

Оригинальная статья / Original article
УДК 004.94, 620.91
DOI: 10.18470/1992-1098-2020-4-152-160

Исследование сезонных изменений частотных характеристик скорости и направления ветра в Приморском Дагестане

Дмитрий Н. Кобзаренко¹, Айшат М. Камилова¹, Булат Д. Паштаев²

¹Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ФГБУН Объединенного института высоких температур РАН, Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джамбулатова, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Дмитрий Н. Кобзаренко, доктор технических наук, лаборатория комплексного освоения возобновляемых источников энергии, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Объединенного института высоких температур РАН; 367030 Россия, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 39а.

Тел. +79882649074

Email kobzarenko_dm@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0963-7935>

Формат цитирования

Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Паштаев Б.Д. Исследование сезонных изменений частотных характеристик скорости и направления ветра в Приморском Дагестане // Юг России: экология, развитие. 2020. Т.15, N 4. С. 152-160. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-4-152-160

Получена 18 мая 2020 г.

Прошла рецензирование 9 июля 2020 г.

Принята 25 августа 2020 г.

Резюме

Цель. Выполнить анализ сезонных изменений частотных характеристик скорости и направления ветра на территории Приморского Дагестана (рассматриваются районы городских округов Махачкалы и Дербента) с точки зрения ветроэнергетического потенциала.

Материал и методы. Исследование проводится на основе временных рядов – скоростей и направлений ветра за временной период 2011-2018 гг., полученных в результате наблюдений на метеорологических станциях «Махачкала» и «Дербент». В качестве математического инструмента исследования используется непрерывное вейвлет-преобразование с комплексной вейвлет-функцией Морле.

Результаты. Установлено, что основной периодичностью колебания во временных рядах является периодичность в одни сутки и наличие периодичности в одни сутки во временном ряде имеет ярко выраженные сезонные изменения. Также установлены и описаны различия в сезонных изменениях периодичности в одни сутки для скорости и направления ветра между территориями городов Махачкалы и Дербента.

Заключение. Рассмотренные параметры оценки сезонных изменений динамики скорости и направления ветра могут применяться как дополнительные параметры для классификации и кластеризации регионов для выявления лучших территорий ветроэнергетического потенциала.

Ключевые слова

Частотно-временной анализ, скорость ветра, направление ветра, энергия ветра, непрерывное вейвлет-преобразование.

Estimation of seasonal changes in the frequency characteristics of wind speed and direction in coastal Dagestan, Russia

Dmitry N. Kobzarenko¹, Ayshat M. Kamilova¹ and Bulat D. Pashtaev²

¹Institute of Geothermal and Renewable Energy Research, Branch of Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

²M.M. Dzhambulatov Dagestan State Agrarian University, Makhachkala, Russia

Principal contact

Dmitry N. Kobzarenko, Doctor of Technical Science, Laboratory for Integrated Development of Renewable Energy Sources, Institute of Geothermal and Renewable Energy Research, Branch of Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences; 39A Imama Shamil'ya Prospekt, Makhachkala, Russia 367030.
Tel. +79882649074

Email kobzarenko_dm@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0963-7935>

How to cite this article

Kobzarenko D.N., Kamilova A.M., Pashtaev B.D. Estimation of seasonal changes in the frequency characteristics of wind speed and direction in coastal Dagestan, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2020, vol. 15, no. 4, pp. 152-160. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2020-4-152-160

Received 18 May 2020

Revised 9 July 2020

Accepted 25 August 2020

Abstract

Aim. To analyse seasonal changes in the frequency characteristics of wind speed and direction in coastal Dagestan, namely the urban districts of the cities of Makhachkala and Derbent, from the point of view of wind power potential.

Material and Methods. The research was based on time series of wind speed and direction for the period 2011-2018, obtained as a result of observations at the Makhachkala and Derbent weather stations. As a mathematical research tool, a continuous wavelet transform with a complex Morlet wavelet function was used.

Results. According to the results of analysis, it was found that the main frequency of fluctuations in the time series is one day and one-day periodicity in the time series has pronounced seasonal changes. Also, differences in seasonal changes of one-day periodicity for wind speed and direction between the regions of Makhachkala and Derbent were established and described.

Conclusion. The parameters considered in assessing seasonal changes in the dynamics of wind speed and direction can be used as additional parameters for the classification and clustering of regions to identify the best areas of wind power potential.

Key Words

Time-frequency analysis, wind speed, wind direction, wind power, continuous wavelet transform.

ВВЕДЕНИЕ

Основным параметром для оценки потенциала энергии ветра является скорость и ее среднемесячные/среднегодовые значения. Для выполнения общего прогноза ресурсного потенциала энергии ветра на определенной территории обычно выполняется статистический анализ скорости ветра, как например, в работе [1]. Такой анализ может дать нам ответ на вопрос, насколько пригодна территория для использования энергии ветра и строительства ветряных электростанций.

