

УДК 551.46.0:551.465

МОДЕЛЮВАННЯ З ВИСОКИМ РОЗДІЛЕННЯМ СКЛАДНИХ ВІТРОВИХ УМОВ НАД ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЮ ЧАСТИНОЮ ЧОРНОГО МОРЯ

**Р. В. Зазимко, С. Е. Романенко, І. Г. Рубан,
С. В. Іванов, Ю. С. Тучковенко, О. В. Дерик**

*Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
science@odeku.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

Досліджено можливості конвективно-роздільної моделі Harmonie при відтворенні мезомасштабних особливостей вітрового режиму над північно-західною частиною Чорного моря. Встановлено оптимальні розміри, проекція та геометрія області високого просторового розділення моделі над українською частиною акваторії Чорного моря, підготовлений цифровий формат берегової лінії відповідного розділення та проведені експерименти щодо інформативності та стійкості розрахунків.

Результати модельних розрахунків показали, що модель з просторовим кроком 2.5 км та кроком за часом 60 сек дає можливість детально відтворювати всю просторову мінливість вітрових умов до зазначеного масштабу та її еволюцію. Зокрема, виділяти окремі мезомасштабні, порядку десяти км, циркуляційні структури над однорідною морською поверхнею та відстежувати їх еволюцію; встановлювати положення смуг конвергенції в умовах збіжності потоків; відзначати просторові характеристики вздовж берега підвітряних смуг послаблення вітру за умов, якщо вітер дме від берега; деталізувати опис полів вітру в затоках і при складній конфігурації берегової смуги з урахуванням орографії; відтворювати послаблення вітру над областю міської забудови за рахунок збільшення шорсткості поверхні.

Порівняльний аналіз розрахункових полів вітру за моделями Harmonie і GFS (Global Forecast System) показав, що остання модель, маючи просторову роздільну здатність 25 км, в змозі адекватно відтворювати тільки великомасштабні атмосферні процеси над регіоном. Однак, при різкій зміні циркуляції, що супроводжується зміною напрямку вітру на протилежний та посиленням вітру, зазначається запізнення опису еволюції полів вітру. Крім того, модель GFS, внаслідок грубої просторової роздільної здатності, не в змозі враховувати мезомасштабні особливості атмосферної циркуляції, обумовлені відмінностями в типах підстильної поверхні, орографією, термічними контрастами і т.п. Порівняння модельних розрахунків зі спостереженнями на станціях Одеса-порт, Чорноморськ і порт Південний у період складних погодних умов показало, що осереднена за весь період розбіжність між модельними результатами та спостереженнями входить в допустимий інтервал помилки прогнозу (5 м/с) тільки для станції Одеса-порт за моделлю Harmonie. При помірних вітрах з боку берега розбіжність між модельними результатами і спостереженнями незначно (до 5-7 м/с) перевищує допустимий інтервал помилки прогнозу, тоді як при сильних вітрах східних румбів з боку моря розбіжність між модельними результатами та спостереженнями досягає катастрофічних значень у 20-25 м/с. Такі значення розбіжностей обумовлені, головним чином, розбіжностями у визначенні напрямку (до 180°) та швидкості вітру. Результати порівняння однозначно вказують на сумнівну репрезентативність спостережень вітру на станціях Чорноморськ та порт Південний, взагалі, а на станції Одеса-порт – частково.

Результати наведені в роботі свідчать, що застосування атмосферної мезомасштабної моделі високої роздільної здатності для прогнозування вітрових умов в північно-західній частині Чорного моря дозволить значно підвищити якість оперативних прогнозів мінливості океанографічних характеристик в прибережних зонах моря.

Ключові слова: конвективно-роздільна модель Harmonie, північно-західна частина Чорного моря, поле вітру.

