

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА ПО ЕЖЕЧАСНЫМ ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5

А.С. Лубков, О.Ю. Сухонос

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: andrey-ls2015@yandex.ru

С использованием ежечасных данных о скорости ветра на высотах 10 м и 100 м из атмосферного реанализа ERA5 за период 1980–2019 гг. дана климатическая оценка современного состояния ветровых ресурсов Крымского полуострова с целью анализа перспективы использования ветроэнергетики в регионе. Величины скорости ветра в среднем в центральной части Крыма составляют 2–6 м/с, что заметно ниже, чем на западном побережье (4–8 м/с) и на территории Керченского полуострова (5–9 м/с). Обнаружено, что наиболее эффективным районом для ветрогенерации является территория Керченского полуострова. Повторяемость скорости ветра для номинальной выработки ветроэнергетических установок на ней составляет 15–17% на высоте 10 м и 37–38% на высоте 100 м.

**Ключевые слова:** ветер, скорость ветра, ветроэнергетический потенциал, ВИЭ, Крымский полуостров.

Поступила в редакцию: 02.07.2020. После доработки: 08.09.2020.

**Введение.** На сегодняшний день развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является одним из актуальных вопросов экологии и энергетического сектора. Это обусловлено уменьшением запасов ископаемого топлива и влиянием традиционных источников энергии на климатическую систему. В отчетах Росгидромета [1] и МГЭИК [2] отмечается существенное смягчение антропогенного воздействия на климатическую систему при переходе на ВИЭ, так как их использование не связано с эмиссией парниковых газов в атмосферу. При этом в отчете Всемирной сети по энергетической политике 21 века (REN21) [3] за 2020 год утверждается, что мировая доля ввода в эксплуатацию объектов генерации на ВИЭ в период 2012–2014 гг. составила 50%, а в 2019 г. – 75%. При этом рассчитанная мировая мощность выработки ВИЭ в настоящее время достигает 2588 ГВт, из них 1131 ГВт – гидроэлектростанции, 593 ГВт – ветровая энергия и 579 ГВт – солнечная.[3].

По данным Единой энергетической системы России [4] вырабатываемая мощность солнечных и ветровых электростанций на территории России в настоящее время составляет 1547 МВт,

при этом всего 184 МВт вырабатываются ветровыми электростанциями. Тем не менее, исходя из утвержденного распоряжения Правительства Российской Федерации от 08.01.2009 г. № 1-р, к 2024 году в России планируется повысить вклад генерации ВИЭ в общую вырабатываемую энергию до 4,5%, что соответствует 5,9 ГВт. При этом вклад ветровой энергии составит 3,4 ГВт [5]. В то же время вопрос об определении перспективных территорий для размещения ВИЭ, в частности ветроэнергетических установок (ВЭУ), на региональном масштабе окончательно не решен.

Достаточно детальную информацию о ветроэнергетических ресурсах можно получить из Глобального атласа ветра (Global Wind Atlas), представленного в электронном виде [6]. Этот атлас из себя представляет трехуровневый комплекс численных и параметрических моделей. Входными данными являются данные реанализа ERA5. В открытом доступе проект предоставляет ветроэнергетические характеристики с пространственным расширением 250 м на 5 высотах (10, 50, 100, 150 и 200 м). Тем не менее, атлас рассчитан на основе 10-летнего

периода 2008–2017 гг., что недостаточно для учета климатических особенностей.

Одним из ключевых факторов размещения ВЭУ является климатическая оценка ветрового режима вблизи земной поверхности и на различных высотах приземного слоя атмосферы. Такие результаты получены как для России в целом [1, 7, 8], так и для ее отдельных регионов [9–11]. В Крыму оценки ветровых характеристик были исследованы с точки зрения экстремальных скоростей ветра, приводящих к сильному волнению на море [12–14]. В то же время ветроэнергетические ресурсы полуострова не изучались.

Согласно работе [15], в Крыму сконцентрировано практически 50% всей вырабатываемой ветровой электроэнергии России. В связи с этим существует необходимость дать современную климатическую оценку ветровых ресурсов на территории Крымского полуострова, что и является целью настоящей работы.

