

Неопределенность оценки ветроэнергетического потенциала Азово-Черноморской прибрежной зоны вследствие климатических изменений ветрового режима

В. П. Евстигнеев^{1,2*}, Н. А. Лемешко³, В. А. Наумова^{2,4},
М. П. Евстигнеев¹

¹ Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

² Севастопольский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Севастополь, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

*e-mail: vald_e@rambler.ru

Поступила 21.09.2020 г.; принята к публикации 11.11.2020 г.; опубликована 25.12.2020 г.

Исследованы проблемы, возникающие при оценке влияния изменения ветрового климата на ветроэнергетический потенциал Азово-Черноморского побережья. Даны оценки снизу в отношении продолжительности рабочего периода действия ветроэнергетических установок (типа *Vestas V117-4.2MW*), а также определена потенциальная годовая выработка энергии для региона. По данным гидрометеорологических станций Азово-Черноморского региона выполнен расчет средних многолетних значений скорости ветра для двух смежных климатических периодов (1954–1983 и 1984–2013 гг.). Результаты свидетельствуют об уменьшении скорости ветра в последние 30 лет на всех метеорологических станциях, кроме Новороссийска. Изменение скорости ветра при сравнении двух тридцатилетних периодов подтверждается оценками линейных трендов среднегодовой скорости ветра за период 1954–2013 гг., которые почти для всех метеорологических станций в регионе имеют отрицательное значение и являются значимыми ($\alpha = 1\%$). Величина трендов оценена непараметрическим методом робастного линейного сглаживания с использованием робастной оценочной функции Тейла – Сена. В работе обсуждается неопределенность оценок ветроэнергетического ресурса вследствие недоучета однонаправленного изменения ветрового климата в регионе. Несмотря на наблюдаемые тенденции режима ветра, средние скорости ветра на пространстве Азово-Черноморского региона достаточны для планирования размещения ветроустановок и регионального развития данной отрасли энергетики.

Ключевые слова: скорость ветра, ветроэнергетический потенциал, ветроэнергетические установки, изменение климата, Азово-Черноморский регион.

Благодарности: работа выполнена при поддержке РФФИ и г. Севастополь в рамках научного проекта № 18-48-920021.

© Евстигнеев В. П., Лемешко Н. А., Наумова В. А., Евстигнеев М. П., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Неопределенность оценки ветроэнергетического потенциала Азово-Черноморской прибрежной зоны вследствие климатических изменений ветрового режима / В. П. Евстигнеев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 4. С. 22–39. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-22-39

Climate Change Induced Uncertainty of Wind Energy Potential for the Azov and Black Seas Coastal Zone

V. P. Evstigneev^{1,2*}, N. A. Lemeshko³, V. A. Naumova^{2,4},
M. P. Evstigneev¹

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

² Sevastopol Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Sevastopol, Russia

³ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

⁴ Institute of natural and technical systems, Sevastopol, Russia

*e-mail: vald_e@rambler.ru

Submitted 21.09.2020; revised 11.11.2020; published 25.12.2020

The paper deals with assessing an impact of wind climate change on the wind energy potential of the Azov and Black Sea coast region. A lower estimate of operating time for wind power installation and a potential annual energy output for the region are given for the case of Vestas V117-4.2MW. Calculation has been performed of a long-term mean wind speed for two adjacent climatic periods (1954–1983 and 1984–2013) based on data from meteorological stations of the Black and Azov Sea region. The results show a decrease in wind speed at all meteorological stations except for Novorossiysk. The wind climate change is confirmed by comparing two adjoined 30-year periods and by estimating linear trends of the mean annual wind speed for the period 1954–2013, which are negative and significant for almost all meteorological stations in the region ($\alpha = 1\%$). The trend values were estimated by the nonparametric method of robust linear smoothing using the Theil – Sen function. In the present study, the uncertainty of wind energy resource induced by a gradual wind climate change is estimated for perspective planning of this branch of energy sector. Despite the observed trends in the wind regime, average wind speeds in the Azov and Black Sea region are sufficient for planning the location of wind power plants.

Keywords: wind speed, wind power potential, wind power installations, climate change, Azov and Black Seas coast.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and Sevastopol under project no. 18-48-920021.

For citation: Evstigneev, V.P., Lemeshko, N.A., Naumova, V.A. and Evstigneev, M.P., 2020. Climate Change Induced Uncertainty of Wind Energy Potential for the Azov and Black Seas Coastal Zone. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 22–39. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-22-39 (in Russian).

Введение

В условиях современного прогресса глобального потепления Российская Федерация максимально концентрирует усилия на снижении антропогенных выбросов парниковых газов. С этой целью предусматривается

реализация мер, обеспечивающих повышение энергетической эффективности во всех секторах экономики, в том числе мер, направленных на использование возобновляемых и альтернативных источников энергии.

Эффективная политика в области климата призвана стать важным фактором и катализатором динамичной технологической модернизации всей экономики страны, укрепления ее позиций в мировом экономическом сообществе, повышения конкурентоспособности – в первую очередь за счет энергоэффективности. Устойчивое развитие страны основано на увеличении потребности в энергии, ресурс которой ограничен. Следствием истощения энергоресурсов является усиление зависимости экономики от цен на традиционные энергоносители, такие как уголь, нефть и газ. По этой причине важной задачей является поиск нетрадиционных источников возобновляемой энергии, одним из которых является ветер. Ветряные электростанции не загрязняют окружающую среду вредными выбросами, а ветровая энергия может конкурировать с невозобновляемыми источниками энергии, так как ветер является неисчерпаемым ресурсом. Использование механической энергии ветра позволит получать абсолютно чистую с точки зрения экологии электроэнергию, что является важным аспектом обеспечения рекреационной привлекательности Крыма.

Кроме того, ветрогенераторы небольшой мощности позволят решить проблему электрификации удаленных от линий электропередач фермерских и других хозяйств. Для нескольких областей Крыма ветроэнергетический потенциал оценен, однако без учета микро- и мезомасштабных особенностей циркуляции ветра, обусловленных неоднородностью подстилающей поверхности. Так, для Севастопольского региона, по предварительным оценкам, достаточно высоким энергоресурсом обладает район м. Херсонес (Гераклейский п-ов), включая побережье. Для Крыма перспективным можно считать строительство высокогорных ветроэнергетических станций на плато Главной гряды Крымских гор.