1. ВСТУП

З 80-х років минулого століття оперативні прогнози стану атмосфери виконуються виклю-

чно з використанням чисельних моделей. В останні роки вони набули особливо інтенсивного розвитку. За цей період досягнуто незаперечні успіхи в прогнозуванні великомасштабної

циркуляції атмосфери. В порядку денному стоїть вдосконалення чисельного опису мезомасштабних особливостей. В центрі уваги знаходяться проблеми параметризації фізичних процесів та асиміляції даних спостережень. До перших відноситься удосконалення існуючих і розробка нових схем параметризації розвитку конвекції [1-3], радіаційних процесів [4], включно з розповсюдженням, розсіюванням та поглиненням короткохвильової сонячної радіації у неоднорідній за складом атмосфері та довгохвильовим випромінюванням з поверхні землі та хмарних прошарків, а також розвитком турбулентності у граничному шарі атмосфери та вертикальної турбулентної дифузії у вільній атмосфері [5, 6]. Потреба у розвитку нових методів асиміляції даних пов'язана зі стрибком у розвитку інструментальної бази на існуючих і нових платформах. Сучасні оперативні регіональні моделі атмосфери можуть використовувати високе просторове розділення з адаптованими схемами параметризації фізичних процесів. Серед таких моделей слід зазначити GME / COSMO [6-8], IFS / HIRLAM-HARMONIE [9], глобальну / регіональну конфігурацію UKMO [10, 11], GEM / GEM-LAM [12, 13]. Результати досліджень в цьому напрямку для Чорного моря, з використанням моделі WRF, представлені в [14, 15].

У Європейському центрі Середньострокових Прогнозів Погоди (*ECMWF*) розроблена чисельна схема дискретизації рівнянь руху на основі напівлагранжевої (*semi-Lagrangian, SL*) схеми адвекції на *симулі А* та напівявної дворівневої за часом (*semi-Implicit two-time-level, SI 2TL*) схеми зі спектральним поданням основних прогностичних змінних з використанням двовимірного перетворення Фур'є [5, 16]. Такий принципово новий підхід привів до більш реального опису глобального атмосферного потоку та мезомасштабних особливостей в областях нелінійних взаємодій. Зокрема, зменшена помилка прогнозів за рахунок більш точного опису у нових схемах горизонтальної дифузії та вертикальної нелінійної дифузії в атмосфері. Розроблені схеми параметризації для короткохвильової радіації з шістьма спектральними інтервалами та довгохвильової радіації – з 16-ма спектральними смугами [17]. Базові розробки *ECMWF* для глобальної атмосферної моделі перенесені та адаптовані для мезомасштабної моделі *HARMONIE-AROME*, яка дозволяє моделювати конвективні процеси в явному виді [18].

Мета цієї роботи полягає у викладенні та обговоренні результатів адаптації конвективно-роздільної моделі *HARMONIE-AROME* для від-

творення поля вітру у приводному шарі атмосфери прибережних ділянок північно-західній акваторії Чорного моря.

2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИХІДНІ ДАНІ

Для моделювання структури поля вітру над північно-західною частиною Чорного моря був обраний період з 9 по 16 жовтня 2016 р. В цей час спостерігався вихід Скандинавського циклону, який супроводжувався різкими змінами вітрових умов (рис.1). Спочатку, 10 жовтня акваторія Причорномор'я, знаходилася під впливом холодного фронту. Перед проходженням фронту фіксувався слабкий вітер змінних напрямків. Під час проходження фронту вітер зберігав південний або південно-західний напрямок і швидкість до 5 м/с. Потім, до 11 жовтня погода над акваторією визначалась південно-західною периферією антициклону зі східним вітром до 5 м/с та незначними опадами від 0,6 до 5,0 мм. До 12 жовтня північна частина Причорномор'я опинилась під впливом теплої ділянки фронтального розділу, а центральна частина – під впливом теплового фронту. На всій акваторії спостерігалися південно-східний вітер зі швидкістю до 15 м/с та сильні опади і грози. 13 жовтня регіон опинився під впливом холодного фронту в північній частині фронтальної області, де спостерігався південно-східний вітер зі швидкістю до 13 м/с. У подальшому, 15 та 16 жовтня регіон знаходився під впливом холодного фронту зі слабкими вітрами змінних напрямків.

