

<http://doi.org/10.17721/1728-2721.2018.70.12>
УДК: 551.553, 551.581.1

В. Хохлов, д-р геогр. наук, проф.,
Ю. Ель Хадрі, асп.

Одеський державний екологічний університет, Одеса

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ПОКАЗНИКІВ ШВИДКОСТІ ВІТРУ І ДОБОВОГО МАКСИМУМУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ НА ТЕРИТОРІЇ МАРОККО У 2020–2050 РР.

Проаналізовано результати розрахунків середньорічної й середньомісячної швидкості вітру та добового максимуму його швидкості за 11 регіональними кліматичними моделями проекту CORDEX-Africa на період 2020–2050 рр. у Марокко. Визначено можливі кількісні показники середньої швидкості вітру, добового максимуму його швидкості та їх просторово-часового розподілу в період 2020–2050 рр. у Марокко. Установлено, що в майбутньому на більшій частині території Марокко переважатимуть слабкі й помірні вітри та спостерігатиметься два типи річного ходу швидкості вітру. Найсприятливішими для розвитку вітроенергетики будуть ділянки, розташовані на березі Середземного моря та Атлантичного океану, а також південна частина Марокко.

Ключові слова: швидкість вітру, добовий максимум швидкості вітру, піковий фактор пориву вітру, регіональні кліматичні моделі, Марокко, CORDEX-Africa.

Вступ. Нині людство усвідомило, що єдиним реалістичним засобом для досягнення сталого розвитку й уникнення катастрофічних змін клімату є швидкий і глобальний перехід до відновлюваних енергетичних технологій. За результатами конференції зі змін клімату в Парижі у 2015 р. був розроблений глобальний план, метою якого є подвоєння частки відновлюваних енергетичних джерел у загальносвітовому виробництві енергії до 2030 р. [13]. Утілення в життя цього плану має важливе значення для досягнення "carbonfree" (енергія, виробництво якої не супроводжується викидами двоокису вуглецю) – енергетичної системи – протягом найближчих 50 років, а також зменшення викликів глобальній енергетичній безпеці й ризиків для навколишнього середовища і здоров'я людини. Використання вітрової енергії є одним з найперспективніших напрямів у розвитку відновлюваних джерел енергії.

У 2009 р. уряд Марокко розробив національну енергетичну стратегію, одним із пріоритетних напрямів якої є збільшення частки поновлюваних технологій в енергетиці країни. Марокко володіє багатими вітровими ресурсами. Розрахунки, зроблені організаціями, які беруть участь у розвитку вітроенергетики в Марокко, дають обґрунтування тому, що технічний потенціал вітрової енергії в Марокко становитиме 26 ГВт [12]. На поточний момент існує кілька сценаріїв розвитку відновлюваних джерел енергії в Марокко, які не збігаються лише в кількісних оцінках; усі вони мають на меті нарощування вироблення екологічно чистої вітрової енергії – від повного забезпечення всіх потреб марокканських споживачів до можливості експорту її частини до Європи.

Метою пропонованого дослідження є визначення можливих кількісних показників середньорічної та середньомісячної швидкості вітру, добового максимуму швидкості вітру та їх просторово-часового розподілу в період 2020–2050 рр. на території Марокко.

Фізико-географічна характеристика. Марокко знаходиться на північному сході Африки, на широті від 20 до 35° пн. ш. Площа території становить 446550 км². На півночі Марокко омивається водами Середземного моря, а на заході – Атлантичного океану. Марокко відокремлюється від Європи Гібралтарською протокою. Східні кордони проходять усередині континенту.