Важным вопросом исследования ветроэнергетического потенциала является оценка распределения скорости ветра в открытом море, в частности на побережье [2]. Такое исследование помогает оптимизировать размещение ветряных установок на морском побережье. Для планирования размещения ветряных электростанций необходимо также создание интегрированного инструмента оценки ветровых ресурсов. Пример создания такого инструмента приведен в работе [3].

Много научных работ посвящено предиктивному моделированию скорости ветра различными методами. В последнее время часто для прогнозирования используется математический аппарат нейронной сети, как, например, в работе [4].

Наше исследование направлено на изучение динамики изменения скорости и направления ветра для выявления ее зависимости от времени года и от географического территориального расположения. В последнее время не встречались научные работы, связанные с оценкой такого параметра, как направление ветра. Однако этот параметр также очень важен для ветроэнергетики, и он влияет на выбор типа ветрогенератора. Согласно [5] существует два основных типа ветрогенераторов: с вертикальной и горизонтальной осью вращения. У горизонтального ветрогенератора производительность в момент разворота связанного со сменой направления ветра затухает, поэтому в районах с постоянно меняющимся направлением ветра рекомендуется использовать вертикальные ветрогенераторы, для которых направление ветра не играет роли, но их коэффициент полезного действия ниже, чем у горизонтальных. Таким образом, динамика изменения направления ветра влияет на выбор типа ветрогенерирующей установки.

Технической основой для выполнения исследования являются в разное время разработанные информационные технологии:

- программа для выполнения непрерывного вейвлет-преобразования вейвлетами Mexican Hat и Morlet [6], позволяющая сохранять массивы-результаты в двоичном формате;
- база данных ветромониторинга [7], дополненная возможностями построения розы ветров и расчета средних скоростей ветра;
- программа для расчета и построения гистограмм частотного распределения по результатам непрерывного вейвлет-преобразования функцией morlet [8].

Объектом исследования являются временные ряды – скорости и направления ветра в Приморском

Дагестане, взятые из наблюдений метеорологических станций «Махачкала» и «Дербент», расположенных в одноименных городах.

В качестве математического аппарата частотно-временного анализа используется непрерывное вейвлет-преобразование [9]. Существуют зарубежные научные работы, в которых вейвлет-преобразование используется в качестве инструмента предсказания поведения временного ряда – скорости ветра в будущем. Нами же этот инструмент используется для оценки динамики частотных характеристик временного ряда.

Основная цель исследования – проанализировать сезонные и пространственные зависимости частоты изменения скорости и направления ветра в Приморском Дагестане с точки зрения ветроэнергетического потенциала.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На сегодняшний момент имеется в наличии база данных ветромониторинга по наблюдениям нескольких метеостанций региона, которая охватывает временной период 2011-2018 гг. с частотой 8 измерений в сутки. Для выполнения текущих исследований по Приморскому Дагестану сформированы временные ряды для параметров скорость ветра и направление ветра на основе данных метеорологических станций «Махачкала» и «Дербент».

Вейвлет-преобразование общего временного ряда 2011-2018 гг. является достаточно трудоемким вычислительным процессом. Поэтому для удобства вычислений временной ряд разбивается на двухлетние интервалы: 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017 и 2017-2018. За единицу временного отсчета принят интервал 0,125 суток (что соответствует 8 измерениям в сутках). Таким образом, двухлетний интервал состоит из количества значений $(365 + 365) \cdot 8 = 5840$ или $(365 + 366) \cdot 8 = 5848$.

Непрерывное вейвлет-преобразование временного ряда выполняется по известной формуле (1):

$$W(a, t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-x}{a}\right) dt \quad (1)$$

где $W(a, t)$ – коэффициент вейвлет-преобразования; $f(t)$ – временной ряд; t – время; ψ – вейвлет-функция, a – значение периода (частоты); x – временной сдвиг вейвлет-функции.

Для анализа временного ряда используется вейвлет-функция Morlet, которая состоит из вещественной (2) и мнимой (3) частей. Вейвлет-преобразование временного ряда с помощью функции Morlet дает возможность оценить его колебательные свойства для различных временных периодов.

$$\psi(t)_{RE} = \cos(w_0 t) \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2)$$

$$\psi(t)_{IM} = \sin(w_0 t) \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (3)$$

где w_0 – частота модуляции, обычно принимаемая равной 6.

На основе соотношения (1) вейвлет-преобразование выполняется для вещественной части $W(a, t)_{RE}$ с использованием (2) и мнимой части $W(a, t)_{IM}$

с использованием (3), а затем рассчитывается значение модуля по формуле (4).

$$W(a, t) = \sqrt{W(a, t)_{RE}^2 + W(a, t)_{IM}^2} \quad (4)$$

В результате операций (1-4) генерируется матрица коэффициентов вейвлет-преобразования $W[a, t]$ с количеством строк a (периодичность) и количеством столбцов t (время). Визуализация матрицы $W[a, t]$ на примере модельного сигнала, описанная нами в работе [10] позволяет наглядно увидеть динамику изменения его частот во времени.