Для представленого періоду нагінного вітру виконувалося моделювання атмосферної циркуляції за чисельною мезомасштабною моделлю *Harmonie*. Область моделювання покривала всю північно-західну частину Чорного моря та прилеглі території суші. Розмір області складав 200 вузлів за довготою та 100 вузлів за широтою з кроком 2.5 км, тобто 500 x 250 км. Крок за часом складав 60 секунд. Використовувалась стандартна конфігурація моделі для оперативних розрахунків. Вона включає наступні компоненти:

- генерацію кліматичних полів і цифрове представлення топографії модельної області з високим розділенням;
- створення початкових і кінцевих умов з використанням *gl*-інтерполяції, яка враховує тип проєкції (Ламберта, Меркатора, полярно-стереографічна, широтно-довготна) та можливість повороту області;

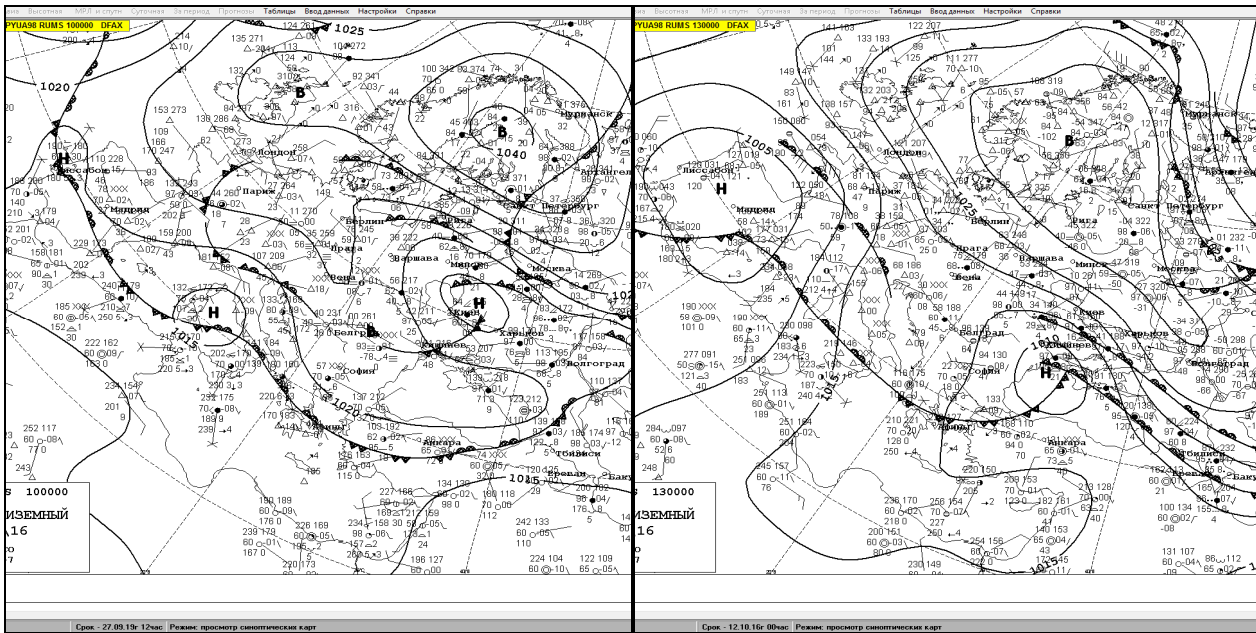


Рис. 1 – Карта приземного аналізу за 00 СГЧ а) 10 жовтня 2016 р.; б) 13 жовтня 2016 р.

- попередню обробку спостережень, яка включає: (а) селекцію всіх доступних за модельною областю спостережень за типами та формуванням “чорного списку”, (б) створення єдиної бази даних спостережень (Observation Data Base, ODB) для вибраної області та періоду;
- системи асиміляції даних: (а) для атмосферних спостережень поблизу підстильної поверхні; (б) тривимірну варіаційну систему з врахуванням структурних функцій і просіювання;
- ініціалізацію моделі на основі нелінійних нормальних мод ініціалізації;
- власне прогностичну модель;
- заключну обробку результатів моделювання з виконанням наступних операцій: конвертацію результатів розрахунків з форматів моделі (LFA та LFI) в GRIB формат; повний пост-процесінг розрахунків (розрахунки прогностичних атмосферних величин, які не використовуються в ході модельних розрахунків); діагностичні розрахунки на горизонтальних областях;
- щогодинну верифікацію модельних розрахунків.

Крім того, результати прогностичних розрахунків, отримані за допомогою моделі Harmonie, порівнювались з розрахунками за допомогою глобальної моделі GFS за той самий період і зі спостереженнями, які отримані на станціях Оdesa-порт, Чорноморськ і порт Південний.