**Данные.** В связи с наличием внутрисуточной изменчивости скорости ветра (рис. 5б,в), для анализа ветровых характеристик целесообразно использовать базы данных с временным разрешением, достаточным для их отображения. На сегодня существуют 2 реанализа с ежечасным временным разрешением: MERRA2 и ERA5. Пространственное разрешение этих реанализов различно. За счет высокого пространственного разрешения реанализа ERA5 ( $0,25^\circ$  широты  $\times$   $0,25^\circ$  долготы) территория Крымского полуострова представлена 47 узловыми точками. В то время как анализируемый регион в реанализе MERRA2 ( $0,5^\circ$  широты  $\times$   $0,625^\circ$  долготы) – всего девять, что не позволяет учесть физико-географические особенности Крыма, в частности горы и Керченский полуостров.

Сравнение ветроэнергетических характеристик по рассматриваемым реанализам выполнено в модельном исследовании электрогенерации на 1051 турбине в Швеции [16]. Авторами показано, что данные ERA5 более применимы для расчетов ветрогенерации (корреляция между модельными данными генерации

энергии по ERA5 и наблюдаемыми на турбинах составляет 0,87, а по данным MERRA2 – 0,80).

Таким образом, для анализа ветровых ресурсов в Крыму в работе использовались ежечасные данные о скорости ветра (u- и v-компоненты) на высоте 10 и 100 метров реанализа ERA5 за 40-летний период (1980–2019 гг.) с пространственным разрешением –  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ .

**Методика.** В качестве характеристики ветровых ресурсов в работе использовался модуль скорости ветра. Его расчет производился по u- и v-компонентам как квадратный корень из суммы квадратов компонент ветра. Модуль скорости ветра вычислялся для каждого часа данных реанализа.

Известно [17, 18], что мощность ВЭУ зависит от мощности ветрового потока (N) рассчитываемого по формуле

$$N = \frac{1}{2} \rho S V^3, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха ( $1,23 \text{ кг/м}^3$ ),  $S$  – ометаемая воздухом площадь, для вертикальных ВЭУ зависящая от диаметра лопастей установки ( $S = \pi D^2/4$ ) и  $V$  – скорость ветра. При этом, исходя из закона Ланчестера-Беца-Жуковского [19] о максимальной мощности ВЭУ, которую можно получить из мощности ветрового потока, КПД любой ВЭУ технически ограничено константой 59,3%. Из формулы (1) очевидно, что мощность ВЭУ определяется геометрическими особенностями ВЭУ (размер лопастей установки) и скоростью ветра возведенной в куб. В связи с чем в работе рассчитывались среднегодовое и ежемесячные поля куба ветра за период 1980–2019 гг..

Из [8] известно, что вырабатываемая ВЭУ мощность нелинейно зависит от скорости ветра. В среднем стартовая скорость ветра равна 3 м/с, а при скоростях выше 9 м/с установка вырабатывает номинальную (установленную) мощность. В случае превышения скорости ветра более 25 м/с в большинстве ветроустановок срабатывает автоматическая тормозная система. Для оценки длительности условий, при которых ВЭУ не эффективна и при которых ВЭУ вырабаты-

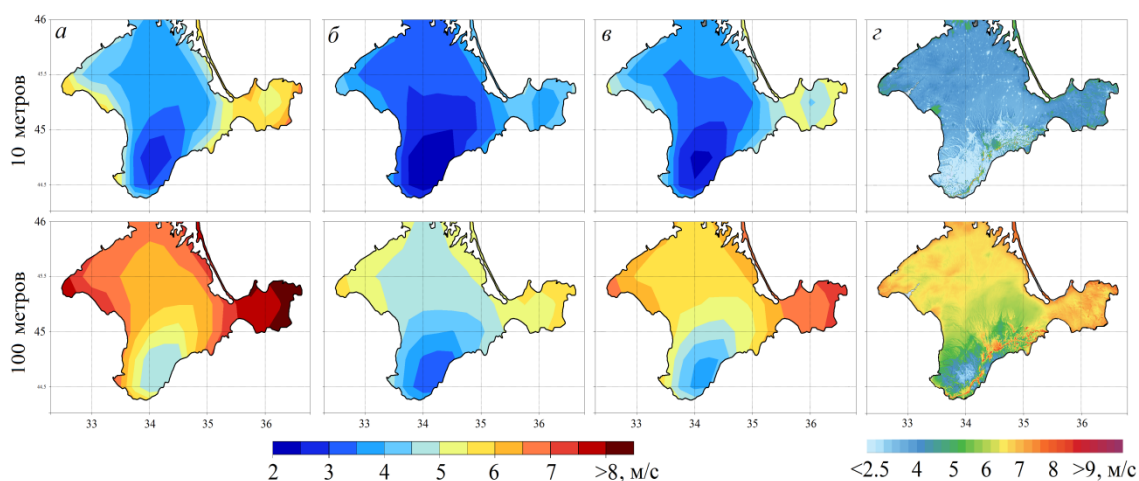
вает номинальную мощность, были построены ежемесячные и среднегодовые поля (осреднение за период 1980–2019 гг.) повторяемости скорости ветров ниже 3 м/с и в диапазоне 9–25 м/с.