Територію країни можна поділити на чотири фізико-географічні регіони: Ер-Риф (гірський район) розташований паралельно Середземноморському узбережжю, його висота не перевищує 1500 м; Атлаські гори, які пролягають із південного заходу на північний схід і розділені на три основні хребти: Антиатлас (2360 м), Високий Атлас, вершини якого перевищують 3700 м, і СЕРЕ-

дній Атлас, північна частина якого – це плато, розташоване на висоті близько 1800 м; регіон прибережних рівнин, що лежать на Атлантичному узбережжі; долини, розташовані на південь від Атлаських гір, що переходять у пустелю.

Гірський хребет Атлас проходить через центр країни, утворюючи розділову лінію між двома основними кліматичними зонами, середземноморським північним прибережним регіоном і південним, внутрішнім, районом, який лежить на краю пустелі Сахара.

Методи і матеріали дослідження. До кліматичних характеристик, за якими оцінюють вітроенергетичний потенціал, належать [5]: середня швидкість вітру (за рік і по місяцях); амплітуда добового ходу швидкості вітру за сезонами року; розподіл (повторюваність) швидкості вітру за градаціями; вертикальний профіль середньої швидкості вітру; густина повітря; інтенсивність турбулентності вітрового потоку та ін. У першому наближенні вітроенергетичний потенціал можна оцінити за величиною середньорічної швидкості вітру, яка має становити ≥ 5 м/с на висоті 10 м над поверхнею землі [3].

Величина максимальної швидкості вітру належить до екстремальних кліматичних показників, які дозволяють точно оцінити можливі ризики, пов'язані з погодними катаклізмами.

У дослідженні використано дані регіонального кліматичного моделювання з високим просторовим дозволом, отримані з проекту CORDEX-Africa [11]. Кліматичні дані CORDEX-Africa одержані з аналізу даних спостережень (1988–2010 рр.) або глобальних кліматичних моделей (1950–2100 рр.). Масштабування виконується з використанням кількох регіональних моделей клімату і методів статистичного зменшення масштабу.

Результати розрахунків регіональних кліматичних моделей (РКМ) дозволяють глибше розуміти атмосферні процеси в досліджуваному регіоні та їх можливі зміни в майбутньому. Найвищу успішність відтворення середніх кліматичних характеристик при порівнянні з даними спостережень зазвичай показує результат осереднення за ансамблем моделей. Це пов'язано з тим, що систематичні помилки, властиві кожній моделі окремо, часто є випадковими щодо ансамблю моделей і при осередненні за ансамблем взаємно компенсуються [6].

У роботі використовувались результати моделювання РКМ за сценарієм RCP 4.5 для регіону Африка, які подані в прямокутній системі координат із просторовим дозволом ≈ 44 км. Для аналізу використовувалася ансамбль з 11 кліматичних моделей, розроблених у дослідних інститутах і метеорологічних центрах різних країн світу (табл. 1).

Таблиця 1. Характеристики регіональних кліматичних моделей

№ моделі	Назва моделі	Модель загальної циркуляції атмосфери	Інститут-розробник
M1	KNMI-ICHEC-EC-EARTH	IFS	CNRM, Франція
M2	CanESM2	CanCM4	CCCMA, Канада
M3	CNRM-CM5	ARPEGE	CNRM / CERFACS, Франція
M4	SMHI-ICHEC-EC-EARTH	IFS	CNRM, Франція
M5	CSIRO Mark 3.6	Mk3 AGCM	CSIRO, Австралія
M6	IPSL-CM5A-MR	LMDZ	IPSL, Франція
M7	MIROC5	AGCM CCSR	AORI/NIES/JAME S&T, Японія
M8	HadGEM2-ES	HadGEM2-A	Hadley Center, Великобританія
M9	MPI-ESM-LR	ECHAM6	MPI, Німеччина
M10	NorESM1	CAM4-Oslo	NCC, Норвегія
M11	GFDL-ESM2M	AM3	GFDL, США

У результаті розрахунків за РКМ були отримані середні місячні значення швидкості вітру (Near-Surface Wind Speed) і добового максимуму швидкості вітру (Daily Maximum Near-Surface Wind Speed) на період 2020–2050 рр. для території Марокко.