3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунках 2, 3 представлені розраховані циркуляційні форми атмосфери на стандартній висоті 10 м над Чорним морем в період з 9 по 13 жовтня 2016 р. Розрахунки проводилися з інтервалом 6 годин, але на рисунках показані лише з інтервалом 24 години. На картах рис. 2 показані потоки повітря над північно-західною частиною Чорного моря, а на рис.3 – їх детальна структура над Одеською затокою. Для порівняння, на цих картах також наведені прогностичні значення моделі GFS з розділенням 25 км та спостережені значення на станціях Оdesa-порт, Чорноморськ і порт Південний. Карти на рис.3 чітко показують суттєву неоднорідність поля вітру над регіоном. Зокрема, над відкритою морською поверхнею швидкість вітру на 5-7 м/с вища, ніж над поверхнею суші; на початку розрахункового періоду 9 жовтня 2016 р. при західних вітрах над західним підвітряним узбережжям спостерігається послаблення вітру до 2-3 м/с і посилення вітру до 10-12 м/с – над східною частиною регіону. При зміні циркуляції 10 жовтня 2016 р. відмічається послаблення вітру до 2-3 м/с над північною та центральною частиною регіону, при збереженні сильних вітрів до 10-12 м/с над південною межею північно-західної частини регіону, яка приймає до глибоководної частини моря.