В связи с проблемой повышения эффективности альтернативных низкоуглеродных источников энергии и необходимостью разработки долгосрочной стратегии развития энергетического комплекса страны вопросы оценки энергозапасов возобновляемых источников энергии в условиях изменяющегося климата являются чрезвычайно актуальными. В соответствии с Распоряжением Правительства РФ № 1 от 8 января 2009 г. к 2020 г. показатель введения альтернативных источников энергии должен составить 4.5 % от общей выработки электроэнергии. Поэтому для каждого региона необходимо разработать основу научно обоснованной методологии оценивания параметров гидрометеорологического режима, в том числе ветра как потенциального источника чистой энергии.

Основным аспектом настоящего исследования является оценка ветроэнергетического потенциала прибрежной акватории моря. Размещение парков ветроэнергетических установок (ВЭУ) в прибрежной зоне морей считается одним из перспективных направлений, в том числе и для Черного моря [1]. Это связано с незначительным влиянием подстилающей морской поверхности на ветровые характеристики, за исключением случаев взволнованной поверхности, над которой характеристики вертикального распреде-

ления ветра меняются [2]. Кроме того, к очевидным преимуществам использования ветроэнергетического потенциала морского побережья относятся: более высокие значения скорости ветра по отношению к континентальным районам и увеличение скорости по мере удаления от берега; менее интенсивная турбулентность, что позволяет извлекать больше энергии, чем на суше [1]. Не менее важный аспект развития прибрежных парков энергетических установок – это возможность одновременного использования энергии ветра и энергии морских волн [3]. Однако в расчетах потенциала того или иного региона все большее внимание уделяется анализу неопределенности оценок, обусловленной региональными климатическими изменениями на исследуемых территориях [1, 4].

Согласно известной точке зрения, оценки текущего состояния параметров климатической системы обладают некоторой степенью неопределенности [5]. Однако именно на этих оценках основываются заключения, важные для принятия решений, в частности относительно политики перспективного социально-экономического развития регионов [6]. Источниками такой неопределенности могут быть как измерительные ошибки или пропуски в рядах данных, так и пространственно-временная изменчивость элементов гидрометеорологического режима, а также структура моделей, положенных в основу статистического оценивания (существуют и другие причины неопределенности, подробнее см. в [5]). В зависимости от уровня неопределенности меняется степень достоверности выводов и заключений, полученных на их основе для той или иной области интересов. Частным примером такой области служит возобновляемая энергетика.

Целью настоящего исследования является оценка величины неопределенности расчетов ветроэнергетического потенциала прибрежной зоны Азово-Черноморского бассейна, связанная с климатическими тенденциями изменения ветрового режима региона.

Материалы и метод исследования

В работе использованы срочные данные 14 гидрометеорологических станций морской береговой сети России и Украины на побережье Черного моря. Статистическая выборка формировалась из данных о средней в срок скорости ветра, определяемой как средняя скорость за небольшой промежуток времени (10 мин – в случае наблюдений по анеморумбометру, 2 мин – по флюгеру). Исходные ряды использовались для получения среднесуточных значений. В соответствии с известными требованиями¹⁾ для получения надежных режимных оценок необходимо наличие качественных и однородных массивов гидрометеорологических данных. По этой причине предварительно была осуществлена проверка климатической однородности исторических массивов с помощью алгоритма *RHtests_dlyPrcp* [7]. В ходе этой процедуры ряды скоростей ветра были скорректированы с учетом высоты ветроизмерительного прибора, смены методики наблюдения за ветром, смены местоположения пунктов [8]. Оценка изменений ветровых условий проводилась

¹⁾ Guidelines on climate metadata and homogenization / E. Aguilar [et al.]. WMO, 2003. 55 p. (WMO WCDMP ; WMO-TD No. 1186). URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9252 (Accessed: 1 October 2020).

за расчетный период 1954–2013 гг. (60 лет). Для оценки ветроэнергетического потенциала прибрежной зоны в текущих климатических условиях использовались восьмисрочные данные наблюдений метеорологических станций побережья Черного и Азовского морей за период 1976–2019 гг. Для станций украинского побережья расчет выполнен по 2013 г. включительно. Начало расчетного периода (1976 г.) выбрано как год перехода на большинстве станций с измерений характеристик ветра по флюгеру на измерения по анеморумбометру.

В работе рассматривается проблема неопределенности оценок ветрового климата так, как это понимается международным климатологическим сообществом [6]. Согласно принятой практике [5] неопределенность может быть охарактеризована либо количественно в оценках статистической изменчивости интересующей величины, либо качественно – по степени достоверности выводов. В нашем исследовании мы использовали первый вариант.

Стандартный подход в оценке ветрового климата предполагает статистическую модель для скоростей ветра V_i вида

$$V_i = V_0 + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где V_0 – норма скорости ветра, оцененная по ряду среднегодовых скоростей ветра за период 25–30 лет, а ε_i – ошибки, которые считаются независимыми случайными величинами, каждая из которых имеет распределение $N(0, \sigma^2)$. Другими словами, стандартные расчеты ведутся в предположении стационарности климата. В действительности, во временных рядах ветровых характеристик присутствует многолетний тренд уменьшения скорости.

Используя оценки на основе (1) за предыдущий климатический период, мы вносим неопределенность в характеристику будущих состояний ветрового климата. Эта неопределенность состоит из двух основных компонент: случайной $S_{\text{вар}}$, индуцированной климатической вариабельностью нормы, и систематической $S_{\text{климат}}$, обусловленной разницей между климатическими нормами вследствие постепенного изменения климата. Считая эти компоненты независимыми, зададим общую неопределенность нормы скорости ветра в будущем S_0 в виде

$$S_0 = \sqrt{S_{\text{вар}}^2 + S_{\text{климат}}^2}. \quad (2)$$

В (2) $S_{\text{вар}} = S/\sqrt{N}$, где S – стандартное отклонение среднегодовых скоростей ветра; N – число лет периода осреднения при расчете нормы. Однако нельзя пренебрегать смещением $S_{\text{вар}}$ из-за автокоррелированности временного ряда скоростей ветра или уменьшением числа степеней свободы выборки N . В случае если красный шум является удовлетворительной моделью автокорреляции климатического ряда, эффективное число степеней свободы выборки N^* аппроксимируется выражением [9, с.2]

$$N^* \approx N \frac{1 - r_1}{1 + r_1}, \quad (3)$$

где r_1 – автокорреляция ряда при единичном сдвиге.