У РКМ проекту CORDEX за добовий максимум швидкості вітру береться максимальне значення із чотирьох миттєвих швидкостей вітру, розрахованих для 00:00, 6:00, 12:00 і 18:00 UTC. Різні РКМ використовують різні підходи для розрахунку добового максимуму швидкості вітру. Наприклад, SMHI враховує турбулентну кінетичну енергію, середній вітер і статичну стійкість у граничному шарі; KNMI-RACMO2 обчислює швидкість пориву вітру, додаючи до швидкості вітру на висоті 10 м статичну стійкість у граничному шарі атмосфери; обчислення MPI-PEMO засновані на емпіричних припущеннях із врахуванням турбулентної кінетичної енергії в найнижчому шарі моделі [8].

Зв'язок добового максимуму швидкості вітру і середньодобової швидкості вітру можна встановити за допомогою пікового фактора пориву [9], який розраховується як співвідношення

$$G = u_g U^{-1} - 1, \quad (1)$$

де G – піковий фактор пориву, u_g – добовий максимальний порив вітру, U – середньодобова швидкість вітру; G – безрозмірна величина, яка набуває значень $0 \leq G < +\infty$ (при $u_g = U$, $G = 0$).

При осередненні за часом піковий фактор пориву (ФП) відображає кліматичну поривчастість вітру [10]. Дослідження показують, що ФП чутливий до метеорологічних умов, наприклад, його значення зазвичай зменшується при збільшенні середньої швидкості вітру. Шорсткість підстильної поверхні впливає на ФП. Над нерівними поверхнями він набуває більших значень. Типовий діапазон значень ФП – від 1,3 над відкритою поверхнею води до 2,3 у центрі великого міста. На ФП впливає стан стійкості атмосфери, його величина збільшується зі зменшенням стійкості атмосфери, хоча цей вплив не такий сильний, як зв'язок ФП із величиною середньої швидкості вітру [10].

Результати дослідження. *Середньорічна швидкість вітру.* Розрахунки за РКМ показали, що територія Марокко за величиною середньорічної швидкості вітру в період 2020–2050 рр. (рис. 1 а) може бути поділена на 4 вітроенергетичні зони: I зона – до 4 м/с; II – 4-5 м/с; III – 5-7 м/с; IV зона – 7 м/с та більше.

У першу зону входять центральні райони на території адміністративних областей Фес – Мекнес і Бені-Меллал – Хеніфра та долини на південному сході гір Атласу на кордоні з Алжиром, розташовані на ділянці Драа – Тафілалет.

Найбільша за площею друга зона включає гірські райони Ер-Рифу і Атлаських гір, частину прибережних рівнин на південь від Касабланки й ділянки біля кордону з Алжиром і Мавританією в адміністративних областях Гулімін – Уед-Нун, Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра, Дахла – Уед-ед-Дахаб.

До третьої зони належать ділянки Середземноморського узбережжя між Надором і Ель-Хосеймою, територія, що примикає до Гібралтарської протоки в адміністративній області Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма, ділянка узбережжя Атлантичного океану від Сафі до Агадира і частина території на південь від Агадира в адміністративних областях Гулімін – Уед-Нун, Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра, Дахла – Уед-ед-Дахаб.

Найперспективнішою з погляду вітроенергетики є четверта зона, яка займає ділянку Атлантичного узбережжя завширшки 25-40 км від Тарфайї до південного кордону з Мавританією.

Середньомісячна швидкість вітру. Річний хід середньої швидкості вітру має велике значення для оцінки вітроенергетичного потенціалу окремої місцевості, він надає важливу інформацію про ефективність використання вітроенергетичної установки з погляду узгодженості графіка надходження вітрової енергії з графіком енергетичного навантаження споживачів [14].