Для детальной оценки суточного и сезонного хода ветровых характеристик методом сплайновой поверхности типа «тонкая пластинка» была произведена интерполяция поля скоростей ветра в координаты 22 населенных пунктов Крыма. В этих точках были построены гистограммы повторяемости ветра в зависимости от его скорости. В работе представлены только наиболее актуальные и важные результаты.

**Результаты и обсуждение.** Рассмотрим среднемноголетние поля распределения величин скорости ветра на территории Крыма за период 1980–2019 гг. для месяцев с максимальной и минимальной скоростью ветра и в среднем за год. Далее будет показано (рис. 5а), что максимальные скорости ветра наблюдаются в декабре, а минимальные – в июне, поэтому анализ проводился для этих месяцев. Для центральной части Крыма свойственны ветра со скоростью 3–4 м/с на высоте 10 м над поверхностью и 4–6 м/с на 100 м. Горный массив и Южный берег Крыма (ЮБК) характеризуются наиболее низкими скоростями ветра 2–3 м/с на высоте 10 м и 3–5 м/с

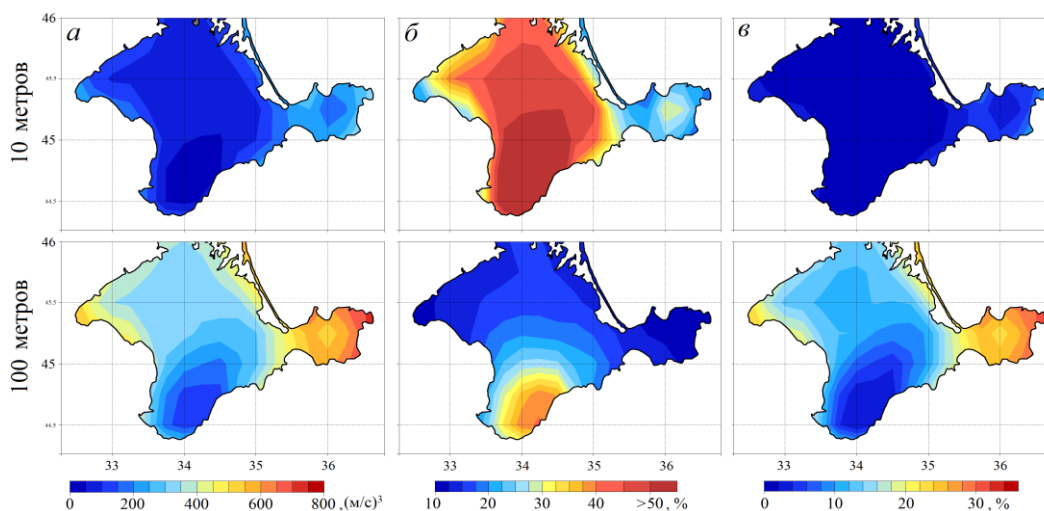
на 100 м (рис. 1в). При этом по данным [6] на вершинах гор и крымских яйлах (вершинные плато) среднегодовые скорости ветра могут достигать более 10 м/с (рис. 1г). Для западного побережья Крыма и Тарханкутского полуострова свойственны более высокие скорости ветра, равные 4–6 м/с на 10 м и 5–8 м/с на 100 м. При этом в декабре (рис. 1а) скорости заметно выше, чем в июне (рис. 1б). Высокие значения скорости ветра наблюдаются на территории Керченского полуострова. Тут скорость ветра в среднем в декабре (рис. 1а) на высоте 10 м равна 5–7 м/с, а на высоте 100 м – 7–9 м/с. В июне же для Керченского полуострова характерны скорости ветра 4–5 м/с на 10 м и 5–7 на 100 м (рис. 1б).

