1 (17), pp. 64—69. Available at: <http://arctica-ac.ru/docs/journals/17/ispolzovanie-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-dlya-energосnabjениya-potrebite.pdf>. (In Russian).
5. Коваленко М. С., Сибилева Е. В. Ресурсный состав Арктики, сложности добычи и перспективы ее развития // Арктика XXI век. Гуманитар. науки. — 2023. — № 1 (31). — С. 26—36. — URL: <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.44.59.003>.
6. Kovalenko M. S., Sibileva E. V. Resource composition of the Arctic, difficulties of extraction and prospects for its development. Arctic XXI century. Humanities,

<sup>7</sup> Утвержден распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2022 г. № 3240-р.

- 2023, no. 1 (31), pp. 26—36. Available at: <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.44.59.003>. (In Russian).
4. Wind Energy in Alaska. Available at: <https://windexchange.energy.gov/states/ak#turbine>.
5. Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Шакиров В. А., Халгаева Н. А. Оценка масштабов рационального использования энергии ветра на труднодоступных территориях востока российской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 406—416. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-406-416.
- Ivanova I. Yu., Tuguzova T. F., Shakirov V. A., Khalgaeva N. A. Assessing the scale of rational use of wind energy in hard-to-reach territories of the eastern Russian Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 406—416. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-406-416. (In Russian).
6. Минин В. А., Целищева М. А. Ресурсы ветра западного сектора Арктической зоны Российской Федерации и возможные направления их использования // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 3, № 1. — С. 72—84. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-72-84.
- Minin V. A., Tselishcheva M. A. Wind resources of the western sector of the Arctic zone of the Russian Federation and possible directions of their use. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 72—84. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-72-84. (In Russian).
7. Ghafouri M., Karaagac U., Mahseredjian J., Kocar I., Lei M. Design of a robust and practicable SSI damping controller using  $H_\infty$  technique for series compensated DFIG-based wind farms. *Energy Reports*, 2023, no. 9, pp. 647—655. DOI: 10.1016/j.egy.2023.05.094.
8. Sungsu Park, Yoonsu Nam. Two LQRI based Blade Pitch Controls for Wind Turbines. *Energies*, 2012, no. 5, pp. 1998—2016. DOI: 10.3390/en5061998.
9. Raghav Chakravarthy E. S., Bhargavi A., Parkavi Kathirvelu K., Balasubramanian R. Analysis and simulation of isolated wind diesel hybrid power system. *ARPN J. of Engineering and Applied Sciences*, 2014, vol. 9, no. 7, pp. 1056—1063. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/264675052\\_Analysis\\_and\\_simulation\\_of\\_isolated\\_wind\\_diesel\\_hybrid\\_power\\_system](https://www.researchgate.net/publication/264675052_Analysis_and_simulation_of_isolated_wind_diesel_hybrid_power_system).
10. Shayeghi H., Monfaredi F., Dejamkhooy A., Shafiekhah M., Catalão J. P. S. Assessing hybrid supercapacitor-battery energy storage for active power management in a wind-diesel system. *Electrical power and energy systems*, 2021, no. 125, p. 106391. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106391.
11. Киселева С. В., Тарасенко А. Б. О возможности использования суперконденсаторных накопителей энергии в составе автономных ветродизельных комплексов // Альтернатив. энергетика и экология (ISJAEE). — 2018. — № 19-21, pp. 23—33. — URL: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.19-21.023-033>.
- Kiseleva S. V., Tarasenko A. B. On the possibility of using supercapacitor energy storage devices as part of autonomous wind-diesel complexes. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2018, no. 19-21, pp. 23—33. Available at: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.19-21.023-033>. (In Russian).
12. O'Leary K., Pakrashi V., Kelliher D. Optimization of composite material tower for offshore wind turbine structures. *Renewable Energy*, 2019, vol. 140, pp. 928—942. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.101>.
13. Резничок А. М. Использование ВИЭ в энергообеспечении удаленных и труднодоступных территорий на примере ветродизельной электростанции (ВДЭС) п. Амдерма Ненецкого автономного округа // Proceedings of the International Renewable Energy Congress — XXI: Energy & Economic Efficiency October 13—14 2016, Skolkovo. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/309210132\\_Renewable\\_energy\\_in\\_the\\_21st\\_Century\\_the\\_energy\\_and\\_economic\\_effectiveness](https://www.researchgate.net/publication/309210132_Renewable_energy_in_the_21st_Century_the_energy_and_economic_effectiveness).
- Reznichok A. M. Use of renewable energy sources in energy supply of remote and hard-to-reach territories on the example of wind-diesel power plant (WDPP) in the village of Amderma, Nenets Autonomous Okrug. *Proceedings of the International Renewable Energy Congress — XXI: Energy & Economic Efficiency October 13—14 2016, Skolkovo*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/309210132\\_Renewable\\_energy\\_in\\_the\\_21st\\_Century\\_the\\_energy\\_and\\_economic\\_effectiveness](https://www.researchgate.net/publication/309210132_Renewable_energy_in_the_21st_Century_the_energy_and_economic_effectiveness). (In Russian).
14. Елистратов В. В., Конищев М. А. Ветро дизельные электростанции для автономного энергоснабжения северных территорий России // Альтернатив. энергетика и экология (ISJAEE). — 2014. — № 11. — С. 62—71. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vetrodizelnye-elektrostantsii-dlya-avtonomnogo-energосnabzheniya-severnyh-territoriy-rossii/viewer>.
- Elistratov V. V., Konishchev M. A. Wind-diesel power plants for autonomous power supply of the northern territories of Russia. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2014, no. 11, pp. 62—71. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vetrodizelnye-elektrostantsii-dlya-avtonomnogo-energосnabzheniya-severnyh-territoriy-rossii/viewer>. (In Russian).
15. Пресс-релизы ПАО «ЭЛ5 Энерго». — URL: <https://www.el5-energo.ru/media/press>.
- Press releases of PJSC EL5 Energy. Available at: <https://www.el5-energo.ru/media/press>. (In Russian).
16. Copernicus. ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
17. Twidell J., Weir T. *Renewable Energy Resources*. 3rd Ed. London, Taylor and Francis, 2015, 816 p. Available at: <https://doi.org/10.4324/9781315766416>.
18. Buck A. L. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *J. Appl. Meteorol.*, 1981, vol. 20, no. 12, pp. 1527—1532. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1981\)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2).