Аналіз середньомісячної швидкості вітру показав, що на території Марокко у 2020–2050 рр. її найменші значення можуть зазначатися в серпні – вересні в гірських районах Середнього Атласу, розташованих на території адміністративної області Фес – Мекнес, і становити близько 2,9 м/с. Найбільші її значення становитимуть близько 9,0 м/с у червні на узбережжі Атлантики на південь від селища Дахла.

Характер річного ходу середньої швидкості вітру буде неоднаковий у різних частинах Марокко. Як зазначено в [7], на початку XXI ст. на території Марокко швидкість вітру має два типи річного ходу. Перший тип характеризується зростанням швидкості вітру в літні місяці та зниженням із жовтня до лютого включно, для другого типу характерне збільшення швидкості вітру в лютому – квітні та зменшення в липні – жовтні.

Аналіз розрахунків за РКМ показав, що в майбутньому такий характер річного ходу загалом збережеться. У центральних гірських районах Атласу, північно-східній частині країни й на узбережжі Середземного моря прогнозується зимовий максимум швидкості вітру. На рівнинах Атлантичного узбережжя, у південній частині країни та в районах, розташованих за хребтами Атлаських гір на кордоні з Алжиром, РКМ передбачають сезонний максимум швидкості вітру влітку.

Зимовий максимум у річному ході швидкості вітру на півночі країни зумовлений зміщенням на південь взимку південної гілки полярного фронту і поширенням циклонічного характеру циркуляції атмосфери в субтропічну зону [1]. Причиною літнього максимуму швидкості вітру є збільшення баричних градієнтів на узбережжі Атлан-

тичного океану в результаті сезонних змін поля тиску. Протягом усього року на широтах 30–35° розташовується зона підвищеного тиску, особливо добре вона виражена над океанами. Над материками така зона зберігається тільки в зимовий час. Улітку внаслідок інтенсивного прогрівання над Африканським континентом розташовується велика барична депресія [2; 4].

Добовий максимум швидкості. Результати розрахунку ФП у різних фізико-географічних районах Марокко показали, що найбільші значення він матиме в першій і другій вітроенергетичних зонах у районі рівнин, що лежать на Атлантичному узбережжі, де його величина становитиме 0,67–0,57. У другій і третій вітроенергетичних зонах, куди належать гірські райони Середнього Атласу, Високого Атласу і Ер-Риф, берег Середземного моря, частина Атлантичного узбережжя між Ель-Джадідой та Агадіром і внутрішніми районами південної частини Марокко, розташованими біля кордону з Мавританією, величина ФП становитиме 0,43–0,49. Найменші значення (0,25–0,37) він матиме в пів-

денній частині Марокко в межах третьої й четвертої вітроенергетичних зон.

Аналіз добового максимуму швидкості вітру (рис. 1 б) показав, що його середнє значення у 2020–2050 рр. коливатиметься в межах від 5,1 до 10,4 м/с, а просторовий розподіл територією буде аналогічним розподілу середньої швидкості вітру. Його значення перевищуватимуть середню швидкість вітру на 2,0–3,0 м/с, ці відмінності визначаються вищеперахованими причинами, які впливають на формування величини ФП.

Аналіз річного ходу добового максимуму швидкості вітру показав, що надалі він буде ідентичним річному ходу середньої місячної швидкості вітру в різних частинах Марокко й так само поділятиметься на два типи.

Найменше середньомісячне значення добового максимуму швидкості вітру, за розрахунками РКМ, становитиме 4,6 м/с у грудні в області Драа – Тафілалет, найбільше буде становити близько 11,8 м/с у червні на узбережжі Атлантичного океану на південь від населеного пункту Дахла.