Относительно данных ветромониторинга вейвлет-преобразование дает возможность проанализировать изменчивость частотных характеристик параметров ветра по месяцам, сезонам, полугодиям. В рамках текущего исследования выполнены расчеты (1-4), в которых периодичность a принимается в диапазоне от 1 до 51 суток с шагом 0,25 суток (6 часов). Имея в наличии сгенерированный набор матриц $W[a, t]$ можно строить

и анализировать гистограммы распределения периодичностей a в различные периоды времени. Наличие периодичности a в период времени t определяется из условия:

$$W[a - 1, t] \leq W[a, t] \leq W[a + 1, t].$$

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим основные результаты, полученные с помощью частотно-временного анализа. Заранее отметим, что расчеты выполнены на основе набора данных временного периода 2011-2018 гг., поскольку задачей текущего исследования является изучение общих частотных закономерностей временных рядов.

На рис. 1 представлены гистограммы распределения периодичностей в диапазоне 0,5-7,25 суток: один график соответствует данным скорости ветра, другой – данным направления ветра.

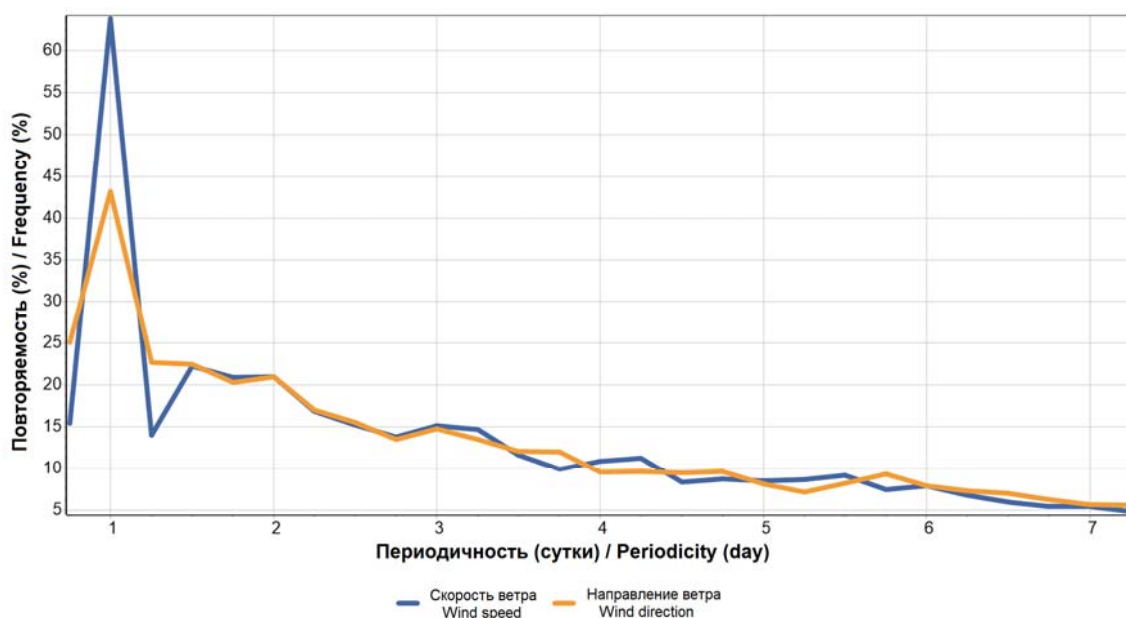


Рисунок 1. Гистограммы распределения периодичностей во временных рядах по скорости и по направлению ветра на основе данных двух метеостанций

Figure 1. Histograms of periodicities distribution in time series of wind speed and direction from both weather stations

Для каждого графика (рис. 1) взяты данные обеих рассматриваемых метеостанций. На гистограмме можно наблюдать факт того, что основной периодичностью во временных рядах является периодичность в одни сутки и эта периодичность стоит подробного рассмотрения. Для скорости ветра она составляет около 67%, а для направления ветра – около 43%. Таким образом, можно сделать вывод о том, что суточное изменение скорости ветра для Приморского Дагестана в среднем происходит в 1,5 раза динамичнее, чем изменение направления ветра.

Поскольку периодичность в одни сутки является определяющей в рассматриваемых временных рядах, то далее все внимание уделим ее оценке.

Рассмотрим гистограммы, на которых сравним графики получение отдельно по данным метеорологических станций «Дербент» и «Махачкала». Гистограммы изображены на рис. 2-3. На основе их сопоставления делаем вывод о том, что для скорости ветра (рис. 2) повторяемость периодичности в одни сутки в среднем выше для данных метеорологической станции «Дербент», а для направления ветра (рис. 3) эта же повторяемость в среднем выше для данных метеорологической станции «Махачкала». В результате можно предположить, что с точки зрения динамики скорости ветра для ветроэнергетики предпочтительней является район Махачкалы, а с точки зрения динамики направления ветра в более выигрышной ситуации находится район Дербента.

