

Ю. ЕЛЬ ХАДРІ, В.М. ХОХЛОВ

**ВІТРО- ТА ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНІ
РЕСУРСИ МАРОККО ПІД ВПЛИВОМ
КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН**

Монографія



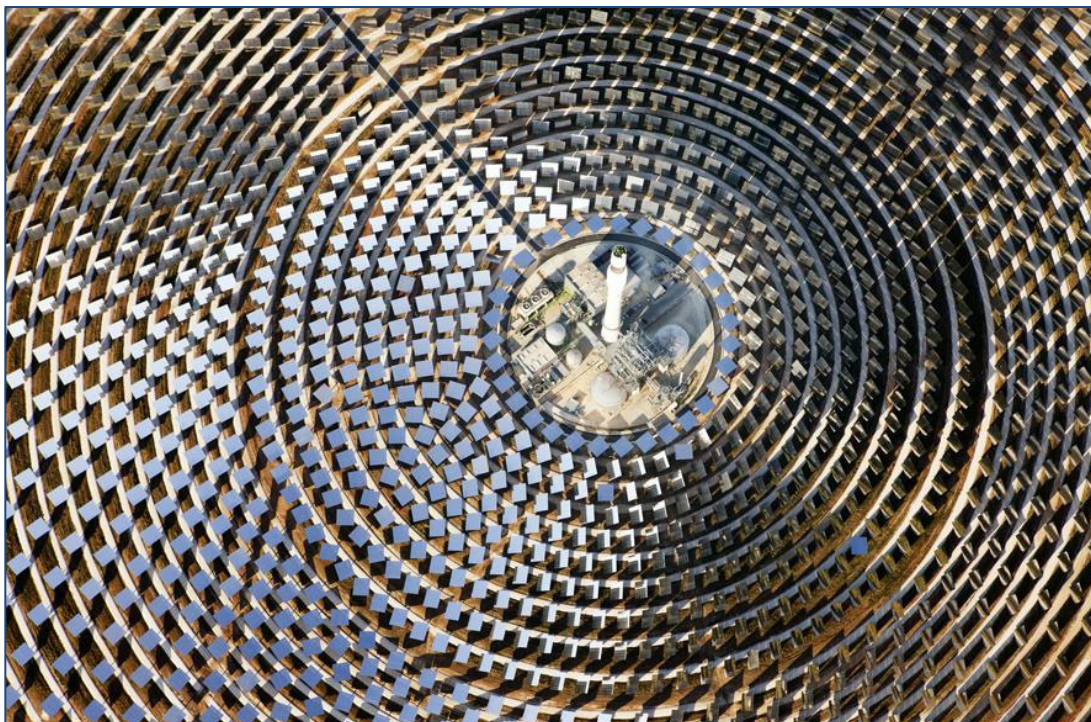


Фото на обкладинці:
 1 - ВЕС Тарфайя,
 2 - Король Мухаммед VI на
 церемонії запуску першої
 установки комплексу
 СЕС Нур Варзат,
 3 - СЕС Нур I,
 4 - СЕС Нур III

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Ю. ЕЛЬ ХАДРІ, В.М. ХОХЛОВ

**ВІТРО- ТА ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ
МАРОККО ПІД ВПЛИВОМ КЛІМАТИЧНИХ
ЗМІН**

Монографія

Одеса
Одеський державний екологічний університет
2022

УДК 551.58
Е53

Ель Хадрі Ю., Хохлов В.М.

Е53 Вітро- та геліоенергетичні ресурси Марокко під впливом кліматичних змін : монографія. Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2022. 128 с.
ISBN 978-966-186-231-8

Використання енергії вітру та сонця сьогодні є одним із найперспективніших напрямів в енергетиці. У цьому контексті дані про майбутні стани клімату відіграють вирішальне значення, оскільки від них безпосередньо залежать ресурси відновлюваних джерел енергії, таких як вітер та сонячна радіація. Монографія присвячена вирішенню важливої наукової проблеми оцінки майбутніх вітрових та сонячних ресурсів Марокко під впливом кліматичних змін.

Монографія розрахована на широке коло науковців в області досліджень клімату та проектування установок, що працюють на відновлювальних джерелах енергії, а також студентів вищих навчальних закладів.

El Hadri Y., Khokhlov V.

Wind and solar energy resources of Morocco under the influence of climate change: monograph. Odesa : Odessa State Environmental University, 2022. 128 p.

The use of wind and solar energy today is one of the most promising areas in energy. In this context, data on future climate conditions are crucial, as they directly affect the resources of renewable energy sources, such as wind and solar radiation. The monograph is devoted to solving an important scientific problem of assessing the future wind and solar resources of Morocco under the influence of climate change.

The monograph is designed for a wide range of scientists in the field of climate research and design of installations running on renewable energy sources, as well as students of higher education.

УДК 551.58

Р е ц е н з е н т и :

к.ф.-м.н. Матигін О.С.; к.геогр.н. Попов Ю.І.

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №6 від 30.06.2022 р.)

ISBN 978-966-186-231-8

© Ель Хадрі Ю., Хохлов В.М. 2022

© Одеський державний екологічний університет, 2023

Зміст

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 СВІТОВА ВІТРО- І ГЕЛІОЕНЕРГЕТИКА ТА ЇЇ РОЗВИТОК В МАРОККО.....	7
1.1 Вітрогенератори і сонячні установки та особливості їх розміщення.	12
1.2 Фактори, що впливають на формування запасів вітрових і геліоенергетичних ресурсів.....	16
1.2.1 Кліматичні характеристики вітроенергетичного потенціалу.....	16
1.2.2 Кліматичні характеристики геліоенергетичного потенціалу.....	20
1.3 Фізико-географічна характеристика Марокко	22
1.4 Клімат та запаси відновлюваних джерел енергії	25
1.4.1 Дослідження клімату Марокко.....	25
1.4.2 Дослідження вітру.....	29
1.4.3 Дослідження сонячної енергії.....	32
1.5 Можливі наслідки впливу зміни клімату на вітро- та геліоенергетику	38
1.6 Висновки до розділу 1	41
РОЗДІЛ 2 ВХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	42
2.1 Вхідні дані.....	42
2.2 Верифікація ансамблю моделей CORDEX-Africa	45
2.3 Питома потужність вітрового потоку	56
2.4 Висновки до розділу 2	58
РОЗДІЛ 3 ЗАПАСИ ВІТРОВИХ РЕСУРСІВ В МАРОККО В НАЙБЛИЖЧІ 30 РОКІВ.....	59
3.1 Проекції швидкості вітру для періоду 2021-2050 pp.....	59
3.1.1 Просторовий розподіл середньої швидкості вітру	59
3.1.2 Міжрічний хід середньорічної швидкості вітру	62
3.1.3 Річні зміни швидкості вітру	68
3.2 Питома потужність вітрового потоку у 2021-2050 pp.....	73

3.2.1 Швидкість вітру на різних висотах в приземному шарі атмосфери	73
3.2.2 Середня питома потужність вітрового потоку в 2021-2050 рр. на різних висотах над поверхнею землі.....	74
3.2.3 Річні зміни питомої потужності вітрового потоку	77
3.3 Проекції добового максимуму швидкості вітру для періоду 2021-2050 рр.	78
3.3.1 Середнє значення добового максимуму швидкості вітру	78
3.3.2 Міжрічний хід добового максимуму швидкості вітру	80
3.3.3 Річні зміни добового максимуму швидкості вітру	83
3.4 Висновки до розділу 3	86
РОЗДІЛ 4 ЗАПАСИ ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ У МАРОККО В НАЙБЛІЖЧІ 30 РОКІВ	87
4.1 Проекції загальної кількості хмарності в Марокко на період 2021-2050 рр.	87
4.1.1 Середня загальна кількість хмарності	87
4.1.2 Міжрічний хід загальної кількості хмарності	89
4.1.3 Річні зміни загальної кількості хмарності	91
4.2 Проекції потоків короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню для періоду 2021-2050 рр.	97
4.2.1 Просторовий розподіл потоків короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню	97
4.2.2 Міжрічний хід потоків короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню	99
4.2.3 Річні зміни потоків короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню	100
4.3 Висновки до розділу 4	103
ВИСНОВКИ.....	105
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	107
ДОДАТОК А	119

ВСТУП

Історія використання енергії вітру сягає своїм корінням в стародавні століття. Людина починаючи з витоків цивілізації, використовувала у своїй господарській діяльності вітрило і вітряні млини. З настанням промислової революції виникла потреба в залученні додаткових енергетичних витрат на процес виробництва. Пошук нових джерел енергії в ХХ столітті привів до великомасштабного впровадження вітрових турбін, потужність яких до кінця століття досягла кількох мільйонів кіловат. В останні десятиліття в ряді країн була створена ціла галузь вітроенергетики, яка поряд з промисловістю поставляє електроенергію понад 8 мільйонам будинків, допомагає вирішити проблему водопостачання і іригації. Другим з пріоритетних напрямків розвитку вітроенергетики є широке впровадження систем автономного енергопостачання у віддалених районах з децентралізованим енергозабезпеченням та розробка більш економічних вітрових турбін на основі впровадження нових технологій.

Ще одним найбільш доступним і енергоємним з усіх відновлюваних джерел енергії є сонячна радіація. Провідні економісти світу прийшли до висновку, що сучасна стратегія довгострокового розвитку енергетики не може більше ґрунтуватися виключно на паливно-енергетичному комплексі, і вихід з цієї ситуації полягає в поступовому переході до альтернативної енергетики на основі використання природних поновлюваних джерел енергії в глобальному масштабі. Забезпечення всіх сьогоdnішніх потреб світової енергетики може вирішити використання лише 0,0125 % енергії Сонця, використання 0,5 % здатне повністю покрити потреби найближчого майбутнього. Можна додати, що невичерпний потенціал та екологічна чистота є основними достоїнствами поновлюваних джерел енергії.

Вивчення режимів вітру та сонячної радіації в Марокко викликає інтерес як марокканських, так і іноземних вчених. Дослідження за цим напрямком проводилися групою марокканських вчених з Університету Мохаммеда V. Вчені провели оцінку вітрових характеристик і вітрового потенціалу Марокко для періодів 1978-1989 рр., 1988-1998 рр. та 1993-94 рр. В результаті аналізу було побудовано розподіл швидкості вітру по території. Найбільш сприятливими для вітроенергетики районами є район

Гібралтару і ділянки узбережжя Атлантики між містами Ель-Аюн і Дахла, та між Касабланкою і Агадіром.

Сьогодні в усьому світі намітилася тенденція до зростання енергоспоживання. Вона викликана темпами розвитку економіки, демографічним зростом і зміною рівня життя людей. Прогнозоване виснаження доступних запасів викопного палива, постійно зростаючі ціни на енергоносії створюють загрозу енергетичній безпеці в світовому масштабі. Країнами, націленими на розвиток промисловості, енергетична безпека розглядається, як частина їх національної безпеки і суверенітету. Крім того в останні десятиліття виникла необхідність швидкого вирішення назрілих екологічних проблем, пов'язаних з підвищеним рівнем викидів парникових газів в атмосферу.

Зміни клімату, які спостерігаються з середини 70-х років XX століття по всій земній кулі призведуть до перерозподілу потенціалу природних поновлюваних ресурсів. Тому своєчасна оцінка можливих змін потенціалу геліо- і вітроенергетичних ресурсів в Марокко є актуальною проблемою, що забезпечить її енергетичну безпеку в майбутньому.

Регіональні та глобальні зміни кліматичної системи на сьогоднішній день є досить актуальною проблемою, оскільки вони впливають на соціально-економічний рівень розвитку країн. Нестійкість кліматичної системи проявляється, головним чином, формуванням аномальних режимів температурних показників, атмосферних явищ, вітрових характеристик і т.д. В даному контексті, наявність максимально достовірної інформації про майбутній стан клімату, є стратегічно значущим пунктом у розвитку економіки Марокко. Сьогодні отримання такої інформації можливо шляхом моделювання майбутніх станів клімату за допомогою кліматичних моделей.

РОЗДІЛ 1

СВІТОВА ВІТРО- І ГЕЛІОЕНЕРГЕТИКА ТА ЇЇ РОЗВИТОК В МАРОККО

У теперішній час людство усвідомлює, що єдиним реалістичним засобом для досягнення стійкого розвитку і уникнення катастрофічних змін клімату, є швидкий і глобальний перехід до відновлюваних енергетичних технологій. Використанню відновлюваних джерел енергії відводиться центральна роль в досягненні стійкості клімату і завдання переходу до них стоїть перед урядами усіх країн світу. Конференція зі зміни клімату 2015 року в Парижі, стала переломним моментом для використання відновлюваних джерел енергії. Аргументи на їх користь ніколи не були настільки сильними. В результаті був вироблений глобальний план, метою якого стало подвоєння їх частки в загальносвітовому виробництві енергії до 2030 року [3]. Втілення в життя цього плану має високе значення для досягнення енергетичної системи, виробництво якої не супроводжується викидами двоокису вуглецю та протягом найближчих 50 років зменшить виклики глобальній енергетичній безпеці та ризики для навколишнього середовища і здоров'я людини.

Однак це не означає, що подвоєння відбудеться в кожній країні. Прогнози для багатьох країн показують, що попит на енергію підвищується швидше, ніж перехід до відновлюваних джерел енергії. Темпи зростання і використання потенціалу відновлюваних джерел завжди будуть відрізнятися, через відмінності національних умов. У 2010 році частка відновлюваних джерел енергії в енергоспоживанні у 40 країнах варіювала від 1 % до близько 50 %, по відношенню до традиційних джерел, що навіть до 90 %, якщо додатково розглядалося використання біопалива [3]. Реалізація усіх варіантів плану приведе до збільшення частки відновлюваних джерел енергії від 20 до 70 % у більшості країн до 2030 року.

Перехід до відновлюваних технологій має першорядне значення для врегулювання кліматичних проблем. Досягнення частки 30 % до 2030 року може бути достатнім, щоб запобігти зростанню глобальної температури більш ніж на 2 °C в порівнянні з доіндустріальним рівнем.

Подвоєння частки відновлюваних джерел енергії дозволило б уникнути до 12 Гт додаткових викидів CO₂ на рік до 2030 року у порівнянні з сьогоdnішнім обсягом [3].

Оптимізована система управління енергетикою повинна розвиватися на національному рівні. Сьогодні переваги використання відновлюваних джерел енергії помітні тільки в певних галузях промисловості. Проте, прискорене розгортання таких проектів входить в число заходів для досягнення цілей сталого розвитку, від охорони здоров'я до боротьби з бідністю. Для досягнення максимального ефекту, обов'язковий перехід до відновлюваних джерел має бути впроваджений на всіх рівнях національного планування.

Енергетична система Марокко дуже залежить від зовнішніх енергетичних ринків. Відповідно до інформації Міністерства енергетики, на сьогодні в Марокко імпортується більш 93 % енергоносіїв. Держава закуповує на міжнародних енергетичних ринках вугілля для своїх електростанцій і нафтопродукти. Природний газ імпортується з Алжиру, як компенсація за транзит алжирського газу через Марокко на південь Іспанії. Від 14 до 20 % щорічно споживаної електроенергії в Марокко припадає на імпортовану через Гібралтарську протоку з Іспанії електрику [4].

Залежність від міжнародних ринків енергоносіїв є тягарем для платіжного балансу і створює ризики для енергетичної безпеки країни. Зростання попиту на енергоносії збільшує навантаження на марокканську економіку, в результаті чого використання альтернативних джерел енергії стає єдиним виходом з ситуації, що склалася.

У 2009 році уряд Марокко розробив Національну енергетичну стратегію, одним з пріоритетних напрямків якої є збільшення частки відновлюваних технологій в енергетиці країни. Крім того, Марокко запустило Програму з розвитку відновлюваних джерел енергії [5], метою якої є досягнення загальної встановленої потужності 2000 МВт, одержуваної від енергії вітру, 2000 МВт від сонячної енергії, та збільшення пропускної здатності гідроелектроенергії до 2000 МВт до 2020 року. Внаслідок цього, загальна встановлена потужність відновлюваних джерел енергії в Марокко становитиме 42 % (рис. 1.1) від загальної встановленої потужності у 2020 році [6].

Основні відомства та організації, які беруть участь у розвитку відновлюваних джерел енергії та реалізації стратегії в Марокко є [6]:

- Міністерство енергетики, гірничо-рудної промисловості, водних ресурсів і охорони навколишнього середовища (MEMEE). MEMEE відповідає за регулювання та здійснення державної політики в галузі енергетики, видобутку корисних копалин, водного господарства та захисту навколишнього середовища;
- Агентство MASEN, засноване в 2009 році і яке має правовий статус державної акціонерної компанії. Метою агентства є керівництво здійсненням заходів спрямованих на досягнення вироблення 2000 МВт енергії від геліоенергетичних установок до 2020 року та інтеграції сонячної енергетики;
- Агентство ADEREE, засноване в 2009 році на основі центру відновлювальної енергії в Марракеші. Завдання агентства – підтримка уряду Марокко в розробці і здійсненні політики, пов'язаної з поновлюваними джерелами енергії і коефіцієнтом корисної дії в області енергії;
- Компанія «Національна Користь» (ONEE) домінує у виробництві, передачі і розподілі електроенергії в Марокко. Уповноважена здійснювати управління програмою з вироблення 2000 МВт енергії від вітроенергетичних установок до 2020 року;
- Компанія SIE (Інвестиційна енергетична корпорація) є інвестором в енергетичній стратегії Марокко;
- Компанія IRESEN є інститутом, спрямованим на розвиток наукових досліджень, інновацій та розвитку в області енергетичного сектору Марокко.



Рисунок 1.1 – Встановлена потужність в Марокко у 2010 та 2020 роках [6]

Високий потенціал відновлюваних енергетичних ресурсів Марокко, головним чином сонячної енергії та енергії вітру, залучає увагу державних та приватних компаній для розгортання проектів на основі відновлюваних джерел енергії.

Марокко є багатим на вітрові енергетичні ресурси. Розрахунки, здійснені організаціями, які беруть участь в розробці вітроенергетики в Марокко, показують, що технічний потенціал вітрової енергії в Марокко складе 26 ГВт [6]. Введення марокканської вітрової програми має забезпечити збільшення виробленої енергії від вітроенергетичних установок від 797 МВт в 2015 році до 2000 МВт до 2020 року і до 5000 МВт або 20 % від всіх встановлених потужностей до 2030 року. Наступними є проекти такі, які будуть введені в експлуатацію для досягнення цільового показника 2000 МВт до 2020 року (рис. 1.2) [7]:

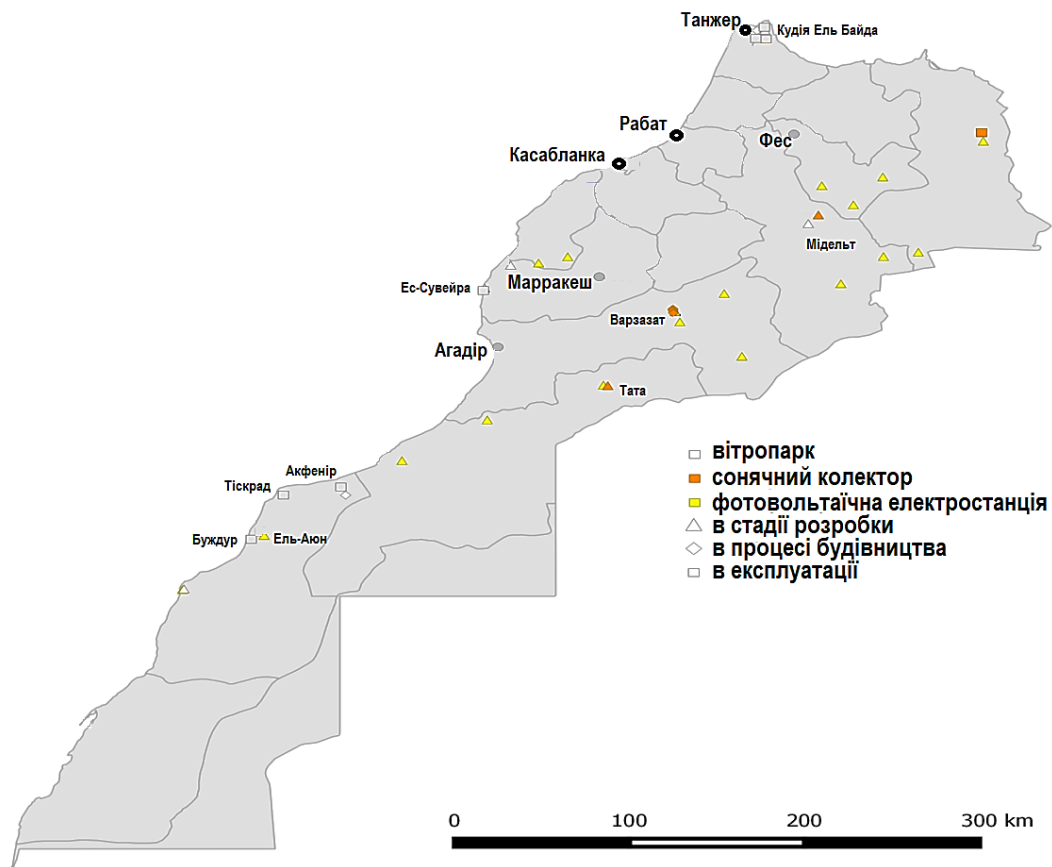


Рисунок 1.2. – Схема розміщення вітрових та сонячних електростанцій Марокко [7]

- 220 МВт в районі Акфеніра;
- 500 МВт в районах Тіскрад, Танжер і Кудія Ель Байда;
- 200 МВт в районі Ес-Сувейра;
- 100 МВт в районі Буждур;
- 300 МВт в районах Таза і Мідельт.

По всій території Марокко також існують в достатку сонячні ресурси. Внутрішні райони адміністративних областей Сус – Маса, Драа – Тафілалет, Ель-Аюн – Сегієт-ель-Хамра і Дахла – Уед-ед-Дахаб мають у своєму розпорядженні достатні ресурси для використання геліотермальних (CSP – Concentrated Solar Power) електростанцій, в той час як північно-західні частини мають оптимальні умови для фотоелектричних проектів (PV). Енергетична стратегія Марокко містить введення в експлуатацію до 2020 року таких геліоенергетичних проектів [7]:

- Два змішаних CSP / PV сонячних комплекси в Варзат (510 МВт CSP блок і 70 МВт PV блок) і Мідельт (близько 320 МВт CSP блок і близько 80 МВт PV блок), які разом складатимуть близько 980 МВт (запланований ще один комплекс в Таті з встановленою потужністю 320 МВт для CSP блоку і 80 МВт для PV блоку);
- Два PV-проекти в Буждурі (80 МВт) і Ель-Аюні (20 МВт);
- Три регіональних фотоелектричних комплекси з одиничними проектами в діапазоні 10-30 МВт в центральних провінціях (100 МВт PV станція Нур Тафілалет, 200 МВт – Нур Атлас і 100 МВт – Нур Аргана), встановлена потужність яких складе 400 МВт до 2020 року;
- приватні проекти PV із запланованою встановленою потужністю 470 МВт.

У 1995 році тільки 18 % населення Марокко мало доступ до електроенергії, і за останні 20 років завдяки Програмі електрифікації сільських районів близько 12 мільйонів громадян отримали доступ до електроенергії, в результаті на 2020 рік електрифікація Марокко близька до 100 % [8]. Найбільш густонаселеними є області Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма, Фес – Мекнес, Рабат – Сале – Кенітра і Бені-Меллаль – Хеніфра, а також прибережні райони областей Касабланка – Сеттат, Марракеш – Сафі, Сус – Маса і Східної області (рис. А.1).

У теперішній час існує декілька сценаріїв розвитку відновлюваних джерел енергії в Марокко, які розходяться лише в кількісних оцінках, але всі вони мають на меті збільшення вироблення такої енергії – від повного

забезпечення всіх потреб марокканських споживачів до можливості експорту частини екологічно чистої електрики до Європи.

1.1 Вітрогенератори і сонячні установки та особливості їх розміщення

Вітрові турбіни можуть мати різні типи в залежності від конфігурації турбінного генератора, шляху повітряного потоку щодо ротора турбіни, потужності турбіни, виду приводу генератора, режиму живлення і місця установки турбіни. Сучасні вітрові турбіни за конфігурацією осі лопатей ротора підрозділяються на два класи – з горизонтальним і вертикальним напрямом осі. Велика частина сучасних комерційних вітряних турбін належать до класу з горизонтальною віссю.

За потужністю вітрові турбіни можна розділити на такі категорії: мікро-, малі, середні, великі і надвеликі вітрові турбіни.

Мікротурбіни ідеально пасують для місць, в яких відсутній доступ до електричних мереж, вони працюють на відносно низьких швидкостях вітру і тому можуть використовуватися в більшості районів по всьому світу.

До малих вітрових турбін належать турбіни з вихідною потужністю менше 100 кВт [9]. Вони широко використовуються в житлових будинках, фермах і інших окремих віддалених спорудах, розташованих в сільських районах.

Сьогодні найбільш поширеними є вітрові турбіни з номінальною потужністю від 100 кВт до 1 МВт (середньої потужності). Такий тип турбін працює як в мережі, так і поза нею, в умовах сільської місцевості.

Турбіни з номінальною потужністю до 10 МВт належать до класу великих вітрових турбін. В останнє десятиліття цей клас відіграє основну роль на міжнародному вітроенергетичному ринку. Даний клас входить до складу вітряних електростанцій, як наземних, так і морських.

До надвеликих вітрових турбін відносяться турбіни з потужністю понад 10 МВт. В теперішній час, цей тип турбін перебуває на стадії розробки [9].

Для полегшення процесу планування вітрових електростанцій, Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), була розроблена єдина система стандарту вітрових турбін (табл. 1.1). Класифікація заснована на показниках величини швидкості вітру, екстремального пориву вітру і

турбулентності, окремо виділяється клас S, до якого входять вітрові турбіни, характеристики яких розроблені з урахуванням особливостей місцевості в якій вони будуть розміщені.

Таблиця 1.1 – Класифікація вітрових турбін [9]

Характеристики		Класи вітрових турбін			
		I (сильний вітер)	II (середній вітер)	III (слабкий вітер)	S
V _{сер} , м/с		10	8,5	7,5	Визначається користувачем
V _{ref} , м/с		50	42,5	37,5	
V _{50пор} , м/с		70	59,5	52,5	
I _{ref} , %	A	0,16			
	B	0,14			
	C	0,12			

Примітка: 1) швидкості відповідно до розподілу Релея при $\gamma = 2$.

2) $V_{\text{сер}}$ – середньорічна швидкість вітру на висоті вісі вітроколеса, V_{ref} – екстремальна швидкість вітру за 50 років, яка триває більше 10 хв, $V_{50,\text{gust}}$ – екстремальний порив вітру за 50 років, який триває більше 3 сек, I_{ref} – середня інтенсивність турбулентності при швидкості вітру 15 м/с.

3) A, B и C категорії інтенсивності турбулентності, які характеризують високе, середнє і низьке значення, відповідно.

Між номінальною потужністю турбіни і діаметром ротора існує пряма залежність. Турбіна з номінальною потужністю близько 3 МВт має діаметр 100 м. Це означає, що висота осі ротора у більш потужних вітрових турбін розташована вище, де в свою чергу спостерігаються більші швидкості вітру.

Як зазначалося вище, вітрові турбіни можуть об'єднуватися в мережу і бути частиною вітрової електростанції або працювати самостійно. На сьогодні більшість середніх і практично усі великі турбіни працюють у складі мереж.

Також турбіни розділяються на наземні та морські вітрові турбіни. Обидва типи мають свої переваги, які ураховуються при їхньому використанні. Наземні турбіни мають більш низьку собівартість фундаментів, вежі, їхні установки і експлуатації, легше інтегруються в

систему електромереж. Морські вітрові турбіни мають більш вигідні умови з точки зору сили вітру і його сталості. Морська вітрова турбіна може виробляти більшу кількість електроенергії, працюючи більше годин на рік, на більш високих швидкостях вітру, ніж аналогічна турбіна, встановлена на суші.

Потенційна зона для видобутку вітрової енергії на морі обмежена глибинами менше 50 м [10]. Крім того, кожен морський район має жорстку прив'язку до конкретних країн (виняткова економічна зона). Морська зона може бути розділена на класи в залежності від відстані від берега: менше 10 км, 10-30 км, 30-50 км і більше ніж 50 км від узбережжя. Виняткова економічна зона простягається на 200 морських миль (370,4 км) від берегової лінії.

Для оцінки майбутнього вітроенергетичного потенціалу необхідно враховувати прогнози щодо технологічних і економічних змін вітрових турбін. Наприклад, передбачається, що потужність вітрових турбін, які розміщуються у морі, збільшиться до 8 МВт до 2020 р. і до 10 МВт в період 2020-2030 рр. Сьогодні однією з найбільш великих вітрових турбін, розробленою лідером у виробництві обладнання в вітроенергетичній сфері, данською компанією Vestas, є турбіна V150-4.2 MW, що належить до ІЕС класу ІІВ з номінальною потужністю 4 МВт та діаметром ротора 150 м і висотою вісі вітроколеса до 166 м залежно від умов місцевості. Вироблена німецькою компанією Siemens, турбіна SWT-DD-142 класу ІІА має номінальну потужність 3,5-3,9 МВт, діаметр ротора 142 м і висоту осі вітроколеса до 165 м. Компанії Vestas і Siemens уклали договори співпраці в області вітроенергетики з урядом Марокко, і вироблені ними вітрові турбіни розміщуються та успішно працюють в різних районах країни.

Понад 95 % випромінювання Сонця припадає на область так званого оптичного вікна атмосфери (0,29-2,4 мкм), що включає видиму, близьку ультрафіолетову (УФ) і інфрачервону (ІЧ) ділянки спектра. Ця область носить назву оптичного вікна з причини, що на цій ділянці спектра земна атмосфера найбільш прозора для сонячного випромінювання (пропускає близько 80 %), в той час як випромінювання в далекій короткохвильовій і інфрачервоній областях (на які припадає 1 і 3,6 %) повністю або майже повністю поглинається атмосферою. Максимум випромінювання Сонця припадає на довжину хвилі $\lambda = 0,4738$ мкм [11].

При проходженні через атмосферу енергія Сонця відчуває складні перетворення. До земної поверхні доходить частина сонячного

випромінювання, а частина поглинається і розсіюється молекулами газів, аерозольними частинками, краплями води і кристалами льоду. Внаслідок розсіювання на рівні земної поверхні спостерігається не тільки пряма, а також розсіяна сонячна радіація, яка становить у сукупності сумарну радіацію, яка є короткохвильовою і складається з УФ, видимого та близького ІЧ випромінювання. Поглинання і розсіювання радіації є основними процесами, контролюючими перенесення радіації в атмосфері. Розсіювання сонячного випромінювання на краплях води і кристалах льоду відбувається у всьому спектральному діапазоні. Зміна спектрального складу сонячної радіації при проходженні через атмосферу обумовлена трьома факторами: 1) аерозольним розсіюванням на великих частинках (пил, краплі води); 2) молекулярним розсіюванням, найбільш інтенсивним в коротких довжинах хвиль; 3) виборчим поглинанням водяною парою в близькій інфрачервоній області спектра. Спостереження над ослабленням прямої сонячної радіації в атмосфері показують, що за умови максимальної чистоти і сухості повітря, ослаблення сонячної радіації майже цілком обумовлено релеевським розсіюванням. У той же час коефіцієнт ослаблення радіації, обумовленого розсіюванням пилом, обернено пропорційний довжині хвилі [12].

Спостереження за сонячним випромінюванням біля земної поверхні ведуть в двох діапазонах довжин хвиль: короткохвильовому випромінюванні з довжиною хвилі від 0,3 до 4,0 мкм і довгохвильовому – від 4,5 до 40 мкм. Короткохвильове випромінювання включає ультрафіолетове, видиме і ближнє інфрачервоне випромінювання [13].

Існує два основних види сонячних електростанцій: концентруючі сонячні теплоелектростанції і фотоелектричні електростанції. Концентруючі сонячні теплоелектростанції зазвичай використовують параболоциліндричні відбивачі або спеціальні стежачи дзеркала (геліостати) для фокусування сонячного випромінювання на трубу або вежу колектора, де теплоносії (рідина або газ) нагрівається до дуже високої температури. Такі станції мало залежать від довжини хвилі, і фокусують пряму радіацію, що приходить у видимому, УФ та ІЧ діапазонах, а в похмурий день можуть використовувати довгохвильове випромінювання атмосфери і хмар.

Традиційні фотоелектричні напівпровідникові матеріали в основному чутливі до видимої і ближньої ІЧ частини спектра, приблизно від 0,4 до 1,1 мкм з піком в ІЧ області. Згідно 3-му закону Фотоефекту, для

кожної речовини існує «червона межа» фотоефекту, тобто максимальна довжина хвилі світла (що залежить від хімічної природи речовини і стану його поверхні), вище якої фотоефект неможливий. Значний вплив на перебіг фотоефекту надають інтенсивність світлового потоку і температура навколишнього повітря [14-16] (при збільшенні T зменшує ККД сонячної батареї). Перетворення сонячної енергії в електричну, за допомогою напівпровідникових сонячних елементів, в даний час, є найбільш розробленим, в науковому та практичному плані методом.

1.2 Фактори, що впливають на формування запасів вітрових і геліоенергетичних ресурсів

1.2.1 Кліматичні характеристики вітроенергетичного потенціалу

Кліматична інформація, яка використовується для обґрунтування схем розміщення і проектування вітроенергетичних установок (ВЕУ) може бути поділена на три групи [17].

Перша група містить загальні кліматичні характеристики, за допомогою яких оцінюється теоретичний вітроенергетичний потенціал:

- 1) середня швидкість вітру (за рік і по місяцях);
- 2) амплітуда добового ходу швидкості вітру за сезонами року;
- 3) розподіл (повторюваність) швидкості вітру по градаціях;
- 4) вертикальний профіль середньої швидкості вітру;
- 5) густина повітря;
- 6) інтенсивність турбулентності вітрового потоку.

Сюди можна віднести поправочні коефіцієнти, що враховують зміну вітру по території, викликану неоднорідністю підстильної поверхні.

Рельєф місцевості, висота над поверхнею землі, шорсткість підстильної поверхні, наявність водойм, а також затінюючих елементів є факторами, що безпосередньо впливають на величину швидкості вітру. Наприклад, ліси і великі міста можуть значною мірою уповільнювати швидкість вітру, в той час як водні простори або території аеропортів не роблять такого ефекту. Виходячи з того, що ці умови можуть значно відрізнятися на різних станціях, для зіставлення середніх швидкостей вітру необхідно приводити їх до порівнянних умов. Зазвичай, за ці умови приймають умови відкритої рівної місцевості і висоту 10 м над поверхнею землі [18, 19].

За допомогою цієї групи кліматичних характеристик визначається питома потужність вітрового потоку, що характеризує теоретичний потенціал енергії вітру. Потужність вітрового потоку пропорційна густині повітря, площі поперечного перерізу потоку і швидкості вітру в третьому ступені [18]

$$N = \frac{1}{2} \rho V^3 A, \quad (1.1)$$

де N – миттєва потужність вітрового потоку, ρ – щільність повітря (при нормальному атмосферному тиску 1013 гПа і температурі повітря 15° С, густина повітря становить 1,226 кг/м³), V – швидкість вітру, A – площа поперечного перерізу, через яку проходить вітрової потік.

В наслідок кубічної залежності від швидкості вітру, потужність є вкрай мінливою величиною, що змінюється в широких межах. Середньорічна питома енергія вітру (енергія, що протікає за рік через поперечний переріз вітроколеса) є інтегральною характеристикою. Вона залежить від повторюваності швидкостей вітру, тобто від того, яку частку річного часу дув вітер з тією чи іншою швидкістю.

Маючи дані про середньорічні швидкості вітру, вертикальний профіль вітру, а також про повторюваність швидкостей вітру, можна дати енергетичну характеристику вітрового потоку будь-якій місцевості і на будь-якій висоті.

Для оцінки енергетичних ресурсів зазвичай розглядають потенційні, технічні та економічні ресурси.

Потенційними вітроенергетичними ресурсами є сумарна енергія руху повітряних мас, які переміщуються над даною територією протягом року.

Технічними вітроенергетичними ресурсами є частина потенційних ресурсів, яка може бути використана за допомогою наявних технічних засобів. Тут відбувається також облік неминучих втрат при використанні вітрової енергії.

Необхідно відзначити, що середня швидкість є недостатньою характеристикою для оцінок природного і, в ще більшому ступені, технічного потенціалу вітрової енергії територій, який визначається потужністю вітрового потоку і середнім виробленням енергії заданим типом ВЕУ. При знаходженні цих характеристик, першорядне значення має повторюваність швидкості вітру в заданій точці території [20, 21].

До наступної групи можна віднести спеціалізовані кліматичні характеристики, за допомогою яких здійснюється вибір оптимальних режимів роботи ВЕУ, тобто характеристики для оцінки реальних вітроенергетичних ресурсів. До них належать:

1) сумарна повторюваність діапазону робочих швидкостей, тобто коли ВЕУ виробляє електроенергію:

- діапазон швидкостей, за яких ВЕУ працює в режимі номінальної потужності;
- енергетичні затишшя – швидкості вітру нижче певного рівня (V_0), за яких ВЕУ не виробляє електроенергію;
- діапазон "буремних" (небезпечних) швидкостей – швидкості вітру, за яких проводиться відключення ВЕУ з метою уникнення поломки лопатей (вироблення електроенергії також дорівнює нулю);

2) безперервна тривалість відповідно діапазону робочих швидкостей, діапазону номінального режиму, енергетичного затишшя.

Остання група містить характеристики, які використовуються при розрахунку міцності і стійкості (вплив вітру) конструкцій ВЕУ. Вони містять:

1) розрахунковий вітровий тиск (вітровий натиск) і його зміна за висотою споруди;

2) інтенсивність турбулентності і коефіцієнт поривчастості вітру;

3) прискорення вітру в пориві;

4) розрахункові екстремальні значення ожеледно- і морозових відкладень на поверхні опор і лопатей ВЕУ.

Оснoву вихідної інформації для визначення кліматичних характеристик вітроенергоресурсів складають матеріали регулярних спостережень на мережі метеорологічних станцій. Відповідно до рекомендацій ГГО ім. А.І. Воєйкова [17], для отримання стійких значень середньої швидкості вітру достатнім є 10-річний ряд спостережень. На висоті 30 м швидкість вітру в середньому в 1,7 рази, а на висоті 100 м – в 2,4 рази вище ніж біля земної поверхні [22, 23].

Вихідною вимогою до місця розгортання автономних ВЕУ і вітроелектричних станцій (ВЕС) є наявність високого вітроенергетичного потенціалу. У першому наближенні його можна характеризувати рівнем середньої річної швидкості вітру ≥ 5 м/с на висоті 10 м над підстильною поверхнею [24]. Однією з характеристик, які дають більш точну оцінку ефективності роботи ВЕУ є тривалість у часі діапазону робочих

швидкостей. Для більшості типів ВЕУ, малої і середньої потужності цей діапазон становлять швидкості від 9 до 25 м/с. Роботу ВЕУ можна вважати достатньо ефективною, якщо відносна тривалість діапазону робочих швидкостей вітру (коефіцієнт використання) становить не менше 0,4 протягом сезону.

Крім того, місце для розміщення ВЕУ має характеризуватися невеликою повторюваністю енергетичного затишшя, тобто для більшості ВЕУ це період часу, коли $v \leq 5$ м/с становить не більше 20-30 %.

Додаткова вимога – відсутність або незначна повторюваність ураганних вітрів ($v > 32,7$ м/с) і мале число штормових періодів ($v > 20,8$ м/с).

Слід мати на увазі, що не завжди великі значення середньої річної швидкості є гарантією високого вироблення електроенергії ВЕУ. Вітри гірських проходів несприятливі для вітроенергетики через велику повторюваність штормів.

До сприятливих умов для розміщення ВЕУ, відносяться: велика середньорічна швидкість вітру; відсутність високих перешкод з підвітряного боку на відстані, що визначається висотою перешкоди; плоска вершина; височина (з пологими схилами) на плоскій рівнині або островах озер або морів; відкриті рівнини або узбережжі; гірська ущелина, яка утворює тунель [25].

Таким чином, можна сказати, що основною характеристикою, яка визначає вітроенергетичний потенціал території, виступає швидкість вітру. Як відомо, швидкість вітру формується під дією сили баричного градієнта, який визначається градієнтом тиску. Найменша швидкість вітру спостерігається в малоградієнтних баричних полях [21].

Ще одним фактором, що робить значний вплив на швидкість вітру, є рельєф місцевості. У гірських районах на одній і тій же висоті з різними формами рельєфу (схил, вершина, долина), виникають відмінності в атмосферному тиску, і як наслідок, виникає місцева циркуляція повітря. Такі види місцевих вітрів, як бриз і гірсько-долинний вітер, обумовлені термічною неоднорідністю, викликаною добовим ходом радіаційного і складових теплового балансу. Вплив гірського рельєфу може поширюватися на висоту 3-4 кратну висоті гір [26, 27].

Гірський рельєф місцевості також впливає на ступінь турбулентності у повітряному потоку. Турбулентність може виникати як через відмінності швидкостей вітру в сусідніх шарах повітря (динамічна турбулентність), так

і через різницю температурних умов шарів повітря (термічна турбулентність). В останньому випадку переміщення повітря відбувається тим інтенсивніше, чим швидше зменшується температура з висотою. За нестійкої стратифікації робота сил плавучості є додатковим джерелом енергії для підтримки турбулентного збурення [28, 29]. Наслідком турбулентності є поривчастість вітру, яка проявляється в мінливих пульсаціях швидкості і напрямку вітру біля середнього значення. Поривчастість більш виражена над сушею, ніж над морем, та особливо велика в районах зі складним рельєфом місцевості [27].

1.2.2 Кліматичні характеристики геліоенергетичного потенціалу

Для оцінки потенціалу сонячної енергії і прогнозу його зміни, важливим є вивчення трендів актинометричних величин. Вичерпним набором величин, що дають фактичну основу для оцінки потенціалу сонячної енергії є [30, 31]:

1) Сонячне сяйво:

- тривалість сонячного сяйва;
- параметри часового розподілу місячної та річної тривалості сонячного сяйва.

2) Складові радіаційного балансу:

- часові суми прямої сонячної радіації на нормальну і горизонтальну поверхні за середніх умов хмарності;
- часові суми розсіяної, сумарної, відбитої і поглиненої сонячної радіації за середніх умов хмарності;
- кількість днів без сонця;
- повторюваність ясного і похмурого неба;
- тривалість періоду з енергетичною освітленістю горизонтальної поверхні $0,60 \text{ кВт/м}^2$ і більше;
- середні квадратичні відхилення сумарної радіації і тривалості сонячного сяйва.

3) Альбедо підстильної поверхні і параметри часового розподілу його середніх місячних і річних значень.

Дані про находження сонячної радіації за різні проміжки часу свідчать про його значну мінливість протягом року, сезону і доби, обумовлені, як астрономічними факторами, так і прозорістю атмосфери і режимом хмарності. Дослідження характеристик структури цієї мінливості викликає велику зацікавленість. Різномасштабна мінливість находження сонячної радіації (в межах доби, місяця або року) в геліоенергетичних розрахунках враховується неоднаково. Так, зміна інтенсивності сонячного випромінювання протягом доби і його залежність від добового ходу хмарності впливає на продуктивність геліоустановки та на режим відбору виробленої енергії. Внутрішньомісячна мінливість сум радіації визначає ефективність використання встановленої потужності геліоустановок і необхідність створення систем довгострокового акумулювання і резервних джерел енергії. Річний хід сонячної радіації дозволяє міркувати про режими роботи геліоустановок протягом року і загальну енергозабезпеченість споживачів.

Однією з характеристик, що впливає на ослаблення сонячної радіації в атмосфері, є її прозорість [11, 12]. Ця характеристика залежить тільки від фізичного стану вертикального стовпа повітря – його заму́тненості і змісту поглинаючих газів. На заму́тненість атмосфери (фактор каламутності) впливають три фактори: молекулярне розсіювання, розсіювання і поглинання радіації водяною парою і краплями рідкої води, розсіювання і поглинання радіації пилом і частинками аерозолів. Фактор каламутності включає в себе фактор вологої каламутності і фактор залишкової каламутності

$$T=1+W+R \quad (1.2)$$

де T – фактор каламутності, W – фактор вологої каламутності, R – фактор залишкової каламутності.