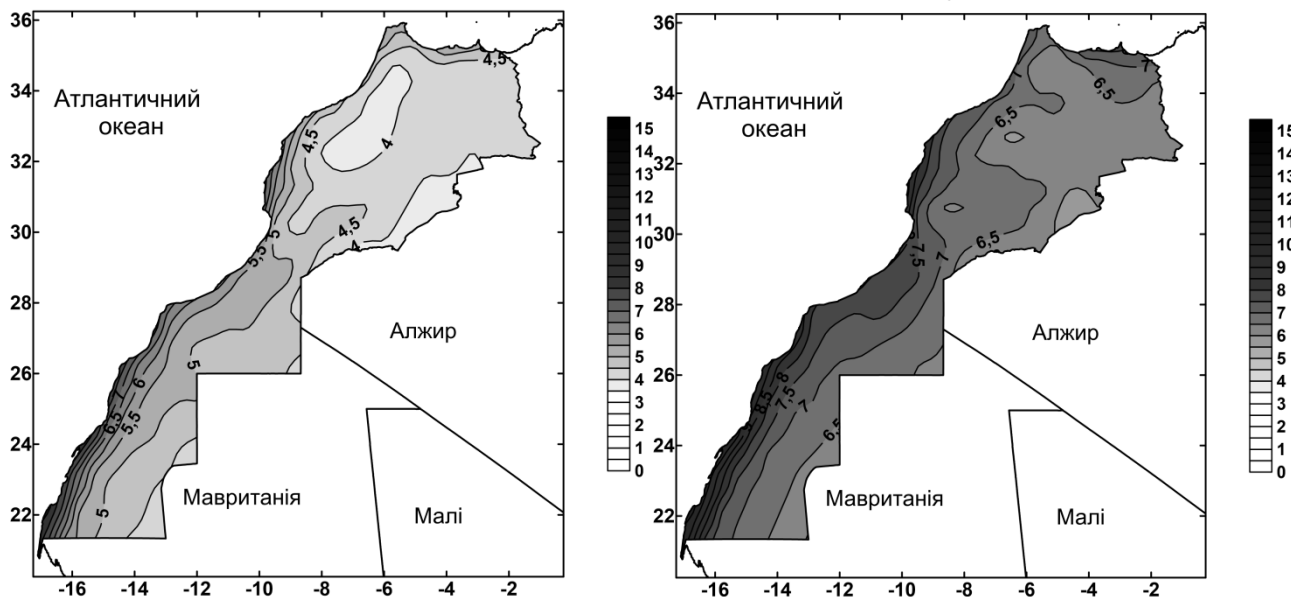


Рис. 1: а – середня за ансамблем моделей середньорічна швидкість вітру (м/с); б – середній за ансамблем моделей добовий максимум швидкості вітру (м/с) для періоду 2020–2050 рр.

Висновки. Моделювання РКМ показало, що у 2020–2050 рр. на території Марокко передусім переважатимуть слабкі та помірні вітри. Установлено, що в майбутньому річний хід швидкості вітру та добового максимуму швидкості вітру поділятиметься на два типи. Літній сезонний максимум буде типовим для рівнинних ділянок Атлантичного узбережжя, південної частини країни в районах, розташованих на південь від Атлаських гір. У центральних гірських районах Атласу, північно-східній частині країни й на узбережжі Середземного моря максимальна швидкість вітру спостерігатиметься взимку.

Найсприятливішими для розвитку вітроенергетики будуть ділянки, розташовані на березі Середземного моря та Атлантичного океану, а також у південній частині Марокко.

Просторово-часовий розподіл добового максимуму швидкості вітру у 2020–2050 рр. буде аналогічний розподілу середньої швидкості вітру, а його середньомісячні значення не перевищуватимуть 12 м/с. Найбільше середнє місячне значення добового максимуму швидкості вітру спостерігатиметься в червні на узбережжі Атлантичного океану на південь від населеного пункту Дахла.