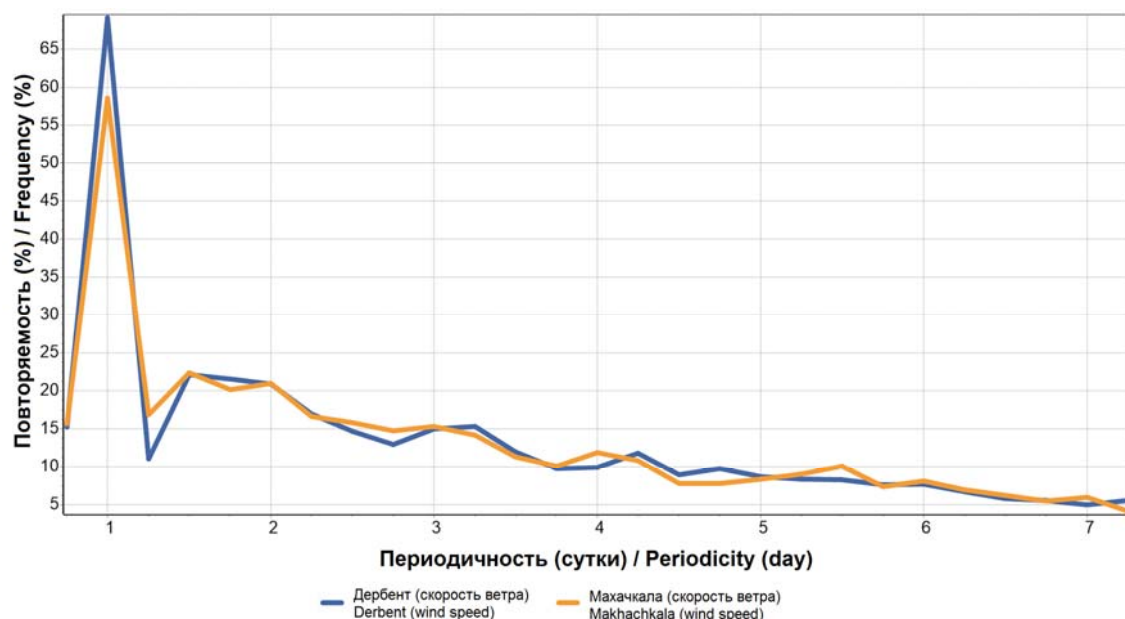


Рисунок 2. Гистограммы распределения периодичностей во временных рядах по скорости ветра
Figure 2. Histograms of the periodicities distribution in time series of wind speed

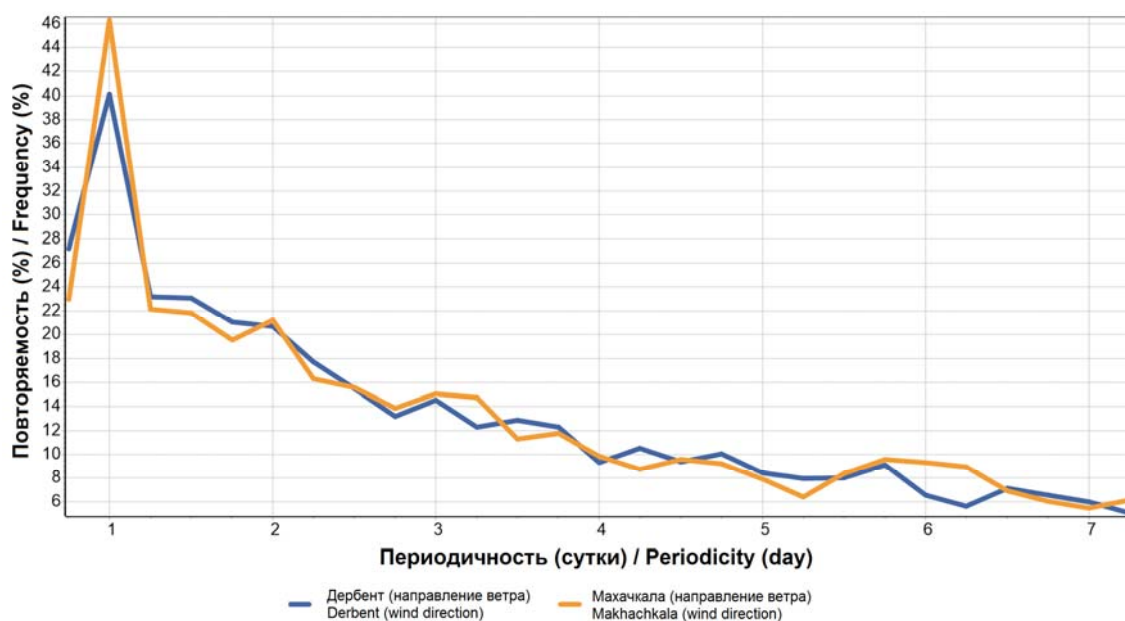


Рисунок 3. Гистограммы распределения периодичностей во временных рядах по направлению ветра
Figure 3. Histograms of periodicities distribution in time series of wind direction

Теперь объединим набор данных обеих метеорологических станций и разделим его по временам года (рис. 4-5). Полученные таким способом результаты показывают, что повторяемость периодичности в один день и для скорости ветра, и для направления ветра существенно зависят от времени года и меняются от зимнего периода к летнему.