Составляющая $S_{\text{климат}}$ может быть оценена по модулю разности климатических норм между двумя смежными 30-летними периодами $\theta = [V_0^I - V_0^{II}]$. Эта разность θ определяет границы систематической погрешности. Любая

выборочная норма скорости имеет одинаковый шанс быть смещенной вследствие изменения ветрового климата. Следовательно, в пределах границ θ распределение вероятностей равномерно. Для равномерного закона распределения случайной величины получена аналитическая формула расчета дисперсии [10], на основании которой можно дать оценку $S_{\text{климат}}$:

$$S_{\text{климат}}^2 = \theta^2/12. \quad (4)$$

Подставляя (3), (4) в (2), получаем

$$S_0 = \sqrt{S^2/N + \theta^2/12}.$$

Окончательно получим расчетную формулу для оценки вклада неопределенности, вызванной трендом изменения ветрового климата, по отношению к климатической норме:

$$\varepsilon_V = 100\% \cdot \delta V/V_0 = 100\% \cdot \frac{S_0 - S_{\text{вар}}}{V_0} = 100\% \cdot \frac{\sqrt{S^2/N + \theta^2/12} - S/\sqrt{N^*}}{V_0}. \quad (5)$$

В настоящей работе по данным каждой станции выполнены расчеты по формуле (5) следующим образом. Для повышения надежности $S_{\text{вар}}$ оценено по ряду остатков линейной регрессии среднегодовых значений скорости ветра за весь период 1954–2013 гг. Границы смещения θ рассчитаны для двух смежных 30-летних периодов: 1954–1983 и 1984–2013 гг.

Помимо неопределенности в оценках нормы скорости ветра, в работе дополнительно оценен вклад систематической погрешности в оценках используемой в энергетике удельной мощности потока, генерируемой ветром в окрестности метеорологических станций. Известно: $N \propto V^3$. Можно показать, что оценка неопределенности в этом случае превосходит величину неопределенности для нормы скорости ветра в три раза ($\varepsilon_N = 3\varepsilon_V$).

Оценка ветроэнергетического потенциала прибрежной зоны по данным многолетних наблюдений за ветром

Отсутствие достаточно точных расчетов и цифровых карт не дает возможности выбора наиболее оптимальных с точки зрения экономической эффективности зон для постановки ветро-энергетических парков, подбора типа установки под конкретный регион и общей оценки возможности частичного перехода экономики региона к зеленой энергетике.

Для локализации зон, пригодных для использования ВЭУ, необходим детальный анализ характеристик ветра за длительный период. На рис. 1 представлены кривые повторяемости скоростей ветра за год и отдельно по двум полугодиям – теплomu и холодному. Расчет выполнен по данным за 1976–2019 гг., для станций украинского побережья – за 1976–2013 г. При расчете повторяемости ветра по градациям скорости первичные данные о скорости были приведены к значениям на стандартной высоте установки ветроизмерительного прибора 10 м и на высоте башни ВЭУ 100 м (формула пересчета взята из Руководства²⁾).

²⁾ Руководство по авиационной метеорологии. 8-е изд. Montréal, Quebec, Canada : ICAO, 2008. 179 с. (Doc. ICAO ; 8896).

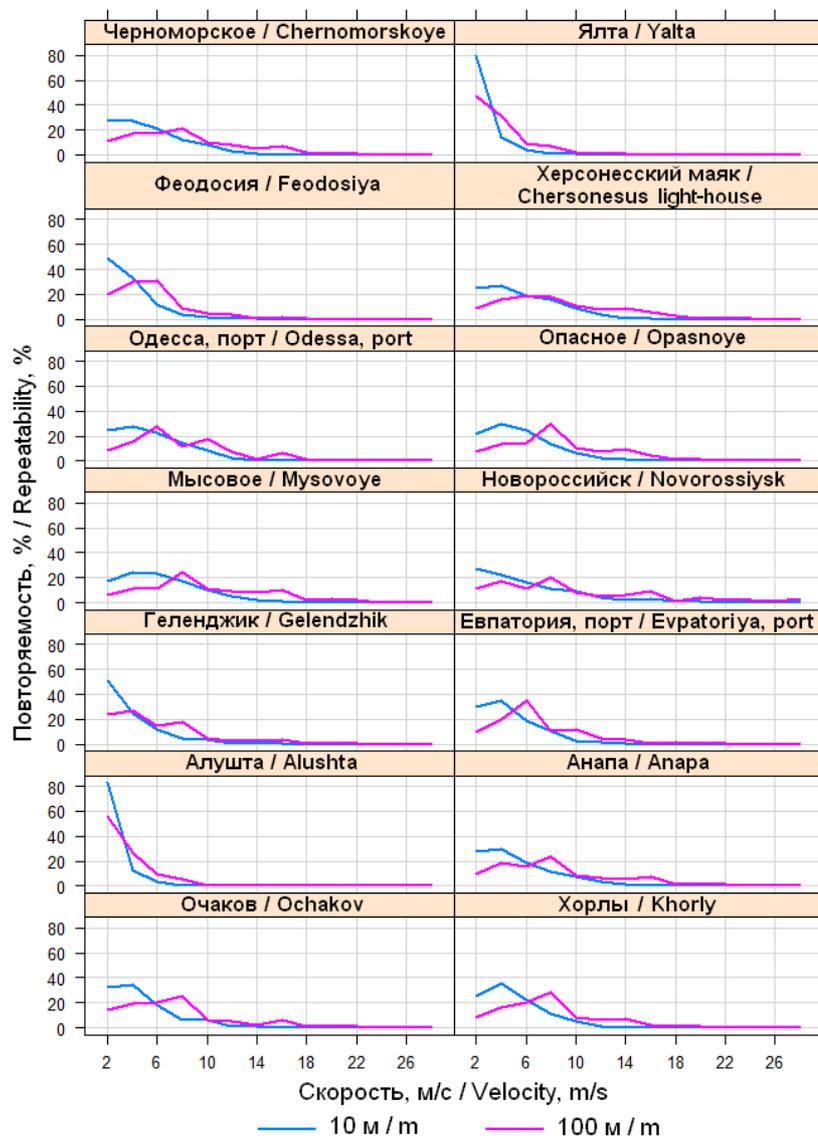


Рис. 1. Повторяемость ветра по градациям скорости на стандартной высоте установки ветроизмерительного прибора 10 м и на высоте башни ВЭУ 100 м, рассчитанная за период 1976–2013 гг.