19. Buck Research Instruments, LLC CR-1A User's Manual, Appendix 1. 1996. Available at: <http://www.hygrometers.com/wp-content/uploads/CR-1A-users-manual-2009-12.pdf>.
20. Bokde N., Feijóo A., Villanueva D. Wind Turbine Power Curves Based on the Weibull Cumulative Distribution Function. *Appl. Sci.*, 2018, vol. 8, Art. 1757. Available at: <https://doi.org/10.3390/app8101757>.
21. АРВЭ. Ежеквартальный информационный обзор рынка ВИЭ в России. IV квартал 2024. — URL: [https://rreda.ru/upload/iblock/882/5o10d2x5wvymya7hu4ot1unryz04plkq/202502\\_RREDA\\_quartely\\_report\\_q\\_4\\_2024\\_2.pdf](https://rreda.ru/upload/iblock/882/5o10d2x5wvymya7hu4ot1unryz04plkq/202502_RREDA_quartely_report_q_4_2024_2.pdf).
22. IEA Wind TCP. Available at: <https://iea-wind.org>.

### Информация об авторах

**Попель Олег Сергеевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (127412, Россия, Москва, Ижорская ул., д. 32, стр. 1), e-mail: [O\\_Popel@mail.ru](mailto:O_Popel@mail.ru).

**Фрид Семен Ефимович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (127412, Россия, Москва, Ижорская ул., д. 32, стр. 1), e-mail: [s\\_frid@jiht.ru](mailto:s_frid@jiht.ru).