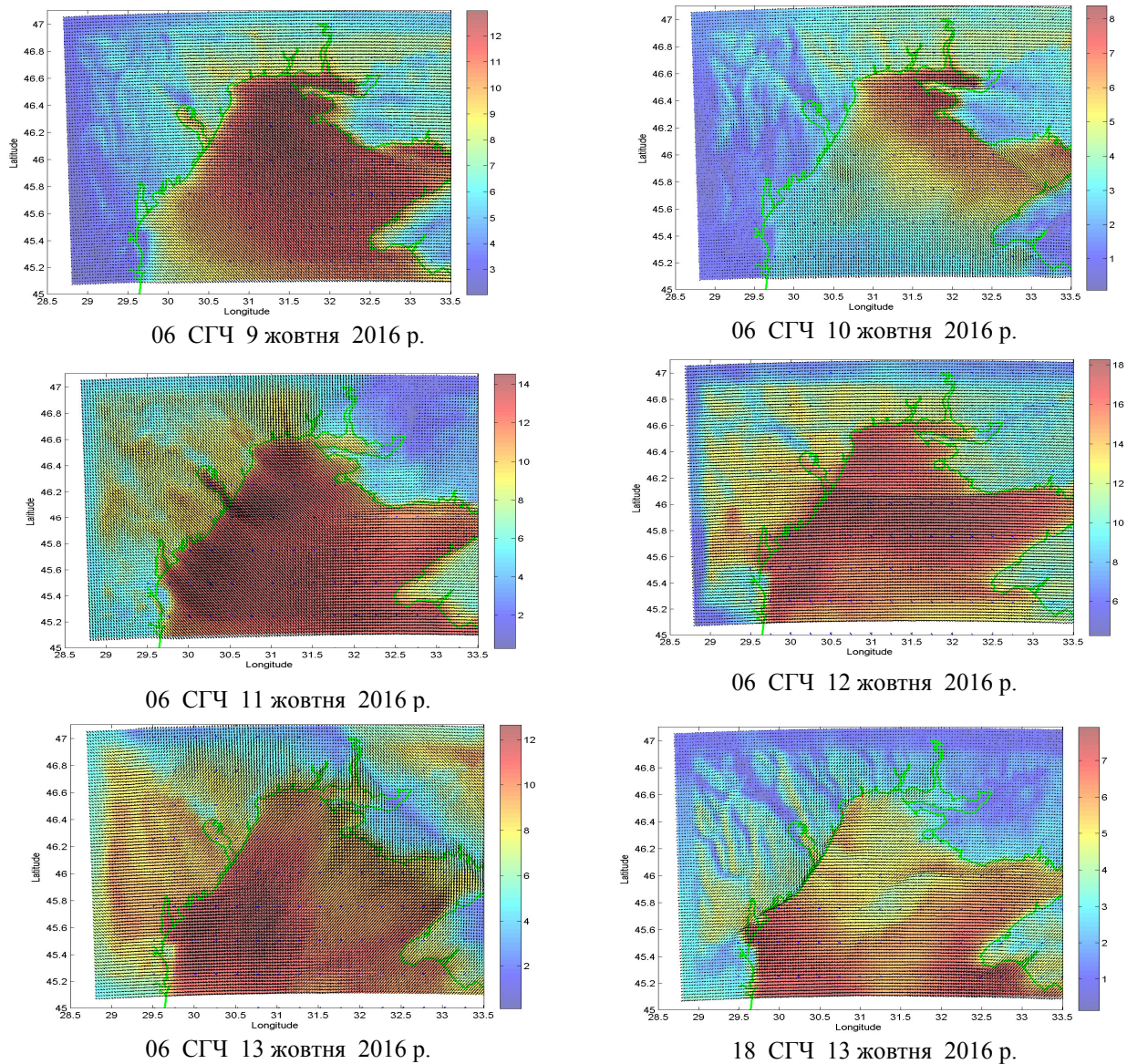


Рис. 2 – Поле вітру над північно-західною частиною Чорного моря 9-13 жовтня 2016 р. Колірна шкала відповідає модулю швидкості вітру (м/с)

В кінці періоду 11-13 жовтня 2016 р. над всією північно-західною частиною панує сильний східний нагінний вітер зі швидкістю вище 15 м/с.

Карті з рис.3 дають можливість деталізувати поля вітру в прибережній зоні. З 9 до опівдні 10 жовтня 2016 р., при загальному західно-північно-західному напрямку, швидкість вітру над сушею складає 5-7 м/с з нічним послабленням до 2-3 м/с, тоді як над морською поверхнею вона досягає 8-12 м/с. При цьому виділяються дві особливості, які враховують місцеву циркуляцію, пов'язані з орографією і урбанізацією. Перша формує 3-5 км смугу послаблення вітру приблизно на 2 м/с з підвітряної сторони берегу. Міська забудова знижує швидкість вітру силь-

ніше – приблизно на 2-4 м/с. В ніч з 10 на 11 жовтня відбувалася зміна атмосферної циркуляції. В цей період швидкості вітру над Одеською затокою та прилеглими областями суші були мінімальними. Зміна циркуляції призвела до появи сильного нагінного східного вітру з максимальними значеннями вище 20 м/с, які спостерігалися 12 жовтня 2016 р. о 18 годині.

Порівняння прогностичних значень швидкості вітру за двома моделями – GFS і Harmonie, та зі спостереженнями на трьох станціях – Одеса-порт, Чорноморськ і порт Південний, демонструє такі загальні особливості. При слабких вітрах розрахункові значення за двома моделями