Fig. 1. Wind velocity frequency at a standard anemometer height of 10 m and at a WPP tower height of 100 m as calculated for 1976–2013

Результаты расчета представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, наибольшая в исследуемом регионе повторяемость характерна для скоростей 10 м/с и менее (на высоте 10 м). Однако в окрестностях метеорологических станций Южного берега Крыма – Ялты, Алушты, Феодосии, а также станции Геленджик – большая часть значений скорости (50–80 %) находится в диапазоне 0–6 м/с. Среднегодовое значение годовой скорости ветра на высоте 10 м составляет 3–5 м/с для большинства станций. В окрестно-

стях Ялты, Алушты, Феодосии и Геленджика среднегодовая скорость находится в пределах 1.5–3 м/с. С точки зрения ветроэнергетики, это наиболее неблагоприятные для освоения районы побережья.

При пересчете скоростей ветра на стандартную для современных ВЭУ высоту 100 м максимумы повторяемости скоростей ветра смещаются в сторону более высоких значений. Для большинства метеорологических станций отмечается увеличение повторяемости скоростей ветра в диапазоне 6–10 м/с. Кроме того, в распределении скорости ветра по градациям на высоте 100 м отмечается вторичный максимум, приходящийся на диапазон 14–18 м/с. Для метеорологических станций Ялта, Алушта, Феодосия на высоте 100 м по-прежнему преобладают ветры со скоростью менее 6 м/с. Для станции Геленджик скорость ветра 6–8 м/с оказывается сравнимой по повторяемости со скоростями менее 6 м/с. Среднегодовое значение годовой скорости ветра на высоте 100 м составляет 6–9 м/с для всех станций, за исключением станций Ялта, Алушта, Феодосия (среднегодовая скорость 2.5–4.5 м/с) и Геленджик (5 м/с).

Важным аспектом научного обоснования использования ветровой энергии в регионе является анализ длительности периодов работы ВЭУ [11]. Рабочим диапазоном стандартных ВЭУ, размещаемых в прибрежной зоне (см., например, *Vestas V117-4.2*³⁾), как правило, считаются значения скорости ветра от 3 м/с и максимум до 25 м/с. Согласно результатам расчетов повторяемость приведенных к высоте 100 м скоростей ветра в рабочей зоне для всех станций, кроме станций Южного берега Крыма, составляет 6000–8000 ч/год (табл. 1). Наименьшая продолжительность рабочего периода получена для станции Алушта (чуть более 3800 ч/год), наибольшая – для станции Мысовое (более 8100 ч/год).

Для большинства станций отмечается увеличение длительности рабочего периода (примерно на 10 %) в холодное полугодие по сравнению с теплым. Это связано с тем, что в холодном полугодии увеличивается повторяемость более высоких скоростей ветра вследствие активизации крупномасштабных атмосферных процессов в Атлантико-Европейском секторе и увеличения частоты штормовых явлений в Азово-Черноморском регионе [12]. При условии установки ВЭУ типа *Vestas V117-4.2* потенциальная годовая выработка энергии для рассматриваемого региона составит 9–17 ГВт·ч, для окрестности станций Ялта, Алушта, Феодосия – от 1,5 до 5 ГВт·ч (рис. 2).

Очевидно, что полученные значения годовой выработки являются приблизительными, поскольку при расчетах не учитывался ряд факторов:

- степень репрезентативности площадок метеорологических станций для характеристик ветра на пространстве прилегающей прибрежной зоны моря;
- увеличение скорости ветра над морской поверхностью вследствие малой шероховатости подстилающей поверхности.

Исходя из этого, полученные в настоящей работе результаты расчетов рабочего периода и годовой выработки энергии можно считать нижней оценкой ветроэнергетического потенциала прибрежий региона.

³⁾ URL: <https://mhivestasoffshore.com/innovations>.

Таблица 1. Средняя продолжительность рабочего периода ВЭУ по данным наблюдений за ветром (1976–2013 гг.) на высоте 10 и 100 м

Table 1. Average performance period duration of a wind power plant (WPP) as per wind observation data (1976–2013) at 10 and 100 m height

Станция / Station	Средняя продолжительность рабочего периода ВЭУ, ч					
	За год / Year		В холодное полу- годие / Cold half- year period		В теплое полугодие / Warm half-year period	
МГ Черноморское / MHS Chernomorskoye	5780	7290	3100	3790	2650	3490
МГ Мысовое / MHS Mysovoye	6740	8160	3500	4090	3230	4070
МГ Опасное / MHS Opasnoye	6130	8080	3200	4050	2930	4040
МГ Евпатория, порт / MHS Evpatoriya, port	5010	6130	2750	3250	2250	2870
МГ Феодосия / MHS Feodosiya	3190	5100	1840	2750	1330	2360
МГ Алушта / MHS Alushta	1590	3840	910	1970	660	1870
МГ Херсонесский маяк / MHS Chersonesus light-house	5730	7680	3210	3980	2500	3700
МГ Ялта / MHS Yalta	1890	4580	1070	2380	790	2200
МГ Одесса, порт / MHS Odessa, port	6020	6640	3200	3500	2810	3130
МГ Очаков / MHS Ochakov	4820	7540	2640	3890	2160	3650
МГ Хорлы / MHS Khorly	5230	8040	2740	4020	2480	4030
МГ Анапа / MHS Anapa	5500	7910	3050	4050	2430	3860
МГ Геленджик / MHS Gelendzhik	3950	6650	2190	3520	1730	3130
МГ Новороссийск / MHS Novorossiysk	6010	7530	3260	3740	2740	3790

Примечание: МГ – морская гидрометеорологическая станция.

Note: MHS – marine hydrometeorological station.

Оценка климатической тенденции изменения ветроэнергетического потенциала побережья

С практической точки зрения особый интерес представляет изучение вклада долгопериодных климатических тенденций в оценку ветроэнергетического потенциала.