Фактор вологої каламутності залежить від вологості повітря, фактор залишкової каламутності визначає ослаблення сонячної радіації пилом і краплями води.

Одним з основних факторів, що впливають на находження сумарної радіації за ясного неба, є висота сонця.

Хмарність суттєво впливає на сумарну радіацію і тривалість сонячного сяйва. Закономірності у зміні місячних сум сумарної радіації за

фактичних умов хмарності обумовлюються, головним чином, особливостями річного ходу сумарної радіації і хмарності [32].

Дотримуючись критерію Б.П. Вейнберга [33], нижній поріг «технічно прийнятної» сумарної сонячної радіації починається з того моменту, коли її величина досягає $0,60 \text{ кВт/м}^2$.

1.3 Фізико-географічна характеристика Марокко

Марокко розташовано на північному заході Африки (рис. 1.3), на широті від 20 до 35° пн. ш. Площа території складає 446550 км^2 . На півночі омивається водами Середземного моря, на заході – Атлантичного океану, довжина берегової лінії становить 1835 км . Марокко відділяється від Європи Гібралтарською протокою. Східні кордони проходять всередині континенту. Найвищою точкою країни є гора Тубкаль (4165 м), яка розташована в хребті Високого Атласу, а найнижчою – Себха-Тах (55 м нижче рівня моря). Річки Мулуя і Себу – головні річки країни.

Територію країни можна розділити на чотири фізико-географічні регіони: Ер-Риф (гірський район), розташований паралельно середземноморського узбережжя, його висота не перевищує 1500 м ; Атлаські гори пролягають з південного заходу на північний схід і розділені на три основні хребти: Антиатлас (2360 м), Високий Атлас, вершини якого перевищують 3700 м , і Середній Атлас, північна частина якого являє собою плато, розташоване на висоті близько 1800 м ; регіон прибережних рівнин, що лежать на атлантичному узбережжі; долини, розташовані на південь від Атлаських гір, які переходять у пустелю. Між горами Ер-Риф і Середнім Атласом простягнувся коридор Фес-Таза (гірський прохід Таза).

Берегова лінія Марокко, головним чином, покрита піщаними пляжами, розділеними виходом скелястих порід. Берег в районі Ер-Рифа обривистий, з вузькою смугою пляжів [34]. Ландшафт Марокко дуже різноманітний. Атлантичне узбережжя має рівнинний рельєф. Між Месетою (Центральне марокканське плато) і гірською дугою Ер-Риф

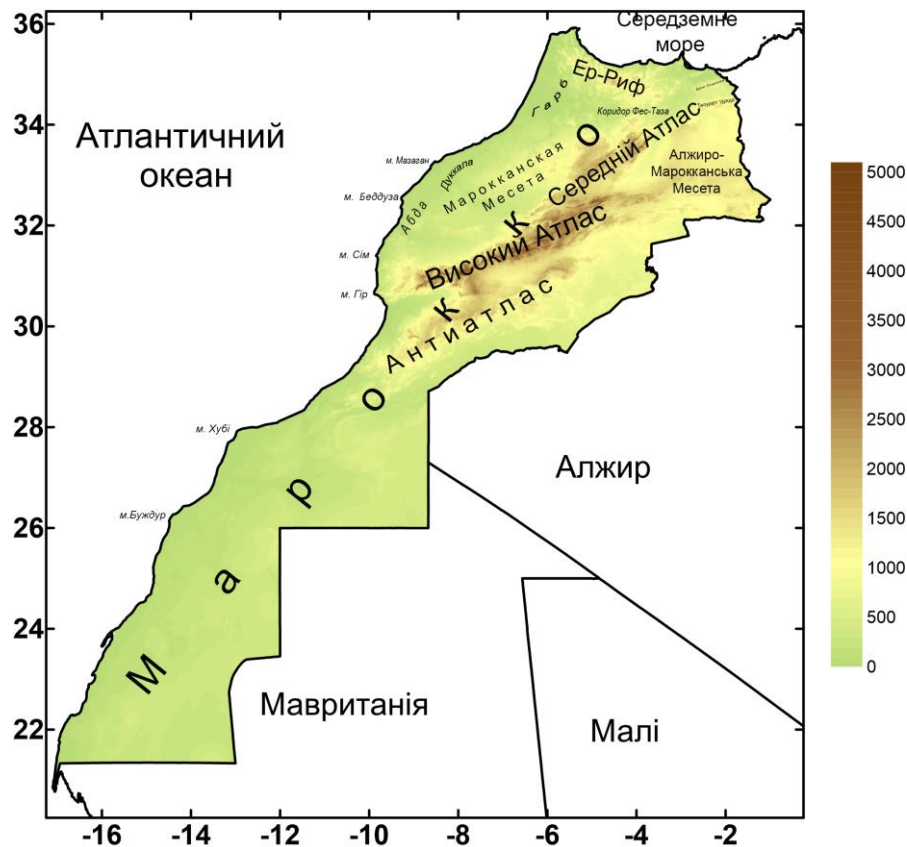


Рисунок 1.3 – Фізична карта Марокко

розташована рівнина Гарб, через яку протікає річка Себу. На північному сході Марокко розмістилася долина річки Мулуя. На заході країни знаходяться прибережні родючі рівнини Абда, Шауїа і Дуккала.

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

Розташування між посушливими районами Західної Сахари і помірними Середземноморським і Атлантичним регіонами, дає велику різноманітність кліматичних умов (рис. 1.4). Клімат змінюється від помірно вологого і субгумідного (на північних схилах Високого Атласу) до напівзасушливого і посушливого (на південь від Атласу). Типи ландшафту змінюються від рівнинних зон в північно-західній частині до високогірних районів Атласу і Ер-Рифа [35].

Температура повітря в прибережних районах коливається у межах від 22 до 25 °C влітку (липень, серпень, вересень) і від 10 до 12 °C в зимовий період. Температури значно нижче цього діапазону

спостерігаються протягом року на великих висотах Атлаських гір. На півночі Марокко сезон дощів триває з листопада по березень, кількість опадів в середньому становить від 50 до 100 мм на місяць. У Сахарі середньорічна сума опадів не перевищує 200 мм (іноді опади можуть взагалі не випадати протягом року). Райони з найбільшим зволоженням – Ер-Риф, Середній Атлас і вершини Високого Атласу (в деякі роки кількість опадів перевищує 1000 мм). Середньорічні суми опадів на рівнинах Атлантичного узбережжя коливаються від 533 мм в Рабаті до 254 мм в Марракеші. В горах на висотах понад 1500 м, з листопада по березень можуть спостерігатися опади у вигляді снігу.

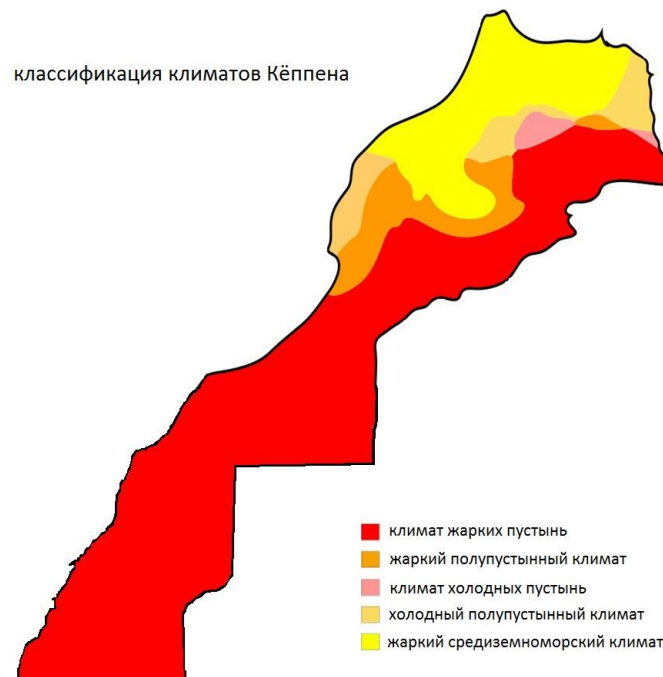


Рисунок 1.4 – Кліматичні зони Марокко за класифікацією Кеппена [36]

Внутрішні прикордонні області Марокко перебувають під впливом сезонних коливань температури з середньою температурою від 25 до 30 °C в теплу пору року (липень, серпень, вересень) і значним зниженням взимку до менш ніж 15 °C в зимовий період (січень, лютий, березень). Цей регіон є дуже сухим протягом всього року.

Найспекотніший клімат спостерігається на південь від Атлаських гір, де з травня по вересень денна температура знаходиться в межах 38-40 °C. Влітку в горах на рівні 1500 м максимальні температури не перевищують 32 °C. З вторгненням теплого морського повітря взимку пов'язані часті тумани на узбережжі [34].

1.4 Клімат та запаси відновлюваних джерел енергії

1.4.1 Дослідження клімату Марокко

Борн та співавтори в 2003 році виконали типізацію полів тиску для району Марокко. На основі аналізу типів погоди і даних розподілу значень тиску на рівні моря Кніппертцом [37] була розроблена класифікація типів атмосферної циркуляції для території Марокко на базі класифікації Лемба. Дана класифікація ґрунтується виключно на динамічних характеристиках повітряних течій в приземному шарі атмосфери і їх кривизні, та на аналізі різних типів погодних умов. Погодні умови були розділені на категорії. Класифікація містить 10 типів циркуляції (рис. 1.5). 8 з них (NE, E, SE, S, SW, W, N W, і N) ґрунтуються на напрямку приземних повітряних потоків і два типи на розташуванні області низького і високого тиску в районі Атлаських гір (типи C і AC, відповідно).

Положення Азорського максимуму і позатропічних депресій, визначають напрямок повітряних потоків в Марокко. Для типів C (AC), система низького (високого) тиску розташовані над Атласом. Формування погодних умов в 40-80 % випадків відбувається під впливом NE і E типів – влітку, і AC (антициклонічного) типу в зимові місяці (рис. 1.6).

З антициклонічним типом AC пов'язано посилення зонального потоку над Атлантикою. При типі NE спостерігається посилення Азорського максимуму і Ісландського мінімуму. Тип E є наслідком зміщення Азорського максимуму в східному напрямку. При типах SE і S над Європою відбувається утворення області високого тиску. Під впливом поля SE типу сухе повітря з Сахари транспортується південним потоком, даний тип характерний для теплої половини року. Депресія, розташована над Канарськими островами, при типі S може привести до адвекції вологого повітря на територію Марокко. Тип SW характерний для зимових місяців, з ним пов'язано проходження холодних фронтів територією країни з випадінням опадів особливо на півдні країни. При типах циркуляції W і NW, які розвиваються в холодний період року, над Іспанією розташована область зниженого тиску. Хоча тип N має взаємозв'язок з посиленням Азорського максимуму його можна віднести до зимового типу циркуляції. При циклонічному типі C, над Атласом відбувається утворення циклону і таке поле характерно для теплої половини року. Антициклонічний тип AC пов'язаний з сильним зональним потоком над Атлантикою.

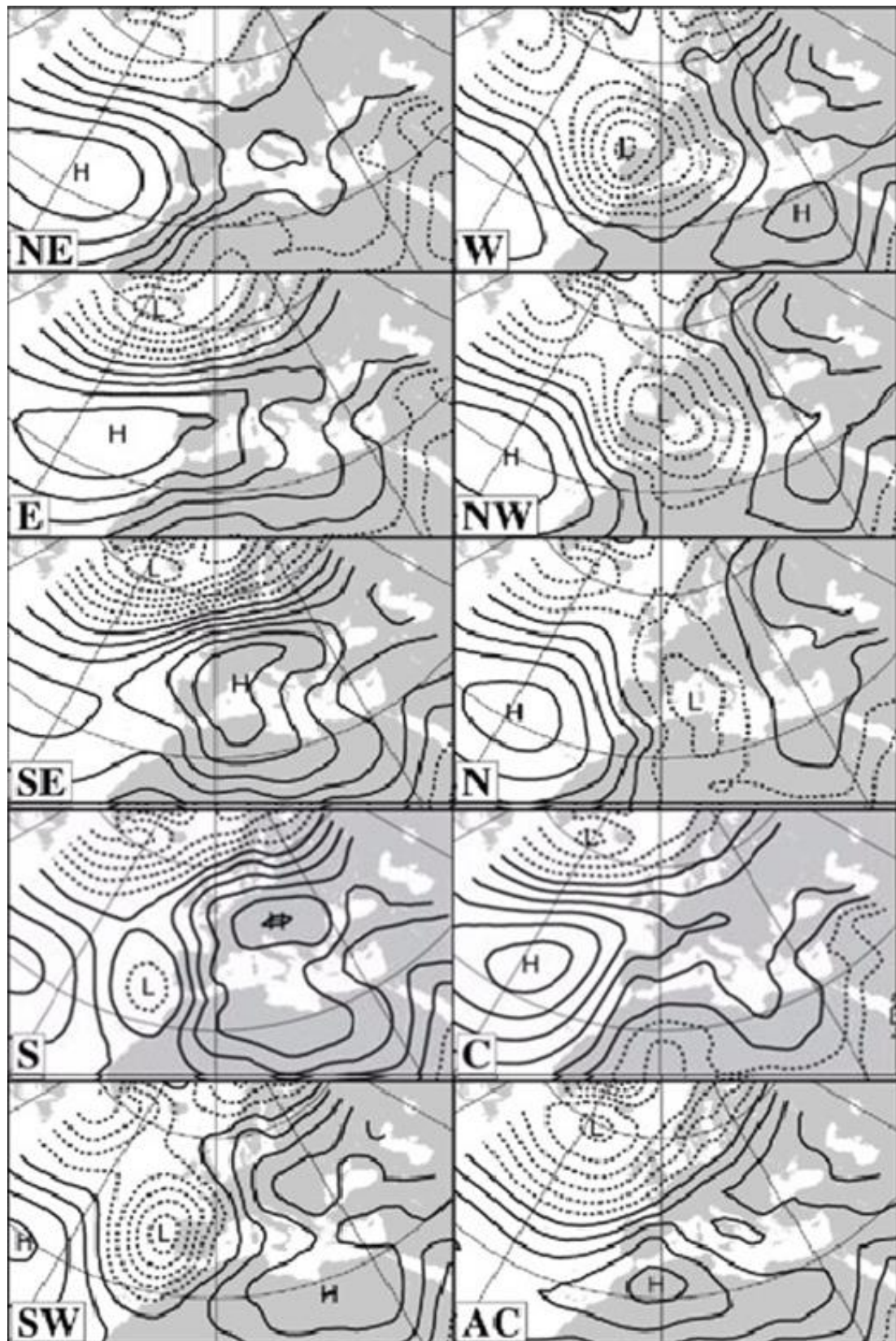


Рисунок 1.5 – Класифікація типів атмосферної циркуляції для Марокко [37]

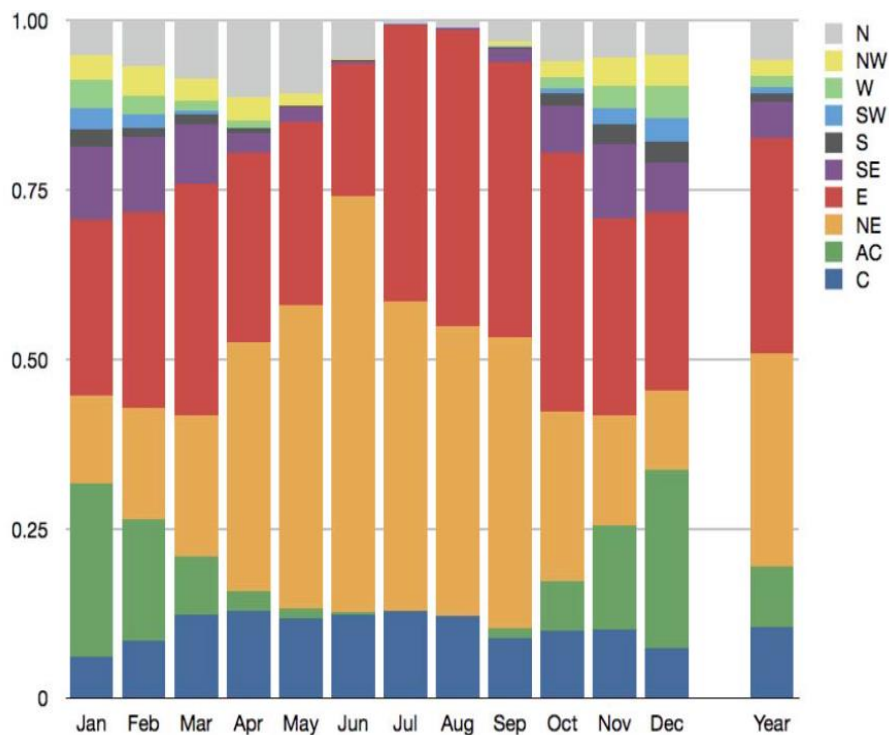


Рисунок 1.6 – Повторюваність циркуляційних погодних типів [37]

Борн та співавтори [37] описують схему перенесення з тропічних районів у внутрішні частини Марокко вологих повітряних мас, всередині яких під впливом орографії відбувається розвиток купчасто-дощової хмарності. Ці випадки розвитку глибокої конвекції в горах Атласу пов'язані з формуванням малоградієнтної висотної (на висоті 5-12 км) улоговини над Атлантичним узбережжям і висотного антициклону над Сахарою. Приплив вологого повітря з тропічних районів Західної Африки або прилеглої тропічній частині Атлантики в північно-західну частину Африки, та конвергенція потоків над районами підвищених температур в горах Атласу в другій половині дня, яка підтримується за допомогою динамічного підйому і низькою вертикальною стійкістю повітря, пов'язаною з висотною улоговиною, призводить до виникнення конвекції.

Мак Свіні та співавтори [38] навели сучасні тенденції зміни клімату в Марокко. Так, починаючи з 1960 року середньорічна температура повітря збільшилася на 0,9 °C, із середньою швидкістю 0,2 °C за десятиліття. Ця тенденція змінюється в залежності від сезону і є статистично значущою в квітні, травні, червні та вересні, жовтні, листопаді. Найшвидші темпи зростання спостерігаються в спекотний сухий сезон – квітень, травень,

червень ($0,34^{\circ}\text{C}$ за десятиліття). Повторюваність «спекотних» днів зростає в усі сезони крім вересня, жовтня та листопада, а «спекотних» ночей значно зростає в усі місяці року. Повторюваність «холодних» днів і ночей значно знизилася в усі пори року. У той же час, середньорічна кількість опадів в Марокко не показала будь-якої сталої тенденції до зміни.

Моделювання майбутніх змін клімату за допомогою глобальної циркуляційної моделі показують, що середньорічна температура збільшиться на $1,1\text{--}3,5^{\circ}\text{C}$ до 2060-тих років, і на $1,4\text{--}5,6^{\circ}\text{C}$ до 2090-тих. Прогнозоване зростання температури до 2090 р. за будь-яких сценаріях викидів становить $1,5\text{--}3,0^{\circ}\text{C}$. Прогнозовані темпи потепління вище у внутрішніх районах Марокко, ніж в прибережних. Всі проєкції та модельного прогону вказують на збільшення частоти днів і ночей, які вважаються «спекотними» в нинішніх умовах. «Спекотні» дні становитимуть 15-28 % до 2060 р. і 16-39 % днів до 2090 р. Найбільш швидкі темпи зростання їх чисельності будуть в липні, серпні і вересні. Ночі, які вважаються «спекотними» збільшаться найбільш швидкими темпами в липні, серпні, вересні. Всі прогнози вказують на зниження кількості днів і ночей, які вважаються «холодними» в нинішніх умовах – холодні дні відбуватимуться менш ніж у 5 % днів до 2090 р., а холодні ночі складуть менше 4 % ночей.

Стосовно опадів всі моделі в ансамблі прогнозують зменшення їх річних кількостей. Прогнози варіюють від дуже незначного підвищення кількості опадів (до 10 %) до зниження (до 52 %).

Борн з групою співавторів [35] наводять результати моделювання змін параметрів клімату Марокко протягом наступного століття за допомогою регіонального кліматичного моделювання, яке було виконано за допомогою мезомасштабної моделі атмосфери REMO Гамбурзького Метеорологічного інституту Макса Планка. REMO була застосована для періоду 2001-2050 рр. Результати моделювання для періоду 2036-2050 рр. показали значний перехід до Степового клімату для Атлантичного і Середземноморського регіонів, і в сторону Пустинного – в регіоні на південь від гір Атласу. Зниження річних сум опадів може досягати 25 % від поточних значень. Зміна температури знаходиться у відповідності з глобальними змінами температури, що спостерігаються у XX столітті, тенденція потепління в літні місяці носить більш виражений характер, ніж в зимовий період.

1.4.2 Дослідження вітру

Вивчення вітру в Марокко проводилося групою марокканських вчених з Університету Мохаммеда V. Нфауї та співавтори [39] здійснили оцінку вітрових характеристик і вітрового потенціалу Марокко. Для аналізу були використані дані метеорологічних спостережень на 11 метеостанціях за періоди 1978-1989 рр. і 1988-1998 рр., та дані за період 1993-94 рр. на 5 тимчасових метеостанціях встановлених алжирською компанією CDER. В результаті аналізу було встановлено, що найбільш сприятливими для вітроенергетики районами є район Гібралтару і ділянка узбережжя Атлантики між Ель-Аюном і Дахлою (швидкість вітру вище 6 м/с) та ділянка атлантичного узбережжя між Касабланкою і Агадіром (швидкість вітру вище 4 м/с). Аналіз розрахованих профілів вітру показав, що при збільшенні висоти від 10 до 30 м швидкість вітру може зростати на 20 % (Ель Хаума), а вітровий потенціал може сягати 85 % (Ес-Сувейра) на висоті 30 м.

Південна частина Марокко характеризується найбільш високим вітровим потенціалом. Даний регіон є малонаселеним, на його території розташовані дві метеостанції Ель-Аюн і Дахла, середньорічна швидкість вітру на яких становить 5,7 м/с і 7,6 м/с, відповідно.

Нфауї та співавтори [40] навели статистичні характеристики вітру та параметри розподілу Вейбулла, розраховані за даними спостережень метеоспостережень за період 1978-1990 рр. (станція Ель-Аюн) і 1980-1989 рр. (станція Дахла). В результаті дослідження було зроблено висновок, що в районі Дахла існують більш сприятливі умови для розміщення ВЕУ.

Для найбільш ефективного використання енергії, що виробляється вітроустановкою, необхідно накопичувати і перерозподіляти енергію в разі розбіжності піків споживання електроенергії і часу найбільшої повторюваності робочих швидкостей установки. З цією метою Нфауї та співавтори [41] побудували модель для розрахунку погодинної послідовності швидкості вітру (HAWS). Верифікація моделі для ст. Танжер показала, що відсоткова помилка, середньомісячної модельованої швидкості вітру не перевищує 3 %, що демонструє більш високу якість ніж у інших районах дослідження.

Надалі Нфауї [42] для визначення погодинної послідовності швидкості вітру (HAWS) використовував аналіз, в основі якого лежить

статистика із застосуванням процесів заснованих на ланцюгах Маркова. На основі даних метеоспостережень в аеропорту Танжер за період 1980-1989 рр. були побудовані матриці переходу Маркова та розглянуто граничну поведінку ланцюга Маркова. Порівняння між даними спостережень і результатами моделювання показали, що статистичні характеристики швидкості вітру точно відтворюються. Погодинні послідовності швидкості вітру можуть використовуватися, як вхідні дані для вітроенергетичних систем.

Садук і Джебла провели дослідження [43] вітроенергетичного потенціалу міста Тетуан на півночі Марокко. В роботі використовувалися дані швидкості вітру за період 1993-1994 рр. на станціях Ель Кудія Ель Байда та Ель Хаума, та за період 1996-1999 рр. на ст. Торрето. Найбільш перспективним з точки зору вітроенергетики є район станції Ель Кудія Ель Байда, де середньомісячні швидкості вітру є сталими та існують земельні ділянки, придатні для розміщення вітроустановок. Мінімальна швидкість вітру тут фіксувалася в зимовий сезон (8,2 м/с), а максимальна – влітку (11 м/с). Було відзначено, що для станцій Торрето, Ель-Нао Ель Хаума і Ель Кудія Ель Байда швидкість вітру на висоті 45 м, може перевищувати на 31 %, 29 % і 25 %, відповідно, величину швидкості вітру біля поверхні землі. Розподіл щільності ймовірності швидкості вітру показав, що на слабкий вітер (швидкість менше 3 м/с) припадає 4 % (ст. Ель Кудія Ель Байда), 7 % (ст. Ель Хаума) і 18 % (ст. Торрето). Результати оцінки доступної енергії вітру, отриманої за характеристиками швидкості вітру і статистичними параметрами Вейбулла, показали, що досліджені ділянки мають дуже високий вітрової енергетичний потенціал і є сприятливими для експлуатації.

Райхані та співавтори [44] провели оцінку роботи вітроенергетичної платформи, встановленої в місті Мохаммедія. Дані про швидкість і напрямок вітру за період 2004-2006 рр. були отримані за вимірюваннями, виробленим на метеорологічній станції, розташованій на платформі. Аналіз даних показав, що середньомісячні швидкості вітру мають значення нижче 3 м/с. Максимальна швидкість вітру, яка фіксувалася в травні і листопаді, дорівнювала 24 м/с. Середньорічна швидкість вітру на висоті 21 м становила 4 м/с. Коефіцієнт асиметрії розподілу швидкостей вітру в цілому більше 3, це означає, що більшість значень швидкості вітру зосереджені зліва від середнього значення, а екстремальні значення праворуч. Переважним напрямком вітру на станції за обраний період було

північний напрямок. У роботі відзначено, що внесок вітрів північного та північ-північно-східного напрямків в загальну частку, виробленої на платформі енергії, в 2004 році склав 30 % і 21 %, в 2005 році – 38 % і 19 %, в 2006 році – 31 % і 25 %, відповідно.

Розрахунок вітроенергетичних ресурсів Марокко був отриманий Ментісом [45]. Розрахунки здійснювалися за даними середньомісячних і середньорічних значень швидкості вітру за період з 1983-1993 рр. біля поверхні землі і на висоті 50 м, наданим Національним управлінням з аеронавтики і дослідженню космічного простору (НАСА) для 15 метеорологічних станцій Марокко. В результаті проведеного аналізу, були зроблені такі висновки для території Марокко:

1. Марокко має високий теоретичний потенціал (загальний енергетичний зміст вітру, кВт·г/рік) в районі атлантичного узбережжя, де середня швидкість вітру складає 6,9-9,4 м/с.

2. Географічний потенціал (загальна площа земельної ділянки придатного для установки вітрових турбін, беручи до уваги географічні обмеження, км²), тобто загальна доступна площа для установки вітрових турбін, за різними оцінками, склала від 214 994 до 333 347 км², що становить від 38,05 до 58,99 % від загальної площі країни.

3. Технічний потенціал території Марокко за різними оцінками становить від 1323,7 до 2721,7 ТВт·г/рік; кількість енергії, при факторі потужності вище 20 % – 493,1 ТВт·г/рік, потенційна потужність вироблюваної електроенергії – 23,7 ТВт·г.

Інтерес представляють дослідження присвячені вивченню впливу зміни клімату на вітроенергетику в Середземноморському регіоні. Девіс та співавтори [46] виконали дослідження зміни потужності вітрової енергії в Європі в період 2020-2049 рр., проведеного з використанням ансамблю з 5 моделей, які входять в CMIP5 (Earth System Models, скор. ESMs). Оцінка зміни потужності, яка вироблювалася ВЕУ, проводилася на основі припущення, що зміна клімату стосуватиметься тільки зміни швидкості вітру та не вплине на параметри її розподілу. Виділений домен дослідження включав північну половину території Марокко, на якій за отриманими результатами показано зменшення середньорічної швидкості вітру на Середземноморському узбережжі, на північному сході країни і в районі прибережних Атлантичному океану рівнин. В гірських районах Високого Атласу і Антиатласу моделі показали зростання швидкості вітру. Такі ж зміни були отримані для швидкості вітру в зимовий період. У літній

період моделі прогнозують збільшення швидкості вітру на північному сході країни і зменшення її значень на Атлантичному узбережжі. Що стосується середньорічних значень швидкості вітру, модельні розрахунки показали її зменшення на 3,5 % на півдні Європи.

Аналогічне дослідження швидкості вітру в Середземноморському басейні було проведено італійськими вченими в рамках проекту CLIM-RUN [47], і включало територію Північного і Центрального Марокко. У дослідженні були використані дані моделювання швидкості вітру на висоті 10 м над землею поверхнею, отримані за допомогою проектів ENSEMBLES і MED-CORDEX. Як видно з рис. 1.7 в районі Танжера моделі демонструють зростання швидкості вітру в обох сезонах. На решті території прогнозується зменшення швидкості вітру в зимовий період, і її зростання в літній період в районі долини Гарб, Марроканської Месети і в гірських районах Антиатласу. В роботі показано, що моделі демонструють відмінності як у величині зміни швидкості вітру, так і в знаку її відхилення від базового значення (рис. 1.8).

Вчені роблять висновок про те, що розбіжності в результатах моделювання, особливо в специфічних областях, можуть бути обумовлені існуючими невизначеностями, такими як орографія і т.п.

1.4.3 Дослідження сонячної енергії

Оцінка геліоенергетичного потенціалу Марокко здійснювалася в дослідженнях як марокканських, так і європейських вчених. Нфауї та співавтори [48, 49] привели дослідження геліоенергетичного потенціалу регіону Варзат. У дослідженні були використані дані спостережень з липня 1982 р. по грудень 1989 р. В результаті дослідження було показано, що район Варзат має високий сонячний потенціал: сонячне сяйво 3400 год/рік, радіація 5,5 кВт·год/м²/добу. Сезонний хід радіації має регулярний характер. Ослаблення радіації зростає з 30 % в червні (максимальне випромінювання) до 40 % в листопаді. Середньомісячне значення прямої радіації на нормальну поверхню коливається в межах 5,56 кВт/м²/день (грудень) і 8,47 кВт/м²/день (травень). Це показує, що район Варзат вигідний для розташування концентрованих сонячних систем для виробництва електроенергії у великих масштабах.

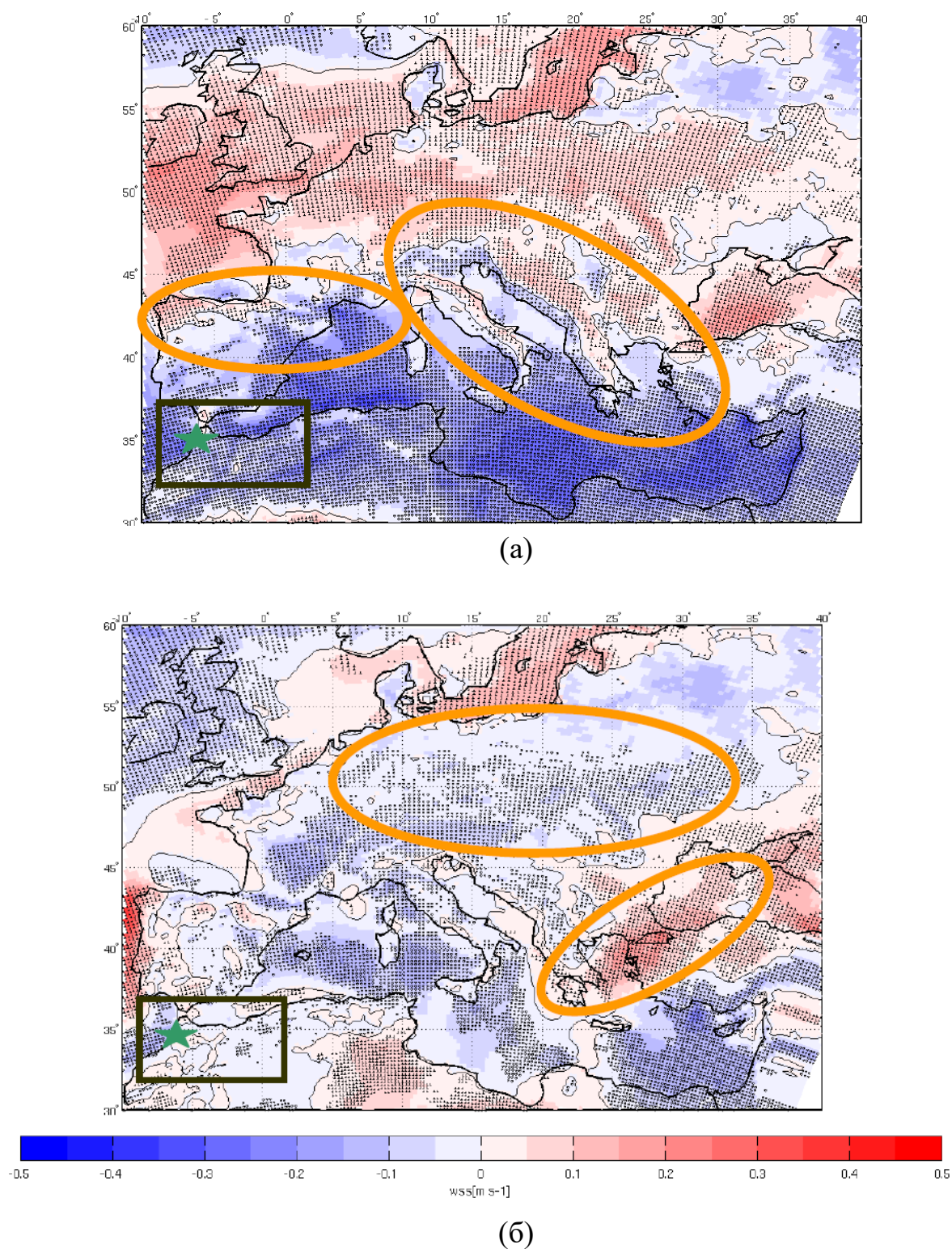


Рисунок 1.7 – Зміна швидкості вітру (м/с) в 2021-2050 рр. щодо періоду 1961-1990 рр.: (а) – грудень-лютий, (б) – червень-серпень [47]

У Марокко число годин сонячного сйива вимірюється на 30 метеорологічних станціях, в той же час сонячну радіацію вимірюють тільки на трьох станціях, а потоки прямої і розсіяної радіації вимірюють не

на всіх станціях. Тому для проведення оцінки геліопотенціалу обраного району було необхідно розробити метод за допомогою якого за наявними даними можна було б виконати оцінку надходження сонячної радіації.

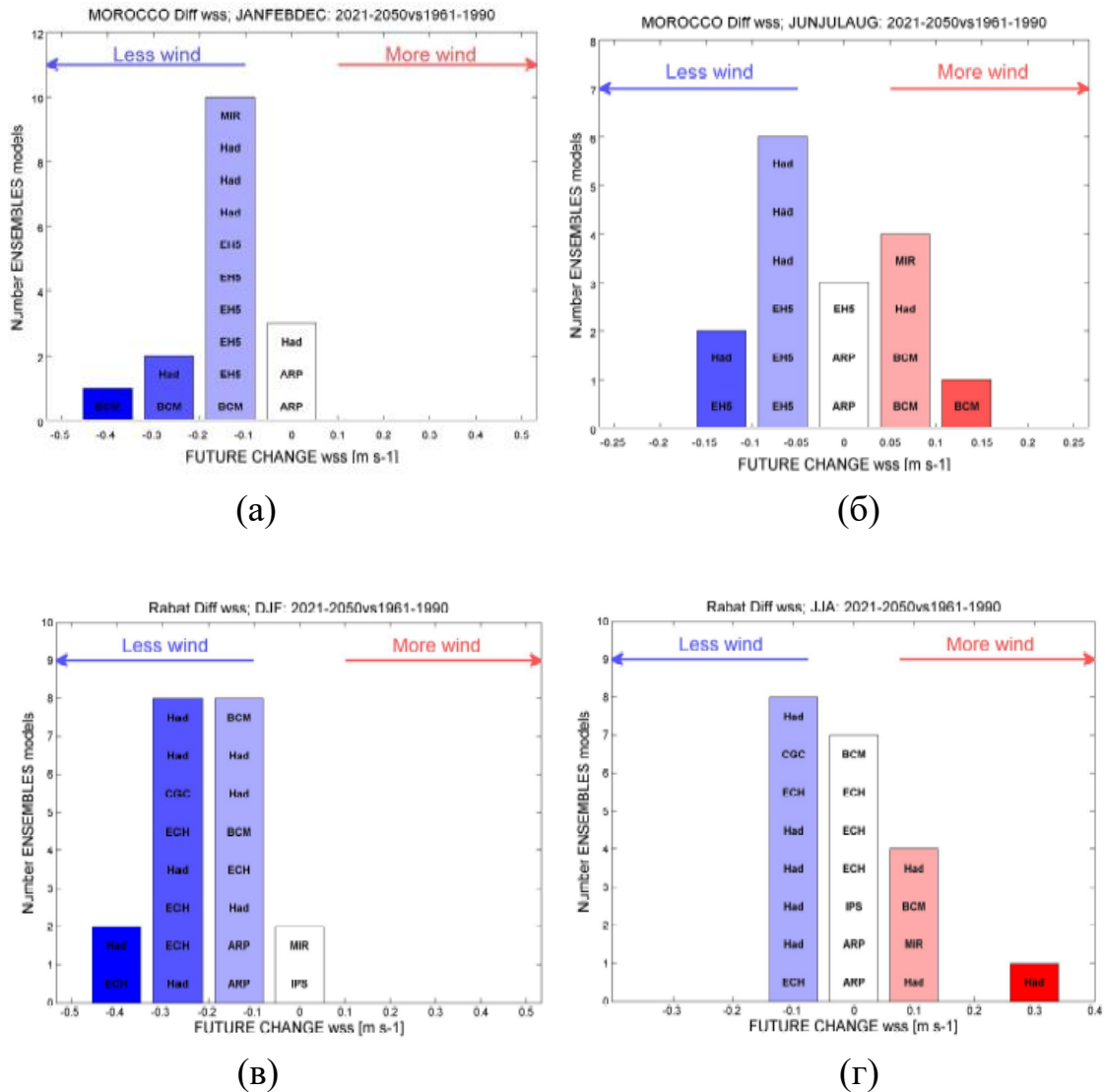


Рисунок 1.8 – Зміна швидкості вітру (м/с) в 2021-2050 рр. щодо періоду 1961-1990 рр.: (а) – в середньому по Марокко в грудні-лютому, (б) – в середньому по Марокко в червні-серпні, (в) – в Рабаті в грудні-лютому, (г) – в Рабаті в червні-серпні [47]

Нфауї та Бюрет [50] за допомогою встановленого кореляційного зв'язку між оцінками сумарної, прямої і розсіяної сонячної радіації і числом годин сонячного сяйва або індексом ясності для ст. Рабат зробили оцінку цих потоків на інших станціях, розташованих у подібних кліматичних умовах. У роботі були використані вимірювання середньодобових значень числа годин сонячного сяйва і радіації, що надходить на горизонтальну і

нормальну поверхню, отримані в Університеті Рабату з 1 серпня 1982 р. по 31 липня 1985 р. У роботі були розраховані коефіцієнти кореляції між прямою і розсіяною сонячною радіацією і часткою годин сонячного сяйва для різних кліматичних зон Марокко.

Таділі та Бардач [51] виконали оцінку надходження сонячної радіації за тривалістю сонячного сяйва. Ця робота присвячена розробці методу оцінки потоку сумарної сонячної радіації на похилу поверхню і його застосування до регіонів Марокко. Проведена на двох ділянках (в Рабаті і Марракеші) верифікація результатів показала, що розрахункові значення не відрізнялися більш ніж на 10 % від вимірювань на метеостанціях у період 2001-2003 рр.

Діабат та співавтори [52], за допомогою кластерного аналізу, середньомісячні значення добового надходження радіації на території Африки були розділені на 20 кластерів. Для виконання розрахунків авторами використовувалися: кліматичні норми (CLINO) за період 1961-1990 рр. для території Африки; добові суми надходження сонячної радіації за період 1994-1998 рр. на метеорологічних станціях Марокко; середньомісячні значення добової приходящої радіації за період 1981-1990 рр. (ESRA) для Північної Африки; дані за 1985-1986гг., що містяться в Атласі сонячної радіації для Африки.

В результаті виконаного аналізу, було зроблено висновок, що існує помітний широтний розподіл кластерів надходження сонячної радіації, який узгоджується з відомим розподілом кліматів Африки та можна бачити зв'язок між кліматом і кліматом сонячної радіації, але в деяких районах існують розбіжності між ними.

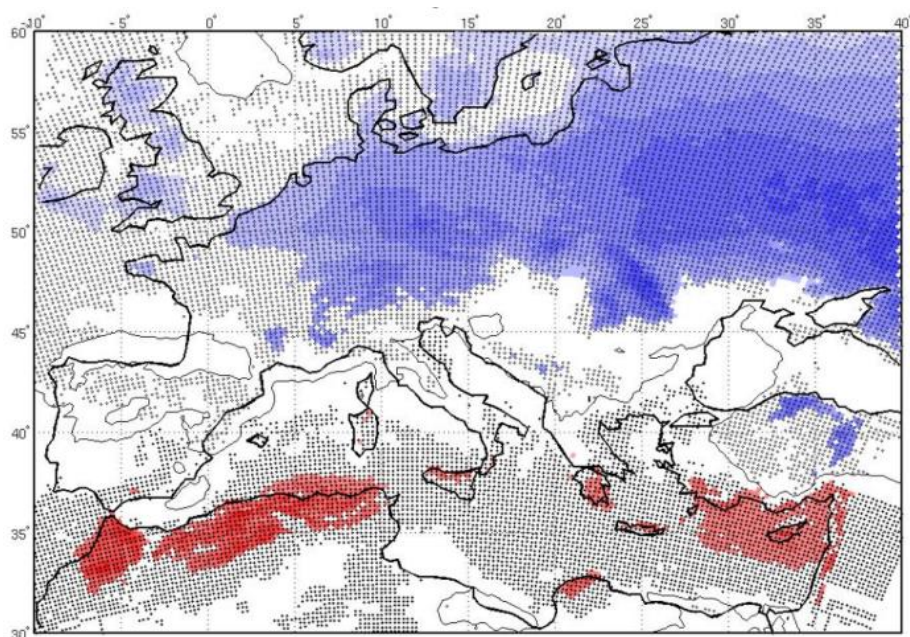
Ричц [53] провів техніко-економічний розрахунок для фотоелектричних (PV) і концентруючих (CSP) геліоенергетичних установок, що входять до плану з розвитку сонячної енергії в Марокко. Було використано набір даних HelioClim 3, дані HelioClim 1 (середньомісячні значення за період 1985-2004 рр.), та середні значення надходження сонячної радіації за період 1981-2000 рр. Для кожної геліоенергетичної установки були обрані: середньомісячні значення, що вказують на довгострокову мінливість сонячного ресурсу, один набір з даними до 2005 р., та один набір значень (1981-2000 рр.). В результаті аналізу були зроблено висновок, що всі отримані значення відрізнялися від кліматичних середніх (HelioClim) на ст. Айн-Бен Матар і ст. Ель-Аюн надходження сонячної радіації у 2005 р. відповідало кліматичному

середньому значенню. Дані про надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню показали більш точну відповідність між кліматичними та погодинними даними від HelioClim і Meteonorm в порівнянні з потоком прямої сонячної радіації на перпендикулярну поверхню. Порівняльний аналіз потоків прямої сонячної радіації на перпендикулярну і горизонтальну поверхні для ст. Варзат показав, що потоки радіації на горизонтальну поверхню мають меншу мінливість.