Между зимними и летними значениями повторяемости периодичности в один сутки (рис. 4-5) наблюдается двукратная разница, а примерно в середине интервала между зимними и летними пиковыми значениями располагаются пиковые значения осени и весны.

Рассмотрим подробнее сезонные изменения повторяемости периодичности в один сутки. Для этого зафиксируем соответствующие значения по месяцам, и все результаты сведем в единую диаграмму, которая показана на рис. 6. Здесь мы можем наблюдать то, что все графики подвержены сезонному изменению по месяцам и в общем случае образуют годовой период колебательного процесса. Диаграмма показывает, что для данных метеорологической станции «Махачкала» разность между графиками скорости и направления ветра меньше, чем для данных метеорологической станции «Дербент».

Если мы посмотрим на графики сезонных изменений повторяемости скорости ветра более 4 м/с (рис. 7), то на обоих графиках прослеживается четкая волнообразная зависимость: ранней весной повторяемость увеличивается, затем к лету происходит падение и затем плавный подъем к декабрю месяцу. Таким образом, сезонные изменения характерны и для повторяемости

скорости ветра в рассматриваемом регионе. Если сопоставить диаграммы на рис. 6 (по скорости ветра) и на рис. 7, то можно увидеть, что сравнительно большие значения периодичности в одни сутки для данных метеостанции «Дербент» приводят к сравнительно меньшим значениям повторяемости скорости ветра больше 4 м/с.

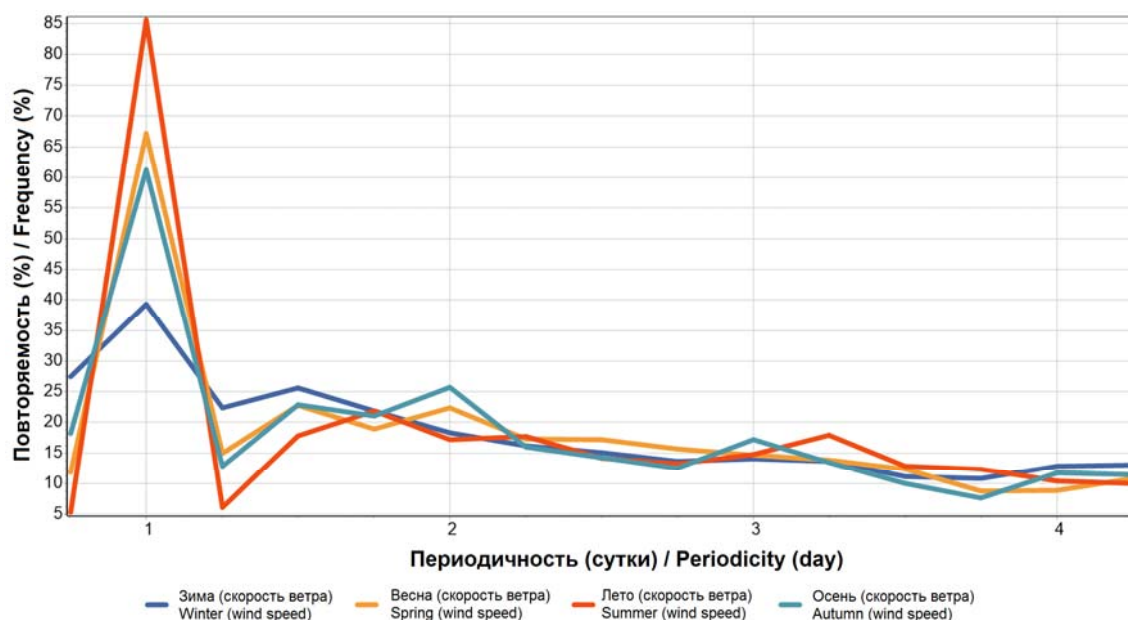


Рисунок 4. Гистограммы распределения периодичностей во временных рядах по скорости ветра на основе данных двух метеостанций по временам года

Figure 4. Histograms of periodicities distribution in time series of wind speed from both weather stations by season