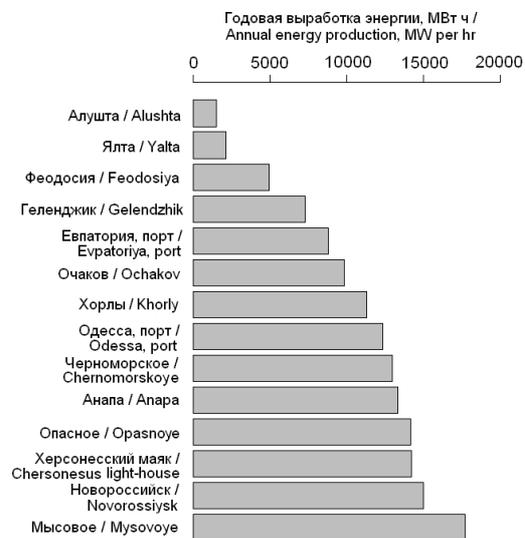


Рис. 2. Потенциальная годовая выработка электроэнергии при условии установки ВЭУ типа *Vestas V117-4.2*

Fig. 2. Potential annual energy output assuming a WPP of *Vestas V117-4.2* type is installed

Представление данных гидрометеорологических наблюдений в виде статистической серии позволяет изучить динамику статистической совокупности, выявить изменения климата и связи исследуемого элемента режима с крупномасштабными процессами в глобальной климатической системе Земли. В качестве такой

оценки изменения гидрометеорологического режима можно использовать разность между климатическими нормами, характеризующими климатические условия начального и конечного периодов. Однако реальным это изменение будет признано только тогда, когда его величина будет превосходить вероятную ошибку вычисления соответствующих норм [13].

В настоящем исследовании выполнен расчет норм скорости ветра для двух смежных климатических периодов (1954–1983 и 1984–2013 гг.) по данным метеорологических станций, сгруппированным по районам Черноморского региона. Выбранные климатические периоды смещены относительно стандартного периода (1961–1990 гг.), применяемого в качестве нормы в климатологических расчетах. Однако используемые здесь периоды позволяют выявить изменение ветровых условий в регионе во второй половине XX – начале XXI в.

Расчет скорости ветра по двум выбранным смежным климатическим периодам позволил выявить значимое различие между среднегодовыми скоростями ветра для большинства метеорологических станций (табл. 2). Из таблицы следует, что уменьшение скорости ветра наблюдается на всех метеорологических станциях, кроме МГ Новороссийск. Статистически значимая ($\alpha = 1\%$ в стандартном t -тесте) разница между нормами скорости ветра на побережье Черного моря колеблется в пределах значений по модулю от 0.3 м/с (Черноморское) до 1.3 м/с (Геленджик). Для большинства пунктов наблюдения норма уменьшилась в среднем на 17%. Наибольшее уменьшение скорости ветра отмечается для таких станций, как Алушта (на 32%), Геленджик (на 30%), Феодосия (на 26%), Ялта (на 22%). Результат расчетов по данным МГ Новороссийск не соответствует выявленной закономерности – разница между нормами является статистически незначимой.

Изменение скорости ветра при сравнении двух тридцатилетних смежных периодов подтверждается оценками линейных трендов среднегодовой скорости ветра за 1954–2013 гг. (табл. 2), которые почти для всех метеорологических станций в регионе имеют отрицательные значения и являются значимыми ($\alpha = 1\%$). Величина трендов оценена непараметрическим методом

Таблица 2. Среднегодовое скорости ветра в смежные климатические периоды и их линейные тренды

Table 2. Long-term average annual wind velocities in adjacent climatic periods and their linear trends

Пункт наблюдения / Observation station	Среднегодовое скорость ветра, м/с / Long-term average annual wind velocity, m/s		Линейный тренд (м/с·10 лет) за 1954–2013 гг. / Linear trend (m/s·10 yrs) for 1954–2013	Неопределенность оценок, % / Estimate uncertainty, %	
	1954–1983	1984–2013		ε_V	ε_N
Северо-западный район Черного моря / North-western Black Sea area					
МГ Одесса-порт / MHS Odessa-port	5.0	4.0	–0.31	4.9	14.6
МГ Очаков / MHS Ochakov	4.4	3.5	–0.26	4.3	12.9
МГ Хорлы / MHS Khorly	4.5	4.1	–0.13	1.2	3.7
МГ Черноморское / MHS Chernomorskoye	5.0	4.7	–0.17	0.7	2.2
Крымский район Черного моря / Crimean Black Sea area					
МГ Евпатория / MHS Evpatoriya	4.0	3.6	–0.12	2.2	6.5
МГ Херсонесский маяк / MHS Chersonesus light-house	4.5	4.1	–0.11	1.1	3.4
МГ Ялта / MHS Yalta	2.3	1.8	–0.13	5.3	16.0
МГ Алушта / MHS Alushta	2.5	1.7	–0.24	7.8	23.3
Керченско-Туапсинский район Черного моря / Kerch-Tuapse Black Sea area					
МГ Феодосия / MHS Feodosiya	3.9	2.9	–0.32	7.1	21.3
МГ Опасное / MHS Opasnoye	5.6	4.9	–0.26	3.2	9.7
МГ Анапа / MHS Anapa	5.9	4.8	–0.35	4.7	14
МГ Новороссийск / MHS Novorossiysk	5.0	4.9	–0.04*	0.1	0.3
МГ Геленджик / MHS Gelendzhik	4.4	3.1	–0.45	8.6	25.9

* Незначимость статистической оценки на уровне 1 %; МГ – морская гидрометеорологическая станция.

* Statistical estimate insignificance at 1 % level; MHS – marine hydrometeorological station.

робастного линейного сглаживания с использованием робастной оценочной функции Тейла – Сена [14]. Значимость трендов устанавливалась на основе теста Манна – Кендалла на уровне 1 %. Применение оценочной функции Тейла – Сена обусловлено возможным наличием в выборке выбросов, несимметричностью и гетероскедастичностью распределения скорости ветра.

В целом для станций Черноморского региона значение тренда составляет от -0.1 до -0.45 м/с за 10 лет, за исключением МГ Новороссийск, для которой ряд скорости ветра имеет незначимый тренд.