Далее рассмотрим среднемноголетние величины куба ветра на Крымском полуострове (рис. 2а). Практически для всего Крыма величины на высоте 10 м равны 40–120 (м/с)<sup>3</sup>, за исключением его западного побережья и Керченского полуострова. На территории Керченского полуострова величины куба ветра находятся в пределах 160–340 (м/с)<sup>3</sup>. На высоте 100 м величины куба ветра в центральной части Крыма равны 200–400 (м/с)<sup>3</sup>, в горах – 100–150 (м/с)<sup>3</sup> и на территории Керченского полуострова – 550–800 (м/с)<sup>3</sup>.



**Рис. 1.** Среднемноголетние (1980–2019 гг.) поля скорости ветра на высотах 10 м и 100 м над поверхностью для декабря (а) и июня (б) и в целом за год (в) по данным реанализа и за 10-летний период (2008–2017 гг.) за год по данным [6] (г)

**Fig. 1.** Mean annual (1980–2019) wind speed at a height of 10 m and 100 m above surface fields in December (a) and June (b) and for the year (c) according to reanalysis data and for a 10-year period (2008–2017) for a year according to data by [6] (e)



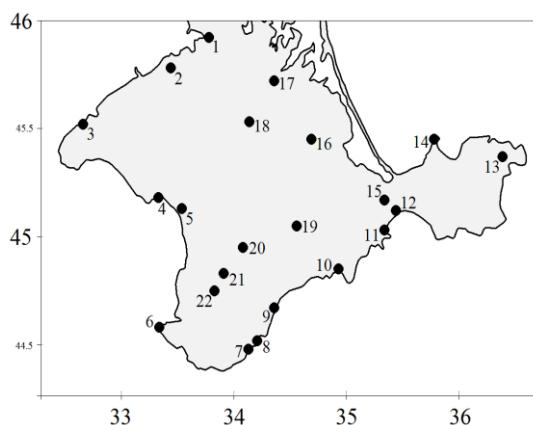
**Рис. 2.** Среднеголетние поля куба ветра (а), повторяемости скорости ветра менее 3 м/с (б) и в диапазоне от 9 до 25 м/с (в) на высоте 10 м и 100 м за период 1980–2019 гг.

**Fig. 2.** Mean annual fields of the cube of wind (a), frequency of wind speed less than 3 m/s (b) and in the range from 9 to 25 m/s (c) at a height of 10 m and 100 m above surface during 1980–2019

Повторяемость ветров, скорость которых меньше 3 м/с, на высоте 10 м для ЮБК, предгорной и центральной части Крыма равна 39–73% (3400–6400 часов/год) и 16–25% (1400–2600 часов/год) для западного побережья и Керченского полуострова. При этом на высоте 100 м на всей территории Крымского полуострова повторяемость таких ветров равна 10–25%, за исключением крымских гор, где она достигает 41% (рис. 2б).

Пространственная структура поля повторяемости скорости ветра в диапазоне 9–25 м/с (рис. 2в), схожа с распределением куба ветра. В центральной части Крымского полуострова и в районе гор на высоте 10 м таких скоростей ветра практически не наблюдается. На территории Керченского полуострова такой ветер повторяется 4–12% (300–1100 часов в году). На высоте 100 м повторяемость скорости ветра в диапазоне 9–25 м/с составляет 5–14% (400–1200 часов/год) в центральной части анализируемого региона и 24–36% (2100–3150 часов/год) на Керченском полуострове.

Проведем более подробный анализ ветровых характеристик с акцентом на 22 населенных пункта, указанные на рис. 3. На рис. 4 представлены диаграммы повторяемости скорости ветра в диапазоне 9–25 м/с и ниже 3 м/с. Можно выделить несколько групп станций, для которых свойственны определенные ветровые условия.