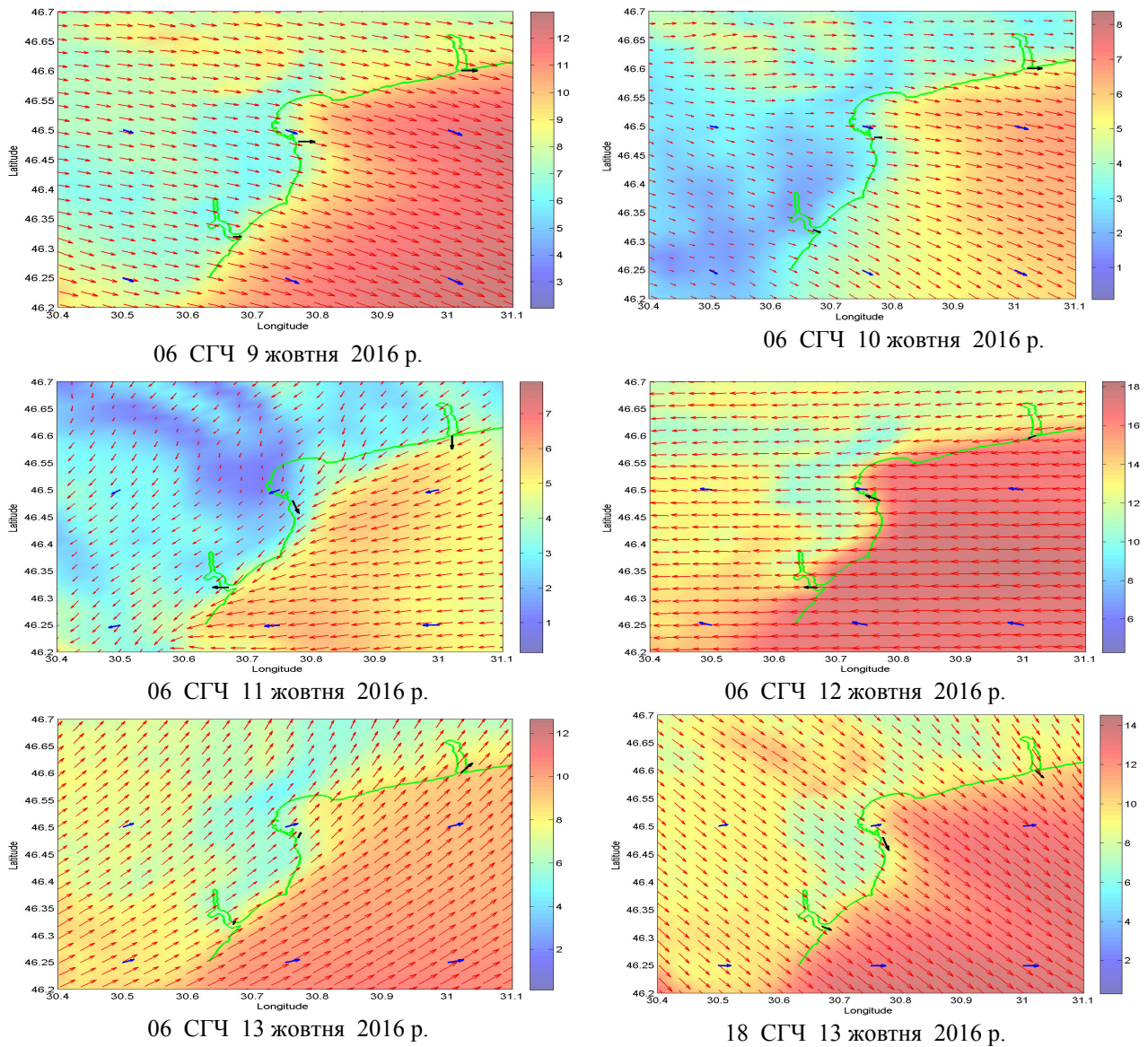


Рис. 3 – Поля вітру над прибережним районом північно-західної частини Чорного моря 9-13 жовтня 2016 р. Колірна шкала відповідає модулю швидкості вітру (м/с). Червоні стрілки – модель Harmonie. Сині стрілки – модель GFS. Чорні стрілки – спостереження на станціях Чорноморськ, Одеса, Південний

та спостереженнями на станції Одеса-порт узгоджуються досить добре. В той же час, спостереження на станції Чорноморськ і, особливо, на станції порт Південний часто мають суттєві відмінності з модельними результатами стосовно напрямку вітру. Цей факт може вказувати на нерепрезентативність спостережень на цих станціях, обумовлених географічним розташуванням пунктів спостережень або появою нових забудов. Інша особливість порівняльних характеристик пов'язана з розбіжностями між модельними розрахунками, які значно зростають при зміні атмосферної циркуляції. На картах чітко видно, що модель GFS, з грубим просторовим розділенням сітки, не в змозі відтворити мезомасштабні

деталі атмосферної циркуляції в областях конвекції потоків і взаємодії їх з особливостями підстильної поверхні, а також при різкій зміні атмосферної циркуляції.

Порівняльний аналіз характеристик вітру, вимірюваних в пунктах спостережень Одеса-порт, Чорноморськ та порт Південний, і розрахованих за обома моделями у вузлах сіток, найближчих до точок вимірювань, показав наступне (рис.4а-в). Насамперед необхідно відмітити, що в моделі GFS результати розрахунків відбиралися тільки за одним вузлом сітки, який відповідає кожному пункту спостережень, і ці вузли були розташовані в морі, в межах 10-15 км від берегу. Тоді як високе просторове розділення

моделі Harmonie дозволяло прийняти до розгляду декілька вузлів сітки в межах квадрату площею 2.5 x 2.5 км з центром в пункті спостережень. Це дало можливість приймати для розгляду по шість вузлів сітки Harmonie окіл станцій спостережень Одеса-порт та Чорноморськ, і два вузла сітки окіл станції порт Південний.