При оценке ветроэнергетического потенциала территории ключевую роль играют оценки среднемноголетних скоростей ветра. Естественная климатическая изменчивость скоростей ветра, а также изменение ветрового климата могут приводить к неопределенности таких оценок в будущем. Источниками неопределенности также могут служить искусственные причины, связанные с неточностью методик измерений параметров ветра, не до конца устраненной неоднородностью и т. п. Однако сфокусируем внимание на первой группе причин. Считая вклады естественной изменчивости ветра и долгопериодного изменения ветрового климата независимыми, мы установили величину относительного вклада изменения климата в неопределенность оценки нормы скорости (см. (5)).

Результат расчета относительной неопределенности ε_V вследствие наблюдающихся тенденций изменения ветрового климата представлен в табл. 2. В целом ее значение колеблется в пределах от 0.7 % (МГ Черноморское) до 8.6 % (МГ Геленджик). Для 8 из 12 станций побережья значение неопределенности не превышает 5 %, что свидетельствует о несущественности для них влияния изменения климата при оценке норм.

Несколько иное состояние дел при расчете удельной мощности потока N , генерируемой ветром в окрестности метеорологических станций. Результат расчета для мощности N представлен в таблице. Если для МГ Черноморское ε_N приняло значение около 2 %, то для МГ Геленджик это значение составило 26 %.

Для МГ Новороссийск индуцированная изменением климата неопределенность как скорости ветра, так и мощности близка к нулю.

Обсуждение результатов

Оценки уменьшения скорости ветра, полученные в данной работе, совпадают с результатами исследований не только для Черноморского региона, но и для остальной территории России [15–18].

Дискуссия о причинах уменьшения скорости ветра в последние десятилетия продолжается и в настоящее время. Среди возможных причин такой тенденции в режиме ветра наиболее вероятными называют: изменение глобальной циркуляции, приводящее к нестационарности временных рядов, а также изменение (увеличение) защищенности метеоплощадок вследствие застройки и зарастания окрестностей. И то и другое требует дополнительных исследований, в том числе изучения экстремальных характеристик режима ветра. Так, по данным Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. [19], наибольшее число опасных явлений после сильных осадков (137 случаев) приходится на очень сильный ветер, в том числе шквал (129 случаев).

Как следует из результатов настоящей работы, средние многолетние скорости ветра по данным регулярных наблюдений составляют 3–5 м/с на всех метеорологических станциях, за исключением станций Ялта, Алушта, Феодосия и Геленджик, где скорости находятся в пределах 1.5–3.0 м/с. На стандартной высоте установки ротора прибрежных ВЭУ 100 м значения скоростей будут выше – по выполненным расчетам 6–9 м/с для большинства станций. Такие скорости ветра позволяют использовать ветродвигатели традиционной конструкции. Эти двигатели представляют собой лопастные механизмы с горизонтальной осью вращения – крыльчатые ВЭУ. Необходимая минимальная скорость ветра для работы крыльчатых ВЭУ мощностью 200 кВт составляет 4–5 м/с. Для Ялты и Алушты среднегодовая скорость ветра принимает значения 2–3 м/с. В этих районах возможно использовать ВЭУ только малой мощности (100 кВт).

Изменение ветрового климата приводит к неопределенности оценок ветроэнергетического ресурса для перспективного планирования развития данной отрасли энергетики в регионах. Представленные в работе оценки неопределенности величины ветроэнергетического ресурса находятся в пределах 2.0–26.0 % (для удельной мощности воздушного потока). Наибольшая неопределенность в оценках соответствует станциям МГ Ялта, МГ Алушта, МГ Геленджик, МГ Феодосия. С одной стороны, установленный факт свидетельствует о нецелесообразности использования ветроэнергоресурса в этих районах. С другой стороны, дополнительной проработки требует вопрос, насколько репрезентативны наблюдения на этих станциях для описания ветрового режима более обширных территорий, поскольку это станции с наиболее закрытым горизонтом метеоплощадки. Для остальных станций неопределенность оценки нормы скорости ветра, обусловленная изменением климата, не превышает 5 %. Данное значение согласуется с оценками аналогичного влияния изменения ветрового климата в ближайшем будущем, полученными для других регионов мира [4].

В работах последнего десятилетия (см. обзор в [20]) на основе результатов численных расчетов с использованием глобальных климатических моделей утверждается, что в Восточной Европе в период до 2050 г. ожидается более умеренная тенденция к уменьшению скорости ветра. Следовательно, полученные в настоящей работе результаты являются оценкой сверху возможной неопределенности климатической нормы в будущем, поскольку опираются на тенденции, выявленные по данным фактических наблюдений за предыдущие годы.

Что касается удельной мощности, то представленные в табл. 2 значения ε_N также являются верхним пределом, поскольку более строгие оценки N должны, вообще говоря, учитывать статистическое распределение скоростей ветра, которое чаще всего является негауссовым и асимметричным. В то же время существуют и другие источники неопределенности величины ветроэнергетического потенциала [21], влияние которых еще предстоит оценить.

Выводы

Из результатов настоящей работы, полученных по данным регулярных наблюдений на береговых гидрометеорологических станциях побережья Черного и Азовского морей, следует, что средние многолетние значения

скорости ветра на стандартной высоте установки ротора прибрежных ВЭУ 100 м составляют 6–9 м/с на всех станциях, за исключением станций Ялта и Алушта, где эта величина принимает значения 2–3 м/с. Следовательно, в районе большинства станций могут быть использованы ветродвигатели традиционной конструкции (например, крыльчатые ВЭУ) мощностью от 200 кВт; в акваториях, примыкающих к этим районам, могут быть использованы и более мощные ветродвигатели специализированной конструкции, например *Vestas V117-4.2*. В районах Ялты и Алушты возможно использовать ВЭУ только малой мощности (100 кВт).