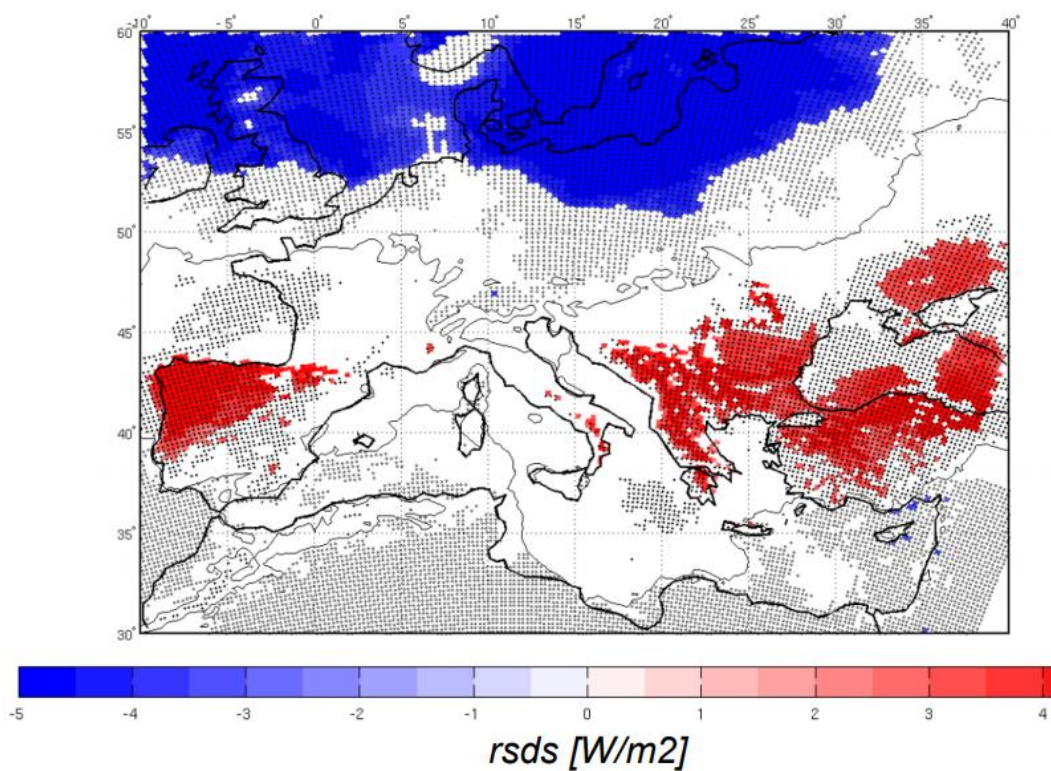
Дослідження впливу зміни клімату на кількість короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню було проведено італійськими вченими в рамках проекту CLIM-RUN [54] для Середземноморського регіону, в тому числі і для території Північного і Центрального Марокко. В роботі була визначена зміна кількості потоку короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню у період 2021-2050 рр. по відношенню до періоду 1961-1990 рр. В результаті був зроблений висновок, що в майбутньому очікується збільшення RSDS в Південній Європі. Для території Північного і Центрального Марокко (рис. 1.9) прогнозується збільшення потоку короткохвильової радіації до 5 Вт/м^2 в північних і північно-східних областях країни в грудні-лютому, і відсутність змін або близькі до нуля в період червень-серпень.

Короткохвильова радіація знаходиться в межах 0,2-4,0 мкм. Оцінка впливу зміни клімату в Європі (включно територію північного Марокко) на енергію, що виробляється сонячними фотоелектричними установками проводилася за допомогою аналізу кількості короткохвильової радіації, яка надходить до підстильної поверхні (Surface Downwelling Shortwave Radiation, скор. RSDS), розрахованої PKM проекту CORDEX [55].

В результаті було зроблено висновок, що для території південного Середземномор'я буде спостерігатися підвищені значення RSDS у 2070-2099 рр. в порівнянні з періодом 1970-1999 рр. Сьогодні в моделях WRF і ECHAM для параметризації короткохвильової радіації використовується інтерполяція даних, отриманих при розрахунку всіх ліній поглинання з урахуванням фактичної температури і тиску. Для короткохвильової радіації окремо розглядається 14 спектральних інтервалів. При цьому



(a)



(б)

Рисунок 1.9 – Зміна RSDS (Вт/м^2) в 2021-2050 рр. по відношенню до 1961-1990 рр.: (а) – грудень-лютий, (б) – червень-серпень [54]

похибка розрахунків не перевищує 3 Вт/м^2 в разі ясного неба [56]. У моделі HadRM3P короткохвильова сонячна радіація розраховується в два етапи. Спочатку проводяться попередні розрахунки експозиції, орієнтації і закритості горизонту для кожного осередку, в препроцесінгу для одного календарного року в кожному кроці по часу розраховуються азимут і кут падіння сонячних променів за допомогою стандартних астрономічних формул для екваторіальної системи координат. Збережені вихідні дані РКМ необхідного тимчасового дозволу містять тільки результати розрахунку сумарної короткохвильової радіації, яка надходить до підстильної поверхні [57].

Ключовим елементом високої точності розрахунку моделями радіаційного балансу на верхній межі атмосфери (ТОА) і на підстильної поверхні є правильне уявлення хмарності в моделях, шляхом визначення таких характеристик, як покриття хмарністю, водність хмар і розміри хмарних частинок. У більшості глобальних кліматичних моделей (ГКМ) гідрометеори зазвичай представляють у призупиненому стані, що породжує деякі розбіжності при порівнянні модельних розрахунків з результатами супутникових спостережень. Мультимодельне зміщення RSDS в CMIP5 складає $\sim 2,5 \text{ Вт/м}^2$, в основному через позитивні зсуви над землею, і негативні зсуви над океаном. Постійні і систематичні просторові зміщення в більшості моделей з середніми значеннями мультимодельного ансамблю завищують RSDS в конвективно активних областях тропіків. Заниження оцінки водності в ГКМ відбувається через неврахування опадів і конвективного ядра хмарності, що в свою чергу призводять до завищеної оцінки RSDS [58]. Хмарність (загальна кількість хмарності) є ключовим компонентом, що впливає на прихід радіації. Зміщення в розрахунках кількості хмарності і RSDS мають протилежні знаки [59].

1.5 Можливі наслідки впливу зміни клімату на вітро- та геліоенергетику

У п. 1.2.1 зазначалося, що основним фактором, який впливає на вітроенергетичні ресурси території, є швидкість вітру, яка залежить від циркуляційних процесів в даному регіоні. У свою чергу, серед атмосферних факторів, що впливають на запаси геліоенергетичного потенціалу, основними є хмарність і прозорість атмосфери, яка залежить від вмісту водяної пари, частинок пилу і аерозолів в стовпі повітря. Як

було показано вище, джерелами вологих повітряних мас, що потрапляють на територію Марокко, є перенесення вологого Атлантичного повітря вглиб континенту і проникнення вологого тропічного повітря з Західної Африки. Джерелом запиленості атмосфери служить пустеля Сахара. Пилові бурі виникають при перенесенні мас пилу з її глибини у напрямку до узбережжя Атлантичного океану і мають фронтальне походження. Їх тривалість може становити від декількох до 10 днів.

На південних схилах гір Атласу виникають пилові бурі, які викликані перевалюванням повітряних мас через гірські хребти і опусканням повітря вниз по схилах гір. Вітер на підвітряній стороні гірського хребта піднімає пил, що лежить біля підніжжя схилу. В такому разі, піднята вгору смуга пилу орієнтована з північного заходу на південний схід. Таке явище виникає при стійкому вітрі на рівні 700 гПа, який спрямований перпендикулярно хребту Атлаських гір.

Отже, циркуляційні процеси є відповідальними за формування умов, які характеризують вітровий і геліоенергетичний потенціал.

На циркуляційні процеси в Марокко значно впливає великомасштабний квазістаціонарний центр дії атмосфери – Азорський максимум. В зимовий період він поширюється на територію Північної Африки [60]. Влітку Марокко перебуває в перехідній зоні між Азорських максимумом і малоградієнтним полем тиску над Північною Африкою. Периферією Азорського антициклону проходить пасат північної півкулі, інтенсивність якого зазнає сезонної зміни.

На циркуляцію в Марокко впливають такі процеси, як Північно-Атлантичне коливання (ПАК), взаємодія між тропіками та помірними широтами і, можливо, Ель-Ніньо Південне коливання (ЕНПК) [37].

Вуллінгс і співавтори [61] використовуючи дані реаналізу ERA-40, за допомогою кліматичної моделі HadCM3, розрахували щомісячні та щоденні аномалії приземного тиску і висоти ізобаричної поверхні 500 гПа в районі Атлантичного океану на північ від 20° північної широти. Були здійснені 2 прогони моделі на 100-річний період включаючи доіндустріальне і подвоєне значення вуглекислого газу (CO₂) в атмосфері. Для визначення характеристики змін в розподілі індексу ПАК були використані його щоденні аномалії. В результаті проведеного аналізу авторами було зроблено висновок, що при подвоєному значенні рівня вуглекислого газу південний центр ПАК розташовується трохи далі на схід і простягається вглиб Європи і додатна фаза ПАК стає домінуючою. Зміни

в висоті поверхні 500 гПа і середнього приземного тиску показує зворотну поведінку. Біля земної поверхні відбувається зниження тиску в високих широтах і слабе збільшення в субтропіках, в той час як всюди відбувається збільшення висоти рівня 500 гПа з великим збільшенням у високих широтах.

На термічний форсінг квазістаціонарний стан атмосфери дає таку відповідь: потепління верхньої тропосфери в тропіках, вихолоджування в полярній стратосфері і збільшення температури поверхні в полярних областях. Потепління в тропічній тропосфері і вихолоджування в полярній стратосфері призведе до зміщення траєкторій позатропічних циклонів у напрямку до полюсів (що і було виявлено експертами Міжурядової групи зі зміни клімату). Нагрівання поверхні в полярній області призведе до зміщення траєкторій позатропічних циклонів в напрямку екватора. Стосовно змін інтенсивності позатропічних циклонів зробити висновок важко. У 5-ї оціночної доповіді Міжурядової групи зі зміни клімату [62] наводиться інформація про зрушення в південному напрямку внутрішньотропічної зони конвергенції (ВЗК) в районі Атлантики за останнє сторіччя.

Кількість водяної пари в атмосфері зростає на 20 % при збільшенні температури на 3 °C, за сталості відносної вологості. Хоча кліматичні моделі дають незмінну кількість водяної пари в атмосфері, але буде відбуватися її перерозподіл за територією.

В системі загальної циркуляції атмосфери дуже важливу роль грає тропічна циркуляція (комірка Гадлі), яка переносить енергію і кутовий момент у напрямку до полюсів. Розширення її меж призведе до зміни динаміки атмосфери в субтропічній зоні. Дані ре-аналізу показують збільшення в другій половині ХХ століття інтенсивності циркуляції в комірці Гадлі. При цьому результати супутникових спостережень містять інформацію, що за останні 27 років кордони комірки Гадлі змістилися в напрямку до полюсів. Результати міжнародного порівняльного експерименту (IPCC-AR 4) демонструють реакцію комірки Гадлі на глобальне потепління у вигляді ослаблення циркуляції і розширенні його меж в напрямку полюса [63-65].

Існує невизначеність в прогнозованій зміні меридіонального градієнта приземної температури в Атлантичному регіоні, що обмежує впевненість в регіональних кліматичних прогнозах для територій навколишньої тропічній частині Атлантичного океану.

В результаті вищевикладеного, можна припустити, що збільшиться повторюваність типів баричних полів з підвищеними значеннями градієнта тиску в районі Атлантичного узбережжя, що призведе до зростання вітрового потенціалу в цьому регіоні. Хвилі тепла, число яких буде збільшуватися в майбутньому, будуть сприяти зростанню числа і інтенсифікації пилових бур в регіоні [62]. Це призведе до зниження прозорості атмосфери, зростанню кількості ядер конденсації, що приводять до утворення хмарних форм в середній і верхній тропосфері [66] і, як наслідок, можливого зменшення геліоенергетичного потенціалу в південних областях Марокко.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Демографічне зростання, урбанізація та економічний розвиток в Марокко надають значного впливу на навколишнє середовище. На соціально-екологічну ситуацію в королівстві сильно впливає зміна клімату, наслідки якої вже призвели до переміщення і міграції людей по всій країні. Тому для досягнення стійкого розвитку і уникнення катастрофічних змін клімату, єдиним способом є швидкий і глобальний перехід до відновлюваних енергетичних технологій. Марокко має високий потенціал відновлюваних енергетичних ресурсів, головним чином, сонячної енергії та енергії вітру. Тому оцінка майбутнього стану вітрового і геліоенергетичного потенціалу є стратегічно важливою інформацією, що дає можливість завчасно знизити ризики пов'язані з впливом кліматичних змін.

2. Глобальні зміни клімату, які простежуються у вигляді зсуву положення та інтенсивності центрів дії атмосфери, призводять до зміни циркуляційних умов, які впливають на формування вітрового режиму і погодних умов.

3. Вивчення впливу зміни клімату на запаси вітрової та геліоенергетики є актуальним завданням, що проводилося дослідниками різних країн для Європи, Середземноморського регіону та Західної Африки, однак, територія Марокко не була об'єктом дослідження в цих роботах.

РОЗДІЛ 2

ВХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Глобальні кліматичні моделі (ГКМ) є основним джерелом прогнозів можливих змін клімату у майбутньому. Регіональні кліматичні моделі (РКМ), використовуючи інформацію від ГКМ, дозволяють отримати інформацію з більш високим просторовим дозволом для конкретних регіонів. Глобальна кліматична модель визначає великомасштабні ефекти в глобальному кліматі такі, як зміни концентрації парникових газів в результаті вивержень вулканів тощо. Кліматичні характеристики (температура, вітер, опади і т.д.), розраховані за допомогою ГКМ використовуються в якості вхідних даних на межах області моделювання РКМ. У РКМ враховуються місцева дрібномасштабна інформація про орографію, землекористування тощо, для можливості надання інформації про погоду і клімат з горизонтальним кроком менше 50 або навіть 10 км. З недавнього часу в РКМ використовуються системи, що включають атмосферні моделі, пов'язані з іншими моделями земних процесів [67].

РКМ набули широкого визнання, оскільки вони забезпечують інформацією в дослідженні змни клімату, а також в плануванні адаптації до цих змін. Кліматичні моделі дають величезну кількість даних з точки зору різноманітності змінних, кількості часових міток і просторового дозволу [67]. Ансамбль РКМ дає можливість більш глибокого розуміння атмосферних процесів в досліджуваному регіоні і їх можливу зміну в майбутньому.

2.1 Вхідні дані

Для дослідження майбутніх змін клімату Марокко були використані дані регіонального кліматичного моделювання з високим просторовим дозволом проекту CORDEX-Africa [68-82]. Кліматичні дані CORDEX отримані з аналізу даних спостережень (1988-2010 pp.) або з глобальних кліматичних моделей (1950-2100 pp.). Моделювання РКМ проводилося для регіону Африка, в прямокутній системі координат з просторовим дозволом ~ 44 км. Розрахунок моделями був виконаний з урахуванням сценарію антропогенного впливу RCP 4.5. Для розрахунку були використані 11 кліматичних моделей, розроблених в дослідницьких

інститутах і метеорологічних центрах різних країн світу. Стисла характеристика використаних моделей подані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики регіональних кліматичних моделей

№ моделі	Індекс моделі	Модель заг. цирк. атм. і океану	Розмір корд. сітки, град.	Кільк. верт. рівнів	Інститут - розробник
M1	KNMI-ICHEC-EC-EARTH	IFS	1,4×1,4	31	CNRM, Франція
M2	CanESM2	CanCM4	1,41×0,94	40	CCCMA, Канада
M3	CNRM-CM5	ARPEGE	1,4×1,4	31	CNRM / CERFACS, Франція
M4	SMHI-ICHEC-EC-EARTH	IFS	1,4×1,4	31	CNRM, Франція
M5	CSIRO Mark 3.6	Mk3 AGCM	1,9×1,9	18	CSIRO, Австралія
M6	IPSL-CM5A-MR	LMDZ	1,25×2,5	39	IPSL, Франція
M7	MIROC5	AGCM CCSR	1,4×1,4	40	AORI/NIES/JAME S&T, Японія
M8	HadGEM2-ES	HadGEM2-A	1,25×1,875	38	Хедлі Центр, Великобританія
M9	MPI-ESM-LR	ECHAM6	1,9×1,9	47	MPI, Германія
M10	NorESM1	CAM4-Oslo	2×2	26	NCC, Норвегія
M11	GFDL-ESM2M	AM3	2×2,5	24	GFDL, США

В результаті моделювання для періоду 2021-2050 рр. були отримані середньомісячні значення: швидкості вітру «sfcWind» (м/с), добового максимуму швидкості вітру «sfcWindmax» (м/с), загальної кількості хмарності «clt» (%) і потоку короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню «rsds» (Вт/м²). Потім з даних моделювання були виділені значення для території Марокко. Обрана область включає 33 вузла сітки по широті, 36 вузлів по довготі і обмежена координатами: 36,25° півн. ш., 17,25° зах. д.; 36,25° півн. ш., 0,25° зах. д.; 20, 25° півн. ш., 17,25° зах. д.; 20, 25° півн. ш., 0,25° зах. д.

Найбільш високу успішність відтворення середніх кліматичних характеристик при порівнянні з даними спостережень, як правило, показує результат усереднення за ансамблем моделей. Це пов'язано з тим, що систематичні помилки, властиві кожній моделі окремо часто є випадковими по відношенню до ансамблю моделей і при осередненні за ансамблем взаємно компенсуються [83].

Для оцінки зміни кількості хмарності у 2021-2050 рр. у порівнянні з поточним кліматичним періодом, в якості базового періоду були використані середньомісячні значення загальної кількості хмарності у 1981-2010 рр. отримані з даних ре-аналізу NCEP / NCAR reanalysis I [84].

Для оцінки зміни кількості короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню (RSDS) в якості базового були використані дані CERES_EBAF-Surface_Ed4.0 для періоду 2005-2015 рр. [85]. Дані являють собою середньомісячні значення RSDS в вузлах регулярної сітки з кроком 1° для регіону, обмеженого координатами: 18° зах. д. – 0° зах. д. і 20° півн. ш. – 36° півн. ш. Радіаційні потоки продукту CERES_EBAF-Surface_Ed4.0 розраховані за допомогою моделі переносу випромінювання з використанням даних супутникових спостережень за хмарністю і аерозолями та метеорологічними і аерозольними даними ре-аналізу, для характеристики стану атмосфери. Дані CERES використовують властивості хмарності і аерозолів, отримані скануючим спектро радіометром середнього дозволу MODIS, розташованим на борту супутника Terra, дані метеорологічної асиміляції моделі Goddard Earth Observing System (GEOS) версія 5.4.1 і асиміляції аерозолів моделі атмосферного транспорту та хімії MATCH. Середньомісячні середньохвильові короткохвильові потоки представлені у вигляді полів з кроком сітки $1^\circ \times 1^\circ$ і часовим дозволом 1 годину, обчислюються шляхом осереднення погодинного потоку Ed4 SYN1deg при хмарному небі. Багатоканальна система Ed4 SYN1deg забезпечує властивості хмарності (частка хмар, висота верхньої межі, оптична товщина, фаза, розмір часток) щогодини зі спостережень супутників Terra і Aqua. Відсутні властивості хмар оцінюються шляхом інтерполяції найближчих часових відрізків [86].

Для того, щоб визначити здатність РКМ відтворювати поточний клімат, дані моделювання порівнювалися зі спостереженнями на метеостанціях і супутниковими спостереженнями. Порівняння проєкцій середньомісячної швидкості вітру здійснювалося з рядами

середньомісячної швидкості вітру, отриманими з сайту метеорологічного сервісу «WeatherOnline Ltd.» [87].

Для перевірки відтворення середньомісячного значення добового максимуму швидкості вітру, в якості фактичного матеріалу були відібрані значення добового максимуму швидкості вітру за період 01.01.2011-31.12.2016 рр., отриманими з сайту агентства NOAA SATELLITE AND INFORMATION SERVICE [88], і потім розраховані їх середні значення для кожного місяця кожного року.

Для порівняння результатів моделювання загальної кількості хмарності, в якості фактичного матеріалу використовувалися дані супутникових спостережень, отриманими з сайту Національного управління з аеронавтики і дослідженню космічного простору НАСА [89]. Ряди спостережень за хмарністю отримані за допомогою радіометру MODIS.

2.2 Верифікація ансамблю моделей CORDEX-Africa

Як правило, якість розрахунків за допомогою тієї чи іншої РКМ неоднакова для різних змінних і регіонів. Тому важливим етапом перед проведенням аналізу проєкцій РКМ є оцінка якості модельних розрахунків. Таку оцінку можна отримати шляхом проведення верифікації моделей. Для цього проводять порівняння модельних даних з результатами спостережень за той же період часу у потрібній точці простору [87].

Для верифікації моделей були розраховані такі статистичні параметри: середнє значення ряду, середньоквадратичне відхилення (σ), середня помилка, мультиплікативне зміщення, коефіцієнт взаємної кореляції.

Середня помилка (ME) показує, на скільки модельне значення часового ряду є помилковим (2.1). Величина середньої помилки лежить в межах від $-\infty$ до $+\infty$, найкращим показником середньої помилки прогнозованого ряду вважається величина $ME = 0$:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i). \quad (2.1)$$

де X_i – прогнозоване (модельне) значення, а Y_i – фактичне значення часового ряду, n – довжина ряду.

Мультиплікативне зміщення (MB), показує ступінь сумісності середнього значення прогнозованого (модельного) ряду і середнього значення ряду спостереження, його величина знаходиться в інтервалі від $-\infty$ до $+\infty$, найкращим показником мультиплікативного зміщення прогнозованого ряду вважається величина $MB = 1$:

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \bigg/ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (2.2)$$

Ступінь зв'язку прогностичного та фактичного рядів була визначена за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2.3)$$

Величина r змінюється в інтервалі від -1 до $+1$. При $r = \pm 1$ є абсолютна (функціональна) кореляція по усіх точках рядів. Випадок, коли $r = 0$ свідчить про відсутність лінійного зв'язку між двома рядами (хоча може бути присутнім нелінійне співвідношення) [90].

Для верифікації кліматичних моделей були використані ретроспективні проєкції кліматичних моделей за період 2011-2016 рр. В якості вихідних даних по швидкості вітру використовувалися ряди спостережень на 5 метеорологічних станціях (Сіді-Іфні, Танжер, Уджада, Рабат, Мекнес) розташованих в різних частинах Марокко (рис. 2.1). Для порівняння були обрані результати модельних розрахунків в вузлах, як найближче розташованих до метеостанцій.

Для верифікації моделей за загальною кількістю хмарності в якості базових даних були використані дані супутникових спостережень, просторово усереднені в вузлах регулярної сітки з кроком 1° , потім вибиралися дані для точки з просторовими координатами відповідними точкам моделей. У табл. 2.2 наведена інформація про розташування станцій і вузлів сітки моделі для яких проводились розрахунки.



Рисунок 2.1 – Схема розташування метеостанцій і вузлів моделей

Станція Сіді-Іфні розташована на південному заході гір Антиатласа, на вузькій терасі, що лежить на висоті 60 м над рівнем моря, між гірською грядою, висотою 350 м і берегом Атлантичного океану.

Для проведення порівняння значень середньої швидкості вітру та добового максимуму швидкості вітру для ст. Сіді-Іфні був обраний вузол моделі 32153. Даний вузол відстоїть на 45,27 км далі від станції, ніж 31152, але різниця висот розташування над рівнем моря станції і вузла 32153 на 132 м менше, ніж у вузла 31152. Метеорологічна станція Танжер розташована в 4,2 км від берегу Атлантичного океану в долині річки, орієнтованої із заходу на схід, вузол 40165 знаходиться в 13,7 км на захід від метеостанції в 3,9 км від узбережжя Гібралтарської протоки. Станція Уджда лежить на висоті 470 м над рівнем моря, в долині між гірським масивом Бені Снассен висотою близько 1500 м, що відокремлює долину від узбережжя Середземного моря, і гірським масивом Таоурірт-Уджда, висотою близько 1700 м над рівнем моря. Станція Рабат розташована в 4,15 км від узбережжя Атлантичного океану на практично плоскій місцевості. Станція Мекнес лежить на висоті 549 м над рівнем моря, в районі Середнього Атласу в центральній частині Марокко.

Верифікація РКМ здійснювалася для періоду 2011-2016 рр. за обраними метеорологічним станціями для значень середньомісячної швидкості вітру (V), середньомісячного добового максимуму швидкості вітру (V_{max}) і середньомісячної загальної кількості хмарності (TC) [91, 92]. Аналізувалися середні значення рядів, середні помилки, мультиплікативні зміщення, середньоквадратичні відхилення, коефіцієнти взаємної кореляції. Результати проведеного аналізу представлені в табл. 2.3.

Таблиця 2.2 – Координати метеостанцій і вузлів моделі

№ п/п	Станція				Вузол сітки моделі			
	Станція	φ, ° півн. ш.	λ, ° зах. д.	Висота над рівнем моря, м	φ, ° півн. ш.	λ, ° зах. д.	Висота над рівнем моря, м	Відстань до станції, км
1	Сіді-Іфні	29°22'	10°11'	66	29°15'	10°15'	302	14,47
					29°45'	09°45'	170	59,74
2	Танжер	35°44'	05°54'	21	35°45'	05°45'	78	13,69
3	Уджа	34°47'	01°56'	470	34°45'	01°45'	520	17,19
4	Рабат	34°03'	06°46'	75	33°45'	07°15'	51	55,73
5	Мекнес	33°53'	05°31'	549	33°45'	05°45'	626	26,52

Таблиця 2.3 – Статистичні характеристики рядів спостережень і середніх по ансамблю моделей рядів та їх помилки

Ряди		Середньомісячна швидкість вітру, м/с					Середньомісячний добовий максимум швидкості вітру, м/с					Середньомісячна загальна кількість хмарності, %				
		<i>V</i>	<i>ME</i>	<i>MB</i>	σ	<i>r</i>	<i>V_{max}</i>	<i>ME</i>	<i>MB</i>	σ	<i>r</i>	<i>TC</i>	<i>ME</i>	<i>MB</i>	σ	<i>r</i>
Сіді-Іфні	спостереж.	3,0	1,8	1,6	0,4	0,4	4,4	3,0	1,7	0,5	0,5	26,6	-1,6	0,9	7,8	0,2
	модельн.	4,8			0,4		7,5			0,6		25,0			4,1	
Танжер	спостереж.	4,8	0,3	1,1	0,9	0,1	8,0	-1,1	0,9	0,9	0,1	40,6	-7,4	0,8	13,5	0,7
	модельн.	5,1			0,3		6,9			0,3		33,2			12,6	
Уджа	спостереж.	3,7	0,7	1,2	0,6	0,1	7,9	-1,0	0,9	1,0	0,1	34,5	4,1	1,1	10,0	0,4
	модельн.	4,3			0,5		6,9			0,4		38,6			7,6	
Рабат	спостереж.	2,5	1,7	1,7	0,5	0,4	5,7	1,5	1,3	0,7	0,5	37,4	-1,2	1,0	10,7	0,5
	модельн.	4,3			0,3		7,2			0,7		36,3			8,8	
Мекнес	спостереж.	2,6	1,4	1,5	0,4	0,3	5,4	1,2	1,2	0,7	0,3	33,8	0,2	1,0	11,4	0,4
	модельн.	4,1			0,3		6,6			0,5		34,0			9,4	

Аналіз статистичних параметрів середнього за ансамблем моделей ряду V показав, що найкращі значення ME (0,3 м/с) і MB (1,1) має модельний ряд на ст. Танжер. Найменшу різницю σ мають середній по ансамблю моделей і спостережуваний ряди на ст. Сіді-Іфні (0,0 м/с). Найбільш високий коефіцієнт кореляції склав 0,4 на ст. Сіді-Іфні та Рабат.

Для V_{max} найкращі значення середньої помилки (-1,0 м/с) і мультиплікативного зсуву (0,9) має модельний ряд на ст. Уджа. Мінімальна різниця σ середнього за ансамблем моделей і спостережуваного рядів дорівнює 0,0 м/с на ст. Рабат. Найбільш високе значення коефіцієнту кореляції мають ряди на ст. Рабат і Сіді-Іфні (0,5).

Аналіз статистичних параметрів для рядів TC показав, що найкращі значення середньої помилки (0,2 %) має модельний ряд на ст. Мекнес і мультиплікативного зсуву (1,0) мають модельні ряди на ст. Мекнес і Рабат. Найменшу різницю σ мають середній за ансамблем моделей і спостережуваний ряди на ст. Танжер (0,9 %). Найбільш високий коефіцієнт кореляції дорівнює 0,7 на ст. Танжер.

В цілому, необхідно відзначити, що моделі з різним ступенем точності відтворюють величину (найкращі показники, що характеризують близькість середніх значень рядів) і мінливість (найменше розбіжність σ рядів і найбільший коефіцієнт кореляції), досліджуваного метеорологічного параметру на тих самих метеостанціях.

На ст. Сіді-Іфні середня помилка ME середнього по ансамблю моделей значення V склала 1,8 м/с, а V_{max} – 3,0 м/с. Найкращі значення ME і MB має модель M1, для V і V_{max} величина ME склала 0,4 м/с і 1,2 м/с, відповідно, величина MB має значення 1,1 і 1,3, відповідно. Різниця σ середнього за ансамблем моделей і спостережуваного рядів склала 0,0 м/с – для V і 0,1 м/с – для V_{max} . Коефіцієнт кореляції для V склав 0,4, для V_{max} – 0,5. Найбільш високу кореляцію для V має ряд моделі M7 (0,5), а для ряду V_{max} ряд моделі M8 (0,6).

Такі розбіжності в значеннях можна пояснити тим, що вузол сітки моделі 32153, для якої проводився розрахунок, лежить на 104 м вище метеостанції, і відповідно до логарифмічного закону зміни швидкості вітру з висотою в приземному шарі, на верхніх рівнях швидкість вітру буде більше. На графіках (рис. 2.2) модельні значення показують чітко виражений річний хід V і V_{max} , хід якого ідентичний ходу V , але має більш згладжений вигляд.

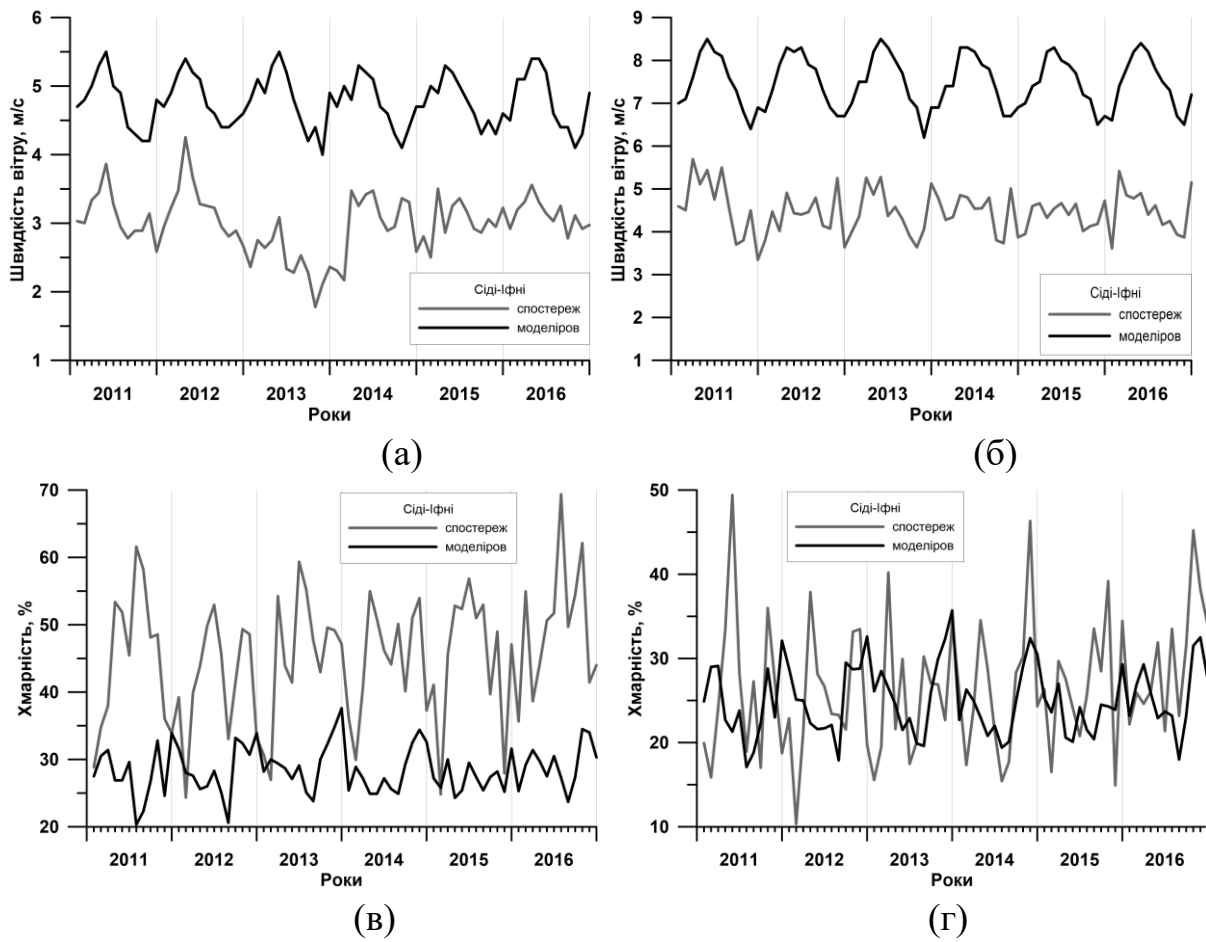


Рисунок 2.2 – Спостережений і модельний ряди: (а) – V (м/с), (б) – V_{max} (м/с) на ст. Сіді-Іфні і в вузлі 32153, (в) – TC (%) ст. Сіді-Іфні в вузлі 31152, (д) – TC (%) ст. Сіді-Іфні в вузлі 32153

На графіку V видно, що в деякі роки присутні вторинні максимуми і мінімуми, які або не простежуються на графіку модельних значень, або мають зрушення в один місяць. Що стосується V_{max} , то необхідно відзначити, що його спостережені значення демонструють нерегулярний річний хід.

Метеостанція Сіді-Іфні лежить в 0,4 км від берега океану, в той час як точка моделей 32153 розташована в 10,3 км від берегової лінії, а вузол моделей 31152 розташований в 3,2 км від берега океану. Тому для верифікації моделей по хмарності були проведені розрахунки статистичних параметрів рядів в обох вузлах (табл. 2.4).

Як видно з таблиці, моделі неоднаково задовільно відтворюють ряд хмарності в різних точках простору. Середня помилка ME для середнього за ансамблем моделей рядом склала -16,9 % у вузлі 31152 і -1,6 % у вузлі

Таблиця 2.4 – Статистичні характеристики рядів спостережень і середніх по ансамблю моделей рядів і їх помилки TC в районі ст. Сіді-Іфні

Ряди	$TC_{2011-2016}, \%$	$ME, \%$	MB	$\sigma, \%$	r
Вузол 31152					
спостереження	45,3	-16,9	0,6	9,4	-0,1
середній за ансамблем моделей	28,5			3,5	
Вузол 32153					
спостереження	26,6	-1,6	0,9	7,8	0,2
середній за ансамблем моделей	25,0			4,1	

32153. Найменше значення ME має ряд моделі М5 у вузлі 31152 (-8,9 %) і ряд моделі М1 у вузлі 32153 (-0,9 %). Оптимальне значення MB мають ряди моделей М5 і М9 в вузлі 31152 (0,8) і ряд моделі М1 в вузлі 32153 (1,0). σ середнього за ансамблем моделей ряду менше σ ряду спостережень на 5,9 % в вузлі 31152 і на 3,7 % в вузлі 32153. Найменшу різницю σ з рядом спостережень має ряд моделі М3 в вузлі 31152 (0,2) і моделі М4 у вузлі 32153 (0,0). Коефіцієнт кореляції дорівнює -0,1 в вузлі 31152 і 0,2 в вузлі 32153, це говорить про слабку зв'язку між рядами.

Відмінності між статистичними параметрами рядів хмарності можуть бути пояснені тим, що в районі Сіді-Іфні з грудня по червень часто повторюються синоптичні умови, при яких відбувається адвекція з акваторії океану шарувато-кучевої хмарності, яка під впливом орोगрафії переходить в адвективний і гірський туман [93, 94] і такий ефект γ -мезомасштабу не враховується в РКМ. Вузол моделі 31152, розташований в районі, на територію якого відбувається адвекція хмарності з акваторії океану, тому в цьому вузлі спостерігається значна різниця між значеннями модельних і фактичних рядів.

На ст. Танжер (рис. 2.3) ME ряду V склала 0,3 м/с, а V_{max} -1,1 м/с. Найбільш низьке значення ME мають ряди моделей М7 і М8 для V (0,2 м/с), і ряд моделі М9 для V_{max} (-0,5 м/с). Оптимальне значення MB мають ряди моделей М7 і М8 (1,0) для V , і ряди М2, М3, М4, М6, М9, М10, М11 для V_{max} (0,9). Різниця σ середнього за ансамблем моделей і спостережуваного рядів склала -0,6 м/с для V і V_{max} . Коефіцієнт кореляції склав 0,1 для рядів V і V_{max} . Найбільш високий коефіцієнт кореляції між

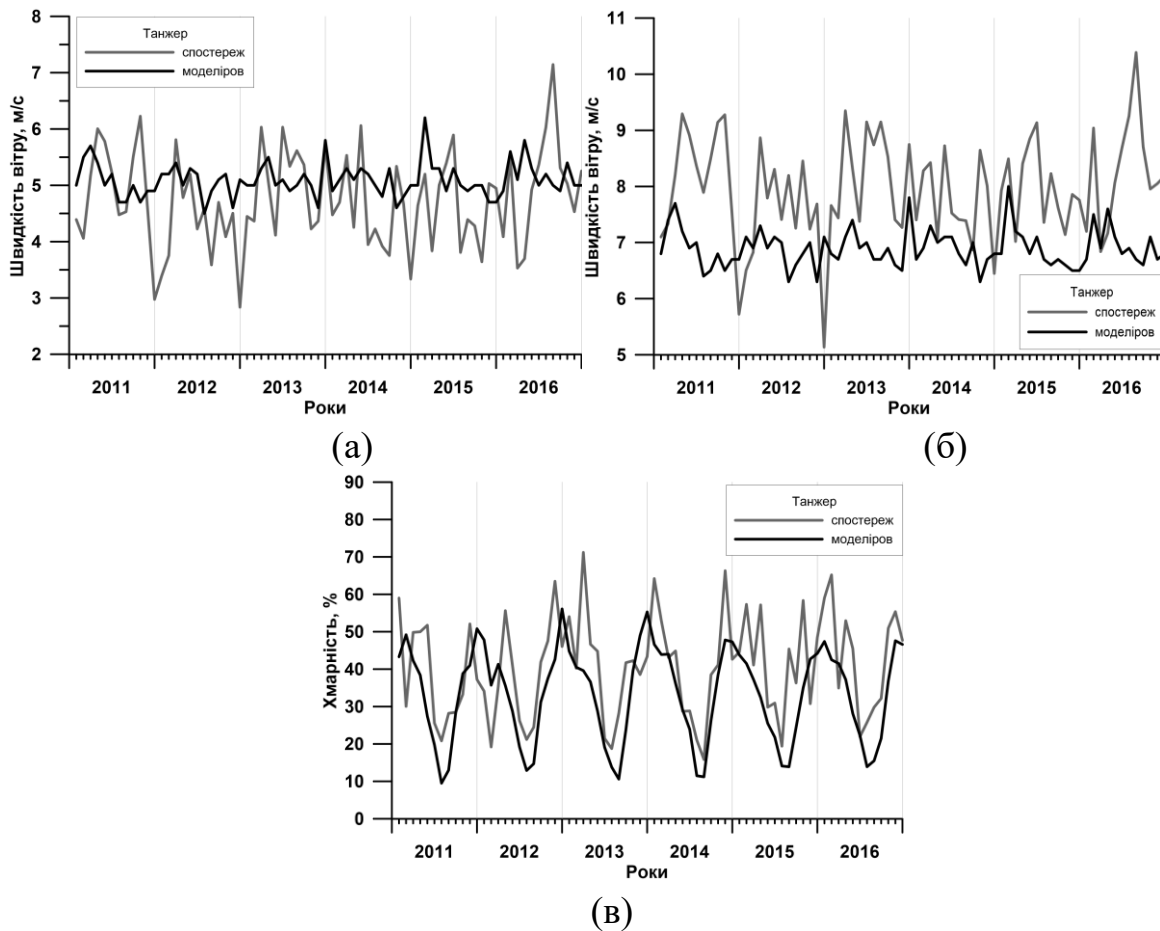


Рисунок 2.3 – Спостережений і модельний ряди: (а) – V (м/с),
(б) – V_{max} (м/с), (в) – TC (%) на ст. Танжер

модельним і спостережуваним рядами має модель M5, для V його значення склало – 0,3 і для V_{max} – 0,2.

Відмінності можуть бути пояснені орографічними ефектами, формою берегової лінії, а також впливом місцевих вітрів. Відмінності в орієнтації берегової лінії створює складну бризову циркуляцію. Район Гібралтарської протоки протягом року перебуває під впливом вітру Леванту і його контрагента Поніенте, а також місцевого вітру Вендаваль. Левант має східний напрямок і спостерігається з липня по жовтень і у березні, Поніенте – західний і має місце в інші місяці. Навесні (з лютого по травень) і восени (з жовтня по грудень) ці вітри можуть досягати штормової сили, а влітку (з червня по вересень) їх сила не перевищує швидкості помірного бризу [95]. Вендаваль штормовий південно-західний або південно-східний вітер, що дме з Марокко на узбережжя Іспанії, може досягати сили урагану, і найчастіше спостерігається у період з жовтня по січень [96].

Середня помилка ME і мультиплікативне зміщення MB середнього за ансамблем моделей ряду TC склали $-7,4\%$ і $0,8$, відповідно. Найбільш низьке значення ME і оптимальне значення MB має ряд моделі $M9$ ($0,9\%$ і $1,0$, відповідно). σ середнього за ансамблем моделей ряду менше σ ряду спостереження на $0,9\%$. Коефіцієнт кореляції дорівнює $0,7$, що говорить про високий зв'язок між даними рядами. Найбільш високий коефіцієнт кореляції мають ряди моделей $M6$ і $M10$ ($0,6$).

Для ст. Уджа (рис. 2.4) середня помилка ME середнього за ансамблем моделей ряду V склала $0,7$ м/с, для V_{max} вона дорівнює $-1,0$ м/с. Найбільш низьке значення ME мають ряди моделей $M7$, $M8$, $M10$ ($0,7$ м/с) для V і ряди моделей $M2$ і $M6$ ($-0,6$ м/с) для V_{max} . σ ряду за ансамблем моделей менше σ ряду спостережень на $0,1$ м/с для V і на $0,6$ м/с для V_{max} .