**Рис. 3.** Схематическая карта с нанесенными населенными пунктами: 1–Красноперекопск, 2–Раздольное, 3–Черноморское, 4–Евпатория, 5–Саки, 6–Севастополь (Херсонесский Маяк), 7–Ялта, 8–Никита, 9–Алушта, 10–Судак, 11–Феодосия, 12–Приморский, 13–Керчь, 14–Мысовое, 15–Владиславовка, 16–Нижнегорский, 17–Джанкой, 18–Клепинино, 19–Белогорск, 20–Симферополь, 21–Почтовое, 22–Бахчисарай

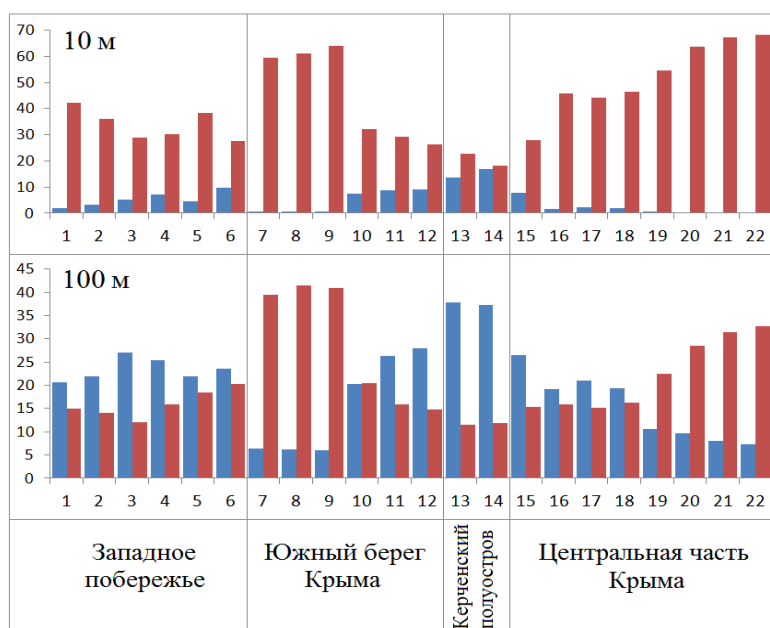
**Fig. 3.** Schematic map with the marked settlements: 1–Krasnoperekopsk, 2–Razdolnoe, 3–Chernomorskoe, 4–Yevpatoria, 5–Saky, 6–Sevastopol (Chersonesos Mayak), 7–Yalta, 8–Nikita, 9–Alushta, 10–Sudak, 11–Feodosia, 12–Primorsky, 13–Kerch, 14–Mysovoe, 15–Vladislavovka, 16–Nizhnegorsky, 17–Dzhankoy, 18–Klepinino, 19–Belogorsk, 20–Simferopol, 21–Postal, 22–Bakhchisarai

Повторяемость случаев оптимальной для выработки энергии скорости ветра в Керчи и Мысовом (Керченский полуостров) на высоте 10 м составляет 17 и 15%, а на высоте 100 м – 38 и 37%, соответственно. При этом неэффективные ветровые условия, при которых ветроустановка не вырабатывает энергию, повторяются в 18% и 22% на 10 м и в 11% и 12% случаях на 100 м.

В западной части ЮБК (Ялта, Никита, Алушта) отмечается высокая повторяемость неэффективных ветровых условий для размещения ВЭУ (рис. 4). Это может быть связано как с недостаточным пространственным разрешением реанализа, так и с защищенностью райо-

на горным хребтом от северных и северо-западных ветров. В предгорном Крыму (Белогорск, Симферополь, Почтовое, Бахчисарай) отмечаются аналогичные ветроэнергетические условия.

На западном побережье Крыма на высоте 10 м повторяемость скорости ветра в диапазоне 9–25 м/с и ниже 3 м/с составляет 2–10% и 28–42%, соответственно; на высоте 100 м – 16–27% и 12–24%, соответственно. Восточная часть ЮБК (Судак, Феодосия, Приморский) и часть центрального Крыма (Владиславовка, Нижегородский, Джанкой, Клепонино) схожи с ветровыми условиями западного побережья Крыма.