**Лисицкая Наталья Владимировна**, ведущий инженер, Объединенный институт высоких температур РАН (127412, Россия, Москва, Ижорская ул., д. 32, стр. 1).

**Тарасенко Алексей Борисович**, научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (127412, Россия, Москва, Ижорская ул., д. 32, стр. 1), e-mail: [tarasenkoab@inbox.ru](mailto:tarasenkoab@inbox.ru).

**Киселева Софья Валентиновна**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (127412, Россия, Москва, Ижорская ул., д. 32, стр. 1); заведующая лабораторией возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1), e-mail: [k\\_sophia\\_v@mail.ru](mailto:k_sophia_v@mail.ru).

## ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF WIND ENERGY RESOURCES IN RUSSIA, INCLUDING THE ARCTIC

Popel, O. S.<sup>1</sup>, Frid, S. E.<sup>1</sup>, Lisitskaya, N. V.<sup>1</sup>, Tarasenko, A. B.<sup>1</sup>, Kiseleva S. V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Joint Institute for High temperatures of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

The article was received on April 7, 2025

### For citing

Popel O. S., Frid S. E., Lisitskaya N. V., Tarasenko A. B., Kiseleva S. V. Analysis of energy efficiency of wind energy resources in Russia, including the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 103—115. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-103-115. (In Russian).

### Abstract

Based on the use of long-term (2001—2023) series of hourly wind speeds at various altitudes for three types of wind turbines with a capacity of 40 kW to 2.5 MW promising for operation in centralized and distributed energy systems, the authors consider the analysis results of the energy efficiency of using wind flows throughout the Russian Federation. The calculations use the power characteristics of the Lagerwey L100, Komai KWT300 and GHRE Power FD16-40 wind turbines. It is shown that the highest values of the considered wind turbines capacity

factors can be achieved in the regions of the Arctic zone of Russia (up to 50% and higher). Examples of energy generation instability analysis results are given for several points in the Russian Arctic. The article analyses the variability of wind resources in Russia, including Arctic over the past 23 years. The provided maps of the wind turbines average annual capacity factor and change trends in the average annual wind speed for last 23 years with a spatial resolution of  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  in latitude and longitude can be useful for a preliminary selection of the most favorable regions for the wind energy development in Russia, including the Arctic.

**Keywords:** *Arctic energy, wind potential, wind power plants (WPP), installed capacity factor, climate change in the Arctic, power generation instability.*

### **Funding**

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. 075-00269-25-00). The work results have been used within the framework of scientific, methodological and informational-analytical support for the implementation of the most important innovative project of national importance “Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances” (VIP SA).

### **Acknowledgements**

The authors express their gratitude to V. M. Shakun for preparing cartographic materials for the article.

---

### **Information about the authors**

**Popel, Oleg Sergeevich**, Doctor of Engineering, Chief Researcher, Joint Institute for High temperatures of Russian Academy of Sciences (13, build. 1, Izhorskaya St., Moscow, Russia, 127412), e-mail: O\_Popel@mail.ru.

**Frid, Semen Efimovich**, PhD of Engineering, Leading Researcher, Joint Institute for High temperatures (13, build. 1, Izhorskaya St., Moscow, Russia, 127412), e-mail: s\_frid@jiht.ru.

**Lisitskaya, Natalia Vladimirovna**, Leading Engineer, Joint Institute for High temperatures (13, build. 1, Izhorskaya St., Moscow, Russia, 127412).

**Tarasenko, Aleksey Borisovich**, Research Fellow, Joint Institute for High temperatures (13, build. 1, Izhorskaya St., Moscow, Russia, 127412), e-mail: tarasenkoab@inbox.ru.

**Kiseleva, Sofia Valentinovna**, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Joint Institute for High temperatures (13, build. 1, Izhorskaya St., Moscow, Russia, 127412); Head of the Renewable Energy Sources Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, Russia, 119991), e-mail: k\_sophia\_v@mail.ru.

© Popel O. S., Frid S. E., Lisitskaya N. V., Tarasenko A. B., Kiseleva S. V., 2025