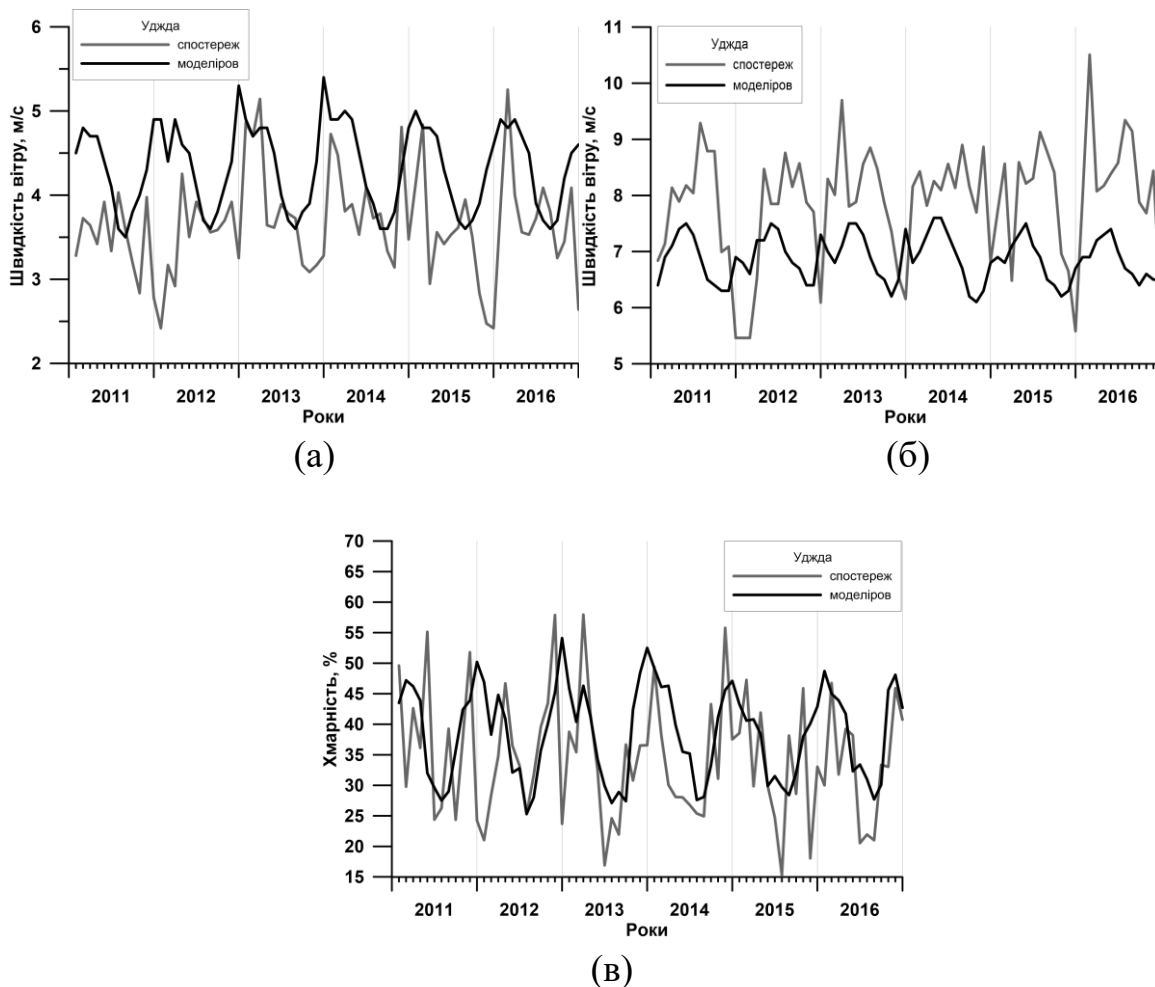


Рисунок 2.4 – Спостережений і модельний ряди (а) – V (м/с), (б) – V_{max} (м/с), (в) – TC (%) ст. Уджа

Коефіцієнт кореляції для рядів V і V_{max} дорівнює 0,1, що свідчить про слабкий зв'язок між модельним і спостережуваним рядами. Найбільш високі значення коефіцієнта кореляції має ряд моделі M1 (0,3) для V і ряд моделі M10 (0,3) для V_{max} . Ці відмінності можна пояснити тим, що дана область знаходиться в районі зі складним рельєфом місцевості, де величина швидкості вітру формується під впливом місцевої гірничо-долинною циркуляції повітря.

Середня помилка ME середнього за ансамблем моделей ряду TC склала 4,1 %, найнижче значення ME має ряд моделі M2 (0,4 %). Мультиплікативне зміщення MB склало 1,1, оптимальне значення MB мають ряди моделей M2, M4, M8, M10 (1,0). σ середнього за ансамблем моделей ряду менше σ ряду спостереження на 2,4 %. Коефіцієнт кореляції має значення 0,4, що говорить про помірну зв'язку між даними рядами. Найбільш високий коефіцієнт кореляції має ряд моделі M1 (0,4).

На ст. Рабат (рис. 2.5), ME середнього за ансамблем моделей ряду V має значення 1,7 м/с, а ряду V_{max} – 1,5 м/с. Найбільш низькі значення ME для V і V_{max} має ряд моделі M1 для (0,6 м/с і 0,9 м/с, відповідно).

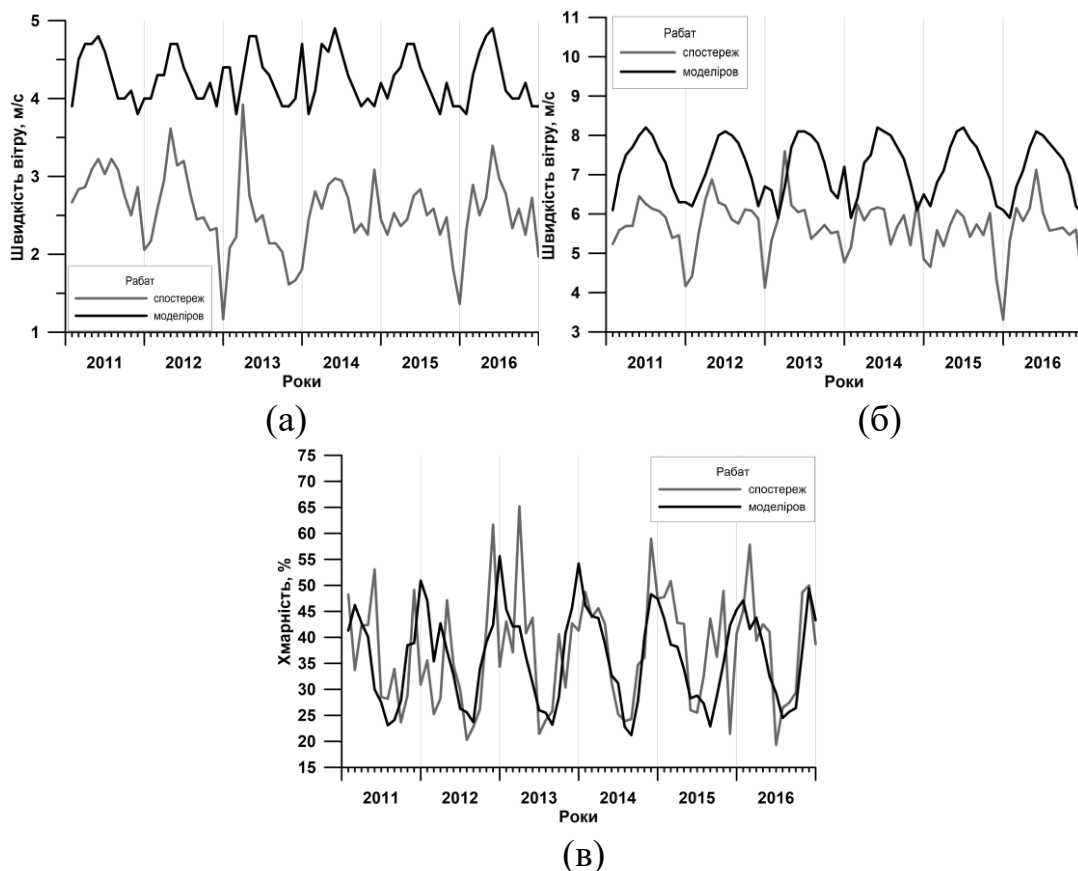


Рисунок 2.5 – Спостережений і модельний ряди (а) – V (м/с), (б) – V_{max} (м/с), (в) – TC (%) ст. Рабат

Мультиплікативне зміщення MB середнього за ансамблем моделей ряду V склало 1,7, для ряду V_{max} – 1,3. Оптимальне значення MB має ряд моделі M1 (1,3) для V , і ряди моделей M1 і M5 для V_{max} (1,2). σ середнього за ансамблем моделей ряду V менше середнього ряду спостережень на 0,2 м/с, різниця σ даних рядів для V_{max} склала 0,0 м/с. Коефіцієнт кореляції середнього за ансамблем моделей і ряду спостережень склав 0,4 для ряду V і 0,5 для ряду V_{max} . Найбільш високі коефіцієнти кореляції мають ряди моделей M1 і M10: 0,5 для V і 0,6 для V_{max} .

Відмінності в статистичних параметрах рядів V можна пояснити тим, що вузол 37161, для якого проводилися розрахунки, знаходиться на відстані 55,73 км на північний захід від метеостанції, а відповідно до [97] значення V збільшується з півночі на південь уздовж атлантичного узбережжя Марокко.

Середня помилка ME середнього за ансамблем моделей ряду TC має значення -1,2 %, найменше її значення має ряд моделі M6 (1,1 %) Мультиплікативне зміщення середнього за ансамблем моделей ряду склало 1,0, найкраще його значення має ряд моделі M6 (1,0). σ середнього за ансамблем моделей ряду менше на 1,9 % σ ряду спостережень. Коефіцієнт кореляції склав 0,5, що відповідає наявності помітної зв'язку між двома рядами. Найбільш високе його значення має ряд моделі M6 (0,5).

Аналіз статистичних параметрів рядів V і V_{max} на ст. Мекнес (рис. 2.6) показав, що середня помилка ME середнього за ансамблем моделей ряду склала 1,4 м/с для V і 1,2 м/с для V_{max} . Найбільш низьке значення ME має ряд моделі M1, його значення для V дорівнює -0,2 м/с, та -0,5 м /с для V_{max} . Мультиплікативне зміщення MB середнього за ансамблем моделей ряду має значення 1,5 для V та 1,2 для V_{max} . Оптимальне значення MB має ряду моделі M1, його величина склала 0,9 для рядів V і V_{max} . Різниця σ даних рядів дорівнює -0,1 м/с для ряду V і -0,2 м/с для V_{max} . Коефіцієнт кореляції для обох рядів дорівнював 0,3. Найбільш високе його значення склало 0,3 для рядів моделей M1, M9, M10 для V та рядів моделей M1, M10 для V_{max} .

Відмінності в статистичних параметрах рядів можна пояснити тим, що ст. Мекнес розташована в районі зі складною орографією, яка створює дрібномасштабні ефекти, що впливають на формування режиму вітру в цьому районі.

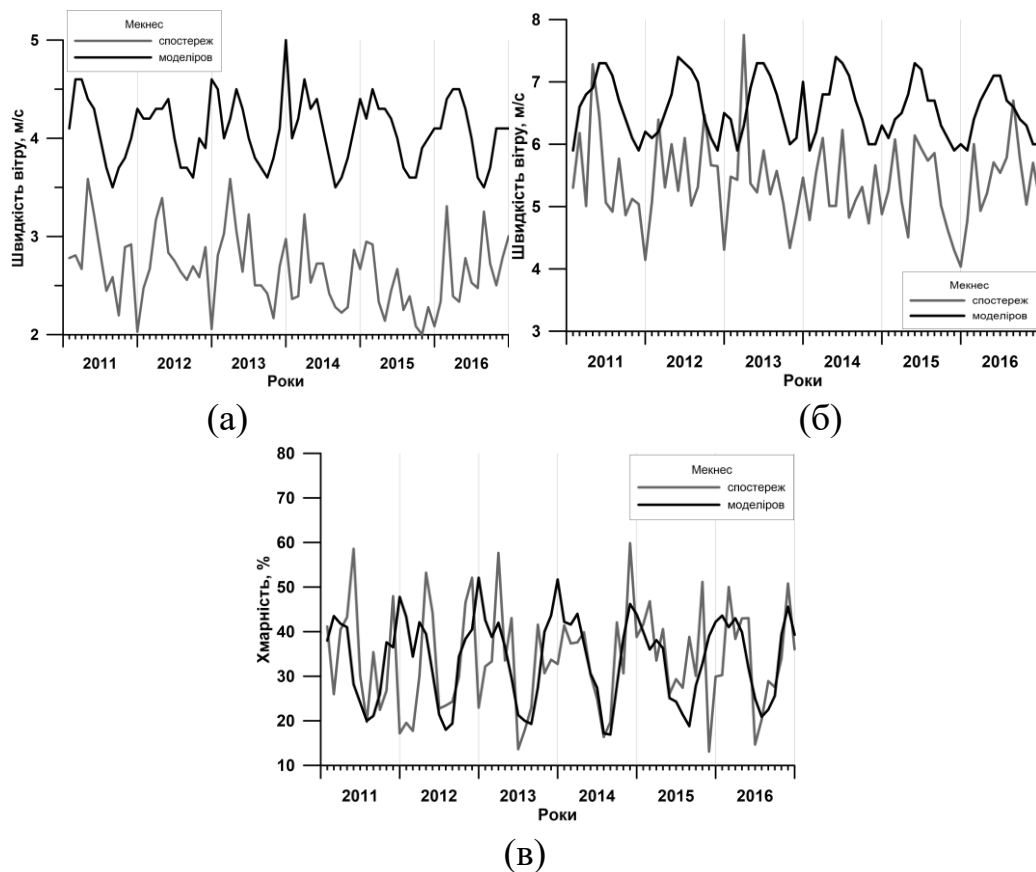


Рисунок 2.6 – Спостережений і модельний ряди (а) – V (м/с),
(б) – V_{max} (м/с), (в) – TC (%) ст. Мекнес

Середня помилка ME середнього за ансамблем моделей ряду TC на ст. Мекнес склала 0,2 %, найменше її значення має ряд моделі М6 (-0,2 %). Мультиплікативне зміщення MB середнього за ансамблем моделей ряду має значення 1,0. Оптимальне значення MB мають ряди моделей М1, М6, М11 (1,0). σ модельного ряду менше на 2,0 % ніж σ ряду спостережень. Коефіцієнт кореляції між спостережуваним і середнім за ансамблем моделей рядами склав 0,4. Найбільш високе його значення має ряд моделі М6 (0,4).

2.3 Питома потужність вітрового потоку

Питома потужність вітрового потоку є енергетичною характеристикою вітру, що залежить від повторюваності швидкостей вітру і характеру підстильної поверхні в конкретній місцевості. Швидкість вітру є випадковою функцією часу. Найбільш точний опис швидкості вітру для

умов рівнинній місцевості можна отримати за допомогою розподілу Вейбулла-Гудріча [98]:

$$f(v) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\gamma-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\gamma} \right], \quad (2.4)$$

де V – швидкість вітру, β – параметр розподілу (м/с), відповідальний за масштаб ($\beta = 1,1\bar{V}$), γ – параметр розподілу, що характеризує форму кривої. Параметр γ розраховується за формулою [43]

$$\gamma = C_V^{-1,086}, \quad (2.5)$$

де C_V – коефіцієнт варіації, ($C_V = \frac{\sigma}{\bar{V}}$). Розподіл Вейбулла, в разі, коли параметр $\gamma = 1$, носить назву експоненціального розподілу, при $\gamma = 2$ – розподілу Релея, при $\gamma = 3$ розподіл наближається до нормального (Гауссова) [99]. Так як, спостережувані величини вітру демонструють частотні розподіли, які добре описуються за допомогою розподілу Релея, то виробники використовують даний розподіл при розрахунку стандартних показників продуктивності для вітряних турбін. На величину параметра γ впливає місцевий вітровий клімат і ландшафт місцевості, для якої проводять розрахунки. Низьке значення параметру $\gamma < 1,8$ характерно для вітрового клімату, переважно сформованого під впливом місцевих вітрів термічного походження. Високе значення параметра $\gamma > 2,5$ характерно для вітрового клімату, що відрізняється постійністю вітрових характеристик (наприклад, пасатів). Обидва параметри, β і γ , залежать від висоти над підстильною поверхнею, до висоти 100 м їх значення зростають, вище 100 м величина параметра γ зменшується [100].

Питому потужність вітрового потоку можна оцінити за допомогою формули [98]:

$$N_E = \frac{1}{2} \rho \beta^3 \Gamma \left(\frac{3}{\gamma} + 1 \right), \quad \left[\frac{Bm}{m^2} \right] \quad (2.6)$$

де N_E – питома потужність вітрового потоку, ρ – густина повітря ($1,226 \text{ кг/м}^3$), $\Gamma \left(\frac{3}{\gamma} + 1 \right)$ – гамма функція. Для розрахунку гамма функції, був використаний інтерполяційний вираз, який при значеннях $x < 60$ має похибку менше 10^{-4} [101]:

$$\Gamma(x) \cong \frac{\sqrt{\frac{2\pi}{y}} \exp\{y[\ln(y)-1] + \frac{1}{12y}\}}{x(x+1)(x+2)(x+3)(x+4)(x+5)}, \quad (2.7)$$

де $y = x + 6$. Такий підхід був запропонований в ряді досліджень [43, 101-103], присвячених розрахунку вітроенергетичних показників, показав хороші результати і використовувався при плануванні розміщення ВЕУ.

2.4 Висновки до розділу 2

Для верифікації результатів розрахунку РКМ використовувалися статистичні характеристики і методи: середнє арифметичне, середня помилка, мультиплікативне зміщення, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт взаємної кореляції Пірсона.

Верифікація показала, що незважаючи на існуючу різницю в просторовому масштабі і репрезентативністю поданих даних спостережень і результатів моделювання, середній за ансамблем моделей часовий ряд середньомісячних значень є близьким до середніх значень спостережених метеорологічних параметрів. Різниця може бути викликана розбіжністю локалізації в просторі, існуванням в районах зі складною орографією та на берегах морів факторів, що впливають на формування режиму вітру та хмарності, які недостатньо враховуються в кліматичних моделях. Регіональні кліматичні моделі забезпечують більш задовільні результати моделювання часових змін швидкості вітру на станціях, що лежать в рівнинних районах, у порівнянні зі станціями, розташованими в гірській місцевості або на узбережжі з викривленою береговою лінією. Результати верифікації моделей по хмарності показали, що модельні ряди мають близькі значення до фактичних рядів, коефіцієнти кореляції між ними є більш високими, ніж для рядів швидкостей вітру. Причиною цього служить той факт, що дані спостережень за хмарністю наведені у вигляді регулярної сітки, а також мінімальною відстанню у просторі вузлів модельної сітки та реаналізу.

Можна зробити висновок, що, не дивлячись на те, що моделі в різних районах Марокко з різним ступенем точності відображають досліджувані кліматичні параметри, їх результати можна розглядати як вхідні дані при аналізі майбутніх станів кліматичної системи в даному регіоні.

РОЗДІЛ 3

ЗАПАСИ ВІТРОВИХ РЕСУРСІВ В МАРОККО

В НАЙБЛИЖЧІ 30 РОКІВ

Швидкість вітру є ключовою кліматичною характеристикою, яка представляє інтерес для досліджень в галузі відновлюваної енергетики в Середземноморському регіоні, включаючи Марокко [104]. Як було сказано в розділі 1 Марокко має великі вітрові ресурси. Основні вітрові парки, які будуть побудовані к 2020 року, будуть розташовані на півночі в районі Гібралтарської протоки, на Атлантичному узбережжі в районі Ес-Сувейри, Тарфайї і Ель-Аюна, в центрі країни в районі міста Мідельт в області Мекнес – Тафілалет. Виникають питання: чи збережеться в цих районах і в подальшому високий вітровий потенціал? І яким буде розподіл по території Марокко показників вітру у 2021-2050 рр.?

3.1 Проекції швидкості вітру для періоду 2021-2050 рр.

3.1.1 Просторовий розподіл середньої швидкості вітру

На основі середньомісячних значень швидкості вітру ($h = 10$ м), отриманих в результаті розрахунку РКМ, було розраховано середнє значення швидкості вітру (V_{cp}) для періоду 2021-2050 рр. Найменші величини V_{cp} прогноуються в районі міста Бені-Меллаль, розташованого в горах Середнього Атласу (рис. 3.1), і складуть 3,7 м/с. Максимальна V_{cp} може досягати 8,5 м/с в районі мису Барбас на ділянці Атлантичного узбережжя на південь від селища Дахла. В цілому на узбережжі моделі прогноують швидкості вітру більше 5 м/с, в районі Марокканської Месети (Центральне марокканське плато) і біля підніжжя Антиатласу на плоскогір'ї Хамада ду Драа середня швидкість вітру не перевищить 4 м/с.

Порівняння результатів розрахунку РКМ з даними спостереження на метеорологічних станціях Марокко за період 2005-2014 рр. [105-108] показало, що моделі прогноують схожий розподіл по території швидкості вітру, але з більш високими значеннями (від 0,5 до 2,3 м/с). Найбільші зміни швидкості вітру, моделі показали в центральних гірських районах і

на узбережжі Атлантичного океану від міста Агадир до Гібралтарської протоки, найменші на Атлантичному узбережжі на південь від міста Тан-Тан. У місцях розміщення основних вітропарків прогнозоване збільшення швидкості вітру складе: близько 2,3 м/с в районі Ес-Сувейри, на 0,6 м/с в районі Танжера, 0,9 м/с в районі Тетуана і близько 0,5 м/с в районі Ель-Аюна і Тарфайі. Аналогічні зміни в швидкості вітру в районі Танжера і Ес-Сувейри показало дослідження, проведене італійськими вченими в рамках проекту CLIM-RUN [47].

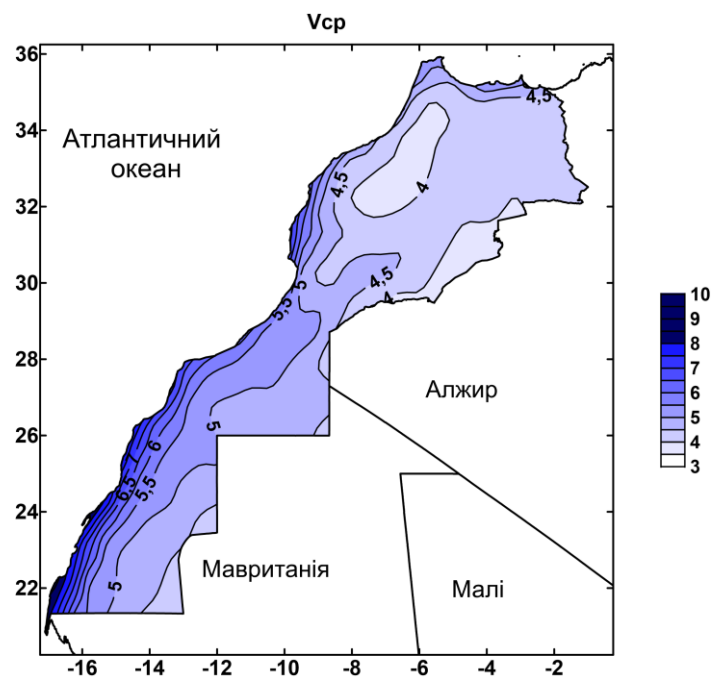


Рисунок 3.1 – Середня швидкість вітру (м/с) за ансамблем моделей для періоду 2021-2050 рр.

Як було сказано в п. 1.2.1, в першому наближенні вітроенергетичний потенціал можна оцінити по рівню середньої річної швидкості вітру, яка повинна бути ≥ 5 м/с на висоті 10 м над землею поверхнею, а в якості перспективних для розміщення ВЕУ приймають райони, де середньорічна швидкість на висоті 44 м дорівнює або перевищує 8 м/с (це приблизно 5,7 м/с на висоті 10 м) [25]. Результати розрахунків РКМ показали, що територія Марокко може бути розділена на 4 вітроенергетичні зони за величиною середньої швидкості вітру (рис. 3.2): I зона – до 4 м/с, II зона – 4-5 м/с, III зона – 5-7 м/с, IV зона – 7 м/с і більше [107].

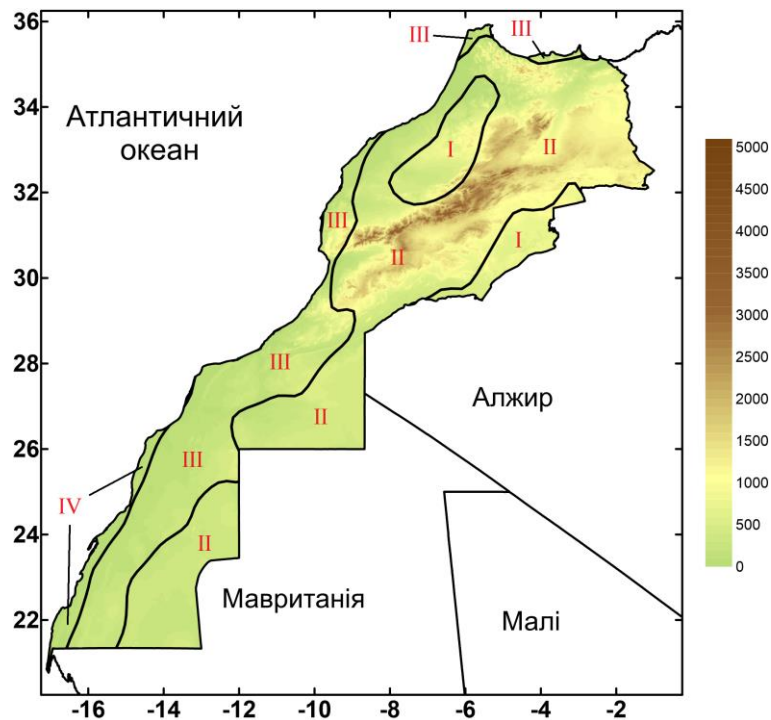


Рисунок 3.2 – Вітроенергетичні зони Марокко (в кольорі рельєф місцевості)

В першу зону включені центральні райони, що знаходяться на території адміністративних областей Фес – Мекнес і Бені-Меллаль – Хеніфра, розташовані в районі Марокканської Месети і західній частині долини Гарб, а так само плоскогір'я Хамада ду Драа, що лежить біля підніжжя південно-східних схилів Антиатласу в області Драа – Тафілалет.

Найбільша за площею друга зона містить в собі гірські райони Ер-Рифу, Середнього, Високого Атласу і Антиатласу, Алжиро-Марокканську Месету, прибережні Атлантичному океану долини Гарб і Дуккала, і внутрішні райони адміністративних областей Гулімім – Уед-Нун, Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра, Дахла – Уед-ед-Дахаб.

До третьої зони віднесені ділянка Середземноморського узбережжя між містами Надор і Ель-Хосейма; територія, що примикає до Гібралтарської протоки в адміністративній області Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма; ділянка узбережжя Атлантичного океану від міста Ель-Джадіда до мису Гір; і частина території на південь від Агадира в адміністративних областях Гулімім – Уед-Нун, Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра, Дахла – Уед-ед-Дахаб.

Найбільші швидкості вітру будуть відзначатися в четвертій зоні, яка займе смугу узбережжя Атлантичного океану шириною 25-40 км від мису Буждур до південного кордону з Мавританією.

3.1.2 Міжрічний хід середньорічної швидкості вітру

Одним з статистичних методів, який дозволяє виявити закономірності або тенденції в розвитку явища, є метод аналітичного вирівнювання. В даному методі фактичні рівні ряду динаміки замінюються теоретичними, розрахованими на основі рівняння певної кривої, що відбиває загальну тенденцію розвитку явища. Тенденцію розвитку зображують кривою, параболою, гіперболою і прямою лінією. Найбільш простим випадком, що дозволяє визначити загальну динаміку зміни величини є пряма лінія. Математичне рівняння, за допомогою якого можна провести оцінку простої (парної) лінійної регресії має вигляд:

$$y = ax + b, \quad (3.1)$$

де x є незалежною змінною або предиктором, а y – залежна змінна або змінна відгуку, a – кутовий коефіцієнт або градієнт оціненої лінії; вона являє собою величину, на яку y збільшується в середньому, якщо ми збільшуємо x на одну одиницю, b – вільний член (перетин) лінії оцінки, значення y при $x = 0$. Коефіцієнти a і b називають коефіцієнтами регресії оціненої лінії. Вибіркові оцінки коефіцієнтів лінійної регресії можна представити у вигляді [109]:

$$a = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - N \cdot \bar{X} \cdot \bar{Y}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - N \cdot \bar{X}^2}, \quad (3.2)$$

$$b = \bar{Y} - a \cdot \bar{X}, \quad (3.3)$$

де N – довжина ряду, $\bar{X}$ та $\bar{Y}$ – середні значення рядів.

Величина коефіцієнта a показує на скільки змінюється наступне значення часового ряду. Якщо величина $a > 0$, то динаміка зростання позитивна, якщо $a < 0$ – негативна.

Висновок про статистичну значущість коефіцієнта лінійної регресії a роблять на основі проведення перевірки гіпотези за допомогою критерію Стьюдента t [110]

$$t = \frac{|a|}{\sigma_a}, \quad (3.4)$$

де σ_a – стандартне відхилення коефіцієнта регресії a , яке обчислюється:

$$\sigma_a = \frac{S_y}{S_x \sqrt{N}}, \quad (3.5)$$

де

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}, \quad (3.6)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2}. \quad (3.7)$$

У разі якщо $t > t_{кр}(\alpha, v)$, то коефіцієнт регресії a є статистично значущим на рівні значущості α . Якщо $t < t_{кр}(\alpha, v)$, то коефіцієнт a вважають статистично незначущим.

На основі розрахованих середньорічних значень швидкості вітру, в кожному вузлі сітки був проведений розрахунок коефіцієнтів лінійної регресії a і b . Аналіз величини коефіцієнта a , дозволяє оцінити динаміку зміни середньорічної швидкості вітру в досліджуваному періоді в даній точці простору. На рис. 3.3 представлено розподіл коефіцієнта A по території Марокко. Аналіз показав, що велика частина території буде характеризуватися негативними значеннями A , з найбільшою тенденцією до зменшення середньорічної швидкості вітру в районі Атлаських гір і Антиатласу (від -0,04 до -0,11 м/с за 30 років). Зростання швидкості вітру

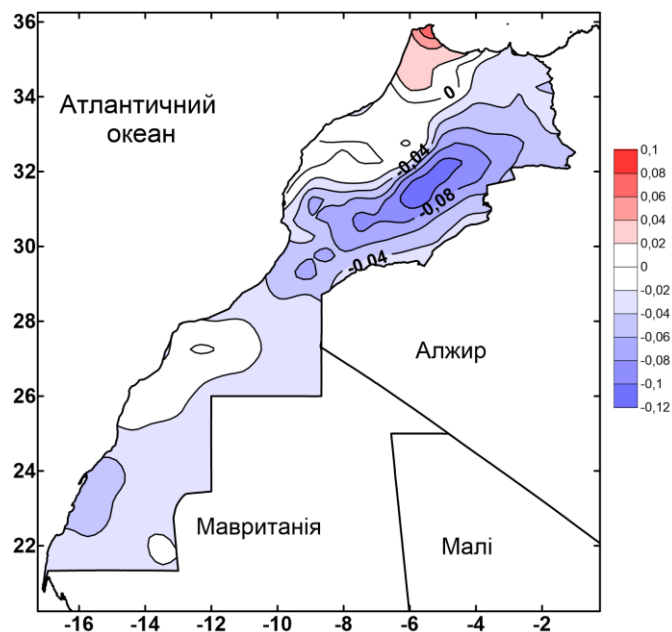


Рисунок 3.3 – Коефіцієнт лінійної регресії A (м/с) за 30 років середньорічної швидкості вітру в період 2021-2050 рр.

можна очікувати на півночі Марокко в районі Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма (від 0,02 до 0,07 м/с за 30 років). На решті частини території очікується нульова тенденція швидкості вітру або незначне зменшення.

Для перевірки рівня значущості коефіцієнта (a) були обрані ряди швидкостей вітру в точках з найбільшими по модулю значеннями (a), та точки розташовані в різних районах Марокко (табл. 3.1, рис. 3.4).

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти лінійної регресії швидкості вітру і фактичні значення критерію Стюдента

Вузол сітки	Координати вузла		Коефіцієнти регресії			Критерій Стюдента		
	Широта, ° пн. ш.	Довгота, ° зх. д.	A	a	b	t	$t_{кр}$ ($\alpha=0,1$)	$t_{кр}$ ($\alpha=0,05$)
40165	35,75	-5,59	0,067	0,0022	5,028	1,85	1,7	2,05
40161	33,75	-5,59	-0,006	-0,0002	4,039	0,90	1,7	2,05
37161	33,75	-7,05	-0,017	-0,0006	4,241	0,90	1,7	2,05
19136	21,25	-15,79	-0,02	-0,0007	5,401	1,03	1,7	2,05
25141	23,75	-12,88	-0,027	-0,0009	4,624	0,79	1,7	2,05
48163	34,75	-1,71	-0,035	-0,0012	4,339	1,90	1,7	2,05
19139	22,75	-15,79	-0,043	-0,0014	6,423	1,09	1,7	2,05
31152	29,25	-9,96	-0,054	-0,0018	5,289	0,74	1,7	2,05
33152	29,25	-8,99	-0,066	-0,0022	5,031	2,22	1,7	2,05
40156	31,25	-5,59	-0,111	-0,0037	4,279	2,60	1,7	2,05

Аналіз показав, що при $\alpha = 0,05$ значущими є коефіцієнти в вузлах, що потрапляють на територію гірських районів Антиатласу. Вузол 40156, знаходиться неподалік від міста Тінгір в області Драа – Тафілалет і вузол 33152, розташований поблизу міста Фам ель Хісна в області Сус – Масса. При $\alpha = 0,1$ значущими є додатково коефіцієнти в вузлі 40165, розташованому біля міста Танжер в області Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма і в вузлі 48163, що знаходиться біля міста Уджда в Східній області.

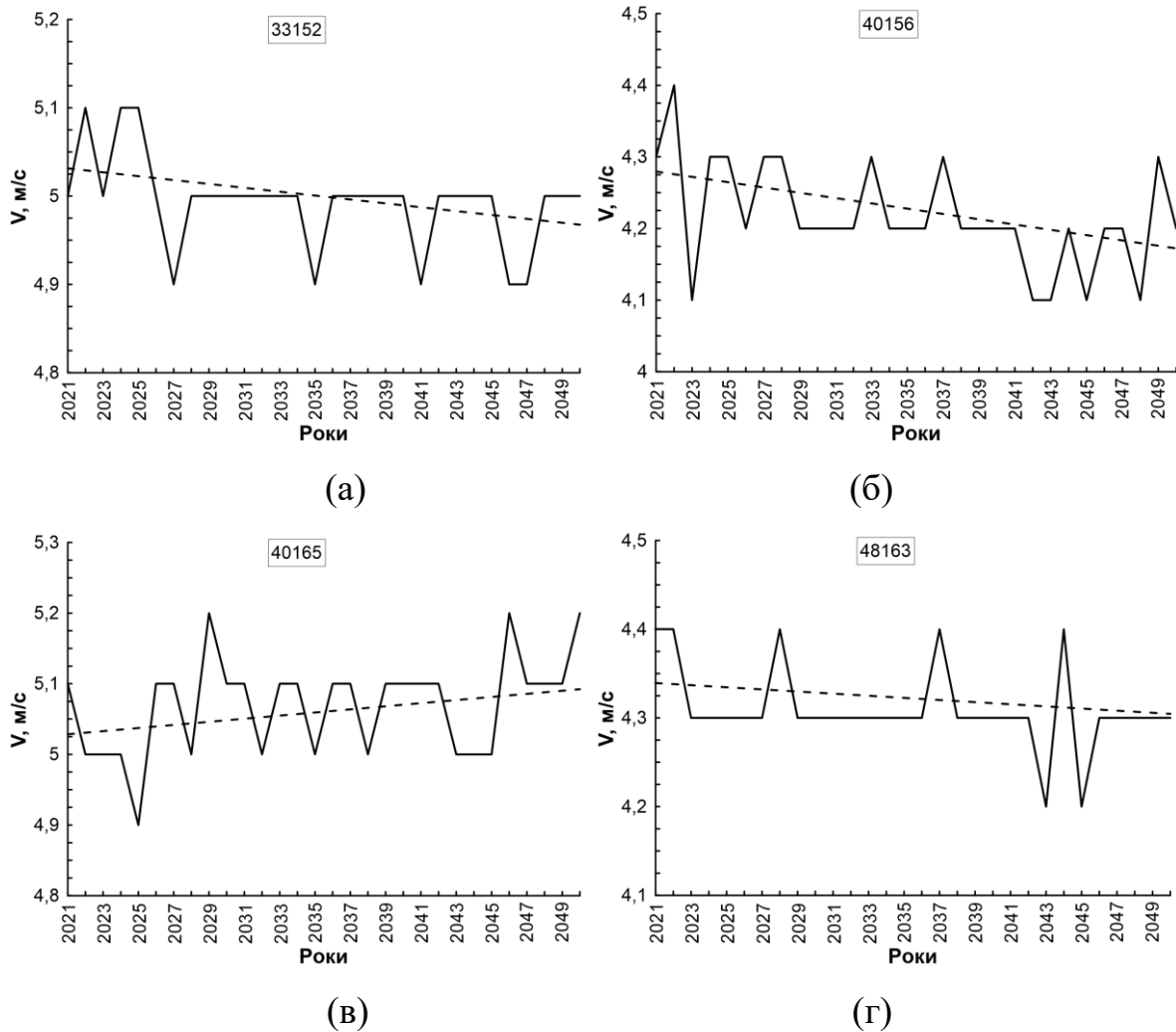


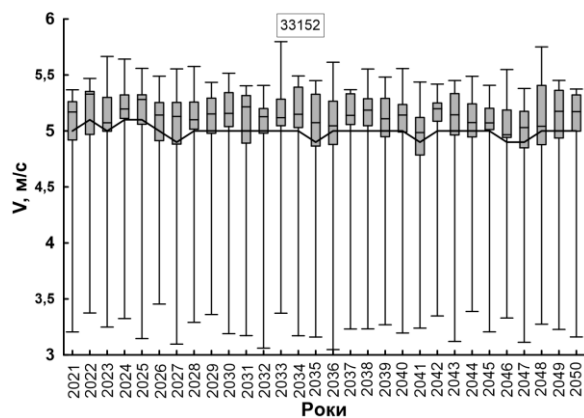
Рисунок 3.4 – Середньорічна швидкість вітру (м/с) (суцільна лінія), лінійний тренд (пунктирна лінія) у вузлах сітки моделей: (а) – 33152, (б) – 40156, (в) – 40165, (г) – 48163

З причини різних підходів і систематичних помилок, якість розрахунків різних кліматичних моделей неоднакова. Для кожної величини для кожного місяця були отримані ряди з 11 значень розраховані

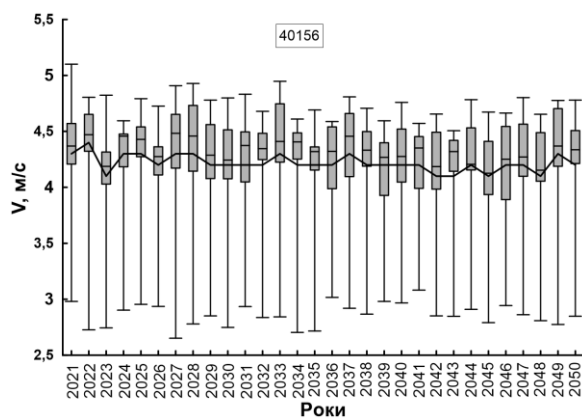
моделями. Значення в такому ряду знаходяться в певному інтервалі, і їх розподіл може не відповідати нормальному закону. В такому випадку, в якості графічної ілюстрації емпіричного розподілу, зручно використовувати діаграму типу «ящик з вусами», яка надає діагностичну, описову і наочну інформацію про досліджувану сукупність емпіричних даних [111]. Середнє арифметичне (математичне очікування) має деякі недоліки, наприклад, в деяких розподілах з'являються великі значення, які спотворюють середню величину. Оцінкою менш схильною до спотворення, в результаті появи великих значень у вибірці є медіана. Медіана – це одна з характеристик розподілу випадкової величини, таке число, яке ділить ранжований (тобто побудований в порядку зростання або зменшення) варіаційний ряд на дві рівні частини, з яких значення однієї половини менше медіани, а інший – більше. Важливе значення медіана набуває при аналізі асиметричних рядів. Медіану можна використовувати в тих випадках, коли досліджувана сукупність неоднорідна.

До переваг медіани слід віднести те, що вона менш схильна до випадковостей вибірки, ніж середня арифметична [112]. При аналізі розподілу потрібно виділити 5 квантилів, які становлять найбільший інтерес: мінімум, нижня квартиль (25 % або 25-ий перцентиль), медіана *Me*, верхня квартиль (75 % або 75-й перцентиль) і максимум. Графічно це зображено на діаграмі «ящик з вусами». Верхня і нижня кришки «ящика» задають положення квартилей 25 % і 75 %, та визначають область 50 % значень навколо центру розподілу. Положення медіани (лінія всередині «ящика») щодо кришок визначає асиметрію без урахування аномальних значень. Верхній і нижній «вуса» визначають по 50 % найбільш сильних негативних і позитивних аномалій [113, 114]. На рис. 3.5 представлені діаграми «ящик з вусами», побудовані для рядів середньорічної швидкості вітру для вузлів в яких тенденція має найбільшу величину.

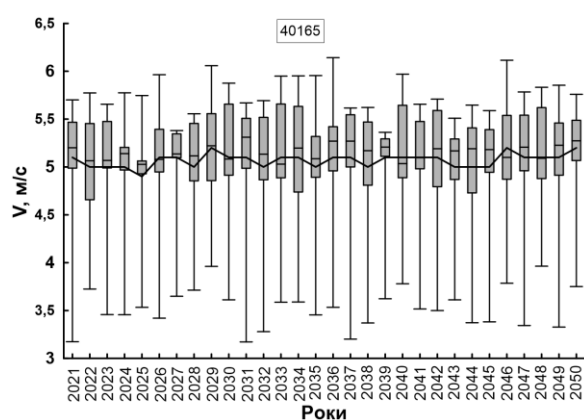
Аналіз показав, що в більшості випадків для всіх обраних вузлів середні по ансамблю моделей значення швидкості вітру менше медіани ансамблевих значень на 0,1-0,2 м/с. Розкид значень 25-го перцентилі становить 0,2-0,3 м/с, а 75-го перцентилі – 0,2-0,5 м/с. Різниця величини середньорічної загальної кількості хмарності між 25-й і 75-й перцентиліями становить в середньому 0,3 м/с. Це свідчить про незначне розходження в значеннях розрахованих моделями і про репрезентативності середніх по ансамблю моделей величин.



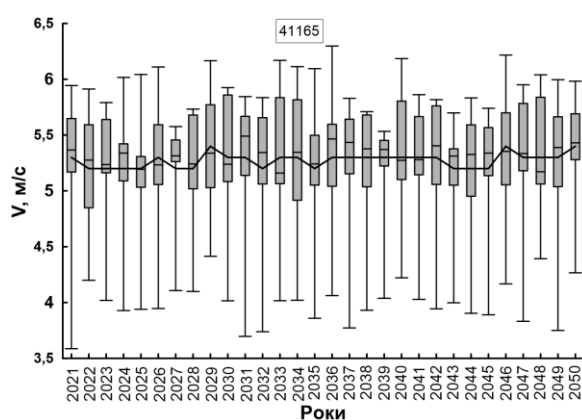
(а)



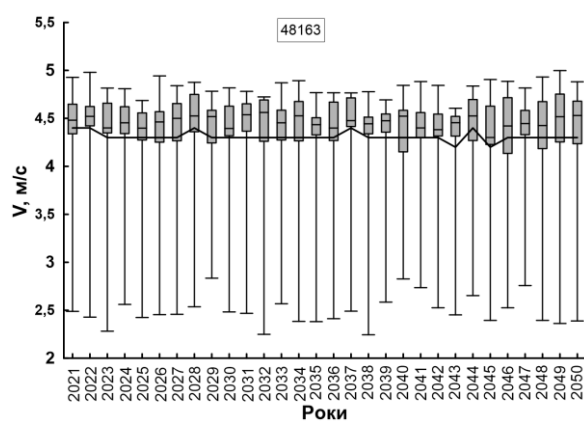
(б)



(в)



(г)



(д)

Рисунок 3.5 – Міжрічний хід швидкості вітру (м/с) в вигляді «ящика з вусами» в вузлах: (а) – 33152, (б) – 40156, (в) – 40165, (г) – 4165, (д) – 48163

3.1.3 Річні зміни швидкості вітру

Основний інтерес в моделюванні вітру сфокусований на короткостроковому (прогноз поточної погоди) і сезонному прогнозуванні, оскільки найбільша частина ризиків пов'язаних з управлінням зосереджена в цих часових масштабах [104]. Річний хід середньої швидкості вітру має велике значення в оцінці вітроенергетичного потенціалу окремої місцевості і надає важливу інформацію про ефективність використання ВЕУ, з точки зору узгодженості графіка надходження вітрової енергії, з графіком енергетичного навантаження споживачів [115].