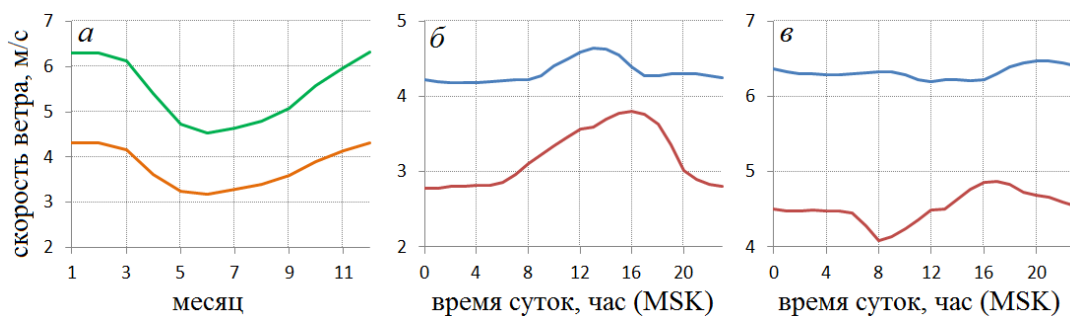
**Рис. 4.** Гистограммы повторяемости скорости ветра в диапазоне от 9 м/с до 25 м/с (синий столбец) и менее 3 м/с (красный столбец) на уровне 10 м и 100 м в 22 населенных пунктах, как на рис. 3

**Fig. 4.** Histograms of wind speed frequency less than 3 m/s (red column) and in the range from 9 to 25 m/s (blue column) at a height of 10 m and 100 m 22 settlements as in fig. 3

Анализ годового хода скорости ветра на высотах 10 м и 100 м (рис. 5а) показал, что скорость ветра в зимнее время выше на 31% для 10 м и 35% для 100 м, чем в летнее. Такие сезонные изменения скорости ветра могут быть связаны с увеличением циклонической активности в холодное время года [20].

Рассмотрим суточный ход изменения скорости ветра. На высоте 10 м можно отметить различие в скоростях ветра: дневные скорости заметно выше относительно ночных. В дневное время суток

наблюдается увеличение скорости ветра на 6% в декабре и 21% в июне (рис. 5б). На высоте 100 м отмечается незначительный суточный ход. В декабре скорость ветра практически не зависит от времени суток, а в июне минимальные скорости наблюдаются в 8 часов (MSK), а максимальные – в 17 (рис. 5в). Такой характер суточного хода на рассматриваемых высотах может говорить о том, что в реанализе ERA5, вероятно, учитывается бризовая (суточная) циркуляция воздуха.



**Рис.5.** Внутригодовая изменчивость (а) на высоте 10 м (оранжевая линия) и 100 м (зеленая линия) и суточный ход скорости ветра на высоте 10 м (б) и 100 м (в) над поверхностью в декабре (синяя линия) и июне (красная линия)

**Fig. 5.** Intra-annual variation (a) at a height of 10 m (orange line) and 100 m (green line) and the daily variation of wind speed at a height of 10 m (b) and 100 m (c) above the surface in December (blue line) and June (red line)

**Заключение.** На основе ежечасных данных реанализа ERA5 выполнена климатическая оценка ветровых ресурсов Крымского полуострова за 40-летний период. Показано, что величины скоростей ветра в среднем в центральной части Крыма равны 2–6 м/с, что заметно ниже, чем на западном побережье (4–8 м/с) и на территории Керченского полуострова (5–9 м/с). При этом ветровые условия Керченского полуострова – наиболее эффективны для ветрогенерации. Повторяемость скоростей ветра, характерных для номинальной выработки ветроэнергетических установок, тут составляет 15–17% на высоте 10 м и 37–38% на высоте 100 м. При этом повторяемость неэффективных ветровых условий для ветрогенерации, когда скорость ветра недостаточная для запуска ветроустановки, не превышает 17–22% на 10 м и 11–12% на 100 м. В центральной части Крыма и ЮБК повторяемость неэффективных ветровых условий на высоте 10 м превышает 40% в год.

В результате анализа суточного хода установлено, что на высоте 10 м скорость ветра в дневные часы, по сравнению с ночными, в среднем выше на 21% в июне и на 6% в декабре. На высоте 100 м суточный ход заметно не выражен.

Выявленные сезонные особенности изменения скорости ветра на высотах 10 и 100 м характеризуют увеличение на 31–35% рассматриваемого климатического параметра в зимний сезон, относи-

тельно летнего.