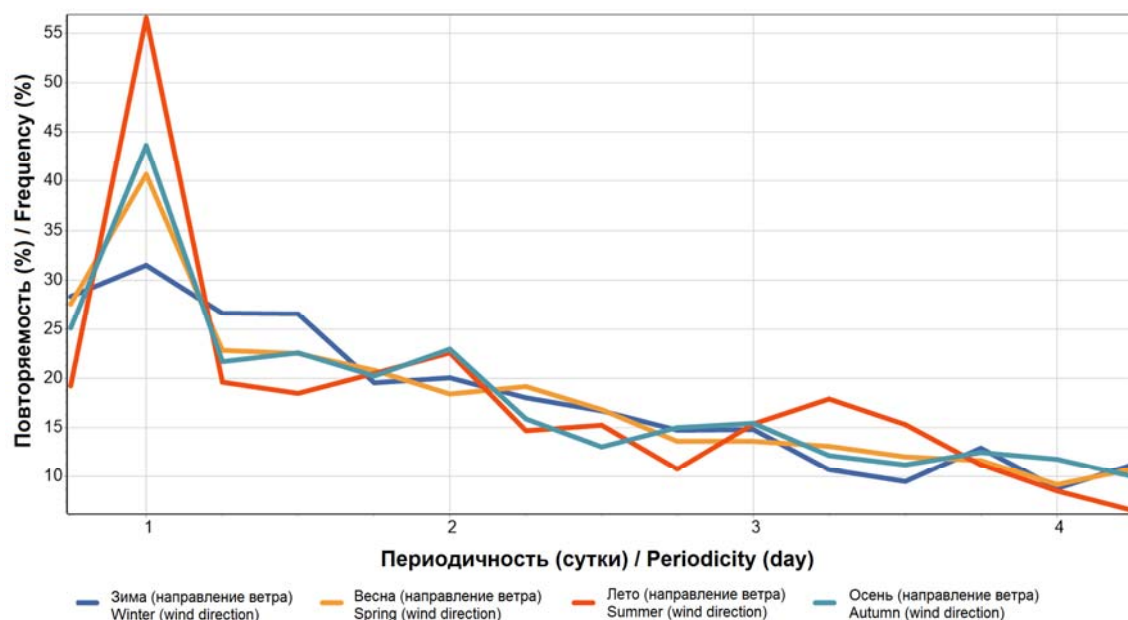


Рисунок 5. Гистограммы распределения периодичностей во временных рядах по направлению ветра на основе данных двух метеостанций по временам года

Figure 5. Histograms of periodicities distribution in time series of wind direction from both weather stations by season

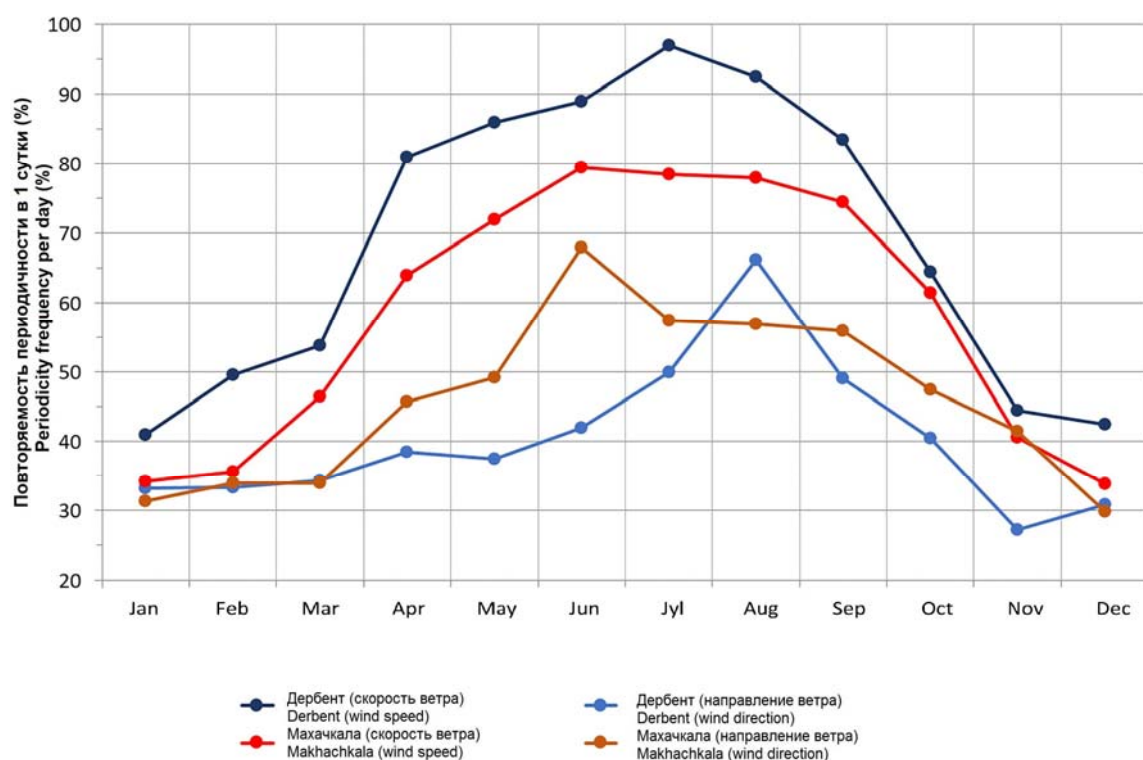


Рисунок 6. Сезонные изменения повторяемости периодичности в одни сутки по месяцам