Розрахунки РКМ показали, що для території Марокко найменші значення середньомісячної швидкості вітру можуть відзначатися в серпні-вересні в гірських районах Середнього Атласу розташованих на території адміністративної області Фес – Мекнес і складати близько 2,9 м/с [116]. Найбільші значення складуть близько 9,0 м/с в червні на узбережжі Атлантики на південь від селища Дахла (рис. А.2-А.3). Характер річного ходу швидкості вітру буде неоднаковий в різних частинах Марокко.

У I вітроенергетичній зоні протягом усього року величина середньомісячної швидкості вітру буде в межах 3-4,5 м/с. У квітні вона буде досягати максимальної величини (близько 4,5 м/с). З вересня по січень її величина не перевищить 3,5-4,0 м/с. На ділянці розташованому за хребтом Атлаських гір на кордоні з Алжиром середньомісячна швидкість вітру буде перебувати в межах 3,0-4,0 м/с.

II вітроенергетична зона – найбільш велика за площею, на її території розташовані райони з різними фізико-географічними умовами, це знаходить своє відображення в характері річного ходу швидкості вітру в різних її частинах. В центрі і на північному сході країни, куди входять гірські райони Середнього і Високого Атласу, та Алжиро-Марокканська Месета з грудня по квітень прогнозується збільшення середньомісячної швидкості вітру (від 4,0 до 5,0 м/с і більше), а з червня по жовтень її значення будуть знижуватися до 3,0-4,0 м/с. У південній частині, куди входять райони, розташовані на південь від Атлаських гір, що примикають до кордону з Мавританією, збільшення середньомісячної швидкості вітру прогнозується з квітня по серпень (4,5-6,0 м/с), а її зниження – з жовтня по лютий (3,5-4,5 м/с).

У III вітроенергетичній зоні річний хід швидкості вітру матиме такі особливості. На ділянках, розташованих на березі Середземного моря,

протягом усього року швидкість вітру буде зберігати значення близькі 5 м/с. У період з лютого по квітень її величина буде перевищувати 5,5 м/с, у вересні, січні, травні та червні вона буде перебувати в межах 5,0-5,5 м/с. В інші місяці швидкості вітру матиме значення 4,5-5,0 м/с. У липні-серпні величина 5,0 м/с і більше буде відзначатися тільки на незначній по площі ділянці біля міста Танжер.

На ділянці Атлантичного узбережжя між містами Ель-Джадіда і Агадір зростання середньомісячної швидкості вітру буде відзначатися з квітня по серпень (від 5,0 м/с і більше). На відрізку узбережжя між мисом Сім і мисом Гір моделі прогнозують величину до 8,0 м/с. В період з жовтня по лютий відбувається ослаблення атмосферної циркуляції, і в даній зоні швидкості більше 5,0 м/с будуть відзначатися тільки на ділянці вздовж берегової лінії шириною 30-35 км.

Річний хід швидкості вітру на ділянці Атлантичного узбережжя, розташованої на південь від міста Агадір буде демонструвати такі особливості. Найбільші значення розрахунки РКМ показали у липні (6,0-8,0 м/с). З квітня по червень і в серпні величина швидкості вітру може скласти від 5,0 до 7,5 м/с. У березні та вересні вона буде знаходитися в межах 5,0-7,0 м/с. З жовтня по лютий моделі прогнозують її найменші значення (4,5-6,0 м/с).

У IV зоні РКМ прогнозують найбільші значення середньомісячної швидкості вітру з квітня по серпень (7,5-9,0 м/с), та найменші значення з жовтня по лютий (6,0-7,5 м/с). Для більш детального аналізу були побудовані графіки річного ходу середньої швидкості вітру в вузлах сітки моделі, розташованих в різних фізико-географічних районах Марокко (рис. 3.6-3.7). Аналіз показав, що в 2021-2050 рр. характер ходу швидкості вітру матиме три типи:

Тип 1. Для даного типу характерний максимум в червні-липні і мінімум в листопаді-грудні (рис. 3.6, червоні трикутники). Такий хід відзначатиметься на узбережжі Атлантичного океану між мисом Беддуза і мисом Сим, і в південній частині Марокко включаючи узбережжя.

Тип 2. Максимум швидкості вітру в березні-квітні і мінімум у вересні-листопаді (рис. 3.6, чорні крапки). Вузли сітки, на яких прогнозується даний тип розташовані в горах Антиатласу, на рівнині Гарб і рівнинах Атлантичного узбережжя в районі Рабату.

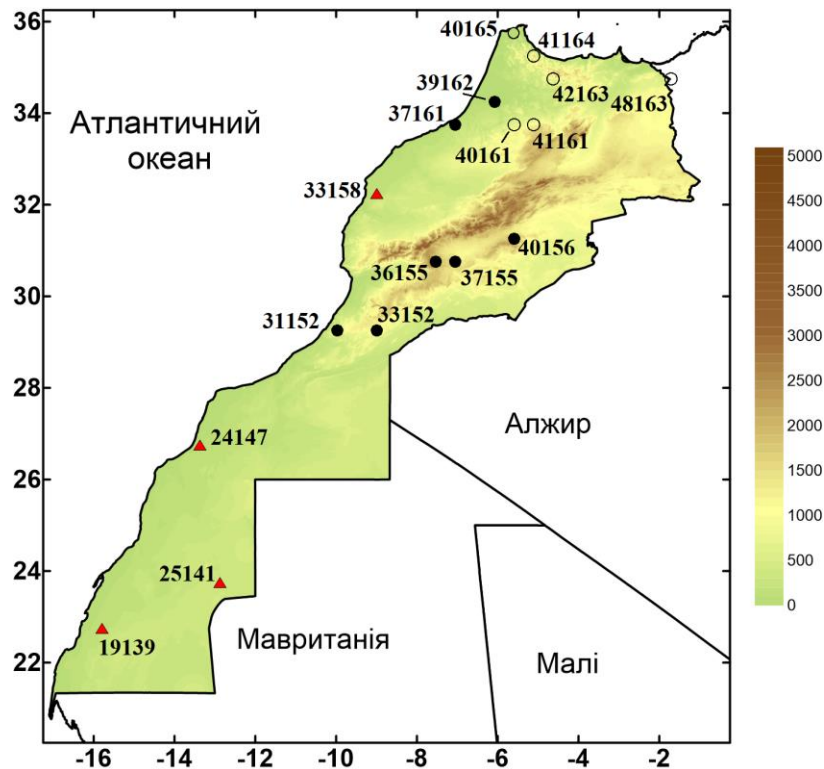


Рисунок 3.6 – Схема розташування вузлів сітки моделі (в кольорі рельєфу місцевості): тип 1 – червоні трикутники, тип 2 – чорні точки, тип 3 – гуртки

Тип 3. Максимум швидкості вітру в березні-квітні і мінімум в липні-серпні (рис. 3.6, прозорі гуртки). Такий хід відзначатиметься в гірських районах Ер-Рифу, на Центральному марокканському плато і на плато Алжиро-Марокканської Месети.

Відмінність в періоді року в який буде спостерігатися мінімум швидкості вітру в районах з третім типом може бути викликано значною (близько 47 %) повторюваністю у липні-серпні циркуляційного типу NE при якому на півночі Марокко баричні градієнти менше ніж в центрі, в порівнянні з осінніми місяцями (близько 25 %).

На початку XXI століття на території Марокко швидкість вітру має два типи річного ходу [117, 118]. Перший тип характеризується зростанням швидкості вітру в літні місяці і зниженням з жовтня по лютий, для другого типу характерно збільшення швидкості вітру в лютому-квітні і зменшення в липні-жовтні. Аналіз розрахунків РКМ для періоду 2021-2050 рр. дає можливість зробити висновок, що в майбутньому такий характер річного ходу в цілому збережеться.

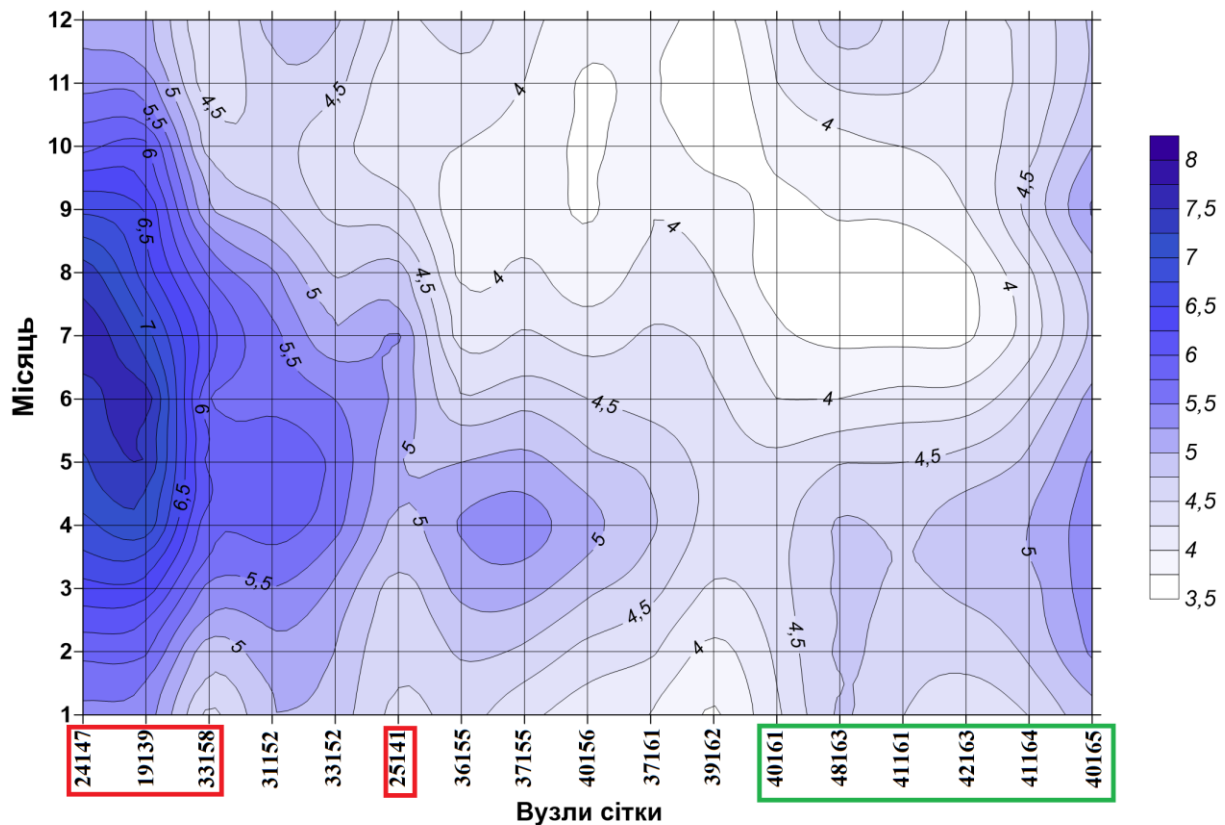


Рисунок 3.7 – Річний хід швидкості вітру (м/с)
(тип 1 – червона рамка, тип 2 – без виділення, тип 3 – зелена рамка)

Причиною збільшення швидкості вітру у річному ході є зростання баричних градієнтів на узбережжі Атлантичного океану в результаті сезонних змін поля тиску. Протягом всього року на широтах 30-35° розташовується зона підвищеного тиску, особливо добре виражена над океанами. Над материками така зона зберігається тільки в зимовий час. Влітку внаслідок інтенсивного прогрівання над Африканським континентом розташовується велика барична депресія [119, 120].

У повторюваності циркуляційних погодних типів в Марокко це виражається в переважанні влітку повторюваності циркуляційних типів (більше ніж 95 % випадків) для яких характерне посилення Азорського антициклону, що призводить до збільшення баричних градієнтів в зоні узбережжя. Північ Марокко при такій формі циркуляції знаходиться в зоні дії баричного гребеня з меншими баричними градієнтами ніж на півдні країни. Ще одним фактором, що сприяє збільшенню швидкості вітру в літні місяці є розвиток бризової циркуляції в цей період.

У липні-серпні в Марокко спостерігається місцевий вітер шергі, який супроводжується перенесенням пилу з пустелі Сахари та зростанням температури повітря вище 40°C . Виникнення шергі відбувається при формуванні над Середземним морем області високого тиску і малоградієнтного поля зниженого тиску над пустелею Сахара, при цьому ізобари проходять квазіпаралельно берегової лінії. Виникаючі в результаті сильні східні вітри натікають на природний бар'єр у вигляді Атлаських гір, перевалюють через них і на заході Марокко з приходом шергі відзначається зростання температури повітря на 10 і більше градусів.

Золотокрилін [121] проводить паралель між шергі та сирокко, які виникають в Середземноморському регіоні, з явищем суховію, яке зазначається на території Південно-Східної Європи, в Середній Азії і на Далекому Сході. Дослідження сучасних умов які супроводжуються виникненням суховіїв в Україні [122] показало, що вони виникають при певних синоптичних умовах, що призводять до трансформації повітряних мас, а так само в разі адвекції повітряних мас зі степових і напівпустельних районів Середньої Азії і Близького Сходу.

Максимум у річному ході швидкості вітру в холодне півріччя на півночі країни можна пояснити зміщенням на південь в зимові місяці південної гілки полярного фронту і поширенням циклонічного характеру циркуляції атмосфери в субтропічну зону [26]. Якщо простежити зміни циркуляційних погодних типів від весни до літа [37], то можна помітити, що в квітні на частку циркуляційних типів при яких північна частина Марокко знаходиться під впливом циклонів, а південна частина підпадає під вплив малоградієнтного поля підвищеного тиску або баричного гребеня, припадає близько 25 % випадків.

Інтерес представляє аналіз річного ходу в вузлах, які знаходяться поблизу основних вітропарків. Так в вузлах 24147 і 33158, розташованих в районі Ель-Аюна і Ес-Сувейри, максимум швидкості вітру буде відзначатися в липні місяці (7,7 м/с і 6,1 м/с, відповідно), мінімум в грудні (5,1 м/с і 4,2 м/с, відповідно). У вузлі 40165, що знаходиться поблизу Танжера, максимум швидкості вітру прогнозується в березні-квітні (5,4 м/с), мінімум в липні, листопаді і грудні (4,8 м/с).

3.2 Питома потужність вітрового потоку у 2021-2050 рр.

3.2.1 Швидкість вітру на різних висотах в приземному шарі атмосфери

В результаті розрахунків РКМ були отримані середньомісячні значення швидкості вітру на рівні 10 м над земною поверхнею, в той час як осі сучасних вітроенергетичних установок (ВЕУ) розташовуються на різних висотах в шарі товщиною до 165 м. До технічних характеристик ВЕУ, безпосередньо пов'язаних зі швидкістю вітрового потоку відносяться: мінімальна робоча швидкість вітру (швидкість при якій відбувається запуск ВЕУ), номінальна швидкість вітру (швидкість, при якій досягається номінальна потужність ВЕУ) і максимальна швидкість вітру (швидкість вітру, при якій відбувається відключення ВЕУ). Для більшості сучасних ВЕУ мінімальна робоча швидкість вітру становить 2,5-5,0 м/с, номінальна швидкість вітру складає 10-15 м/с і максимальна швидкість вітру знаходиться в межах 24-25 м/с. Всі ці значення відносяться до швидкості вітру на висоті вісі вітроколеса. У приземному шарі в усталеному потоці швидкість вітру зростає зі збільшенням висоти над поверхнею землі. Тому при оцінці майбутнього вітрового потенціалу території необхідно враховувати, що значенням швидкості вітру, розрахованим за допомогою РКМ, на висоті вісі вітроколеса ВЕУ будуть відповідати більш високі значення. Для цього наведемо значення мінімальної, номінальної і максимальної швидкостей вітру відповідні висоті ВЕУ до висоти 10 м над земною поверхнею.

Зміну швидкості вітру в шарі 100 м можна оцінити за допомогою степеневі функції [115]

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m, \quad (3.8)$$

де V_1 і V_2 – швидкість вітру на висотах h_1 і h_2 , m – змінний показник степеню, що залежить від сезону року. В середньому приймають $m = 0,14$.

На рис. 3.10 представлено розподіл по території Марокко швидкостей вітру на висотах 50 м і 100 м над поверхнею землі, розрахованих за допомогою формули (3.8). Як видно з рис. 3.8, зі

збільшенням висоти до 50 м швидкість вітру збільшується на 1,25 м/с і до 100 м на 1,38 м/с, таким чином площа території, яка характеризується наявністю вітрового потенціалу, достатнього для розвитку вітроенергетики збільшується при розміщенні ВЕУ на висоті 50-100 м над землею поверхнею.

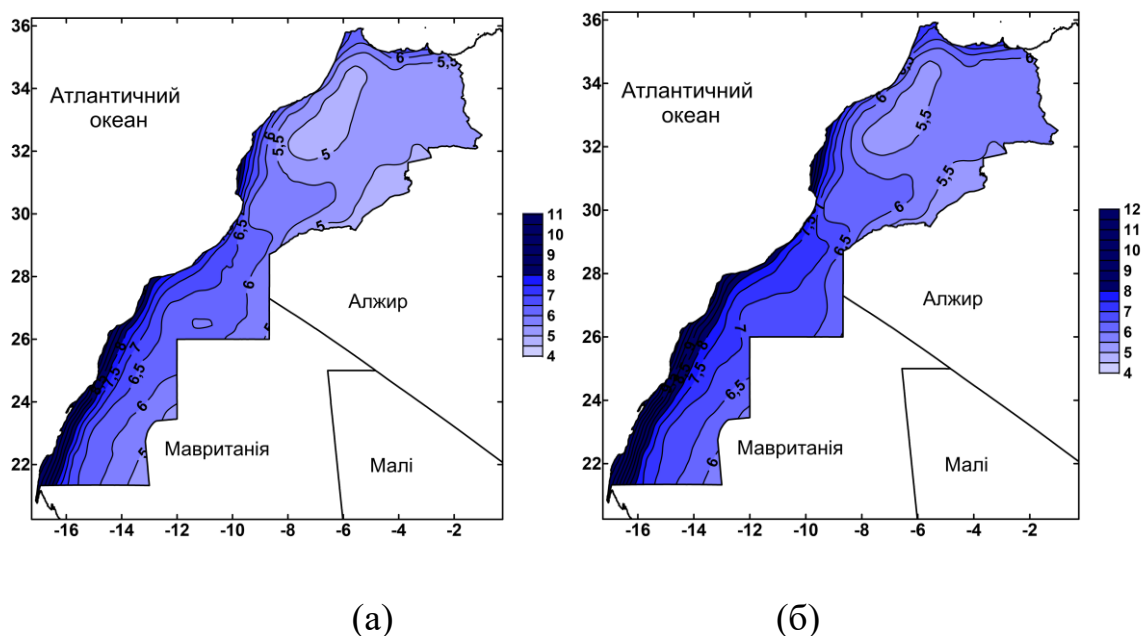


Рисунок 3.8 – Швидкість вітру (м/с) на висотах: (а) – 50 м, (б) – 100 м над поверхнею землі

Необхідно так само відзначити, що відсутність інформації про вертикальний зсув вітру і стратифікацію атмосфери створює значну невизначеність при моделюванні добових і сезонних швидкостей вітру на висотах [46].

3.2.2 Середня питома потужність вітрового потоку в 2021-2050 рр. на різних висотах над поверхнею землі

Для оцінки вітроенергетичного потенціалу територій виділяють сім класів за значенням питомої потужності вітрового потоку (N_e) (табл. 3.2). Територія придатна для розміщення великомасштабних вітрових установок повинна мати вітроенергетичний клас 4 або вище.

Таблиця 3.2 – Вітроенергетичні класи [100]

Вітровий клас		Висота 10 м		Висота 50 м	
		Питома потужність (N_e), Вт/м ²	Середньорічна швидкість вітру (V), м/с	Питома потужність (N_e), Вт/м ²	Середньорічна швидкість вітру (V), м/с
1	Низький	< 100	< 4,4	< 200	< 5,6
2	Незначний	100-150	4,4-5,1	200-300	5,6-6,4
3	Середній	150-200	5,1-5,6	300-400	6,4-7,0
4	Значний	200-250	5,6-6,0	400-500	7,0-7,5
5	Відмінний	250-300	6,0-6,4	500-600	7,5-8,0
6	Видатний	300-400	6,4-7,0	600-800	8,0-8,8
7	Досконалий	> 400	> 7,0	>800	> 8,8

За допомогою формул (2.4) – (2.7) був проведений розрахунок прогностичної питомої потужності вітрового потоку для періоду 2021-2050 рр. на висотах 10, 50 і 100 м над поверхнею землі. В якості вихідного значення середньорічної швидкості вітру було використано середнє за ансамблем моделей значення швидкості вітру. Параметр γ , розподілу швидкостей вітру, був прийнятий рівним 2,5, виходячи з міркувань, що велика частина території Марокко протягом року перебуває під впливом пасатів. У розрахунку потужності вітрового потоку ми виходимо з припущення, що зміни клімату виявляться лише в зміні величини швидкості вітру при збереженні параметрів її розподілу, тому результати забезпечують наближену оцінку майбутньої потужності вітрового потоку.

Аналіз показав, що в майбутньому на висоті 50 м величина N_e (рис. 3.9а) в північній частині Марокко не перевищить 200 Вт/м², що буде характеризувати її, як територію з низькими потенційними запасами енергії вітру. Узбережжя Середземного моря, ділянка Атлантичного узбережжя в районі Танжера, центральні райони областей Касабланка – Сеттат, Марракеш – Сафі, Гулімім – Уед-Нун, Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра і Дахла – Уед-ед-Дахаб матимуть незначний вітровий потенціал (200-300 Вт/м²).

Ділянку узбережжя Атлантики між Ес-Сувейрой і Агадіром можна буде охарактеризувати як територію з середніми і значними запасами вітрового потенціалу (300-500 Вт/м²). І найбільш багатую на вітрові ресурси в майбутньому буде ділянка Атлантичного узбережжя на південь

від міста Тарфайя, де величина N_e буде приймати значення від 400 Вт/м² в районі Тарфайї і вглиб території до 1000 Вт/м² на ділянці на південь від селища Дахла.

Якщо збільшити висоту вежі вітрової турбіни до 100 м, то площа території яка характеризується величиною $N_e > 400$ Вт/м² збільшується (рис. 3.9б) і охоплює все Атлантичне узбережжя на південь від Ес-Сувеїри, ця смуга простягається вглиб континенту близько 70 км – на ділянці узбережжя Ес-Сувеїра – Агадір, і на 125 км – на ділянці узбережжя на південь від Тарфайї. Необхідно відзначити, що на висоті 100 м значна частина території Марокко володіє вітроенергетичним потенціалом з величиною N_e від 200 до 300 Вт/м², який є сприятливим для розміщення вітрових турбін малої і середньої потужності, здатних виробляти електроенергію на менших швидкостях вітру.

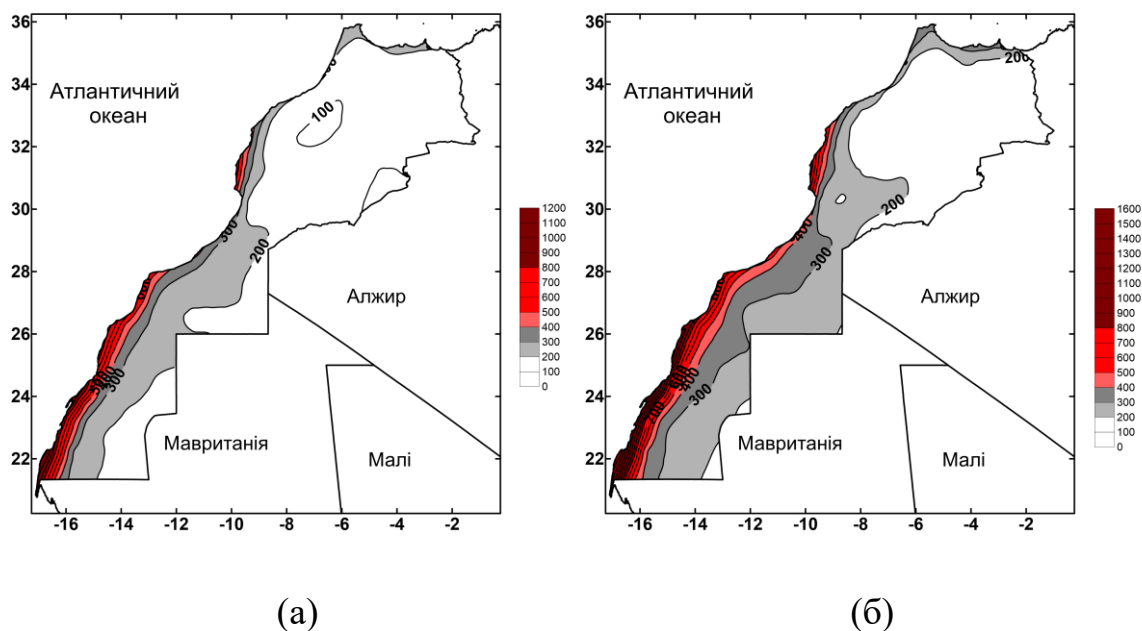


Рисунок 3.9 – Питома потужність вітрового потоку N_e (Вт/м²) на висотах:
(а) – 50 м, (б) – 100 м над поверхнею землі

До вищесказаного необхідно додати, що значна за площею частина території Марокко має гірський рельєф, а це створює обмеження для розміщення в цих районах вітропарків, через відсутність доріг і мережових з'єднань. Однак існують приклади розміщення вітрових турбін на великих висотах, наприклад, високогірна вітрова електростанція, розташована в Швейцарії на висоті 2330 м. Тому деякі дослідники [10] вводять такі обмеження при розрахунку вітрового потенціалу в гірських районах:

вітрові електростанції повинні розташовуватися нижче 2000 м над рівнем моря, величина питомої потужності знижується на ділянках, розташованих на висоті більше 600 м над рівнем моря. Щоб уникнути переоцінки, питомої потужності для вітрових турбін в гірських районах на висотах від 600 до 2000 м зменшується на 50 % в порівнянні з рівнями нижче 600 м.

3.2.3 Річні зміни питомої потужності вітрового потоку

Для аналізу річного ходу енергії вітру на висотах 50 і 100 м над рівнем землі були розраховані середньомісячні значення N_e . Сезонні максимуми енергії вітру припадають на літній період в південній частині Марокко і на узбережжі Атлантики між містами Сафі і Агадір. Високі значення N_e ($\geq 400 \text{ Вт/м}^2$) протягом року характерні для узбережжя Атлантики на південь від міста Тарфайя, де в червні-липні буде відзначатися її максимум (близько 1000 Вт/м^2). У той же час площа зайнята високими значеннями питомої потужності буде розростатися і проникати вглиб території Південного Марокко та поширюватися на ділянки узбережжя, розташовані на північ, доходячи до районів міста Сафі. У південній частині Марокко для висоти 100 м в період з травня по липень будуть характерні значення питомої потужності від 400 до 700 Вт/м^2 , а на узбережжі в цей період вони будуть доходити до 2000 Вт/м^2 .

У північній частині Марокко на узбережжі Середземного моря сезонний максимум питомої потужності буде відзначатися в період з лютого по квітень. Якщо на висоті 50 м в цей період енергія вітру не буде перевищувати 400 Вт/м^2 , то на 100 м її значення будуть знаходитися в межах $400\text{-}500 \text{ Вт/м}^2$. Для прибережних рівнинних районів Марокко, а також гірських районів Атласу на всіх висотах протягом усього року будуть характерні низькі значення питомої потужності. У цих областях сезонний максимум N_e припадатиме на квітень місяць і його величина не перевищить 400 Вт/м^2 .

3.3 Проекції добового максимуму швидкості вітру для періоду 2021-2050 рр.

3.3.1 Середнє значення добового максимуму швидкості вітру

У всіх РКМ за добовий максимум швидкості вітру приймається максимальне значення з чотирьох миттєвих швидкостей вітру, розрахованих для 00:00, 06:00, 12:00 і 18:00 UTC. Різні РКМ використовують різні підходи для розрахунку добового максимуму швидкості вітру. Наприклад, модель SMHI враховує турбулентну кінетичну енергію, середній вітер і статичну стійкість в прикордонному шарі, модель KNMI-RASMO2 обчислює швидкість пориву вітру, додаючи до швидкості вітру на висоті 10 м складова, яка містить статичну стійкість в прикордонному шарі атмосфери, обчислення моделі MPI-РЕМО засновані на емпіричних припущеннях, з урахуванням турбулентної кінетичної енергії в найнижчому шарі моделі [123].

Зв'язок добового максимуму швидкості вітру з середньодобовою швидкістю вітру можна встановити за допомогою пікового фактора пориву [124], який розраховується як співвідношення

$$G = \frac{V_g}{\bar{V}} - 1 \quad (3.9)$$

де G – піковий фактор пориву (ФП), V_g – добовий максимальний порив вітру, а $\bar{V}$ – середньодобова швидкість вітру. G є безрозмірною величиною, яка приймає значення $0 \leq G < +\infty$ (при $V_g = \bar{V}$, $G = 0$).

При осередненні за певний проміжок часу ФП відображає кліматологічну поривчастість вітру. Дослідження показують, що ФП чутливий до метеорологічних умов, наприклад, як правило, його значення зменшується у міру збільшення середньої швидкості вітру. Шорсткість підстильної поверхні впливає на ФП, над грубими поверхнями ФП приймає більш високі значення. На ФП впливає стан стійкості атмосфери, величина ФП збільшується зі зменшенням стійкості атмосфери, хоча цей вплив не такий сильний, як зв'язок ФП з величиною середнього вітру [125].

В якості ілюстрації, був розрахований ФП у 12 точках, які знаходяться в різних фізико-географічних зонах Марокко і належать різним вітроенергетичним зонам. Найбільші значення ФП показав в

першій вітроенергетичній зоні і в другій зоні в районі рівнин, що лежать на Атлантичному узбережжі (0,67-0,57). У другій і третій вітроенергетичних зонах, куди входять гірські райони Середнього, Високого Атласу і Ер-Риф, берег Середземного моря, частина Атлантичного узбережжя між містом Ель-Джадіда і містом Агадір та внутрішні райони південної частини Марокко, величина ФП склала 0,43-0,49. Найменші значення ФП показав в південній частині Марокко, на ділянках третьої і четвертої вітроенергетичних зон (0,25-0,37).

Аналіз добового максимуму швидкості вітру показав, що його середнє значення для періоду 2021-2050 рр. буде коливатися в межах від 5,1 до 10,4 м/с (рис. 3.10), а просторовий розподіл по території Марокко буде аналогічний розподілу середньої швидкості вітру [126, 127].

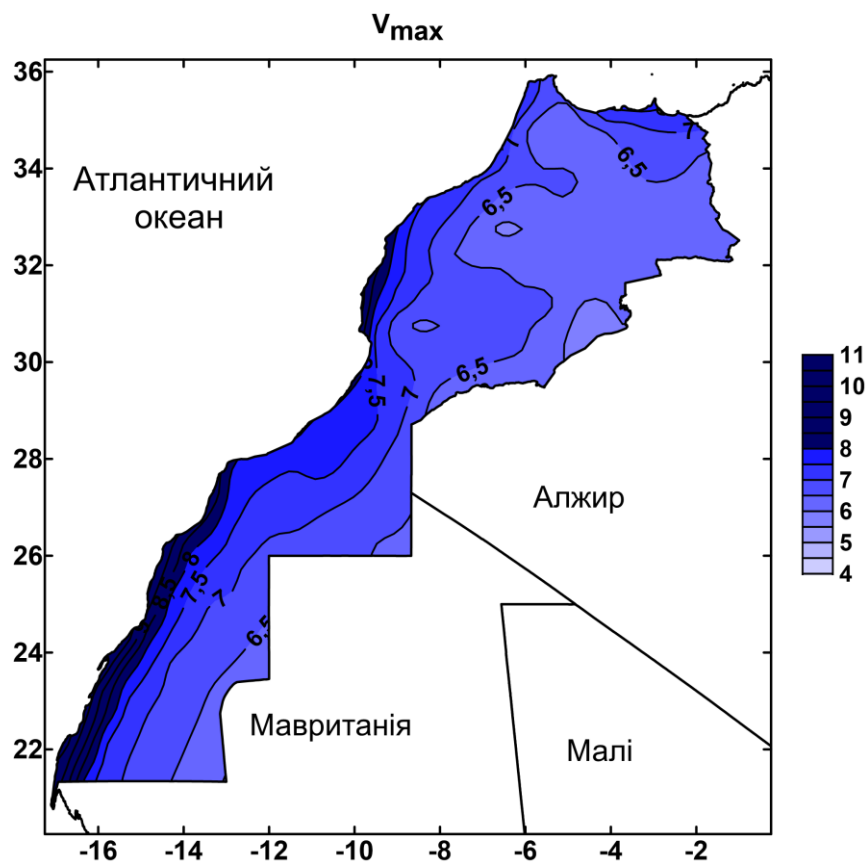


Рисунок 3.10 – Середнє за ансамблем моделей значення добового максимуму швидкості вітру (м/с) для періоду 2021-2050 рр.

Значення добового максимуму швидкості вітру будуть перевищувати середню швидкість вітру на 2,0-3,0 м/с, ці відмінності визначаються вище перерахованими причинами, які впливають на формування величини ФП.

3.3.2 Міжрічний хід добового максимуму швидкості вітру

Для визначення тенденції добового максимуму швидкості вітру V_{max} , на основі його середньорічних значень були розраховані коефіцієнти і побудовані рівняння лінійної регресії в кожному вузлі сітки моделей. На рис. 3.11 представлено розподіл коефіцієнта a по території Марокко.

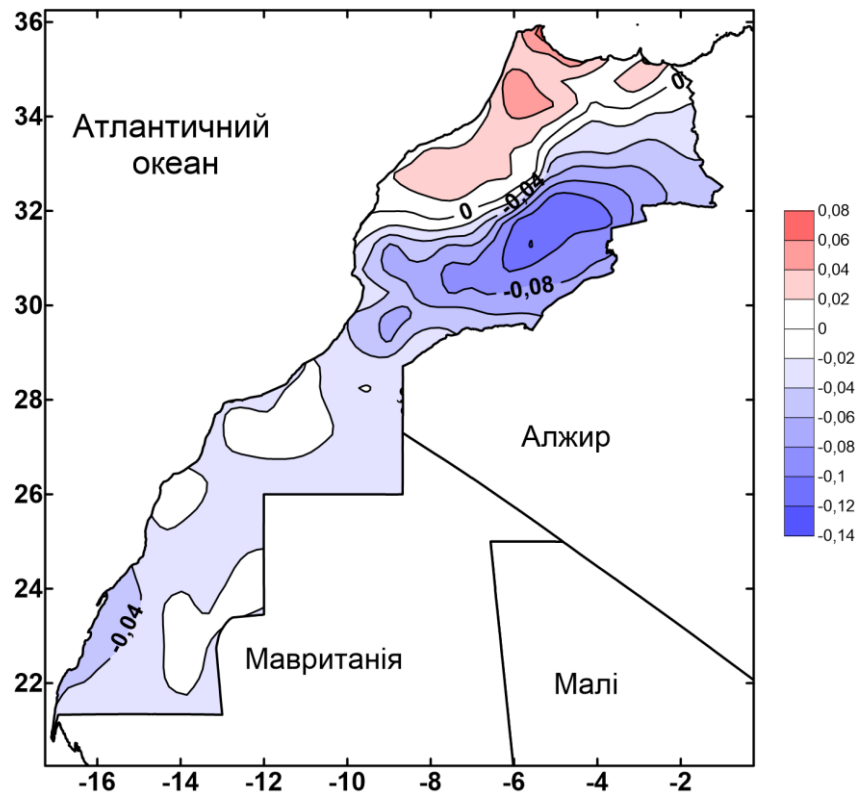


Рисунок 3.11 – Коефіцієнт лінійної регресії A (м/с) за 30 років V_{max} для періоду 2021-2050 рр.

Аналіз показав, що в цілому картина близька до розподілу коефіцієнта A рівняння лінійної регресії середньої швидкості вітру, а екстремальні і близькі до екстремальних значення коефіцієнта a мають практично однакову величину і відзначаються в тих само точках простору. Відмінність у розподілі коефіцієнту A лінійної регресії V_{max} від середньої швидкості вітру полягає в тому, що область зайнята позитивною тенденцією охоплює значно більшу за площею територію, займаючи територію Ер-Рифу, долину Гарб, плато Марокканської Месети і райони Східної області, прилеглі до Середземноморського узбережжя. В іншому

можна відзначити, що велика частина території буде характеризуватися негативними значеннями A , з найбільшою тенденцією до зменшення V_{max} в районі Високого Атласу і Антиатласу (від -0,04 до -0,12 м/с за 30 років). Найбільше зростання V_{max} можна очікувати на березі Середземного моря в районі міста Тетуан (до 0,07 м/с за 30 років). На решті частини території очікується нульова тенденція V_{max} або незначне зменшення.

Для перевірки рівня значущості коефіцієнта a були обрані ряди V_{max} в точках з найбільшими по модулю значеннями a , та точки розташовані в різних районах Марокко (табл. 3.3, рис. 3.12).

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти лінійної регресії добового максимуму швидкості вітру і фактичні значення критерію Стюдента

Вузол сітки	Координати вузла		Коефіцієнти регресії			Критерій Стюдента		
	Широта, ° півн. ш.	Довгота, ° зах. д.	A	a	b	t	$t_{кр}$ ($\alpha=0,1$)	$t_{кр}$ ($\alpha=0,05$)
41165	35,75	-5,11	0,071	0,0024	7,060	1,64	1,7	2,05
40165	35,75	-5,11	0,066	0,0022	6,850	1,76	1,7	2,05
40162	34,25	-5,59	0,052	0,0017	6,360	1,58	1,7	2,05
37161	33,75	-7,05	0,048	0,0016	6,980	1,43	1,7	2,05
40161	33,75	-5,59	0,024	0,0008	6,570	0,67	1,7	2,05
48163	34,75	-1,71	-0,012	-0,0004	6,880	0,47	1,7	2,05
31152	29,25	-9,96	-0,051	-0,0017	7,750	1,57	1,7	2,05
33152	29,25	-8,99	-0,081	-0,0027	7,350	2,7	1,7	2,05
40157	31,75	-5,59	-0,117	-0,0039	6,370	2,12	1,7	2,05
40156	31,25	-5,59	-0,121	-0,0040	6,750	2,16	1,7	2,05

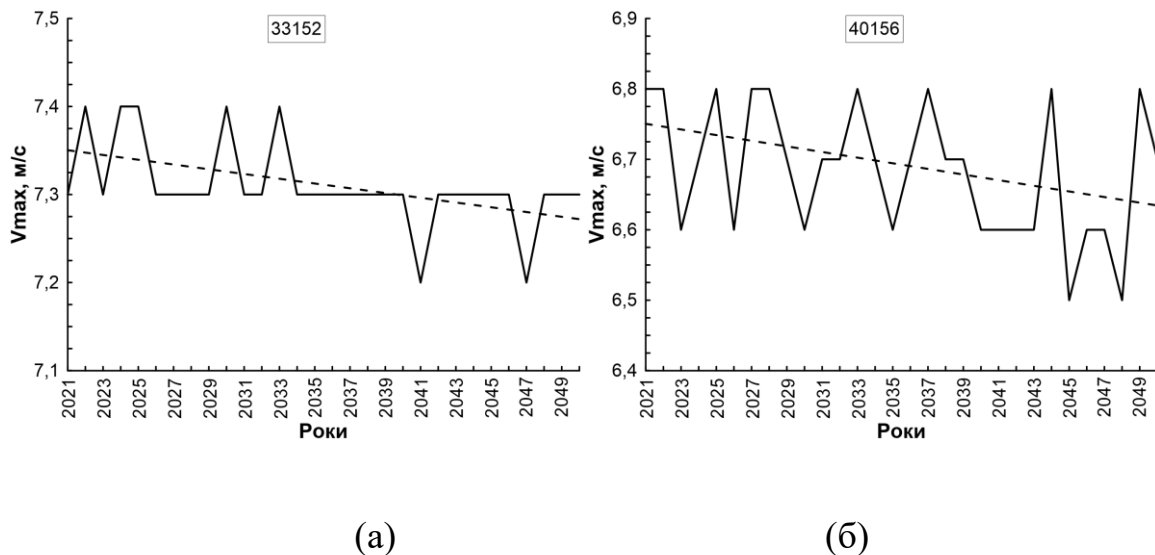


Рисунок 3.12 – Міжрічний хід добового максимуму швидкості вітру (м/с) (суцільна лінія), лінійний тренд (пунктирна лінія) у вузлах: (а) – 33152, (б) – 40156

Аналіз показав, що при $\alpha = 0,05$ значущими є коефіцієнти в вузлах, що потрапляють на територію гірських районів Антиатласу. Вузли 40156 і 40157, знаходяться неподалік від міста Тінгір в області Драа – Тафілалет і вузол 33152, розташований поблизу міста Фам ель Хісна в області Сус – Масса. При $\alpha = 0,1$ значущим є додатково коефіцієнт у вузлі 40165, розташованому біля міста Танжер в області Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма.

Аналіз діаграми «ящик з вусами» (рис. 3.13), побудованої для рядів V_{max} в вузлах з найбільшими по модулю значеннями коефіцієнта a рівняння лінійної регресії показав, що значення медіани в більшості випадків вище середнього значення на 0,1-0,2 м/с.

Розкид значень 25-го перцентиля становить 0,3-0,5 м/с, а 75-го перцентиля – 0,3-0,6 м/с. Різниця величини V_{max} між 25-м і 75-м перцентиллями, становить в середньому 0,4 м/с. Це говорить про незначне розходження в значеннях розрахованих моделями і про репрезентативності середніх за ансамблем моделей величин.

3.3.3 Річні зміни добового максимуму швидкості вітру

Аналіз річного ходу V_{max} показав, що в подальшому він буде ідентичний річному ходу швидкості вітру в різних частинах Марокко. Найменше за розрахунками РКМ значення V_{max} становитиме 4,6 м/с в грудні в області Драа – Тафілалет, найбільше значення V_{max} становитиме близько 11,8 м/с в червні на узбережжі Атлантичного океану на південь від населеного пункту Дахла (рис. А.4-А.5).

Для більш детального аналізу були побудовані графіки річного ходу V_{max} в вузлах сітки моделі, розташованих в різних фізико-географічних районах Марокко (рис. 3.14) для яких проводилися аналогічні побудови для середньої швидкості вітру (параграф 3.1.3). Не дивлячись на те, що в основних рисах річний хід V_{max} аналогічний річному ходу середньої швидкості вітру, можна виділити деякі особливості.

Тип 1. Як і для річного ходу середньої швидкості вітру, найбільш поширеним за площею є тип річного ходу V_{max} з максимумом в червні-липні і мінімумом в листопаді-грудні (на рис. 3.14 вузли виділені червоними трикутниками, рис. 3.15б). Такий характер річного ходу V_{max} буде відзначатися в районі Марокканської Месети, на північному заході Марокко на прибережних Атлантичному океану рівнинах, в районі Алжиро-Марокканської Месети і в південній частині країни.