Епюри векторів швидкості вітру всіх трьох джерел інформації мають різний ступінь розбіжностей як на протязі розглянутого періоду, так і в залежності від точки спостереження. На станції порт Південний на всьому часовому відрізку спостерігається значна, а в другій половині інтервалу, після зміни циркуляції та посилення вітру, критична розбіжність у швидкості вітру, і особливо за напрямком вітру (від 45° та 90° до 180°), між спостереженнями, з одного боку, та модельними розрахунками за обома моделями, з іншого боку. Така ситуація може свідчити тільки про нерепрезентативність розташування пунктів вимірювань вітру через наявність локальних природних орографічних чи конструктивних перешкод, які критичним чином змінюють швидкість та напрямок потоку певних румбів.

У даному випадку, цілком нерепрезентативними для морської частини слід вважати спостереження на станції порт Південний. На початку розглянутого періоду, 9 та 10 жовтня 2016 р., при слабких і помірних північно-західних вітрах над районом, спостереження занижують швидкість вітру та показують помилку за напрямком на 45° і більше (рис.3). В період максимальних вітрів східних румбів зі швидкостями вище 20 м/с розбіжності між вимірним напрямком вітру і розрахованим за моделлю Harmonie складають близько 90°, а за моделлю GFS – майже 180°.

Проте, необхідно відмітити, що модель GFS неадекватно та із запізненням відтворює різку зміну циркуляції та мезомасштабні особливості динамічної структури атмосфери над морською поверхнею в області взаємодії двох синоптичних утворень (рис. 3, 12.10.2016.18:00).

На двох інших станціях спостережень, Одеса-порт і Чорноморськ, розбіжності між модельними та фактичними значеннями швидкості вітру повторюють загальну картину, хоча і в меншій мірі. На станції Чорноморськ загальна закономірність відмінностей проявляється у розбіжностях за напрямком вітру на 45° та заниженні швидкості вітру протягом всього розглянутого періоду, як при слабких, так і при екстремальних вітрах. Із вищевикладеного можна зробити ви-

сновок, що спостереження на цій станції не можуть розглядатися як репрезентативні для прилеглої морської частини, де над відкритою морською поверхнею вітер суттєво сильніший при будь-якому типі циркуляції.