Figure 6. Seasonal changes in the availability of one-day periodicity

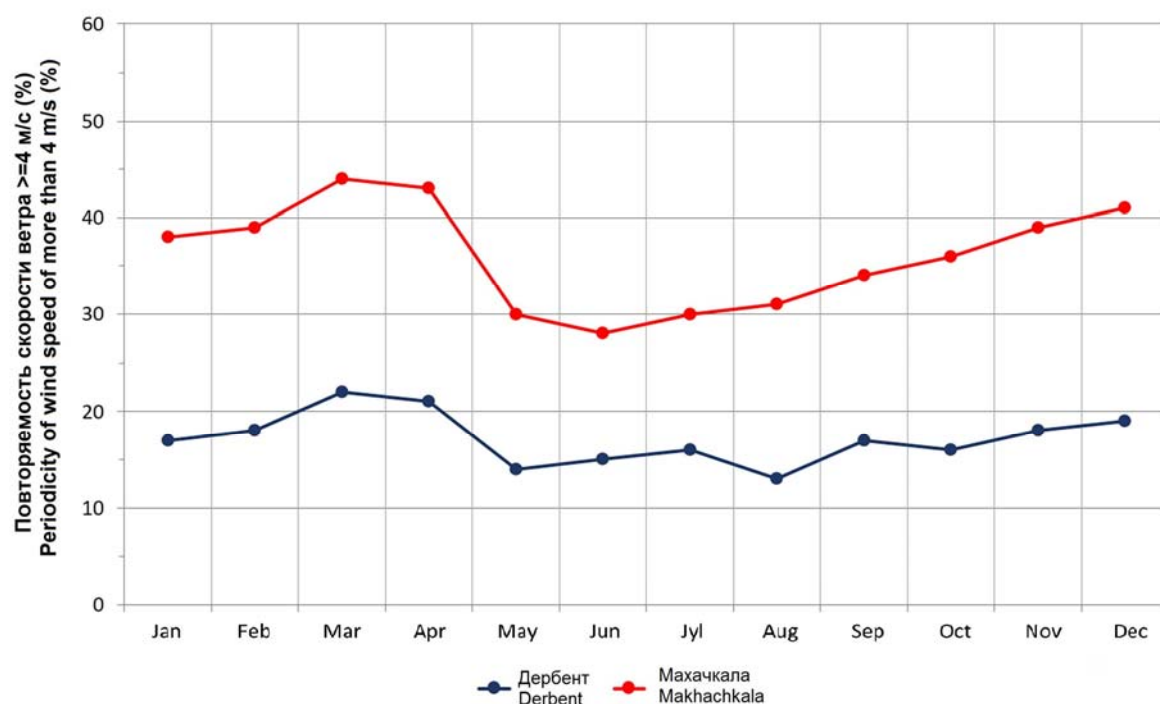


Рисунок 7. Сезонные изменения повторяемости скорости ветра более 4 м/с по месяцам

Figure 7. Seasonal changes of periodicity of wind speed of more than 4 m/s

Относительно повторяемости скорости ветра (рис. 7) следует отметить факт того, что метеорологические станции «Махачкала» и «Дербент» находятся в город-

ской черте. Поэтому реальные значения скоростей ветра на морском побережье будут выше и более пригодными для ветроэнергетики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено исследование по оценке сезонных изменений частотных характеристик временных рядов по скорости и направлению ветра в Приморском Дагестане на основе данных метеорологических станций «Махачкала» и «Дербент», полученных с 2011 по 2018 гг.

Основные выводы сводятся к следующим:

1) Установлено, что основной периодичностью колебания во временных рядах является периодичность в одни сутки.

2) Установлено, что наличие периодичности в одни сутки во временном ряде имеет ярко выраженные сезонные изменения. Этот параметр возрастает к лету и убывает к зиме.

3) Установлены различия в сезонных изменениях периодичности в одни сутки для скорости и направления ветра между рассматриваемыми территориями. В районе города Махачкалы наблюдается более благоприятная картина для ветроэнергетики с точки зрения динамики и повторяемости скорости ветра по сравнению с районом города Дербент. Однако в районе города Дербент в среднем наблюдается меньшая интенсивность изменения направления ветра, что играет свою положительную роль для КПД горизонтального ветрогенератора.