Некоторая локальная специфика рельефа Крыма, в особенности горные массивы, не учитывалась в работе, что связано с недостаточным пространственным разрешением реанализа. В дальнейшем планируется повысить детализацию пространственной интерполяции ветровых полей путем использования региональной численной атмосферной модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Г.В.* Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г.В. Алексеев, М.Д. Ананичева, О.А. Анисимов [и др.]. 2014. М. Росгидромет. 1008 с.
2. *IPCC, 2011: Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.* Chapter 3. Direct Solar Energy. P. 341–343.
3. *Renewables 2020: Global Status Report*, Paris, 2020: REN21. 367 p.
4. *Анализ показателей балансов электрической энергии и мощности ЕЭС России за IV квартал 2019 года.* URL: [http://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2020/ups\\_balance\\_analysis\\_2019q4.pdf](http://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2020/ups_balance_analysis_2019q4.pdf) (дата обращения 17.08.2020).
5. *Распоряжение* Правительства РФ от 8 января 2009 г. № 1-р Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эф-

фективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2024 года URL: <http://government.ru/docs/20503/> (дата обращения 17.08.2020).

6. *Global Wind Atlas* URL: <https://globalwindatlas.info/> (дата обращения 28.08.2020)

7. *Попель О.С.* Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): учебное пособие / О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева [и др.], 2010. М.: МФТИ. 56 с.

8. *Попель О.С., Фортвов В.Е.* Возобновляемая энергетика в современном мире: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ. 2015. 450 с.

9. *Борисенко М.М.* Климатические характеристики ветроэнергетических ресурсов на территории Ленинградской области // Вопросы охраны атмосферы от загрязнения: инф. бюл. 2007. № 2 (36). С. 119–131.

10. *Переведенцев Ю.П., Николаев А.А.* Климатические ресурсы солнечной радиации и ветра на территории Среднего Поволжья и возможности их использования в энергетике. Казань: Изд-во «Отечество». 2002. 122 с.

11. *Минин В.А.* Оценка перспектив использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей Севера // Теплоэнергетика. 2009. № 11. С. 34–40.

12. *Маслова В.Н., Наумова В.А., Евстигнеев В.П.* Режим, аномалии и многолетняя изменчивость ветро-волновых условий Севастопольского региона // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2019. № 1 (157). С. 55–60.

13. *Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н.* Штормовой ветро-волновой режим у Черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. № 19. С. 56–69.

14. *Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н.* Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2008. № 17. С. 225–243.

15. *Гусева Е.В.* Развитие ветроэнергетики в России и Крыму / Е.В. Гусева, А.Ю. Шалимов, А.Ю. Богомолов [и др.] // Энергетические установки и технологии. 2019. № 2 (5). С. 52–55.

16. *Jon O.* ERA5: The new champion of wind power modelling? // *Renewable Energy*. 2018. V. 126 (October). P. 322–331. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.056

17. *Betz A.* Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen* 1920. V. 26. P. 307–309.

18. *Lanchester F. W.* A contribution to the theory of propulsion and the screw propeller. *Transactions of the Institution of Naval Architects* 1915. V. 57. P. 98–116.

19. *Gijs A.M.* The Lanchester–Betz–Joukowski limit // *Wind Energy*. 2007. V.10(3). P. 289–291. DOI: 10.1002/we.218

20. *Voskresenskaya E.N., Maslova V.N.* Winter–spring cyclonic variability in the Mediterranean–Black Sea region associated with global processes in the ocean–atmosphere system // *Adv. Sci. Res.* 2011. V. 6. P. 237–243.

## RESEARCH OF THE CRIMEAN PENINSULA WIND POWER RESOURCES BASED ON HOURLY DATA FROM ERA5 REANALYSIS

**A.S. Lubkov, O.Yu. Sukhonos**

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

Using hourly wind speed data at 10 m and 100 m from the atmospheric reanalysis ERA5 in 1980–2019 the current state of wind resources is estimated over Crimea for analyzing the promising wind power development in the region. It is established that average wind speed in the central part of Crimea is 2–6 m/s, which is noticeably lower than on the western coast (4–8 m/s) and on the territory of the Kerch Peninsula (5–9 m/s). It is found that the most favorable area for wind generation is the Kerch Peninsula territory. The frequency of wind speed for the rated output of wind power plants in that region is 15–17% at 10 m and 37–38% at 100 m.

**Keywords:** wind, wind speed, wind power, renewable energy, Crimean peninsula.