Анализ многолетнего хода характеристик скорости ветра за период 1954–2013 гг. позволил выявить явную тенденцию к уменьшению среднегодовых значений скорости ветра. На всех станциях, за исключением МГ Новороссийск, установлен значимый отрицательный тренд скоростей ветра в пределах от –0.1 до –0.45 м/с за 10 лет. В работе оценена неопределенность величины ветроэнергетического ресурса (в терминах удельной мощности воздушного потока), связанная с изменением ветрового климата, значение которой варьирует в пределах 2.0–26.0 %. Наибольшая неопределенность в оценках соответствует станциям с наибольшей защищенностью метеоплощадки, данные наблюдений которых являются, по-видимому, нерепрезентативными для характеристик ветрового режима над прилегающими акваториями. Кроме того, эта оценка является оценкой сверху, поскольку она опирается на величину трендов, рассчитанных по данным фактических наблюдений за предыдущий климатический период. Поэтому, скорее всего, фактор изменения ветрового климата не критичен для разработки бизнес-проектов и государственных программ поддержки отрасли ветровой энергетики в ближайшем будущем. Принятый в мировой практике финансовый горизонт инвестиций в ветровую энергетику составляет от 10 до 25 лет. В пределах горизонта 10 лет влияние фактора изменения ветрового климата будет еще меньше представленных в работе оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Onea F., Rusu E.* Wind energy assessments along the Black Sea basin // *Meteorological Applications*. 2014. Vol. 21, iss. 2. P. 316–329. doi:10.1002/met.1337
2. *Волков Ю. А., Полников В. Г., Погарский Ф. А.* К вопросу о профиле ветра у взволнованной поверхности // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43, № 2. С. 279–288.
3. *Akpınar A., Kömürçü M. I.* Wave energy potential along the south-east coasts of the Black Sea // *Energy*. 2012. Vol. 42, iss. 1. P. 289–302. doi:10.1016/j.energy.2012.03.057
4. *Breslow P. B., Sailor D. J.* Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States // *Renewable Energy*. 2002. Vol. 27, iss. 4. P. 585–598. doi:10.1016/S0960-1481(01)00110-0
5. *Семенов С. М., Инсаров Г. Э., Мендес К. Л.* Характеристика неопределенностей в оценках межправительственной группы экспертов по изменению климата // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2019. № 1. С. 76–96. doi:10.21513/2410-8758-2019-1-76-96
6. *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T. F. Stocker [et al.]. Cambridge : Cambridge University Press, 1535 p.* doi:10.1017/CBO9781107415324

7. New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series / X. L. Wang [et al.] // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2010. Vol. 49, iss. 12. P. 2416–2436. doi:10.1175/2010JAMC2376.1
8. *Евстигнеев В. П.* Скорости ветра и высоты волн редкой повторяемости на Азово-Черноморском побережье Украины // *Геоинформатика*. 2014. № 2. С. 56–64.
9. *Jones R. H.* Estimating the variance of time averages // *Journal of Applied Meteorology*. 1975. Vol. 14, no. 2. P. 159–163. URL: <https://www.jstor.org/stable/26176648> (date of access: 13.11.2020).
10. *Джонсон Н. Л., Коц С., Балакришнан Н.* Одномерные непрерывные распределения: в 2 частях. М. : БИНОМ, 2012. Ч. 2. 600 с.
11. *Минин В. А.* Распределение рабочих периодов и периодов простоя ВЭУ по длительности на северном побережье Кольского полуострова // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. Т. 9, № 8. С. 48–55. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.48-55
12. Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона / В. П. Евстигнеев [и др.]. Севастополь : ИПТС, 2017. 320 с. doi:10.33075/978-5-6040795-0-8
13. *Груза Г. В., Ранькова Э. Я.* Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск : ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. 194 с. URL: meteoinfo.ru/images/media/books-docs/special/Gruza_Rankova_2012.pdf (дата обращения: 13.11.2020).
14. *Sen P. K.* Estimates of regression coefficient based on Kendall's tau // *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63, iss. 324. P. 1379–1389. doi:10.1080/01621459.1968.10480934
15. *Баранова А. А., Голод М. П., Мещерская А. В.* Изменение градуированных скоростей ветра на территории России во второй половине XX века // *Труды Главной геофизической лаборатории им. А. И. Воейкова*. Санкт-Петербург, 2007. Вып. 556. С. 116–138. URL: <http://voeikovmgo.ru/download/publikacii/2007/556.pdf> (дата обращения: 13.11.2020).
16. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным / А. В. Мещерская [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 9. С. 46–58.
17. *Луц Н. В.* Многолетняя изменчивость скорости ветра в Восточном Приазовье // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 2. С. 98–102.
18. *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*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 17. С. 225–243.
19. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М. : Росгидромет, 2019. 79 с. URL: www.meteorf.ru/upload/pdf_download/oklimat-rf-2018.pdf (дата обращения: 13.11.2020).
20. *Solaun K., Cerdá E.* Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections // *Renewable Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 116. 109415. doi:10.1016/j.rser.2019.109415
21. *Lackner M. A., Rogers A. L., Manwell J. F.* Uncertainty analysis in MCP-based wind resource assessment and energy production estimation // *Journal of Solar Energy Engineering*. 2008. Vol. 130, iss. 3. 031006. doi:10.1115/1.2931499

Об авторах:

Евстигнеев Владислав Павлович, старший научный сотрудник, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33); начальник отдела Севастопольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, 61), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3064-2613**, **ResearcherID: G-1894-2014**, **Scopus Author ID: 12544785600**, *vald_e@rambler.ru*

Лемешко Наталья Александровна, доцент, Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5120-8552**, **ResearcherID: L-5688-2015**, **Scopus Author ID: 6701651926**, *n.lemeshko@spbu.ru*

Наумова Валентина Анатольевна, начальник Севастопольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, 61); ведущий научный сотрудник, Институт природно-технических систем (299011, Россия, Севастополь, ул. Ленина, д. 28), кандидат географических наук, **SPIN-код: 8739-5204**, **Scopus Author ID: 55901058400**, *naumova51@mail.ru*

Евстигнеев Максим Павлович, проректор, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-1964-803X**, **ResearcherID: A-5189-2014**, **Scopus Author ID: 6701789254**, *max_evstigneev@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Евстигнеев Владислав Павлович – концепция расчетов и разработка вычислительного алгоритма, качественный анализ результатов и их интерпретация, написание статьи

Лемешко Наталья Александровна – качественный анализ результатов и их интерпретация с точки зрения ветроэнергетики, написание статьи

Наумова Валентина Анатольевна – контроль качества рядов данных наблюдений за характеристиками ветра и проверка на их однородность, участие в обсуждении статьи

Евстигнеев Максим Павлович – соавтор концепции расчетов, качественный анализ результатов и их интерпретация