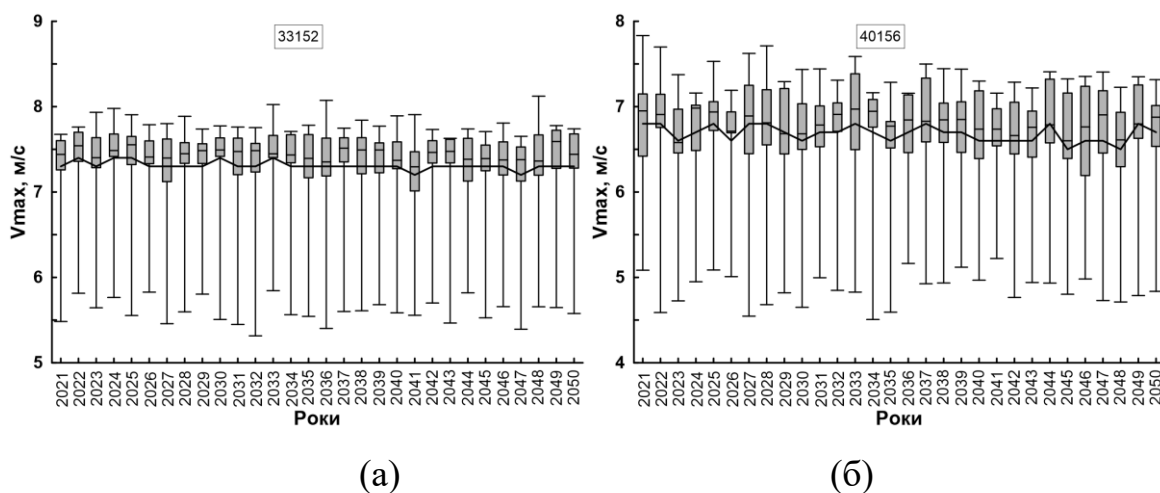


Рисунок 3.13 – Міжрічний хід добового максимуму швидкості вітру (м/с) у вигляді «ящика з вусами» у вузлах: (а) – 33152, (б) – 40156

Тип 2. Для даного типу буде характерний максимум V_{max} в квітні і мінімум в листопаді (на рис. 3.14 вузли виділені чорними крапками, рис. 3.15б). Такий характер річного ходу буде відзначатися в гірських районах Антиатласу.

Тип 3. При даному типі річного ходу максимум V_{max} відзначатиметься в березні-квітні, а мінімум в червні-липні (на рис. 3.14 вузли виділені гуртками, рис. 3.15б). Він повністю аналогічний річному ходу середньої швидкості вітру в вузлах, де він відзначається, і буде спостерігатися в гірських районах Ер-Рифу і на березі Гібралтарської протоки.

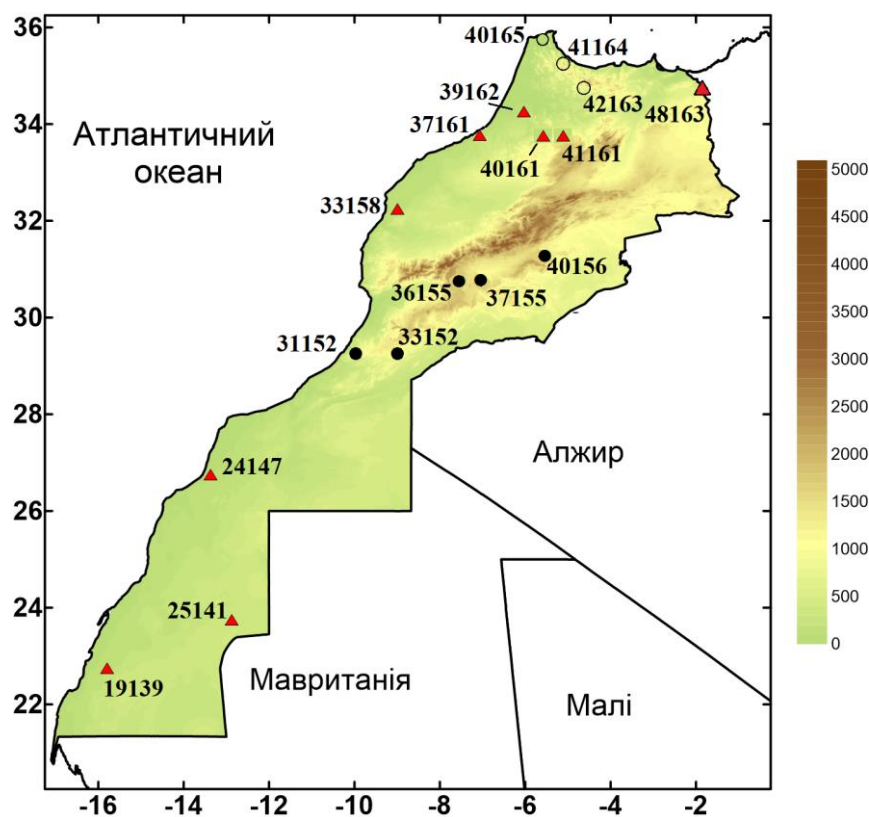


Рисунок 3.14 – Схема розташування вузлів сітки моделі (в кольорі рельєф місцевості): тип 1 – червоні трикутники, тип 2 – чорні крапки, тип 3 – гуртки

Для оцінки міжсезонної зміни співвідношення середньої швидкості вітру і добового максимуму швидкості в відібраних вузлах сітки моделі були розраховані середньомісячні значення пікового фактора пориву (ФП). Якби хід добового максимуму був повністю ідентичний ходу швидкості вітру, то величина фактора пориву була б постійна протягом всього року.

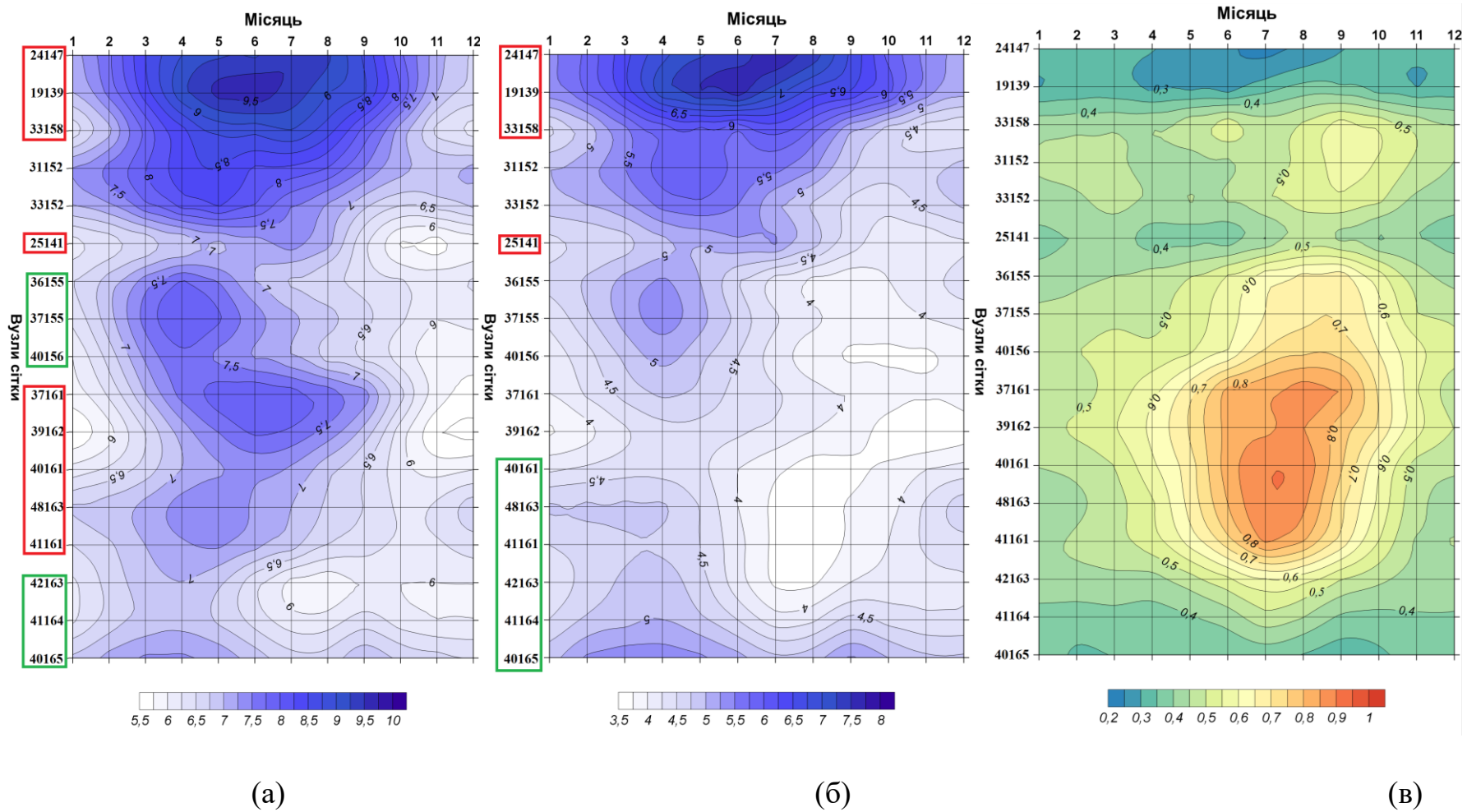


Рисунок 3.15 – Річний хід V_{max} (м/с) – (а), швидкості вітру (м/с) – (б), ФП – (в) (на а і б червона рамка – тип 1, без виділення – тип 2, зелена рамка – тип 3)

Аналіз показав, що величина ФП буде демонструвати збільшення (від 0,6 до 1,0) з квітня по жовтень в вузлах сітки розташованих в північній частині Атлантичного узбережжя і в гірських районах Антиатласу і Середнього Атласу (рис. 3.15в). В інших районах Марокко ФП матиме менш значний річний хід і його величина складе від 0,2 до 0,5.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Аналіз результатів моделювання швидкості вітру в 2021-2050 рр. показав, що районами з необхідним вітровим потенціалом для подальшого розвитку вітроенергетики будуть: ділянка узбережжя Середземного моря між містами Надор і Ель-Хосейма; територія, що примикає до Гібралтарської протоки в адміністративній області Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма; ділянка узбережжя Атлантичного океану від міста Ель-Джадіда до мису Гір; і прибережні райони адміністративних областей Гулімін – Уед-Нун, Ель-Аюн – Сегієт-ель-Хамра, Дахла – Уед-ед-Дахаб.

2. Незважаючи на деякі розбіжності результатів отриманих автором з результатами аналогічних досліджень щодо зміни середньої швидкості вітру для періоду 2021-2050 рр. відносно попереднього кліматичного періоду, можна сказати, що в районі Гібралтарської протоки і на прилеглих до нього територіях в майбутньому очікується збільшення швидкості вітру, з наявністю невеликого статистично значущого позитивного тренду всередині періоду 2021-2050 рр.

3. За величиною питомої потужності вітрового потоку на висоті 50 м, середнім і значним вітровим потенціалом буде володіти ділянка узбережжя Атлантики між Ес-Сувейрой і Агадіром. Найбільш багатими вітровими ресурсами в майбутньому буде мати ділянка Атлантичного узбережжя на південь від міста Тарфайя. Область Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма в період лютий-квітень буде характеризуватися середніми запасами вітрових ресурсів. Ділянка узбережжя Атлантики між Ес-Сувейрой і Агадіром в період з квітня по вересень буде володіти значним і більше вітровим потенціалом, а ділянка Атлантичного узбережжя в області Ель-Аюн – Сегієт-ель-Хамра буде володіти значними і більше вітровими запасами протягом усього року.

4. Середньомісячна величина добового максимуму швидкості вітру буде коливатися в межах від 5,1 до 10,4 м/с, а його просторовий розподіл буде аналогічний розподілу середньої швидкості вітру.

РОЗДІЛ 4

ЗАПАСИ ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ У МАРОККО В НАЙБЛІЖЧІ 30 РОКІВ

4.1 Проекції загальної кількості хмарності в Марокко на період 2021-2050 рр.

4.1.1 Середня загальна кількість хмарності

Як зазначалося вище, хмарність має суттєвий вплив на кількість сонячної радіації, що надходить на земну поверхню, і як наслідок, на кінцевий виробок електроенергії сонячним елементом. Шакіров та співавтор [128] вказують на необхідність обов'язкового обліку хмарності при оцінці економічної ефективності використання сонячних енергетичних установок, так як кількість виробленої енергії при наявності хмарності в рази нижче, ніж при безхмарному небі.

На основі розрахунків РКМ було отримано середнє за ансамблем моделей значення загальної кількості хмарності TC для періоду 2021-2050 рр. на території Марокко (рис. 4.1а). Аналіз показав, що в досліджуваному періоді на більшій частині території країни середнє значення TC становитиме від 20 до 40 %. Величина TC від 40 до 60 % буде характерна для гірських районів Високого Атласу, Ер-Рифу і Таоурірт-Уджди, а так само на ділянках Атлантичного узбережжя в районі населених пунктів Ель-Джадіда, Сафі, Ель-Аюн, Буждур, Дахла. Найбільш низькі значення TC (до 20 %) будуть характерні для прикордонних з Алжиром районів адміністративної області Сус – Маса, що лежать біля підніжжя південних схилів Антиатласу.

Порівняння модельних значень TC з даними ре-аналізу [84] для періоду 1981-2010 рр. (рис. 4.1б) показало, що в різних частинах Марокко моделі прогнозують як збільшення, так і зменшення цієї величини в майбутньому.

Найбільше зростання TC (до 22 %) очікується в південній частині Атлантичного узбережжя Марокко в районі Дахла. Значне збільшення (від 8 до 16 %) моделі прогнозують в гірських районах Високого, Середнього Атласу і Ер-Рифу. На узбережжі Атлантичного океану модельні

розрахунки показали збільшення TC , в районі Тан-Тан – на 8 %, на ділянці від Гібралтарської протоки до Сафі – близько 6 % і збереження значень в районі Ель-Аюна. Найбільше зменшення TC прогнозується в районі гірського проходу Таза (до -12 %). Значне зниження хмарності очікується біля підніжжя південно-східних схилів Антиатласу в районі міст Тата і Загора (-8% і -6%, відповідно). Незначне зменшення TC прогнозується у внутрішніх частинах областей Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра і Дахла – Уед-ед-Дахаб (-2 %).

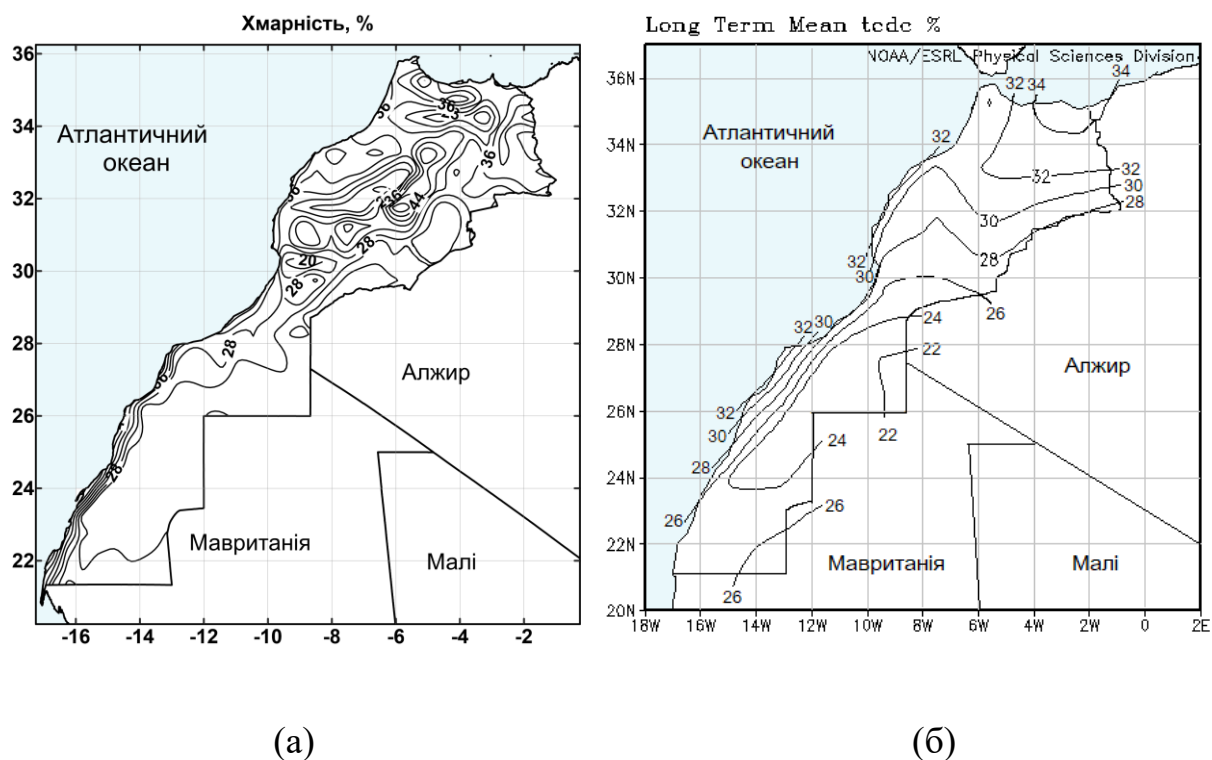


Рисунок 4.1 – Середнє за ансамблем моделей значення TC (%) для періоду 2021-2050 рр. – (а) і середнє значення TC за даними ре-аналізу для періоду 1981-2010 рр. – (б) [84]

Виходячи із того, що метою нашої роботи є оцінка впливу можливих кліматичних змін на геліоенергетичний потенціал Марокко, докладніше зупинимося на змінах в кількості TC , які прогнозують РКМ в районах розміщення сонячних електростанцій. Основні сонячні електростанції розташовані в горах Атласу в області Драа – Тафілалет, а регіональні сонячні енергетичні установи (СЕУ) в Східній області і на Атлантичному узбережжі, на ділянці Ес-Суейра – Сафі і Гуельмім – Ель-Аюн. В області Драа – Тафілалет моделі прогнозують зменшення TC в 2021-2050 рр. в

порівнянні з періодом 1981-2010 рр. (до -8 %), на ділянці узбережжя між Ес-Сувейра і Сафі очікується збільшення $ТС$ близько 2 %, в районі Марракеша і Ель-Аюна моделі прогнозують збереження значень $ТС$.

Як було сказано у першому розділі, джерелом вологих повітряних мас в Марокко є перенесення вологого Атлантичного повітря вглиб континенту [37]. Надалі вони натікають на північно-західні схили Атлаських гір, що призводить до збільшення повторюваності хмарності в цих районах. Потім переваливши через гірські хребти Атласу, повітря опускається по південно-східних схилах, відчуваючи ефект фену, воно нагрівається і висушується, в результаті чого, відбувається розмивання хмарності, що добре простежується в переважанні ясної погоди в прикордонних з Алжиром областях.

Високі значення $ТС$ на Атлантичному узбережжі викликані перенесенням на континент хмарності утвореної над поверхнею Атлантичного океану. Біля узбережжя Марокко протікає Канарська океанічна течія, над холодними водами якої створюються сприятливі умови для конденсації вологого морського повітря, виникнення туманів і шаруватої хмарності нижнього ярусу [93, 94].

4.1.2 Міжрічний хід загальної кількості хмарності

На основі модельних обчислень, були отримані середньорічні значення $ТС$. На основі цих рядів в кожному вузлі сітки були розраховані коефіцієнти лінійної регресії a і b (3.1-3.3). На рис. 4.2 представлено розподіл коефіцієнта A по території Марокко. Аналіз показав, що тенденція до зменшення $ТС$ буде відзначатися в гірському районі Ер-Риф, на північному сході країни в Східній області, в районі рівнин в областях Бені-Меллаль – Кеніфра, Сеттат – Касабланка, Марракеш – Сафі, і на більшій частині південної половини Марокко, виключаючи райони Атлантичного узбережжя і прикордонні райони областей Гульмим – Уед-Нун і Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра. Найбільша тенденція до зменшення середньорічного значення $ТС$ буде відзначатися в гірському районі Ер-Риф (від -0,6 до -1,61 % за 30 років) і на території областей Бені-Меллаль – Кеніфра, Марракеш – Сафі (від -0,6 до -1,2 % за 30 років). Зростання $ТС$ можна очікувати на узбережжі Атлантичного океану, на східних схилах

Атлаських гір, в долині Варзат і в горах Антиатласу (від 0,2 до 1,6 % за 30 років).

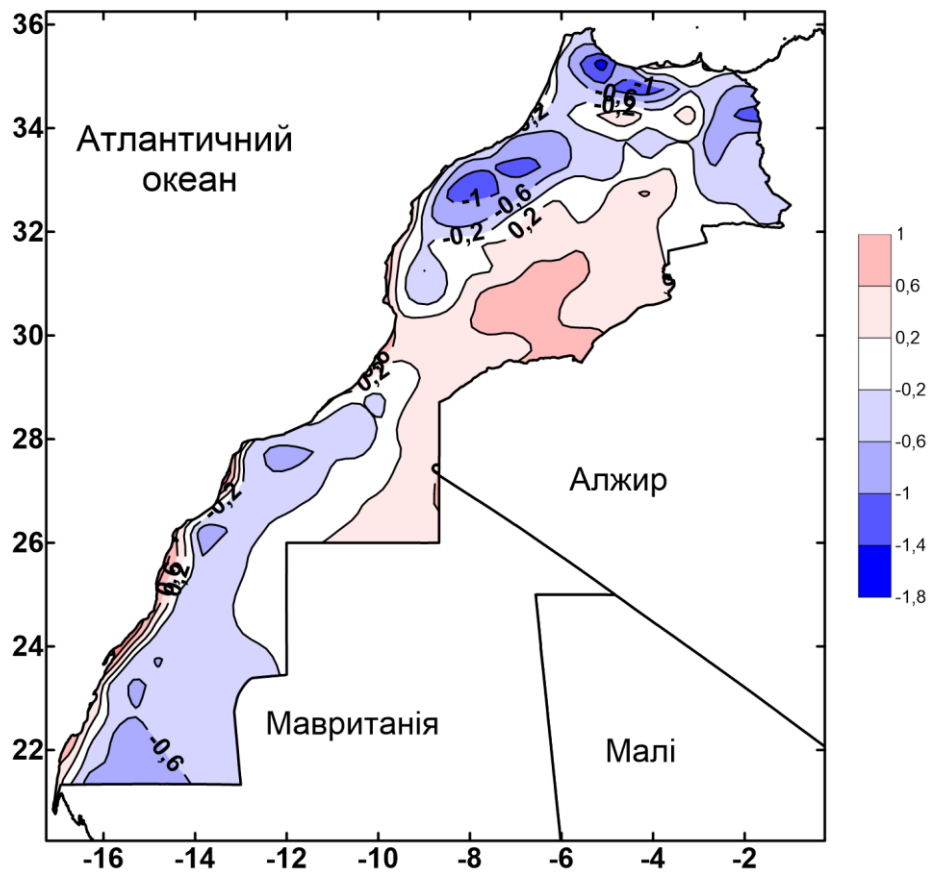


Рисунок 4.2 – Коефіцієнт A (%) рівняння лінійної регресії загальної кількості хмарності за період 2021-2050 рр.

Для перевірки рівня значущості коефіцієнта a були обрані ряди $ТС$ в точках з найбільшими по модулю значеннями a та точки розташовані в різних районах Марокко (рис. 4.3а). Аналіз показав, що при $\alpha = 0,05$ відзначається відсутність значущих коефіцієнтів. При $\alpha = 0,1$ значущим є коефіцієнт у вузлі 41164, розташованому біля міста Варзат в області Сус-Масса-Драа.

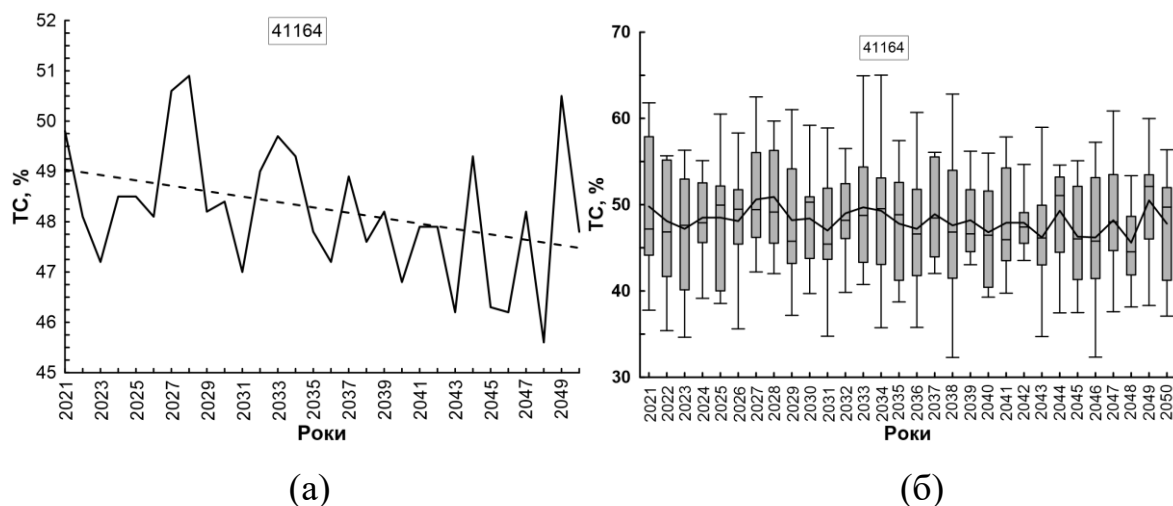


Рисунок 4.3 – Міжрічний хід TC (%) (суцільна лінія), лінійний тренд (пунктирна лінія) – (а) та міжрічний хід TC (%) у вигляді «ящика з вусами» – (б) у вузлі 41164

Аналіз діаграми «ящик з вусами» (рис. 4.3б), побудованої для ряду загальної кількості хмарності в вузлі 41164 показав, що значення медіани більше середнього значення на 0,3 %. Розкид значень 25-го перцентиля становить 6,1 %, а 75-го перцентиля – 7,7 %. Різниця величини середньорічної загальної кількості хмарності між 25-й і 75-й перцентиллями становить в середньому 8 %.

4.1.3 Річні зміни загальної кількості хмарності

Формування режиму хмарності відбувається під впливом циркуляційних процесів і впливом на повітряні маси підстильної поверхні [26]. Схили гір роблять значний вплив на утворення хмарності, на навітряних схилах відбувається вимушене натікання повітряних потоків і виникає впорядкована конвекція гірничо-долинної циркуляції, в результаті чого відбувається інтенсивне хмароутворення і збільшується повторюваність похмурого неба. На підвітряних схилах, завдяки низхідним рухам повітря, хмарність розмивається.

Джерелами вологих повітряних мас, що потрапляють на територію Марокко, є перенесення вологого Атлантичного повітря вглиб континенту і проникнення вологого тропічного повітря з Західної Африки на територію Марокко. Гірські масиви Середнього, Високого Атласу і Ер-Рифа істотно впливають на повторюваність хмарності в цих районах,

створюють розкид в розподілі від сезону до сезону, та значне розмаїття її форм. Високі значення TC на Атлантичному узбережжі, в основному, викликані перенесенням на континент хмарності утвореної над поверхнею Атлантичного океану і в зоні берегової лінії [93, 94, 129].

Річний хід хмарності, в основному, визначається циркуляційними процесами, але в гірських районах провідну роль у його формуванні може грати сезонність у розвитку конвекції. Це відбувається на підвітряних схилах гір, де фронтальна хмарність, пов'язана з процесами загальної циркуляції атмосфери, розмивається при перевалюванні через гірські хребти. Для аналізу сезонних змін TC були збудовані графіки річного ходу в вузлах сітки моделі, розташованих в різних фізико-географічних районах Марокко (рис. 4.4). Розрахунки РКМ показали, що в 2021-2050 рр. характер річного ходу TC буде мати три типи.

Тип 1. Для даного типу буде характерний максимум у річному ході TC в грудні-січні, а мінімум в липні-серпні (рис. 4.5). Даний тип річного ходу TC буде відзначатися в північній частині Марокко в гірських районах Середнього Атласу і Ер-Рифу, на узбережжі Середземного моря і Атлантичного океану.

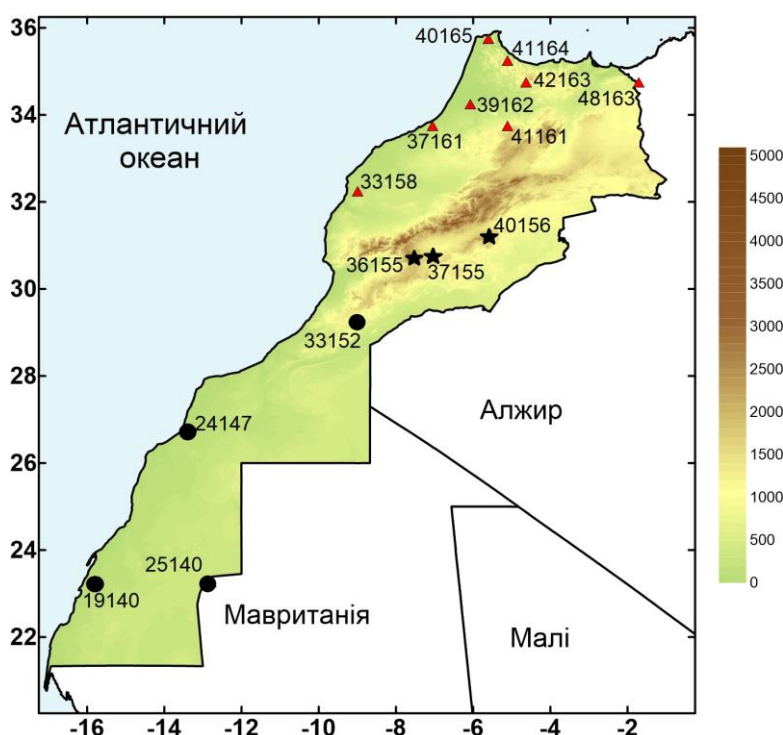
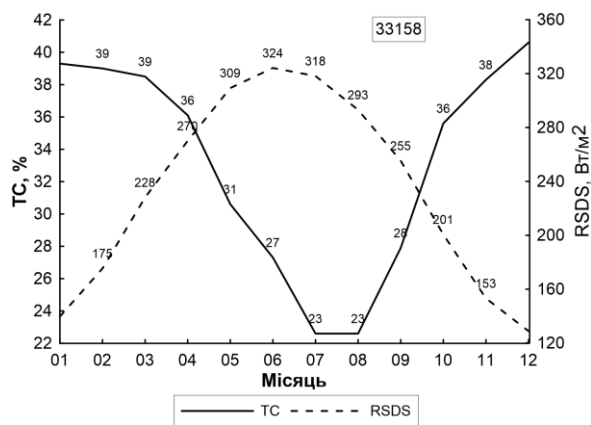
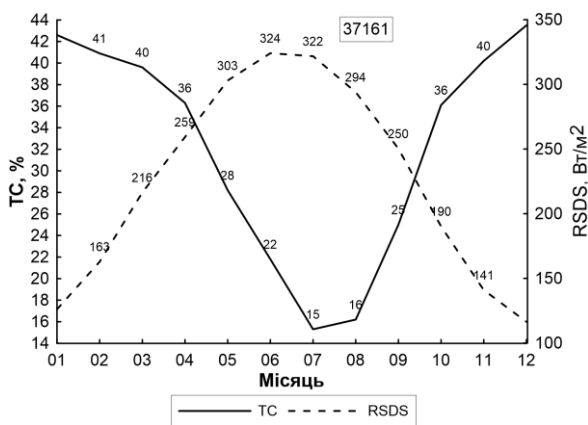


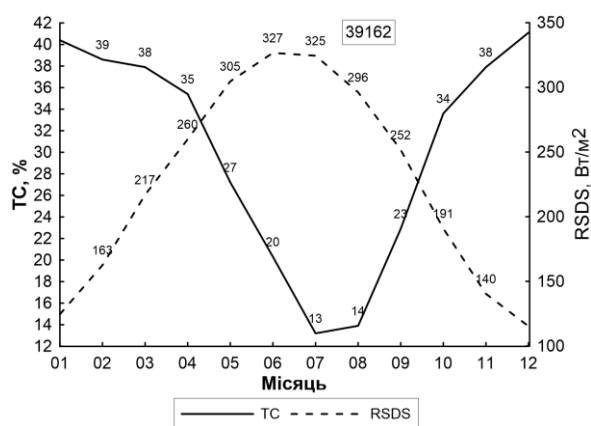
Рисунок 4.4 – Схема розташування вузлів сітки моделей (в кольорі рельєф місцевості): тип 1 – червоні трикутники, тип 2 – зірки, тип 3 – чорні крапки



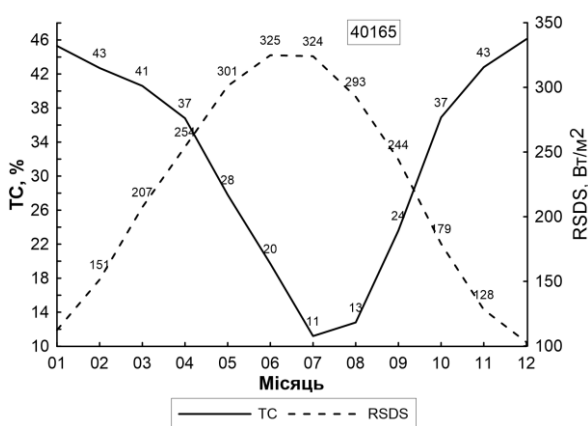
(a)



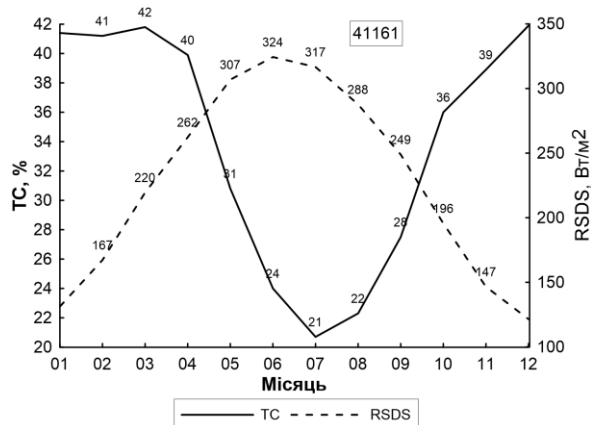
(б)



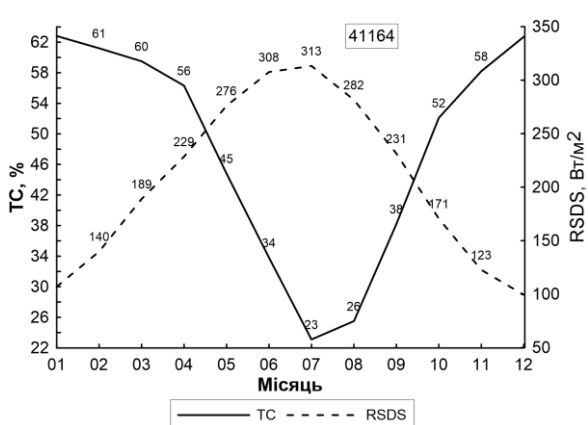
(в)



(г)



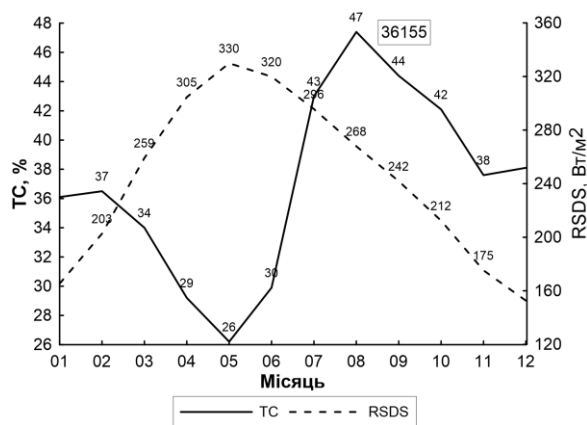
(д)



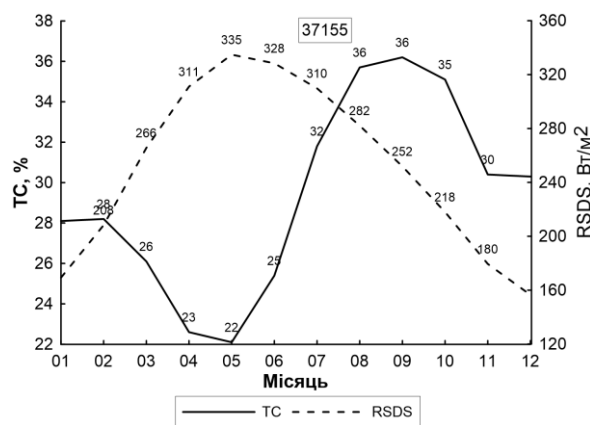
(е)

Рисунок 4.5 – Річний хід TC (%) тип 1 та $RSDS$ (Вт/м²) у вузлах: 33158 – (а), 37161 – (б), 39162 – (в), 40165 – (г), 41161 – (д), 41164 – (е)

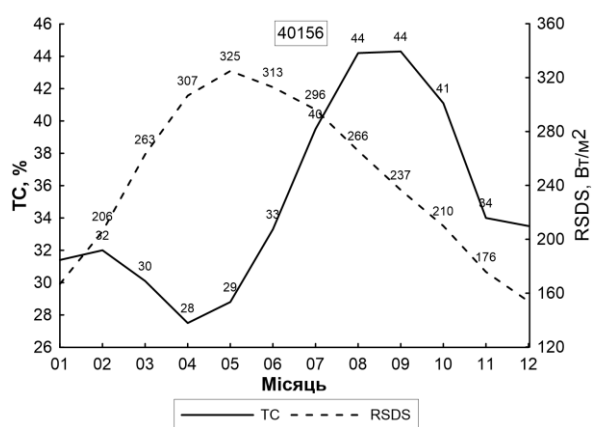
Тип 2. Для даного типу максимум TC прогнозується в серпні-вересні, а мінімум в квітні-травні (рис. 4.6). Територія, на якій буде поширений такий тип річного ходу TC , включає гірські райони Антиатласу.



(а)



(б)



(в)

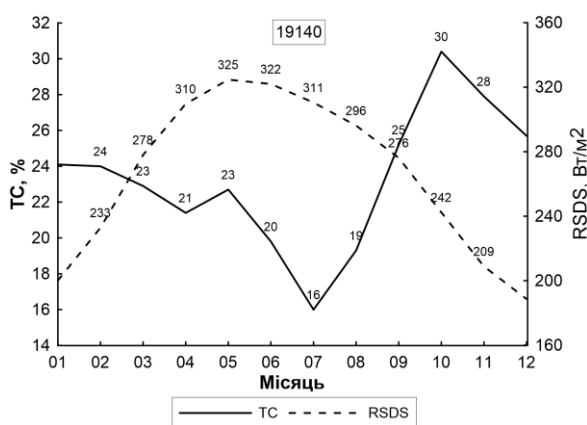
Рисунок 4.6 – Річний хід TC (%) тип 2 та $RSDS$ (Вт/м²) у вузлах:
36155 – (а), 37155 – (б), 40156 – (в)

Тип 3. Відмінною особливістю даного типу річного ходу є наявність максимуму TC в жовтні, а мінімуму в червні-липні (рис. 4.7). Такий тип річного ходу буде відзначатися на території південної частини Марокко.

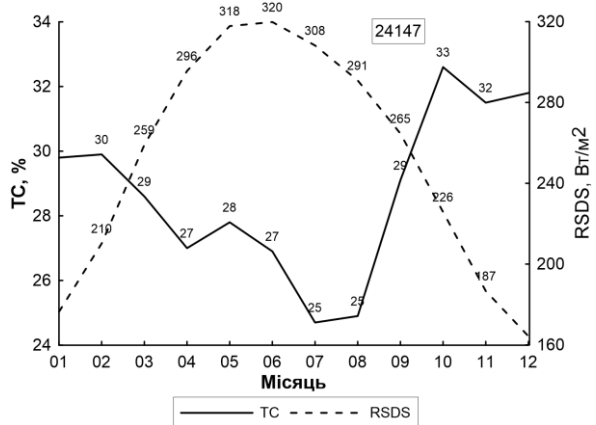
В цілому середньомісячні величини TC матимуть такі значення (рис. А.6-А.7). У північній частині Марокко на прибережних рівнинах Атлантичного океану, на Середземноморському узбережжі, в горах Ер-Рифу і гірських плато, розташованих в північно-східній частині країни з грудня по березень середньомісячні значення TC становитимуть 40-60 % [130], а в період з червня по серпень не будуть перевищувати 30 %.

У гірських районах Високого і Середнього Атласу в липні-вересні величина TC буде перебувати в межах 40-70 %, а в квітні-травні від 20 до

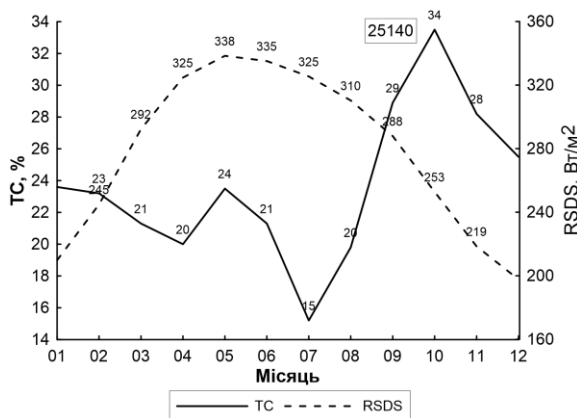
30 %. На ділянці Атлантичного узбережжя від міста Агадір до кордону з Мавританією, в період з травня по жовтень величина TC складе 40-60 %, а в решту часу буде перебувати в межах 30-40 %. У південній частині Марокко, виключаючи узбережжі Атлантичного океану, у вересні-жовтні кількість TC , прогнозоване моделями складе 30-40 %, а в квітні-серпні близько 10-20 %.



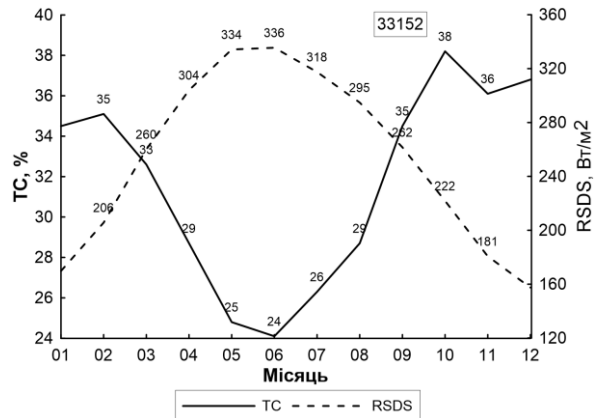
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 4.7 – Річний хід TC (%) тип 3 та $RSDS$ (Вт/м²) у вузлах:
19140 – (а), 24147 – (б), 25140 – (в), 33152 – (г)

Таким чином, територія Марокко може бути розділена на 3 зони за характером майбутнього річного ходу $ТС$, а це в свою чергу говорить, що на її формування в різних частинах країни будуть впливати різні чинники.

Збільшення $ТС$ в зимові місяці в північній частині Марокко може бути пов'язане з тим, що в субтропічній зоні циркуляція атмосфери взимку носить циклонний характер [26].

У гірських районах Атласу і Антиатласу, основним фактором, що впливає на формування режиму хмарності, може виступати розвиток конвективних процесів в літні місяці, які призводять до локального хмароутворення. Як показано в [37], літні опади на території Марокко викликані впливом Атлаських гір, і простежуються в збільшенні повторюваності злив і гроз в цьому районі. Взимку на підвітряних схилах відбувається розмивання фронтальної хмарності, тому літній максимум і зимовий мінімум в річному ході хмарності обумовлений сезонною зміною в умовах конвекції [26].

Зростання $ТС$ в червні-липні і мінімум в жовтні в південній частині країни, і відмінність у річному ході $ТС$ на півночі і півдні Марокко пояснюється зміною від місяця до місяця повторюваності різних циркуляційних погодних типів, які по різному впливають на хмароутворення в цих районах. Згідно [37], в липні і серпні близько в 90 % випадків відбувається встановлення циркуляційних типів (типи E і NE) з якими не пов'язано випадання опадів на території країни. У жовтні та грудні-січні ситуація змінюється, зменшується повторюваність типів з якими пов'язана суха погода (повторюваність типу NE знижується до 25 % в жовтні і до 10 % в грудні) і збільшується відсоток типів пов'язаних з випадінням опадів. Причому, якщо з типами SW і S пов'язано випадання опадів по всій території Марокко, то типи W, NW і C пов'язані з опадами на півночі і сухою погодою на півдні, а типи SE і E пов'язані з сухою погодою на півночі і дощовою на півдні країни. У жовтні на частку погодних типів пов'язаних з випаданням опадів на півдні і сухими умовами на півночі доводиться до 40 %, а в грудні на частку погодних типів, з якими пов'язані опади тільки на півночі, припадає близько 20 % випадків.