Рассмотренные параметры оценки сезонных изменений динамики скорости и направления ветра могут применяться как дополнительные параметры для классификации и кластеризации регионов для выявления лучших территорий ветроэнергетического потенциала. Поэтому данное исследование планируется продолжать для других территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Olaofe Z.O., Folly K.A. Statistical Analysis of the Wind Resources at Darling for Energy Production // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2012. V. 2. N 2. P. 250-261.
2. Olaofe Z.O. Assessment of the Offshore Wind Speed Distributions at Selected Stations in the South-West Coast, Nigeria // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2017. V. 7. N 2. P. 566-577.
3. Gualtieri G. An Integrated Wind Resource Assessment Tool for Wind Farm Planning: System's Upgrades and Applications // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016. V. 6. N 4. P. 1464-1475.
4. Paramasivan S.K., Lopez D. Forecasting of Wind Speed Using Feature Selection and Neural Networks // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016. V. 6. N 3. P. 833-837.
5. Белгородский институт альтернативной энергетики / энергия ветра. URL: <http://altenergo-nii.ru/renewable/wind/> (дата обращения: 30.04.2020)
6. Гаджиев А.А., Гаджиев Р.А., Кобзаренко Д.Н. Вейвлет-анализ колебаний уровня Каспийского моря и влияния на сейсмический режим Дагестанского клина // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2000. N 3. С. 230-236.
7. Кобзаренко Д.Н. К созданию средств автоматизации выборки данных ветромониторинга с сервера «Погода России» // *Программная инженерия*. 2014. N 2. С. 27-32.

8. Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Шихсаидов Б.И. Средства автоматизации процесса построения гистограмм частотного распределения по результатам непрерывного вейвлет-преобразования с помощью функции morlet // *Программная инженерия*. 2019. Т. 10. N 6. С. 281-288. DOI: 10.17587/prin.10.281-288
9. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. 1996. N 11(166). С. 1145-1170. DOI: 10.3367/UFNr.0166.199611a.1145
10. Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Газанова Н.Ш., Дадашев А.М. Применение непрерывного вейвлет-преобразования в изучении временных рядов ветромониторинга на примере Дагестана // *Информационные технологии*. 2018. Т. 24. N 3. С. 201-208.

REFERENCES

1. Olaofe Z.O., Folly K.A. Statistical Analysis of the Wind Resources at Darling for Energy Production. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2012, vol. 2, no. 2, pp. 250-261.
2. Olaofe Z.O. Assessment of the Offshore Wind Speed Distributions at Selected Stations in the South-West Coast, Nigeria. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2017, vol. 7, no. 2, pp. 566-577.
3. Gualtieri G. An Integrated Wind Resource Assessment Tool for Wind Farm Planning: System's Upgrades and Applications. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016, vol. 6, no. 4, pp. 1464-1475.
4. Paramasivan S.K., Lopez D. Forecasting of Wind Speed Using Feature Selection and Neural Networks. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016, vol. 6, no. 3, pp. 833-837.
5. *Belgorodskii institut al'ternativnoi energetiki / energiya vetra* [Belgorod Institute of Alternative Energy / Wind Power]. Available at: <http://altenergo-nii.ru/renewable/wind/> (accessed 30.04.2020)
6. Gadgiev A.A., Gadgiev R.A., Kobzarenko D.N. Wavelet Analysis of Fluctuations in the Level of the Caspian Sea and the Impact on the Seismic Regime of the Dagestan Wedge. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences]. 2000, no. 3, pp. 230-236. (In Russian)
7. Kobzarenko D.N. Automation for Sample Data of Wind Monitoring from the "Russia's Weather" Server. *Programnaya inzheneriya* [Software Engineering]. 2014, no. 2, pp. 27-32. (In Russian)
8. Kobzarenko D.N., Kamilova A.M., Shikhsaidov B.I. Automatic Tools for Construction Process of Frequency Distribution Histograms on the Results of Continuous Wavelet Transform by Morlet Function. *Software Engineering*, 2019, vol. 10, no. 6, pp. 281-288. (In Russian) DOI: 10.17587/prin.10.281-288
9. Astaf'eva N.M. Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Phys. Usp.*, 1996, no. 11(166), pp. 1145-1170. (In Russian) DOI: 10.3367/UFNr.0166.199611a.1145
10. Kobzarenko D.N., Kamilova A.M., Gazanova N.Sh., Dadashov A.M. Application of Continuous Wavelet-Transformation in the Study of Time Series of Wind Monitoring on the Example of Dagestan. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2018, vol. 24, no. 3, pp. 201-208. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Айшат М. Камилова выполнила сбор и обработку данных с помощью программного обеспечения. Булат Д. Паштаев консультировал в области применения математического аппарата вейвлет-преобразования для анализа временных рядов. Дмитрий Н. Кобзаренко разработал концепцию исследования, проанализировал его результаты, написал рукопись. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ayshat M. Kamilova collected and processed data using software. Bulat D. Pashtaev advised on the application of mathematical calculation of wavelet transform for time series analysis. Dmitry N. Kobzarenko developed the research concept, analysed the results and wrote the manuscript. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism or other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Дмитрий Н. Кобзаренко / Dmitry N. Kobzarenko <https://orcid.org/0000-0002-0963-7935>

Айшат М. Камилова / Ayshat M. Kamilova <https://orcid.org/0000-0002-6779-4744>

Булат Д. Паштаев / Bulat D. Pashtaev <https://orcid.org/0000-0001-6005-7429>