REFERENCES

1. Onea, F. and Rusu, E., 2014. Wind Energy Assessments along the Black Sea Basin. *Meteorological Applications*, 21(2), pp. 316–329. doi:10.1002/met.1337
2. Volkov, Y.A., Polnikov, V.G. and Pogarskii, F.A., 2007. On the wind profile near a wavy surface. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 43(2), pp. 250–258. doi:10.1134/S0001433807020120
3. Akpınar, A. and Kömürçü, M.I., 2012. Wave Energy Potential along the South-East Coasts of the Black Sea. *Energy*, 42(1), pp. 289–302. doi:10.1016/j.energy.2012.03.057
4. Breslow, P.B. and Sailor, D.J., 2002. Vulnerability of Wind Power Resources to Climate Change in the Continental United States. *Renewable Energy*, 27(4), pp. 585–598. doi:10.1016/S0960-1481(01)00110-0
5. Semenov, S.M., Insarov, G.E. and Méndez, C.L., 2019. Characterization of Uncertainties in Assessments of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Fundamental and Applied Climatology*, (1), pp. 76–96. doi:10.21513/2410-8758-2019-1-76-96 (in Russian).

6. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. [et al.], eds., 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1535 p. doi:10.1017/CBO9781107415324
7. Wang, X.L., Chen, H., Wu, Y., Feng, Y. and Pu, Q., 2010. New Techniques for Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(12), pp. 2416–2436. doi:10.1175/2010JAMC2376.1
8. Evstigneev, V.P., 2014. Wind speeds and wave heights of rare recurrence in Azov-Black Sea region of Ukraine. *Geoinformatika*, 2(50), pp. 56–64 (in Russian).
9. Jones, R.H., 1975. Estimating the Variance of Time Averages. *Journal of Applied Meteorology*, 14(2), pp. 159–163. Available at: <https://www.jstor.org/stable/26176648> [Accessed: 13.11.2020].
10. Johnson, N.L., Kotz, S. and Balakrishnan, N., 1995. *Continuous Univariate Distributions. Vol. 2*. New York: Wiley-Interscience, 752 p.
11. Minin, V.A., 2018. Distribution under Duration of Working Periods and Idle Periods of Wind Turbines in the Northern Coast of the Kola Peninsula. *Proceedings of the Kola Science Centre RAS*, 9(8), pp. 48–55. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.48-55 (in Russian).
12. Evstigneev, V.P., Naumova, V.A., Voskresenskaya, E.N., Evstigneev, M.P. and Ljubarec, E.P., 2017. *Wind Wave Conditions in the Coastal Zone of the Azov-Black Sea Region*. Sevastopol: IPTS, 320 p. doi:10.33075/978-5-6040795-0-8 (in Russian).
13. Gruza, G.V. and Rankova, E.Ya., 2012. Observed and Expected Climate Changes over Russia: Surface Air Temperature. Obninsk: VNIIGMI-MTsD, 194 p. (in Russian).
14. Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), pp. 1379–1389. doi:10.1080/01621459.1968.10480934
15. Baranova, A.A., Golod, M.P. and Meshcherskaya, A.V., 2007. The Change of Graduated Wind Velocities over the Territory of Russia in the Second Half of the XX Century. In: MGO, 2007. *Proceedings of A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory*. Saint Petersburg, MGO. Issue 556, pp. 116–138 (in Russian).
16. Meshcherskaya, A.V., Eremin, V.V., Baranova, A.A. and Maistrova, V.V., 2006. [Variation of Wind Velocity in the North of Russia in the Second Half of XX Century on Ground and Aerological Data]. *Meteorologija i Gidrologija*, (9), pp. 46–58 (in Russian).
17. Luts, N.V., 2001. Long-Term Velocity Variability in the Eastern Azov Area. *Meteorologija i Gidrologija*, (2), pp. 98–102 (in Russian).
18. Repetin, L.N. and Belokopytov, V.N., 2008. Wind Regime of the North-Western Part of the Black Sea and its Climatic Changes. In: MHI, 2008. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shelfa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Issue 17, pp. 225–243 (in Russian).
19. Bardin, M.Y., Rankova, E.Y., Platov, T.V., Samokhin, O.F., Egorov, V.I., Nikolaeva, A.M., Gromov, S.A., Alekseev, G.V., Radionov, V.F. [et al.], 2019. [Report on the Peculiarities of the Climate in the Russian Federation for 2018]. Moscow: Rosgydromet, 79 p. (in Russian).

20. Solaun, K. and Cerdá, E., 2019. Climate Change Impacts on Renewable Energy Generation. A Review of Quantitative Projections. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 116, 109415. doi:10.1016/j.rser.2019.109415
21. Lackner, M.A., Rogers, A.L. and Manwell, J.F., 2008. Uncertainty Analysis in MCP-based Wind Resource Assessment and Energy Production Estimation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 130(3), 031006. doi:10.1115/1.2931499

About the authors:

Vladislav P. Evstigneev, Senior Research Associate, Sevastopol State University (33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation); Head of department of the Sevastopol Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (61 Sovetskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0003-3064-2613**, **ResearcherID: G-1894-2014**, **Scopus: 12544785600**, vald_e@rambler.ru

Natalya A. Lemeshko, Assistant Professor, Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University (7 Universitetskaya Emb., Saint-Petersburg, 199034, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-5120-8552**, **ResearcherID: L-5688-2015**, **Scopus: 6701651926**, n.lemeshko@spbu.ru

Valentina A. Naumova, Head of the Sevastopol Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (61 Sovetskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation); Leading Research Associate, Institute of Natural and Technical Systems (28 Lenina St. Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **SPIN: 8739-5204**, **Scopus: 55901058400**, naumova51@mail.ru

Maxim P. Evstigneev, Vice-Rector, Sevastopol State University (33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, **ORCID ID: 0000-0002-1964-803X**, **ResearcherID: A-5189-2014**, **Scopus: 6701789254**, max_evstigneev@mail.ru

Contribution of the authors:

Vladislav P. Evstigneev – calculation concept and development of a computational algorithm, qualitative analysis of the results and interpretation thereof, article text preparation

Natalya A. Lemeshko – qualitative analysis of the results and its interpretation from wind energetics viewpoint, article text preparation

Valentina A. Naumova – wind data quality control and inhomogeneities testing, participation in discussion of the article

Maxim P. Evstigneev – co-author of calculation concept, qualitative analysis of the results and interpretation thereof

All the authors have read and approved the final manuscript.