Таким чином, можна зробити висновок, що в подальшому на півночі і півдні Марокко основною причиною яка впливає на формування режиму хмарності виступатимуть процеси загальної циркуляції атмосфери, а в гірських районах розвиток конвективних процесів в літні місяці.

4.2 Проекції потоків короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню для періоду 2021-2050 рр.

4.2.1 Просторовий розподіл потоків короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню

Як було сказано вище на кількість короткохвильової радіації (RSDS), крім широти місцевості, сильно впливає хмарність, присутність в атмосфері частинок аерозолів і пилу, а також вміст поглинаючих газів.

Для оцінки просторового розподілу RSDS по території Марокко, на основі ансамблю з 11 РКМ, було розраховано її середнє значення для періоду 2021-2050 рр. Результати розрахунку наведені на (рис. 4.8а).

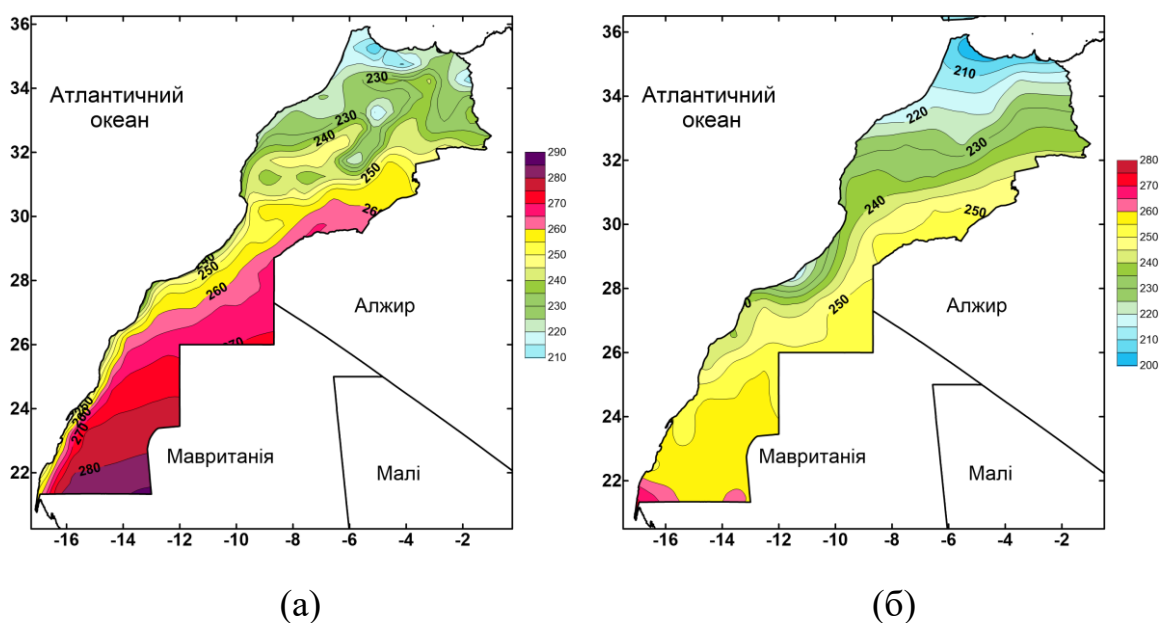


Рисунок 4.8 – Середнє значення RSDS (Вт/м^2): (а) – 2021-2050 рр.,
(б) – 2005-2015 рр. [89]

Аналіз показав, що розподіл RSDS матиме широтний характер з деяким відхиленням в гірських і прибережних Атлантичному океану районах. Найбільша кількість RSDS буде спостерігатися у внутрішніх областях південній частини Марокко і в районі гір Антиатласу (від 250 до 290 Вт/м^2). Найменша кількість RSDS відзначатиметься на півночі країни в областях Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма і Східної області, а так само в горах Середнього Атласу в області Фес – Мекнес (від 200 до 220 Вт/м^2).

Порівняння розподілу RSDS для періоду 2021-2050 рр. з розподілом для кліматичного періоду 2005-2015 рр., отриманого з супутникових спостережень (рис. 4.8б) показало, що в цілому при збереженні характеру розподілу моделі показали як зростання, так і зниження величини RSDS. Можна побачити, що зменшення RSDS очікується на узбережжі Атлантичного океану в районі Дахла (-10 Вт/м^2). Збереження величини RSDS моделі прогнозують в гірських районах Ер-Рифу, Високого Атласу (області окреслені ізорами 210 і 240 Вт/м^2), в Східній області, на ділянці Атлантичного узбережжя в районі рівнин Абда і Дуккала (міста Ес-Сувейра, Сафі, Ель-Джадіда), Ель-Аюна, а так само в районі Варзату. На решті території моделі прогнозують збільшення RSDS. На Центральному марокканському плато в областях Рабат – Сале – Кенітра, Касабланка – Сеттат, Марракеш – Сафі і на сході країни на південно-східних схилах Високого Атласу і в горах Антиатласу в областях Драа – Тафілалет і Сус – Масса прогнозується збільшення RSDS не більше ніж на 10 Вт/м^2 . У південній частині Марокко в областях Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра [131] і Дахла – Уед-ед-Дахаб і в області Гулімім – Уед-Нун моделі показали збільшення RSDS від 10 до 20 Вт/м^2 . Найбільше за величиною збільшення RSDS (до 20 Вт/м^2) прогнозується на узбережжі Атлантичного океану в області Гулімім – Уед-Нун в районі міста Тан-Тан та у внутрішніх районах цієї області.

Збільшення в зимові місяці RSDS від 3 до 5 Вт/м^2 в областях Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма, Східна, Фес – Мекнес, Рабат – Сале – Кенітра, Бені-Меллаль – Хеніфра, демонструють модельні розрахунки, отримані італійськими вченими, в результаті дослідження кліматичних змін в Середземноморському басейні в рамках програми CLIM-RUN [54].

Викликає зацікавлення оцінка зміни кількості RSDS в районах розміщення сонячних електростанцій. Як говорилося в розділі 1 пунктами розгортання основних геліоенергетичних проєктів до 2020 р. будуть Варзат, Мідельт, Буждур і Ель-Аюн. Розглянемо більш докладно, які зміни можна очікувати в даних районах.

В області Драа – Тафілалет моделі прогнозують збільшення RSDS на 10 Вт/м^2 або збереження сьогоденних величин. В області Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра, де розташуються великі станції в Буждур і Тіскрад, розрахунки моделей показали збереження величини RSDS. В районі Марракеша прогнозується збільшення RSDS близько 10 Вт/м^2 .

4.2.2 Міжрічний хід потоків короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню

Для визначення динаміки в приході короткохвильової радіації, на основі її середньорічних значень, були розраховані коефіцієнти і побудовані рівняння лінійної регресії в кожному вузлі сітки моделей. На рис. 4.9 представлено розподіл коефіцієнта a по території Марокко. Аналіз показав, що розподіл коефіцієнта a рівняння лінійної регресії RSDS має схожий характер з розподілом коефіцієнта a для рядів середньої кількості хмарності. Причина цього полягає в тому, що при розрахунку RSDS моделі враховують кількість хмарності в даному районі, тому тенденція в приході радіації містить тенденцію в зміні хмарності.

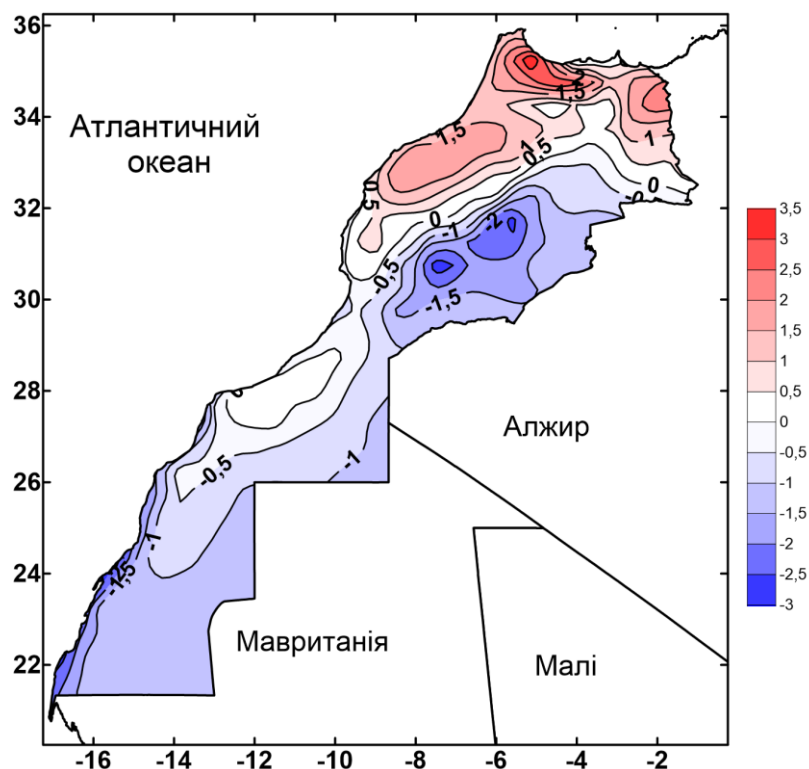


Рисунок 4.9 – Коефіцієнт A (Вт/м^2) рівняння лінійної регресії RSDS для періоду 2021-2050 рр.

Позитивна тенденція в кількості RSDS відзначатиметься в гірському районі Ер-Риф, на північному сході країни в Східній області, в районі рівнин в областях Бені-Меллаль – Кеніфра, Сеттат – Касабланка, Марракеш – Сафі. Ці райони відповідають районам з негативною

тенденцією в загальній кількості хмарності. Зменшення RSDS відзначатиметься на східних схилах Атлаських гір, в басейні річки Дадес біля Варзазату, в горах Антиатласу і на узбережжі Атлантичного океану в південній частині Марокко. Найбільше зростання RSDS можна очікувати в горах Ер-Риф в районі Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма ($3,5 \text{ Вт/м}^2$ за 30 років). Найбільше зменшення – в горах Антиатласу ($-2,7 \text{ Вт/м}^2$ за 30 років).

Для перевірки рівня значущості коефіцієнта α були обрані ряди RSDS в точках з найбільшими по модулю значеннями α , та точки розташовані в різних районах Марокко (рис. 4.10).

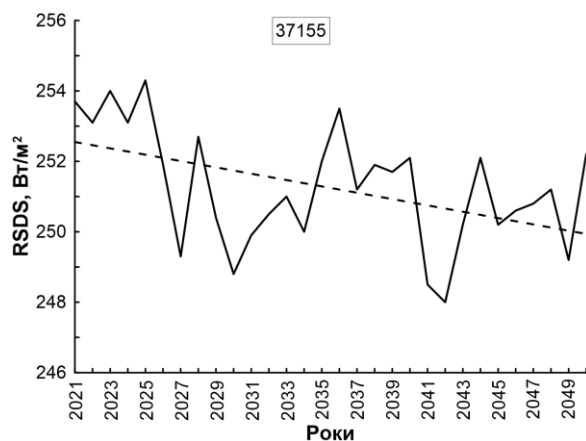
Аналіз показав, що при $\alpha = 0,05$ значущими є коефіцієнти в вузлах, що потрапляють на територію гірських районів Антиатласу і північної частини Марокко. Вузли 41164 і 41163 знаходиться в горах Ер-Риф в області Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма, вузли 36155, 37155, 40156 розташовані в горах Антиатласу в області Сус – Маса. При $\alpha = 0,1$ до вище перерахованих додаються коефіцієнти в вузлах: 35159, розташованому в районі прибережних рівнин Атлантичного океану в області Сттат – Касабланка і в вузлі 48163, розташованому біля міста Уджда в Східній області.

Аналіз діаграм «ящик з вусами» (рис. 4.10), побудованих для рядів RSDS показав, що значення медіани менше середнього значення на $0,3-1,5 \text{ Вт/м}^2$. Розкид значень 25-го перцентилі становить $7-14 \text{ Вт/м}^2$, а 75-го перцентилі становить $11-17 \text{ Вт/м}^2$. Різниця величини RSDS між 25-й і 75-й перцентиліями становить в середньому $8-11 \text{ Вт/м}^2$.

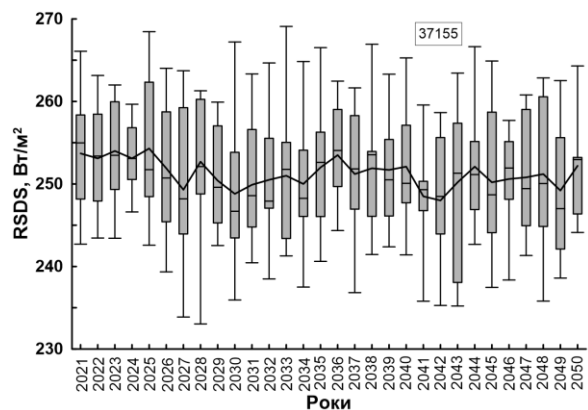
З вище сказаного можна відзначити, що районами з найбільшою негативною тенденцією RSDS є райони, в яких розміщені сонячні електростанції Нур Варзазат I-IV.

4.2.3 Річні зміни потоків короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню

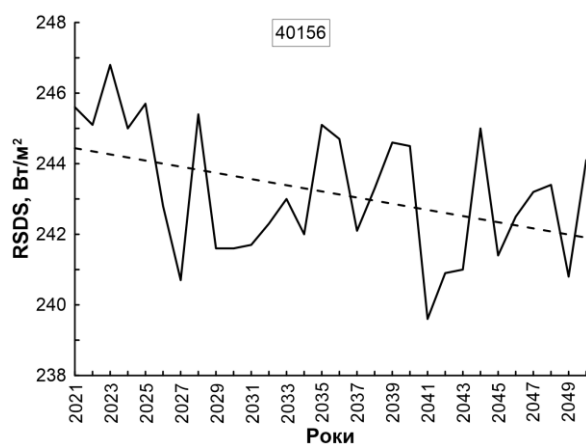
На річну зміну RSDS впливає хід кількості сонячної радіації, яка прибуває, обумовлений астрономічними факторами (обертання Землі навколо Сонця, нахил осі обертання Землі по відношенню до площини орбіти Землі (екліптики), добове обертання Землі) і річний хід загальної кількості хмарності.



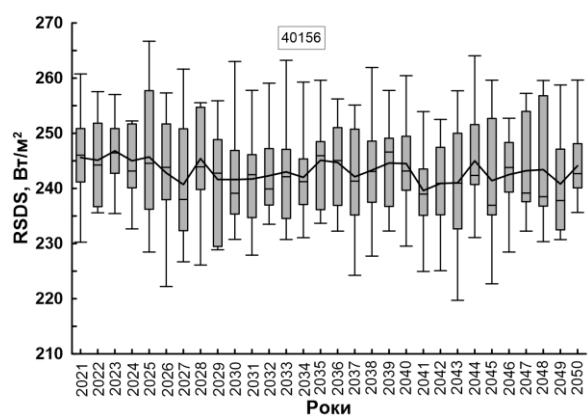
(а)



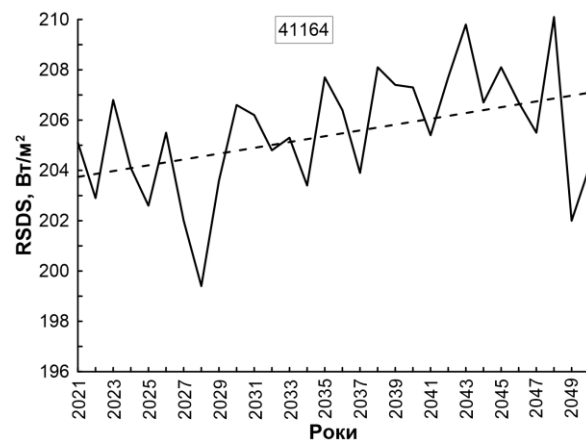
(б)



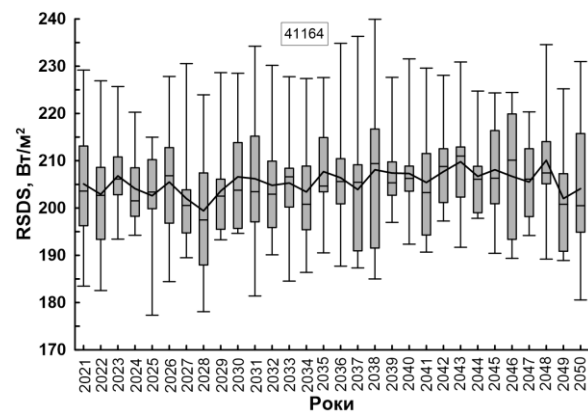
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 4.10 – Міжрічний хід RSDS (Вт/м²) (суцільна лінія), лінійний тренд (пунктирна лінія) та у вигляді «ящика з вусами» у вузлах: 37155 – (а, б), 40156 – (в, г), 41164 – (д, е)

Характер сезонних змін в приході сонячної радіації (інсоляції) добре простежується в зміні її добових сум на верхній межі атмосфери і змінюється на різних широтах.

У позатропічних широтах Північної півкулі річний хід інсоляції має один максимум в червні і один мінімум в грудні [11, 26]. Амплітуда сезонного коливання інсоляції збільшується зі збільшенням широти. Наприклад, за Алісовим амплітуда річної зміни добових сум сонячного тепла на верхній межі атмосфери на широті 20° півн. ш. (відповідної півдню Марокко) становить 340 кал/см^2 , на широті 30° півн. ш. (відповідної центральній частині Марокко) вона дорівнює 525 кал/см^2 , а на широті 40° півн. ш. (розташованої на 4° на північ від Танжера) вже досягає 695 кал/см^2 . Влітку інсоляція в субтропіках через стійку ясну погоду досягає майже такого рівня, як і в тропічних широтах [26].

Для аналізу сезонних змін RSDS були побудовані графіки річного ходу в вузлах сітки моделі, розташованих в різних фізико-географічних районах Марокко і для яких проводився аналіз TC (рис. 4.5-4.7).

Аналіз показав, що на більшій частині території Марокко характер річного ходу RSDS буде відповідати річному ходу інсоляції (рис. А.8-А.9), і максимум RSDS відзначатиметься в червні місяці (на рис. 4.11 вузли сітки моделі виділені червоними трикутниками). Величина RSDS для цих випадків буде коливатися в межах від 316 Вт/м^2 (в горах Ер-Риф, вузол 42163) до 335 Вт/м^2 (на півдні гір Антиатлас, вузол 32152).

В обраних вузлах сітки моделей які розташовані на півдні країни і в горах Антиатласу максимум RSDS відзначатиметься в травні місяці (на рис. 4.11 вузли виділені чорними крапками). У цих вузлах значення RSDS отримують величину від 325 Вт/м^2 (вузол 19140) до 338 Вт/м^2 (вузол 25140).

Окремо потрібно виділити вузол моделі 41164 (на рис. 4.11 позначений зіркою), розташований в горах Ер-Риф, в якому максимум в річному ході RSDS відзначатиметься в липні, і складе 313 Вт/м^2 . Мінімум RSDS у всіх відібраних вузлах відзначатиметься в грудні місяці і його величина буде складати від 99 Вт/м^2 в вузлі 41164 до 198 Вт/м^2 в вузлі 25140.

Відхилення в ході RSDS від ходу інсоляції і зміщення його максимуму на травень місяць (рис. 4.6) в гірських районах Антиатласу полягає в наступному. Як зазначалося в п. 4.1.3, мінімум в річному ході TC в гірських районах буде спостерігатися в травні місяці, в червні-липні

відзначається збільшення кількості TC , що буде призводити до зменшення кількості RSDS в ці місяці. Максимум RSDS в травні в вузлах, розташованих на півдні Марокко, можна пояснити збільшенням активності пилових бур в червні-липні в цьому районі [132].

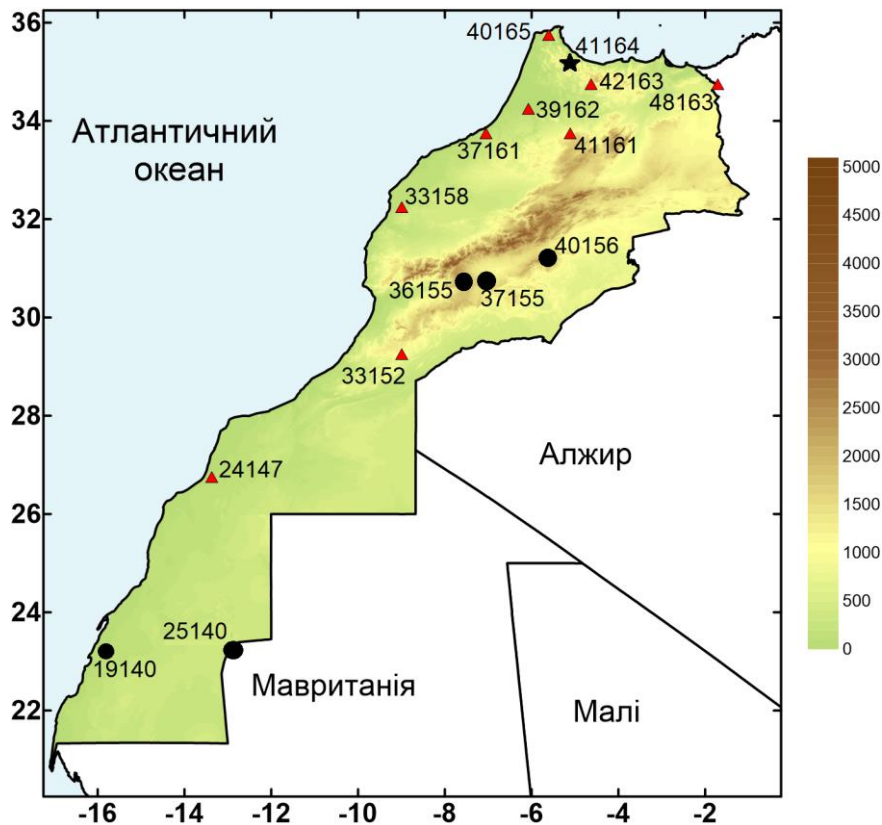


Рисунок 4.11 – Схема розташування вузлів сітки моделей (в кольорі рельєфу місцевості)

Відхилення максимуму RSDS на липень місяць у вузлі 41164, розташованому в горах Ер-Риф, пояснюється зменшенням на 11 % TC (найбільшим серед відібраних вузлів) від червня до липня (рис. 4.7), що призводить до збільшення RSDS в липні в порівнянні з червнем місяцем.

4.3 Висновки до розділу 4

1. Аналіз розподілу загальної кількості хмарності показав, що у 2021-2050 рр. більша частина території Марокко буде характеризуватися незначною кількістю хмарності. У гірських районах Високого Атласу, Ер-Рифу і Таоурірт-Уджди, та на ділянках Атлантичного узбережжя в районі

населених пунктів Ель-Джадіда, Сафі, Ель-Аюн, Буждур, Дахла моделі прогнозують підвищену кількість хмарності (від 40 до 60 %). Найбільш низькі значення загальної кількості хмарності (до 20 %) будуть характерні для прикордонних з Алжиром районів адміністративної області Сус – Маса, що лежать біля підніжжя південних схилів Антиатласу.

2. Найбільше зростання загальної кількості хмарності відносно сучасних кліматичних показників очікується в південній частині Атлантичного узбережжя Марокко в районі Дахла та в гірських районах Високого, Середнього Атласу і Ер-Рифу. Найбільше зменшення очікується в районі гірського проходу Таза та біля підніжжя південно-східних схилів Антиатласу в районі міст Тата і Загора.

3. В майбутньому розподіл середньорічної короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню матиме квазіширотний характер з деяким відхиленням в гірських і прибережних Атлантичному океану районах. Районами з найбільшим геліоенергетичним потенціалом будуть внутрішні області південної частини Марокко і південні схили гір Антиатласу, де поряд з підвищеними величинами короткохвильової радіації прогнозуються мінімальні значення загальної кількості хмарності.

4. Очікувані зміни короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню у 2021-2050 рр. відносно сучасних кліматичних умов мають як позитивні так і негативні значення. Прогнозоване зниження приходу короткохвильової радіації в південній частині Атлантичного узбережжя в районі міста Дахла збігається зі зростанням загальної кількості хмарності в цьому районі, прогнозованому РКМ. На більшій частині території Марокко РКМ показали збільшення потоку короткохвильової радіації або збереження його значень. Відмінності у величині і знаку зміни короткохвильової радіації, отримані автором в порівнянні з аналогічними результатами інших дослідників, отриманими для північній частини Марокко, викликані різним кроком сітки РКМ і фактичних даних.

5. Характер річного ходу короткохвильової радіації на більшій частині території Марокко буде відповідати річному ходу інсоляції з максимумом в червні місяці. На півдні країни і в горах Антиатласу максимум відзначатиметься в травні місяці, а в горах Ер-Риф в липні. Відхилення максимуму від червня місяця викликані характером річного ходу хмарності або сезонними змінами в повторюваності пилових бур.

ВИСНОВКИ

Результати регіонального кліматичного моделювання проекту CORDEX-Африка показали, що в Марокко у 2021-2050 рр. в районах розміщення основних вітропарків збережуться високі значення швидкості вітру, та очікується значима тенденція до зростання швидкості вітру або збереження її величини. На ділянці узбережжя Атлантичного океану від міста Ес-Сувейра до Агадира і від міста Тан-Тан до південного кордону з Мавританією прогноуються умови сприятливі для розміщення великих ВЕУ з номінальною вироблюваної потужністю до 10 МВт, які в разі об'єднання можуть створювати великі вітрові електростанції. В той же час південна половина території Марокко має складні кліматичні умови, вона є малонаселеною і не має розвиненої інфраструктури, а транспортування вироблюваної в цьому районі електроенергії в північні райони країни буде вимагати додаткових витрат на установку і обслуговування ліній електропередач, що в свою чергу збільшить собівартість вироблюваних кВт електроенергії.

1. Найбільш густонаселена північна половина Марокко, де розміщені основні об'єкти господарської діяльності, буде характеризувати незначними запасами вітрових ресурсів і тільки в районі Гібралтарської протоки в області Танжер – Тетуан – Ель-Хосейма в період з лютого по квітень моделі прогноують умови, які характеризуються середніми запасами вітрових ресурсів. В адміністративних областях Марракеш – Сафі і Сус – Масса прогноуються значні запаси вітрових ресурсів. Використання вітрових турбін класу III надасть можливість забезпечення електроенергією невеликі населені пункти та господарства розташовані в областях Бені-Меллаль – Хеніфра, Фес – Мекнес і Східної області.

2. У найбільш густонаселених районах максимум в річному ході швидкості вітру буде відзначатися в холодний період року, що збігається з періодом зростання використання електроенергії споживачами.

3. У пунктах розгортання основних геліоенергетичних проєктів РКМ прогноують збільшення кількості короткохвильової радіації, яка надходить на підстильну поверхню (область Драа – Тафілалет і в районі Марракеша) або збереження її поточних значень (в області Ель-Аюн – Сегіет-ель-Хамра).

4. Областю з найбільш високими значеннями приходячої радіації буде внутрішня частина країни, розташована на південь від Атлаських гір, що є найбільш малонаселеною і тому малоперспективною для розгортання геліоенергетичних проектів.

Проведений аналіз показав, що в прогнозах швидкості вітру, загальної кількості хмарності та потоків короткохвильової радіації з малим кроком сітки (44 км) проявляються особливості в їх розподілі, які неможливо простежити в розрахунках з великим масштабом. Це дозволяє оцінити регіональні умови формування вітрових і геліоенергетичних ресурсів. Отримання в майбутньому даних кліматичного моделювання з кроком сітки до 10 км, надасть можливості визначити найбільш оптимальні місця для розміщення установок, які використовують енергію вітру та сонця.

У дослідженні не застосовувалися характеристики використання енергії по районах Марокко, тому наступним кроком в цьому напрямі, може бути проведення вивчення необхідних і можливих для даної території ресурсів енергії, що збільшить економічну ефективність їх використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pedraza J. M. Electrical energy generation in Europe. The current situation and perspectives in the use of renewable energy sources and nuclear power for regional electricity generation. Vienna: Springer International Publishing Switzerland, 2015. 640 p.

2. Акулинин А., Смыков В. Оценка возможностей солнечной энергетики на основе точных наземных измерений солнечной радиации. *Пробл. региональной энергетики*. 2008. № 1(6). С. 29-39

3. IRENA, REmap: Roadmap for a Renewable Energy Future, 2016 Edition. International Renewable Energy Agency (IRENA). URL: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REmap_2016_edition_summary.pdf (дата звернення 10.02.2018)

4. Nfaoui H., Sayigh A.A.M. Contribution of Renewable Energy to Morocco's Energy Independence. *ISESCO Journal of Science and Technology*. 2015. Vol. 11(19). Pp. 90-96.

5. Бородкина Н. В. Французская политика в области возобновляемых источников энергии в Марокко в начале XXI века. *Вестник САФУ. Серия «Гуманитарные и социальные науки»*. 2015. № 3. С. 5-10.

6. Renewable Energy Transitions in Jordan and the MENA Region. Amman: Friedrich Ebert Stiftung, 2015. 70 p.

7. Background Paper: Country Fact Sheet Morocco Energy and Development at a glance / Schinke B., Klawitter J. et al. Bonn: Germanwatch, 2016. 58 p.

8. Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014. Premiers resultats relatifs a la region de l'Oriental. Direction regionale d'Oujda, 2015. URL: http://www.hcp.ma/region-oriental/docs/RGPH2014/Premiers%20Resultas%20du%20RGPH%202014final_29_04_2015.pdf (дата звернення 10.02.2018)

9. Zhang M. H. Wind Resource Assessment and Micro-siting: Science and Engineering. Singapore: China Machine Press, 2015. 293 p. DOI:10.1002/9781118900116

10. Europe's onshore and offshore wind energy potential: An assessment of environmental and economic constraints. EEA Technical report No 6/2009 / Swart R.J. Coppens C. Gordijn H. Piek M. et al. Copenhagen: European Environment Agency, 2009. 85 p. DOI 10.2800/11373

11. Матвеев Л. Т. Общая метеорология. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 751 с.
12. Кондратьев К. Я. Актинометрия. Ленинград: Гидрометеиздат, 1965. 690 с.
13. Измерение солнечного излучения в солнечной энергетике: Мониторинг потока солнечной энергии для фотоэлектрических и концентрирующих солнечных электростанций. URL: <http://www.kippzonen.com> (дата звернения 10.02.2018)
14. Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев Д. В. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Ленинград: «Наука», 1989. 310 с.
15. Влияние спектра излучения на характеристические кривые солнечной батареи / Тимченко С. Л., Дементьева О. Ю., Задорожный Н. А. *Физическое образование в ВУЗах*. 2015. Т.21. №1. С. 3-13
16. Forecasted Changes in West Africa Photovoltaic Energy Output by 2045 / Buri Bazyomo S.D.Y., Agnidé Lawin E., Coulibaly O. et al. *Climate*. 2016. 4(53). Pp.1-15. doi:10.3390/cli4040053
17. Методические указания «Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок». РД 52.04.275-89. Москва: Госкомгидромет, 1991. 57 с.
18. Квитко А.В. Характеристики ветра, особенности расчёта ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики. *Научный журнал КубГАУ*. 2014. №97(03). С. 1-12.
19. Млявая Г.В. Влияние параметров шероховатости подстилающей поверхности на скорость ветра. *Ecologia și Geografia. Buletinul AȘM. Științele vieții*. 2014. № 2(323). С. 181-187.
20. Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Использование климатических баз данных для оценки природно-ресурсного и технического потенциала ветровой энергии. *Вестник аграрной науки Дона*. 2010. № 1. С. 27-32
21. Журавлёв Г.Г. Оценка ветроэнергетического потенциала Томской области. *Вестник Томского государственного университета*. 2001. Т. 274. С. 141-147
22. Тажиев И.Т. Энергия ветра – база электрификации сельского хозяйства. Ленинград: Гос. энерг. изд-во, 1952. 192 с.

23. Дробышев А.Д., Пермьяков Ю.А. Ветровая энергия и её возможный вклад в ресурсосбережение и экологию Прикамья: Учебное пособие. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1997. 112 с.
24. Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 80 с.
25. Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо: пер. С англ.; под ред. Я.И. Шефтера. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 272 с.
26. Алисов Б.П. Климатология. Москва: Изд-во МГУ, 1974. 300 с.
27. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология: Учебник-5-е изд. перераб. и доп. Москва: Изд-во МГУ, 2001. 528 с.
28. Лайхтман Д.Л. (ред.) Динамическая метеорология. Ленинград: Гидрометиздат, 1976. 612 с.
29. Основы динамической метеорологии / Гандин Л.С., Лайхтман Д.Л., Матвеев Л.Т. и др. Ленинград: Гидрометеиздат, 1955. 647 с.
30. Рекомендации по определению климатических характеристик гелиоэнергетических ресурсов на территории СССР. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 30 с.
31. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (база климатических данных): Учебное пособие. Москва: Из-во МФТИ, 2010. 56 с.
32. Севастьянова Л.М., Никольченко Ю.Н. Потенциальные ветро- и гелиоэнергетические ресурсы в Алтайском крае. *Вестник Томского государственного университета*. 2012. № 365. С. 187-193.
33. Вейнберг Б.П. Гелиоэнергетические ресурсы СССР. Атлас энергетических ресурсов СССР. Москва; Ленинград: Объединен. науч.-техн. изд-во, 1935. Т. 1, ч. III: Гидроэнергетические, ветроэнергетические, гелиоэнергетические ресурсы. 127 с.
34. Гаврилов Н.И. Марокко. Москва: Географгиз, 1998. 187 с.
35. Born K., Christoph M., Fink A. H. et al. Moroccan Climate in the Present and Future: Combined View from Observational Data and Regional Climate Scenarios. *Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa. Environmental Science and Engineering (Environmental Science)* / F. Zereini, H. Hötzel (eds.). Berlin: Springer, Heidelberg, 2008. Pp. 29-45. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-540-85047-2_4
36. EarthwiseTM URL: <http://earthwise.bgs.ac.uk> (дата звернения 10.02.2018)

37. Born K., Fink A. H., Knippertz P. Meteorological processes influencing the weather and climate of Morocco. *Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa* / Edited by P. Speth, M. Christoph, B. Diekkrüger et al. Berlin: Springer, Heidelberg, 2010. Pp. 150-163.
38. McSweeney C., New M., Lizcano G. UNDP Climate Change Country Profiles: Morocco. 2006. University of North Texas Libraries, Digital Library. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc226616/> (дата звернення 10.02.2018)
39. Nfaoui H., Buret J., Sayigh A. A. M. Wind characteristics and wind energy potential in Morocco. *Solar Energy*. 1998. Vol.63(1). Pp. 51-60.
40. Nfaoui H., Essiarab E., Sayigh A.A.M. Wind energy and its economy in south of Morocco. *Proceedings of the 8th World Renewable Energy Congress*. 28 August – 3 September 2004. Denver, Colorado (USA), 646 p.
41. Nfaoui H., Buret J., Sayigh A. A. M. Stochastic simulation of hourly average wind speed sequences in Tangiers (Morocco). *Solar Energy*. 1996. Vol.56(3). Pp. 301-314.
42. Nfaoui H., Essiarab E., Sayigh A. A. M. A stochastic Markov chain model for simulating wind speed times series at Tangiers, Morocco. *Renewable Energy*. 2004. Vol.29. Pp. 1407-1418.
43. Sadouk A., Djebli A. Wind Energy Potential in Tetuan City Northern of Morocco. *International Journal of Science and Research*. 2015. Vol.4(10). Pp. 689-693.
44. Toward an accurate assessment of wind energy platform of Mohammedia city, Morocco / Raihani A., Hamdoun A., Bouattane O. et al. *Engineering Science and Technology: An International Journal*. 2012. Vol.2(5). Pp. 951-958.
45. Mentis D. Wind energy assessment in Africa. A GIS-based approach: Master of Science Thesis / Stockholm. 2013. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:640338/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення 10.02.2018)
46. Devis A., Van Lipzig N.P.M., Demuzere M. Should future wind speed changes be taken into account in wind farm development? *Environ. Res. Lett.* 2018. Vol.13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabff7>
47. Dell'Aquila A., Calmanti S., Davies M., Schmidt P. Climate information for the wind energy industry in the Mediterranean Region: from

ENSEMBLES to MEDCORDEX. URL: <http://www.climrun.eu> (дата звернення 10.02.2018)

48. Nfaoui H. & Sayigh, A. Study of direct solar radiation in Ouarzazate (Morocco). *Sustainability in Energy and Buildings*. 2013. Vol. 2, Pp. 36-43.

49. Nfaoui H., Sayigh A. Renewable energy, large project in Morocco, 500mW solar and wind potential at Ouarzazate region, Morocco. *World Renewable Energy Forum*, 13-17 May 2012, Denver, Colorado, USA. Pp. 4782-4789.

50. Nfaoui H., Buret J. Estimation of daily and monthly direct, diffuse and global solar radiation in Rabat. *Renewable Energy*. 1993. Vol.3(8). Pp. 923-930.

51. Tadili R. Bargach M.N. Une méthode d'estimation du rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée Application aux sites marocains. *La Météorologie*. 2005. n°50. Pp. 46-50.

52. Diabate L., Blanc P., Wald L. Solar radiation climate in Africa. *Sol. energy*. 2004. Vol.76. Pp. 733-744.

53. Richts C. The Moroccan Solar Plan – a comparative analysis of CSP and PV utilization until 2020: master thesis / Christoph Richts. Kassel, 2012. URL: http://www.uni-kassel.de/eecs/fileadmin/datas/fb16/remena/theses/batch2/MasterThesis_ChriChris_Richts.pdf (дата звернення 10.02.2019)

54. Calmanti S., Dell'Aquila A. Advanced solar resource risk management: Solar radiation long term scenarios. CLIM-RUN Product Information Sheet: March 2014. URL: <http://www.climrun.eu> (дата звернення 10.02.2019)

55. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe / Jerez S, Tobin I, Vautard R, et al. *Nature Communications*. 2015. 6:10014. doi:10.1038/ncomms10014

56. Толстых М. А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития. *Труды Гидрометцентра России*. 2016. Вып. 359. С. 5-32.

57. Морозова П. А., Рыбак О. О. Регионализация данных глобального климатического моделирования для расчёта баланса массы горных ледников. *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57 № 4. С. 437-452.

58. Li J.-L. F. et al. Characterizing and understanding radiation budget biases in CMIP3/CMIP5 GCMs, contemporary GCM, and reanalysis / Li J.-L. F. et al. *Journal of geophysical research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118. Pp. 8166-8184. doi:10.1002/jgrd.50378

59. Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: evaluation of a WRF multi-physics ensemble / Katragkou E. et al. *Geosci. Model Dev.* 2015. 8. Pp. 603-618. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-603-2015>
60. Федулов К.В., Астафьева Н.М. Циркуляция атмосферы и структура климатических изменений (по данным спутникового мониторинга). Москва: Ротапринт ИКИ РАН, 2008. 33 с.
61. A regime view of the North Atlantic Oscillation and its response to anthropogenic forcing / Woollings T., Hannachi A., Hoskins B., Turner A. *Journal of climate*. 2010. Vol.23. Pp.1291-1307. DOI: [10.1175/2009JCLI3087.1](https://doi.org/10.1175/2009JCLI3087.1)
62. IPCC, 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 / Edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge;; New York: Cambridge University Press, 1535 p.
63. Mitas C. M., Clement A. Has the Hadley cell been strengthening in recent decades? *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32(3). Pp. 1-5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021765>
64. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing / Vecchi G. A. et al. *Nature*. 2006. Vol. 441. Pp. 73-76.
65. Held I.M., Soden B.J. Robust response of the hydrological cycle to global warming. *J. Climat.* 2006. Vol. 9(1). Pp. 5686-5699.
66. Influence of Saharan dust on cloud glaciation in southern Morocco during the Saharan Mineral Dust Experiment / Ansmann A., Tesche M., Althausen D., Muller D. et al. *Journal of Geophys. Research*. 2008. Vol. 113. Pp. 148-227. doi:[10.1029/2007JD008785](https://doi.org/10.1029/2007JD008785)
67. Regional Climate Models Add Value to Global Model Data: A Review and Selected Examples / Feser F., Rockel B., von Storch H., Winterfeldt J., Zahn M. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 92(9) Pp. 1181-1192. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3061.1>
68. IS-ENES climate4impact portal. URL: <https://climate4impact.eu/> (дата звернення 10.02.2019)
69. Dosio A., Panitz HJ. Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models. *Clim Dyn.* 2016. Vol. 46. Pp. 1599-1625. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2664-4>

70. Evaluation of the CORDEX-Africa multi-RCM hindcast: systematic model errors / Kim J., Waliser DE., Mattmann CA. et al. *Clim Dyn.* 2014. Vol. 42. Pp. 1189-1202. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1751-7>
71. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation / Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D. et al. *Clim Dyn.* 2013. Vol. 40. Pp. 2091-2105. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>
72. Déqué M., Piedelievre J.-P. High-Resolution climate simulation over Europe. *Clim. Dyn.* 1995. Vol. 11. Pp. 321-339.
73. ARPEGE-Climate Version 6.2 Algorithmic Documentation. 2017. URL: <http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/arp62ca.july2017.pdf> (дата звернення 10.02.2019)
74. Déqué M., Drevet C., Braun A., Cariolle D. The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modeling. *Clim. Dyn.* 1994. Vol. 10. Pp. 249-266.
75. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2 / Chylek P. et al. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2011. Vol. 11. Pp. 22893-22907. <https://doi.org/10.5194/acpd-11-22893-2011>
76. Australia's CMIP5 submission using the CSIRO-Mk3.6 model. *Austr. Meteorol. and Oceanogr. Journal* / Jeffrey S., Rotstayn L., Collier M., Dravitzki S. et al. 2013. Vol. 63. Pp. 1-13.
77. Impact of the LMDZ atmospheric grid configuration on the climate and sensitivity of the IPSL-CM5A coupled model / Hourdin F., Foujols MA., Codron F. et al. *Clim. Dyn.* 2013. Vol. 40. Pp. 2167-2180. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1411-3>
78. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity / Watanabe M. et al. *J. Climate.* 2010. Vol. 23. Pp. 6312-6335.
79. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2 / Collins W.J., Bellouin N., Doutriaux-Boucher M., Gedney N. et al. *Geosci. Model Dev.* 2011. Vol. 4. Pp. 1051-1075. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>
80. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 / Giorgetta M.A., Jungclaus J., Reick C.H., Legutke S. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems.* 2013. Vol. 5. Pp. 572-597. [doi:10.1002/jame.20038](https://doi.org/10.1002/jame.20038)

81. Aerosol - climate interactions in the Norwegian Earth System Model – NorESM1-M / Kirkevåg A., Iversen T., Seland O., Hoose C. et al. *Geosci. Model Dev.* 2013. 6. Pp. 207-244. doi:10.5194/gmd-6-207-2013

82. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics / Dunne J.P., John J.G., Adcroft A.J., Griffies S.M. et al. *Journal of Climate*. 2012. Vol.25(19). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1>

83. Новое поколение климатических моделей / Павлова Т.В. и др. *Труды ИГО*. 2014. Вып. 575. С. 5-64.

84. Електронна база кліматичних даних. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата звернення 10.02.2019)

85. Електронна база кліматичних даних. URL: <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/EBAFSFC4Selection.jsp> (дата звернення 10.02.2019)

86. Електронна база кліматичних даних. URL: https://ceres.larc.nasa.gov/documents/DQ_summaries/CERES_EBAF-Surface_Ed4.0_DQS.pdf (дата звернення 10.02.2019)

87. Хохлов В. М., Моспан Н. О. Верифікація прогнозів середньомісячної температури ансамблем моделей проекту ENSEMBLES. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. №11. С. 93-100.

88. Електронна база кліматичних даних. URL: <https://www7.ncdc.noaa.gov> (дата звернення 10.02.2019)

89. Електронна база кліматичних даних. URL: <https://ceres-tool.larc.nasa.gov> (дата звернення 10.02.2019)

90. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science / Jolliffe I. T., Stephenson D. B. (Eds). Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. 240 p.

91. Ель Хадрі Ю., Хохлов В. М. Верифікація результатів регіональних кліматичних моделей стосовно режиму швидкості вітру і хмарності в Марокко. *Вісник ОДЕКУ*. 2017. №22. С. 61-68.