Список використаних джерел:

1. Алісов Б. П. Климатология / Б. П. Алісов, Б. В. Полтараус. – М., 1974.
2. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология / В. И. Воробьев. – Л., 1991.
3. Де Рензо Д. Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо : пер. с англ. ; под ред. Я. И. Шефтера. – М., 1982.
4. Климатология / О. А. Дроздов, В. А. Васильев, Н. В. Кобышева и др. – Л., 1989.
5. Методические указания "Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок". РД 52.04.275-89. – М., 1991.
6. Новое поколение климатических моделей / Т. В. Павлова, В. М. Катцов, В. П. Мелешко и др. // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 575. – С. 5-64.
7. Слиже М. О. Современное распределение ветра в Марокко / М. О. Слиже, А. Б. Семергей-Чумаченко, Ю. Эль Хадри // Укр. гідрометеорол. журн. – 2016. – № 17. – С. 61-69.
8. Donat M.G., Leckebusch G.C., Wild S., Ulbrich U. Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. no. 11. pp. 1351-1370. doi:10.5194/nhess-11-1351-2011
9. Graybeal D.Y. Relationships among daily mean and maximum wind speeds, with application to data quality assurance. Int. J. Climatol. 2006, no 26. pp. 29-43. DOI: 10.1002/joc.1237
10. Harris A.R. On Establishing a Climatology of Gust Factors and Assessing Their Ability to Forecast Wind Gusts in Milwaukee, WI. Theses and Dissertations. 2016. URL:https://dc.uwm.edu/etd/1150

11. IS-ENES climate4impact portal. URL:<https://climate4impact.eu/> (дата звернення: 23.09.2017)
12. Renewable Energy Transitions in Jordan and the MENA Region. Amman, 2015.
URL:<http://library.fes.de/pdf-files/bueros/amman/12045.pdf> (дата звернення: 10.03.2018)
13. Roadmap for a renewable energy future.
URL:http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_R_Emap_2016_edition_summary.pdf (дата звернення: 10.01.2018)
14. Tong W. Wind Power Generation and Wind Turbine Design. Southampton, 2010.

References:

1. Alisov B.P., Poltarau B.V. Klimatologiya. M., 1974.
2. Vorob'ev V.I. Sinopticheskaya meteorologiya. St. Petersburg, 1991.
3. D. de Renzo (Ed.) Vetrojenerretika. M., 1982.
4. Drozdov O.A., Vasil'ev V.A., Kobysheva N.V., Raevskij A.N., Smekalova L.K., Shkol'nyj E.P. Klimatologiya. St. Petersburg, 1989.
5. Metodicheskie ukazaniya "Provedenie izyskatel'skikh rabot po ocenke vetrojenergeticheskikh resursov obosnovaniya shem razmeshheniya i proektirovaniya vetrojenergeticheskikh ustanovok". RD 52.04.275-89. M., 1991.
6. Pavlova T.V., Katsov V.M., Meleshko V.P., Shkol'nik I.M., Govorkova V.A., Nadezhina E.D. Novee pokolenie klimaticheskikh modelej. Trudy GGO im. A.I. Voeykova, 2014, no. 575. pp. 5-64.

7. Slizhe M.O., Semergej-Chumachenko A.B., Jel' Hadri Jussef. Sovremennoe raspredelenie vetra v Marokko. Ukrayins'kyi hidrometeorologichnyy zhurnal, 2016. №17. pp. 61-69.

8. Donat M.G., Leckebusch G.C., Wild S., Ulbrich U. Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. no. 11. pp. 1351-1370. doi:10.5194/nhess-11-1351-2011

9. Graybeal D.Y. Relationships among daily mean and maximum wind speeds, with application to data quality assurance. Int. J. Climatol. 2006, no. 26. pp. 29-43. DOI: 10.1002/joc.1237

10. Harris A.R. On Establishing a Climatology of Gust Factors and Assessing Their Ability to Forecast Wind Gusts in Milwaukee, WI. Theses and Dissertations. 2016. URL:<https://dc.uwm.edu/etd/1150>