92. Хохлов В. М., Ель Хадрі Юссеф, Сліже М. О. Верифікація проєкцій регіональних кліматичних моделей для швидкості вітру в Марокко. Збірник центру наукових публікацій «Велес» за матеріалами VI міжнародної науково-практичної конференції 1 частина: «Осінні наукові читання», м. Київ: збірник статей. Київ: Центр наукових публікацій, 2017. 100 с.

93. Marzol M. V., Sánchez J. L., Yanes A. Meteorological patterns and fog water collection in Morocco and the Canary Islands. *Erdkunde*. 2011. Vol. 65(3). Pp. 291-303.

94. Marzol M. V., Sánchez J. L. Fog Water Harvesting in Ifni, Morocco. An Assessment of Potential and Demand. *Die Erde*. 2008. Vol. 139 (1-2). Pp. 97-119.

95. WeatherOnline Ltd. URL: <http://www.weatheronline.co.uk> (дата звернення 10.02.2019)

96. Komimeteo.ru URL: <https://www.komimeteo.ru> (дата звернення 10.02.2019)

97. Хохлов В. М., Ель Хадрі Ю., Сліже М. О. Міжрічна мінливість швидкості вітру в Марокко. Збірник за матеріалами міжнародної конференції «Наука і сучасність: виклики глобалізації». Київ: Центр наукових публікацій, 2017. 112 с.

98. Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами / под ред. Н.В. Кобышевой. Санкт-Петербург: ГГО им. А.И. Воейкова, 2008. 336 с.

99. Udalov S. N., Zubova N. V. Simulation of Wind Speed in the Problems of Wind Power. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2013. 6(2). Pp. 150-165. <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/9697>

100. Wind Power Generation and Wind Turbine Design / Edited by Jolliffe I. T., Stephenson D. B. Southampton: Boston: WIT Press, 2010. 725 p.

101. Голдаев С. В., Радюк К. Н. Расчет производительности ветроэнергетической установки большой мощности по усовершенствованной методике. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015. Т. 326. № 8. С. 17-32.

102. Al-Abbadi, Naif M., Shafiqur R. Wind Speed and Wind Power Characteristics for Gassim, Saudi Arabia. *International Journal of Green Energy*. 2009. 6(2). Pp. 201-217.

103. Elmabrouk A. M. Estimation of wind energy and wind in some areas (second zone) in Libya. *Ecologic vehicles – Renewable energies*, 26-29 March 2009. Monaco.

104. Schmidt P., Calmant S. Climate Information Products at the Maghreb Wind Energy Congress. *Clim-Ran Newsletter*. 2013. URL: <http://www.climrun.eu> (дата звернення 10.02.2019)

105. Ель Хадрі Ю., Хохлов В. М. Режим швидкості вітру в Марокко на початку XXI століття. *Вісн. Одес. держ. екол. унів.* 2017. №21. С.22-28.

106. El Hadri Y., Khoklov V. N., Slizhe M. O. Regional climate models projections of wind speed in Morocco for period 2020-2050. *Asian Journal of Environment & Ecology*. 2018. 6(3). Pp.1-7. DOI: [10.9734/AJEE/2018/41112](https://doi.org/10.9734/AJEE/2018/41112)

107. Хохлов В. М., Ель Хадрі Ю., Сліже М. О. Міжрічна мінливість швидкості вітру в Марокко. *Збірник центру наукових публікацій «Велес» за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції 2 частина: «Наука і сучасність: виклики глобалізації»*, м. Київ. Київ: Центр наукових публікацій, 2017. 112 с.

108. Эль Хадри Ю. Современный режим ветра в Марокко. *Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития»*. Москва, 20-22 марта 2017 г. / отв. сост. А.А. Трунов, П.Д. Полумиева, А.А. Романовская. Москва: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2017. 707 с.

109. Булашев С. В. Статистика для трейдеров. Москва: Компания Спутник+, 2003. 245 с.

110. Гончарова Л. Д., Школьный Є. П. Методи обробки та аналізу гідрометеорологічної інформації: навчальний посібник. Одеса: Екологія, 2007. 454 с.

111. Дарманян А. П. Использование показателей описательной статистики для характеристики эмпирических выборок макроэкономических индикаторов. *Экономика региона*. 2013. №2. С. 157-163.

112. Корнев В. П. Статистика теория статистики: учеб. пособие. Саратов: Саратовский государственный социально-экономический университет, 2012. 88 с.

113. Многолетняя изменчивость характеристик климата района гидрометеорологической обсерватории Тикси / Иванов Н. Е., Макштас А. П., Шутилин С. В., Гунн Р. М. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2009. № 1(81). С. 24-41.

114. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Москва: Финансы и статистика, 1986. Т. 1. 366 с.

115. Безруких П. П. Ветроэнергетика. Справочное и методическое пособие. Москва: ИД "Энергия", 2010. 315 с.

116. Эль Хадри Ю., Хохлов В. Н. Оценка ветрового энергетического потенциала Марокко. *Сахаровские чтения 2017 года: экологические проблемы XXI века: материалы 17-й международной научной*

конференції, 18–19 мая 2017 г., г. Минск, Республика Беларусь : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А.Д. Сахарова Бел. гос. ун-та; редкол. : С.Е. Головатый [и др.]; под ред. С.А. Маскевича, С.С. Позняка. Минск: Изд-во, 2017. Ч. 2. 264 с.

117. Семергей-Чумаченко А. Б., Слиже М. О., Эль Хадри Ю. Современный ветровой режим Марокко. *Research Bulletin SWorld*. 2015. 4(41,15). С. 42-47.

118. Слиже М. О., Семергей-Чумаченко А. Б., Ель Хадрі Ю. Современное распределение ветра в Марокко. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. №17. С. 61-69.

119. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 616 с.

120. Климатология: учебник для студ. вузов по спец. "Метеорология" / под ред О.А. Дроздова, Н.В. Кобышевой. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 567 с.

121. Zolotokrylin, A. N. Dry winds, dust storms and prevention of damage to agricultural land. *Natural disasters*. Vol. II. / Edited by Kotlyakov V. M. Singapore: EOLSS/UNESCO, 2010. Pp. 1-18 .

122. Слиже М. О., Ель Хадрі Ю. Райони формування та трансформація повітряних мас, які набувають властивості суховію на території України. *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2018. Вип. 48. С. 152-160.

123. Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations / Donat M.G., Leckebusch G.C., Wild S., Ulbrich U. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. 11. Pp. 1351-1370. [doi:10.5194/nhess-11-1351-2011](https://doi.org/10.5194/nhess-11-1351-2011)

124. Graybeal D. Y. Relationships among daily mean and maximum wind speeds, with application to data quality assurance. *Int. J. Climatol.* 2006. 26. Pp. 29-43. [DOI: 10.1002/joc.1237](https://doi.org/10.1002/joc.1237)

125. Harris A. R. On Establishing a Climatology of Gust Factors and Assessing Their Ability to Forecast Wind Gusts in Milwaukee, WI: master thesis. Milwaukee, 2016. URL: <https://dc.uwm.edu/etd/1150> (дата звернення 10.02.2019)

126. Хохлов В. М., Ель Хадрі Ю. Просторово-часовий розподіл показників швидкості вітру і добового максимуму швидкості вітру на території Марокко у 2020–2050 рр. *Вісник Київського нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Серія: Географія*. 2018. Вип. 1(70). С. 68-72.

127. Ель Хадрі Юсеф, Хохлов В. М., Сліже М. О. Результати розрахунків швидкості вітру та добового максимуму швидкості вітру у 2020-2050 рр. в Марокко за допомогою регіональних кліматичних моделей CORDEX-Africa. *Збірник центру наукових публікацій «Велес» за матеріалами IV міжнародної науково-практичної конференції 1 частина: «Весняні наукові читання», м. Київ: збірник статей.* Київ: Центр наукових публікацій, 2018. 108 с.

128. Шакиров В. А., Артемьев А. Ю. Методика учета влияния облачности на поток солнечной радиации по данным архивов метеостанций. *Системы. Методы. Технологии.* 2014. № 4(24). С. 79-83.

129. Bari D., Bergot T., El Khlifi M. Numerical study of a coastal fog event over Casablanca, Morocco. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 141(690). Pp. 1894-1905. DOI:10.1002/qj.2494

130. Ель Хадрі Ю., Хохлов В. М. Результати розрахунків регіональних кліматичних моделей кількості загальної хмарності в Марокко на період 2020-2050 рр. *Український гідрометеорологічний журнал.* 2018. №21. С. 21-27.

131. Assessment of surface downwelling shortwave radiation in 2021-2050 in Laayoune – Sakia El Hamra region, Morocco / El Hadri Y. et al. *EUREKA: Physics and Engineering.* 2019. № 2. С. 23-29.

132. Banks J. R. The Emission and Transport of Saharan Dust: Doctor of Philosophy thesis. Oxford, 2010. URL: <http://eodg.atm.ox.ac.uk/eodg/theses/Banks.pdf> (дата звернення 10.02.2019)

ДОДАТОК А

Густота населення в Королівстві Марокко

Густота населення регіонів Марокко

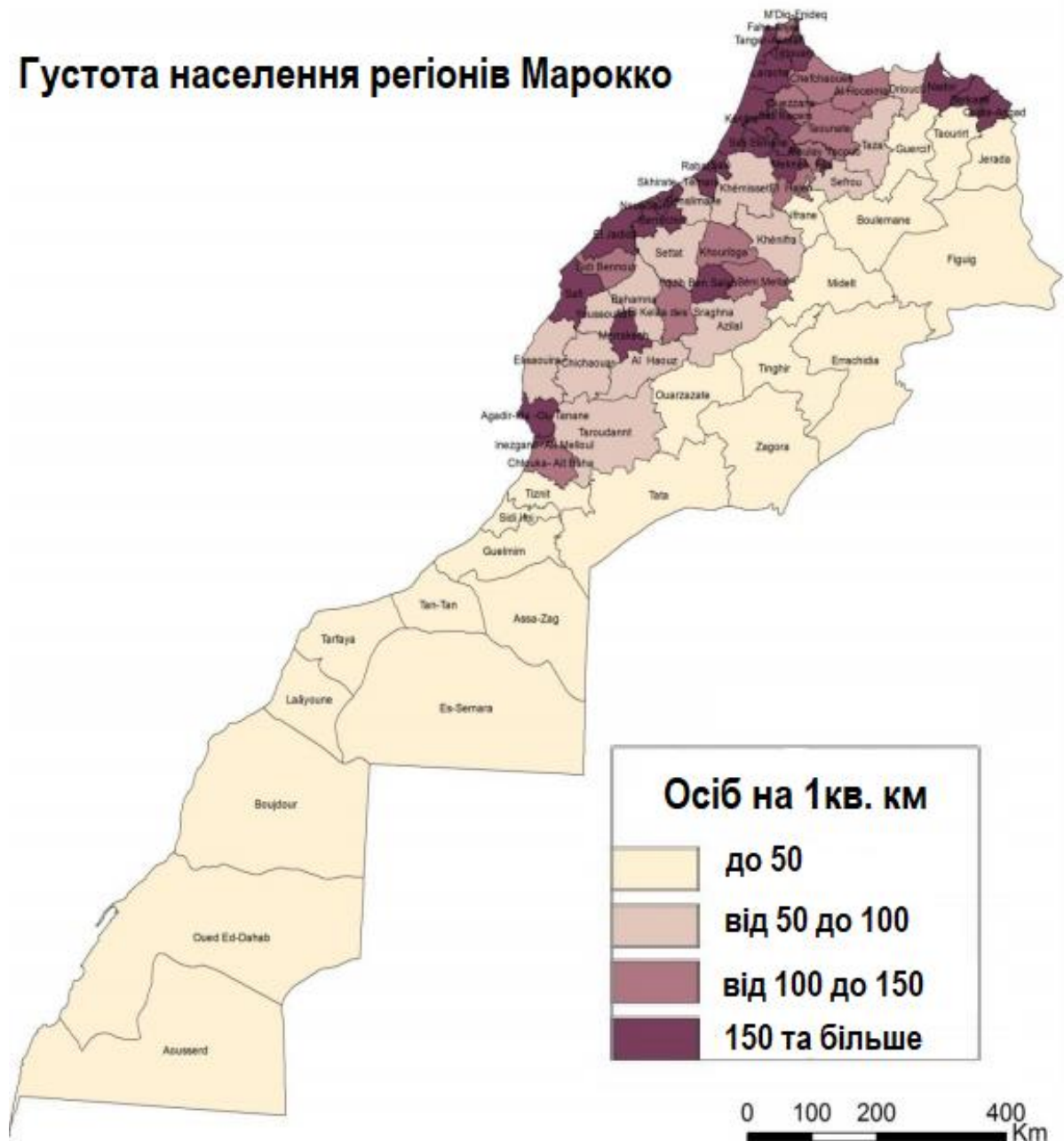


Рисунок А.1 – Густота населення за провінціями та префектурами Королівства Марокко за даними 2014 р. [6]

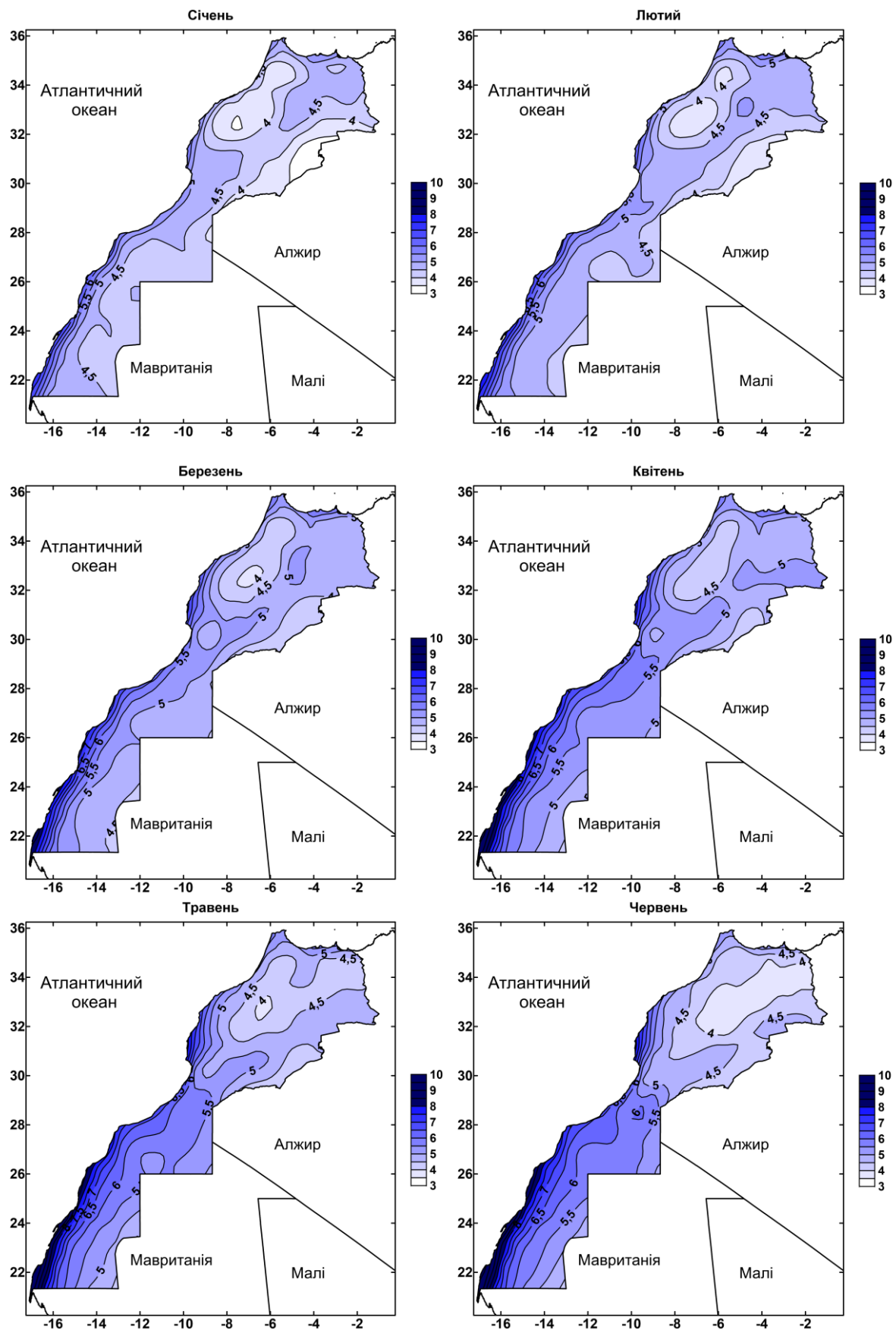


Рисунок А.2 – Середньомісячна швидкість вітру (м/с) для 2021-2050 рр.

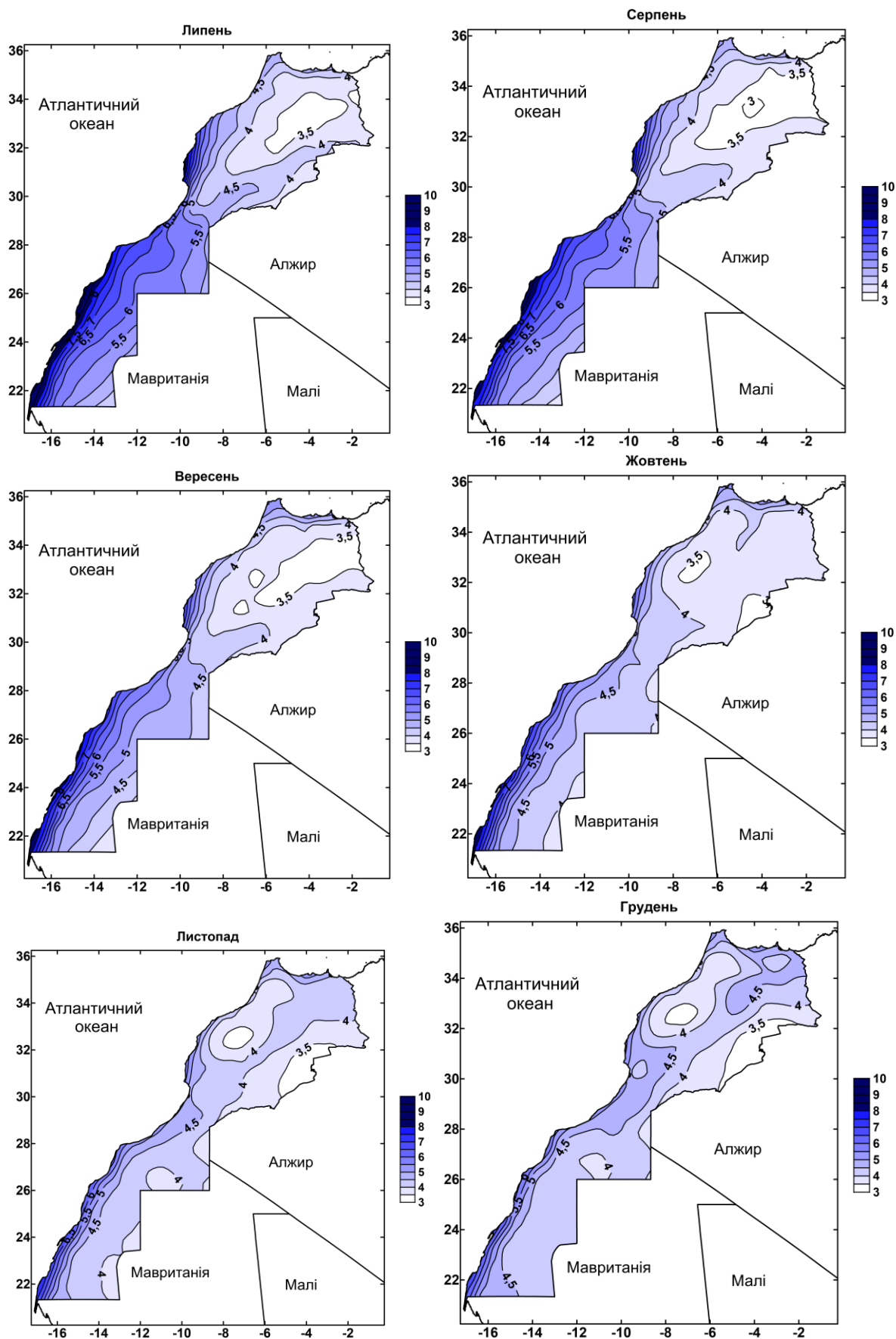


Рисунок А.3 – Середньомісячна швидкість вітру (м/с) для 2021-2050 рр.

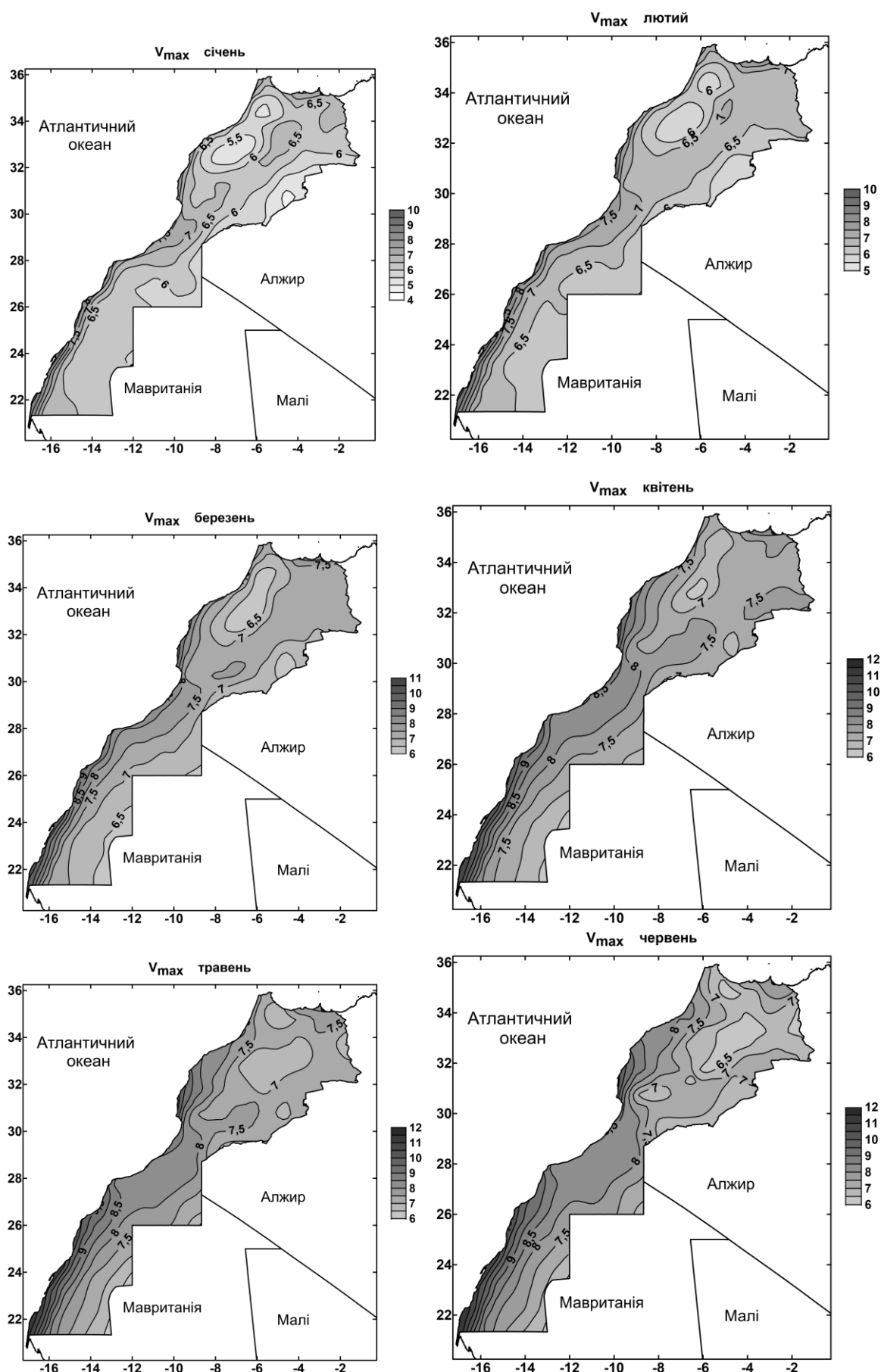


Рисунок А.4 – Середньомісячні значення V_{max} (м/с) для 2021-2050 рр.

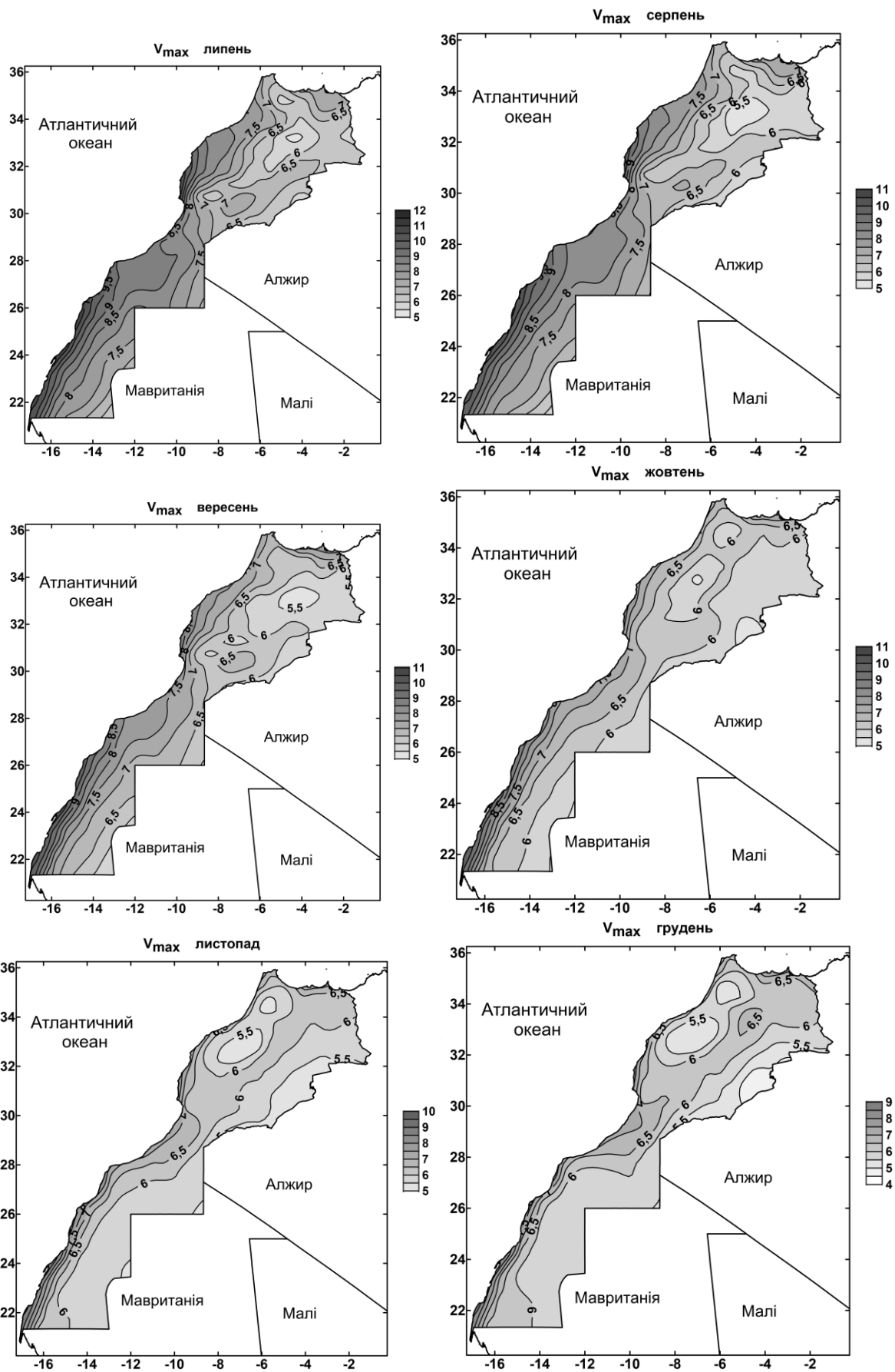


Рисунок А.5 – Середньомісячні значення V_{max} (м/с) для 2021-2050 рр.

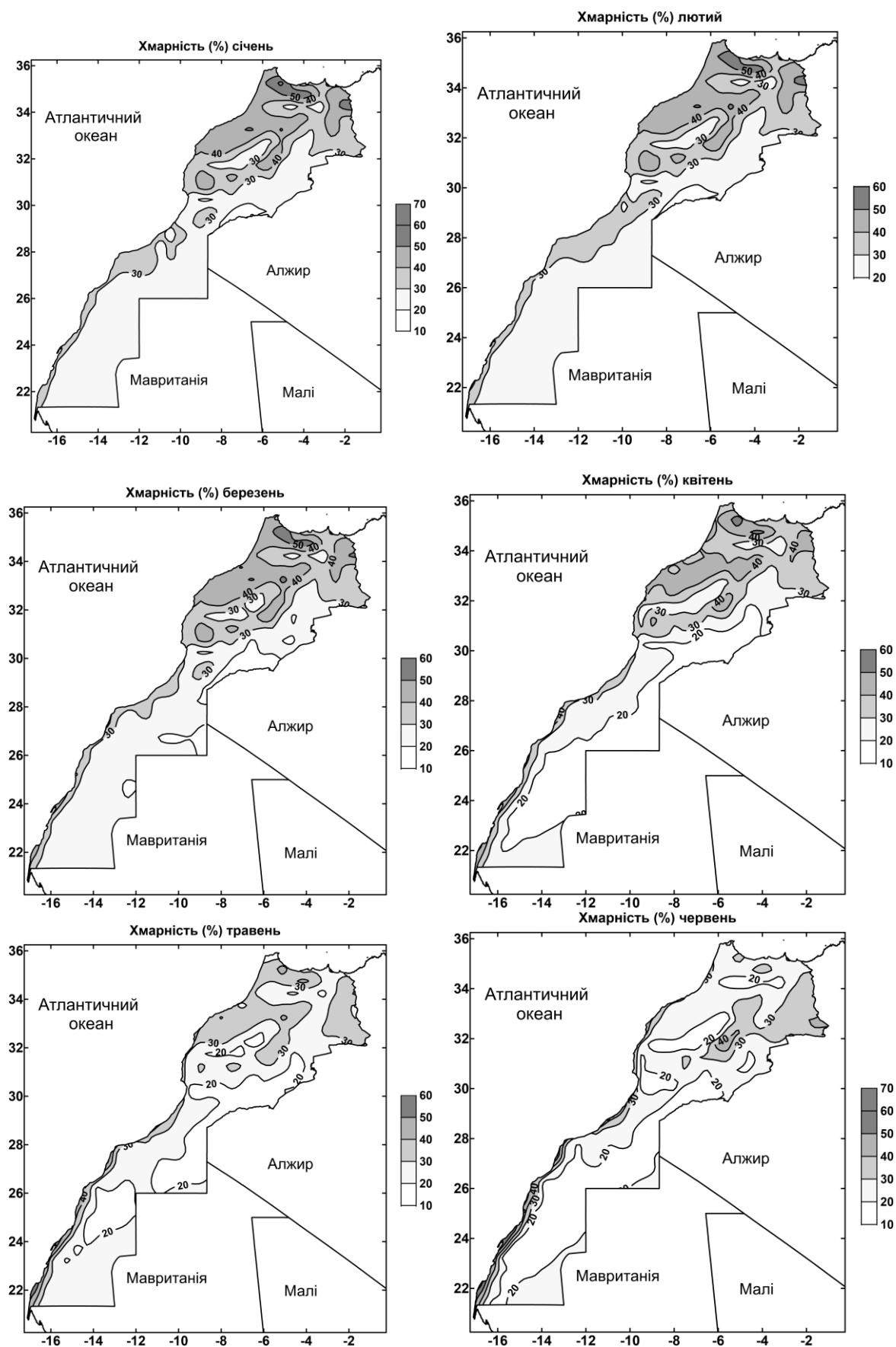


Рисунок А.6 – Середньомісячні значення TC (%) для періоду 2021-2050 рр.

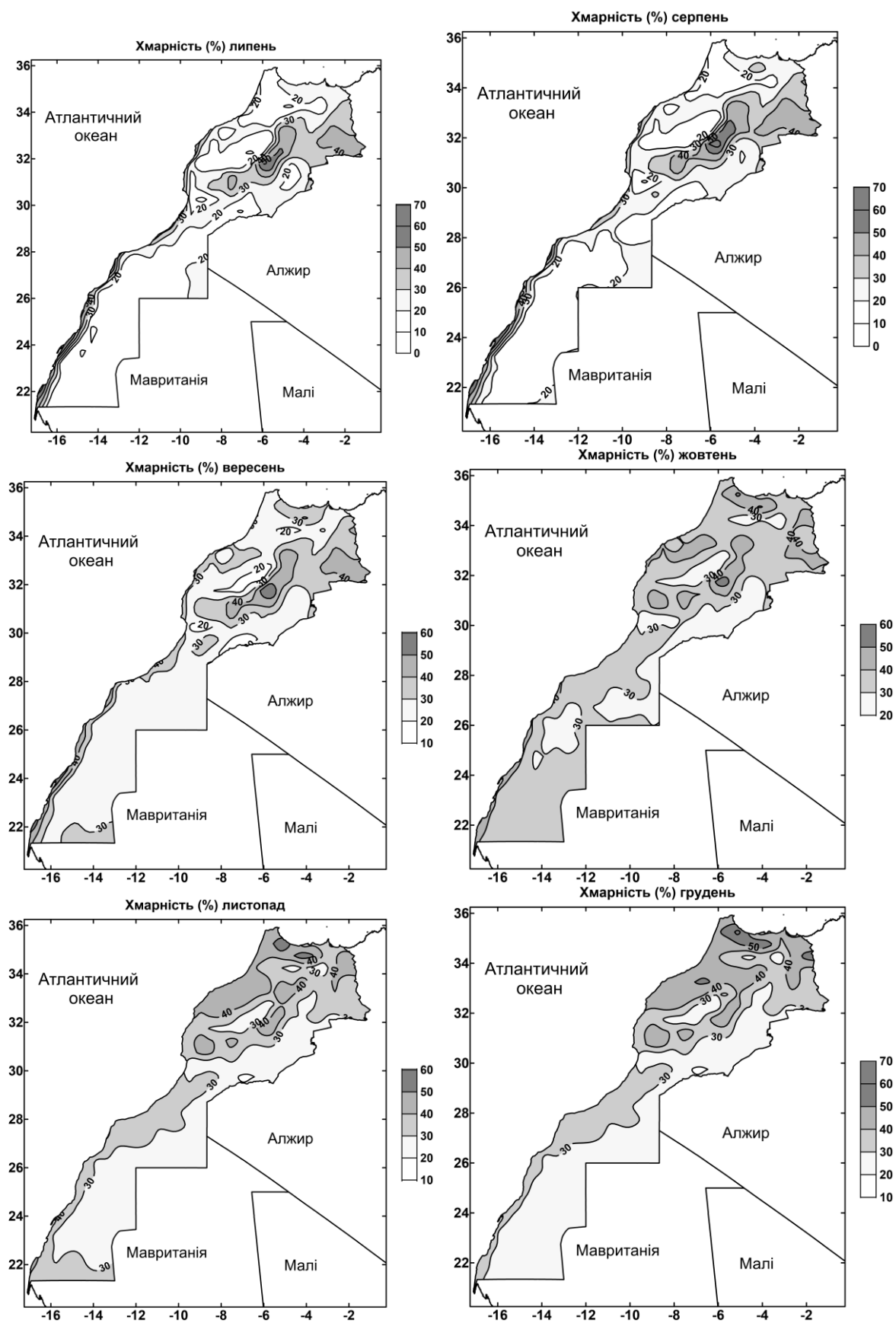


Рисунок А.7 – Середньомісячні значення TC (%) для періоду 2021-2050 рр.

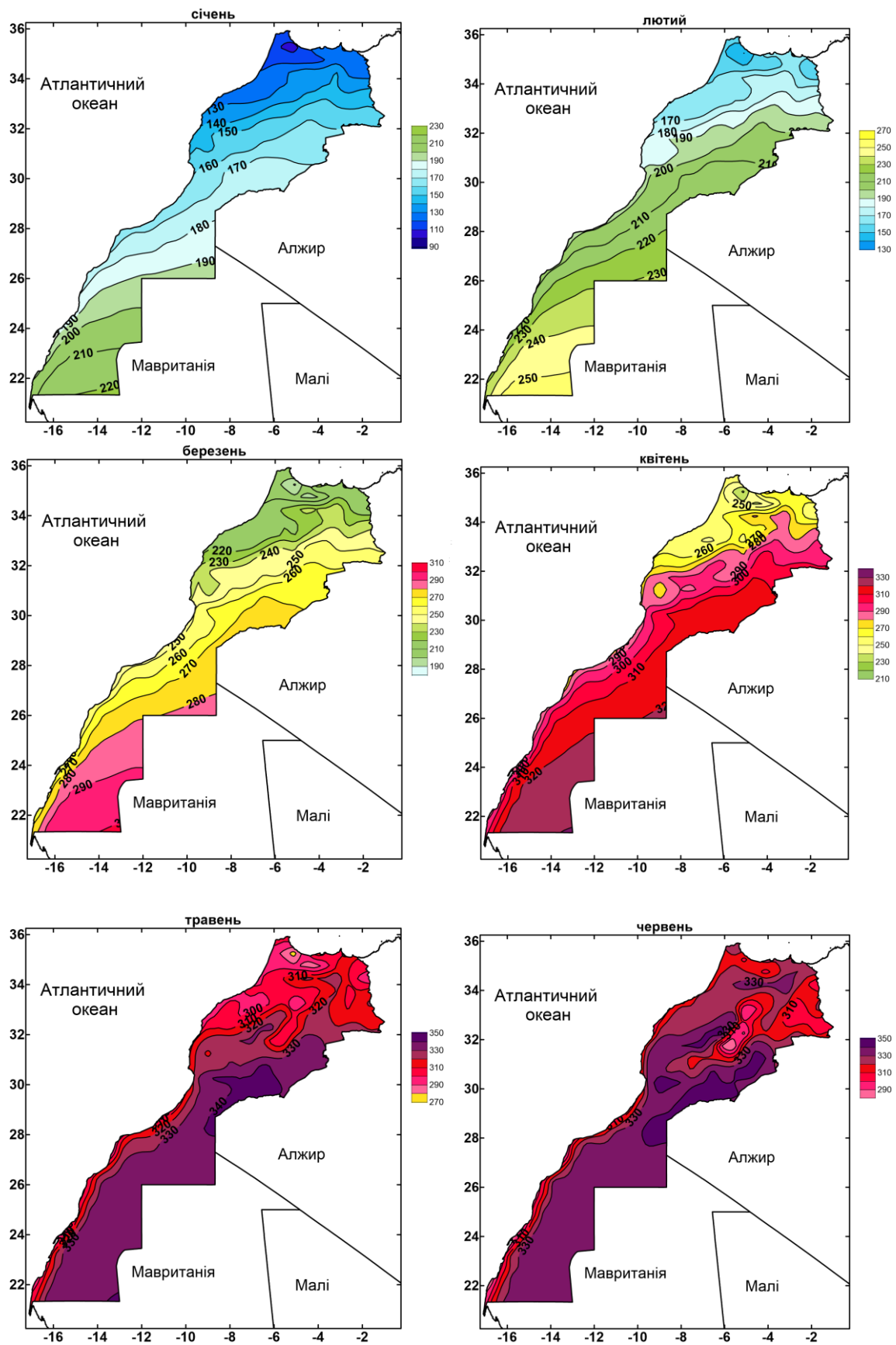


Рисунок А.8 – Середньомісячні значення RSDS (Вт/м^2) для 2021-2050 рр.

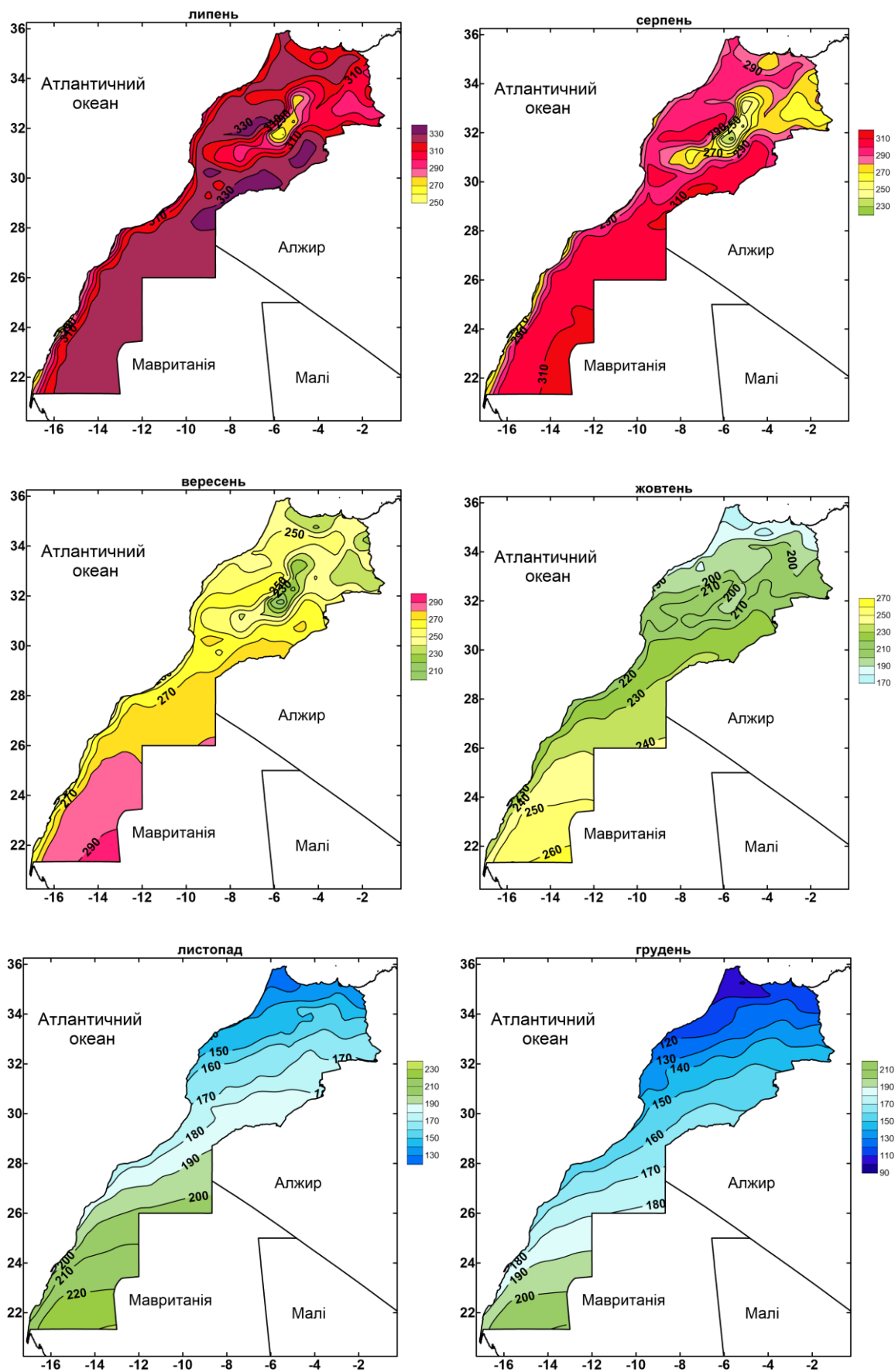


Рисунок А.9 – Середньомісячні значення RSDS (Вт/м^2) для 2021-2050 рр.

Наукове електронне видання

ЕЛЬ ХАДРІ Юссеф, ХОХЛОВ Валерій Миколайович

**ВІТРО- ТА ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ МАРОККО
ПІД ВПЛИВОМ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН**

Монографія

Видавець і виготовлювач

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016

тел./факс: (0482) 32-67-35

Е-mail: info@odeku.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016