11. IS-ENES climate4impact portal. URL:<https://climate4impact.eu/> (accessed 23.09.2017)

12. Renewable Energy Transitions in Jordan and the MENA Region. Amman, 2015.

URL:<http://library.fes.de/pdf-files/bueros/amman/12045.pdf> (accessed: 10.03.2018)

13. Roadmap for a renewable energy future.
URL:http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_R_Emap_2016_edition_summary.pdf (accessed: 10.01.2018)

14. Tong W. Wind Power Generation and Wind Turbine Design. Southampton, 2010.

Надійшла до редколегії 08.05.18

В. Хохлов, д-р геогр. наук, проф.,

Эль Хадри Ю., асп.

Одесский государственный экологический университет, Одесса, Украина

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА И СУТОЧНОГО МАКСИМУМА СКОРОСТИ ВЕТРА НА ТЕРРИТОРИИ МАРОККО В 2020–2050 ГГ.

Приведены результаты расчетов скорости ветра и суточного максимума скорости ветра в 2020–2050 гг. на территории Марокко с помощью 11 региональных климатических моделей проекта CORDEX-Africa. Цель работы – определение возможных количественных показателей средней скорости ветра и суточного максимума скорости ветра, а также их пространственно-временного распределения по территории Марокко в 2020–2050 гг. В результате анализа было определено, что на большей части территории Марокко будут преобладать слабые и умеренные ветры, а также будут отмечаться два типа годового хода и суточного максимума скорости ветра. Наиболее благоприятными для развития ветроэнергетики будут участки, расположенные на берегу Средиземного моря и Атлантического океана, а также южная часть Марокко.

Ключевые слова: скорость ветра, суточный максимум скорости ветра, фактор порыва, региональные климатические модели, Марокко, CORDEX-Africa.

V. Khokhlov, Doctor of Science in Geography, Professor,

El Hadri Y., PhD Student

Odessa State Environmental University, Odessa, Ukraine

SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF WIND SPEED AND DAILY MAXIMUM WIND SPEED IN MOROCCO FOR THE PERIOD 2020-2050

The Moroccan energy system is highly dependent on external energy markets. Therefore, the current renewable energy strategy is focused on deployment of large-scale renewable technologies projects. Morocco has abundant wind resources. Estimations made by development organizations in Morocco quantify that the economic and technical potential of wind energy in Morocco amount to 26 GW. The aim of this study is to determine the possible quantitative indicators of wind speed, the daily maximum wind speed and their space-time distribution in the period 2020-2050 on the territory of Morocco. In study used data from regional climate modelling with a high spatial resolution of the project CORDEX. Simulations of regional climate models provide opportunities for a better understanding of atmospheric processes in the region and their possible future change. In the study use of regional climate models simulations for the RCP 4.5 scenario for the Africa region, presented in a rectangular coordinate system with a spatial resolution of ≈ 44 km. As a result of the regional climate models calculation, the mean monthly Near-Surface Wind Speed, and Daily Maximum Near-Surface Wind Speed values for the period 2020-2050 for the territory of Morocco were obtained. Regional climate models simulations showed that in Morocco will be dominated by gentle and moderate winds. The smallest values of the average wind speed are predicted in Fez – Meknes and Beni-Mellal – Henifra regions and will be about 3 m/s, the highest values can reach 9 m/s on the Atlantic coast to the south of Dakhla village. An analysis showed that in the future a character of annual course, in general, will have two types: in central mountain regions of Atlas, in the northeastern part of country and on the Mediterranean coast maximum wind speed will be register in winter; summer seasonal maximum of wind speed will be typical on the flat areas of the Atlantic coast, in the southern part of the country and on areas located behind the ridges of the Atlas mountains on the border with Algeria. The most favorable for the development of wind energy will be areas located on the shore of the Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean and in the southern part of Morocco.

Keywords: wind speed, daily maximum wind speed, gust factor, regional climate models, Morocco, CORDEX-Africa.