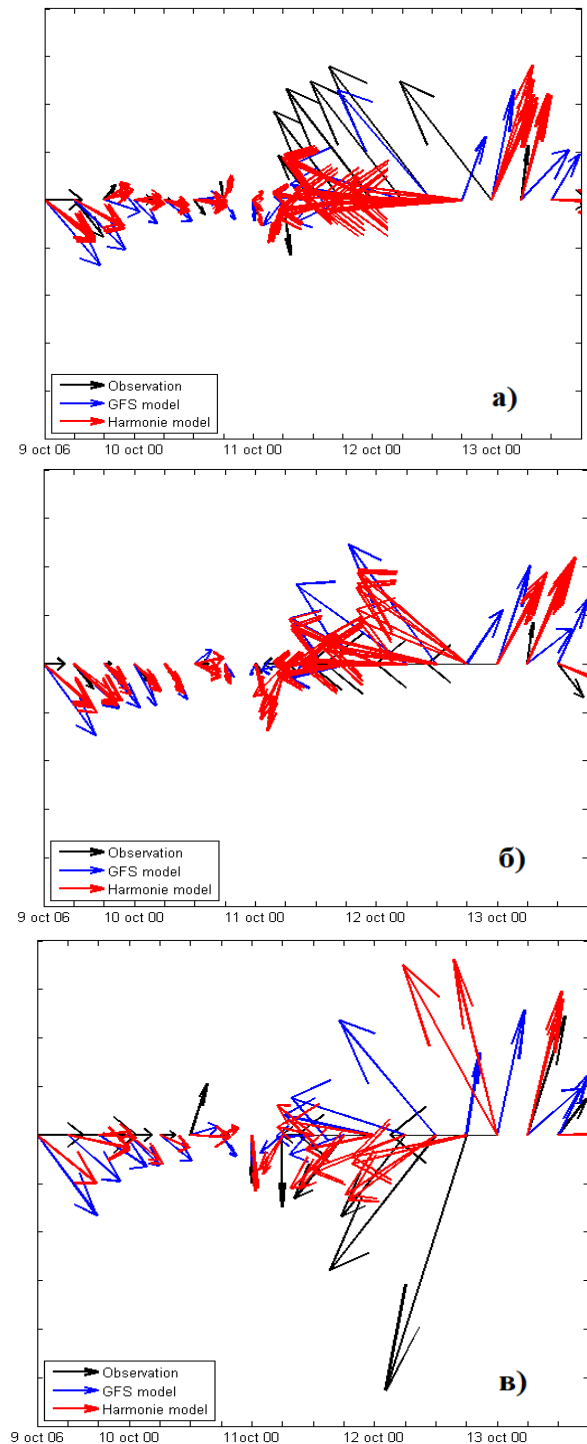


Рис.4 – Епюри швидкості вітру на станціях Одеса-порт (а), Чорноморськ (б), порт Південний (в) та в найближчих вузлах сіток моделей GFS та Harmonie

На станції Одеса-порт, на відміну від станції Чорноморськ, при слабких і помірних вітрах західних румбів на початку розглянутого періоду спостереження дають меншу швидкість у порівнянні з модельними розрахунками, тоді як при екстремальних вітрах східних румбів спостережені значення вищі за отриманні при моделюванні. При цьому, зберігається розбіжність за напрямком вітру до 45°. Порівняння результатів отриманих за двома моделями для цього регіону показує такі відмінності: модель GFS завищує швидкості при слабких і помірних вітрах західних румбів на початку розглянутого періоду (9 та 10 жовтня 2016 р.); не встигає перелаштуватися та неадекватно описує поле вітру при різкій зміні синоптичних утворень в період з 10 жовтня 18:00 до 11 жовтня 6:00 2016 р., занижує швидкість вітру при екстремальних значеннях.

У силу вищезазначеного, проблематично розраховувати кількісні оцінки відмінностей значень швидкості вітру, отриманих при вимірюванні та розрахунку в моделях. Насамперед, це пов'язано з неоднорідністю початкових рядів спостережень та модельних розрахунків. Зокрема, ряди спостережень на прибережних станціях не можуть вважатися репрезентативними внаслідок наявності природних і штучних об'єктів навколо них, які породжують неоднорідні зміни у вимірюваннях при різних напрямках атмосферного потоку. Крім того, як показали розрахунки із використанням моделі високого розділення, вздовж берегової лінії прослідковується смуга перехідних значень швидкості вітру між тими значеннями, які спостерігаються над поверхнею суші та над морською поверхнею. Ширина цієї смуги змінюється в широких межах від 2-3 км до 10-12 км, в залежності від напрямку та швидкості вітру, або може бути відсутня зовсім. Так як берегові станції спостережень розташовані в цій смузі, то некоректно порівнювати спостереження на цих станціях з розрахунковими значеннями у вузлах модельних сіток, які знаходяться над відкритою морською частиною.

Кількісні порівняльні оцінки розрахункових значень вітру отриманих за допомогою двох моделей є певною мірою необ'єктивними в силу істотних (на два порядки) відмінностей їх просторового розділення. Як показано на картах (рис. 2,3), модель GFS не здатна відтворювати мезомасштабні особливості динамічної мінливості атмосфери навіть над однорідною морською поверхнею. Тоді як за допомогою поля вітру, отриманого із використанням моделі Harmonie, можливо виділити навіть межу міської забудови

м.Одеси, яка виділяється як острів ослаблених швидкостей. По суті, у разі порівняння результатів розрахунків за обома моделями, порівнюються атмосферні процеси різних масштабів, яким притаманні різні енергетичні кінематичні характеристики.

Проте, була зроблена спроба отримати деякі кількісні оцінки відмінностей у розрахунках швидкості вітру за двома моделями і, кожної з них, зі спостереженнями. На відміну від скалярних величин, аналіз різниць векторних величин пов'язаний з певними труднощами і ускладнює аналіз результатів. Зокрема, виникає проблема: як інтерпретувати різницю двох векторів, якщо вони рівні за модулем, але мають різні напрямки. Тому розглядалося тільки абсолютне значення різниці двох векторів, яке визначалося за формулою аналітичної геометрії

$$|a-b| = \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2},$$

де a і b – швидкість вітру з двох інформаційних джерел; a_x , b_x – зональні компоненти швидкості вітру з двох інформаційних джерел; a_y , b_y – меридіональні компоненти швидкості вітру з двох інформаційних джерел.

Еволюція у часі відмінностей між відповідними джерелами інформації показана на рис. 5, а отримані інтегральні оцінки представлені в таблиці 1.

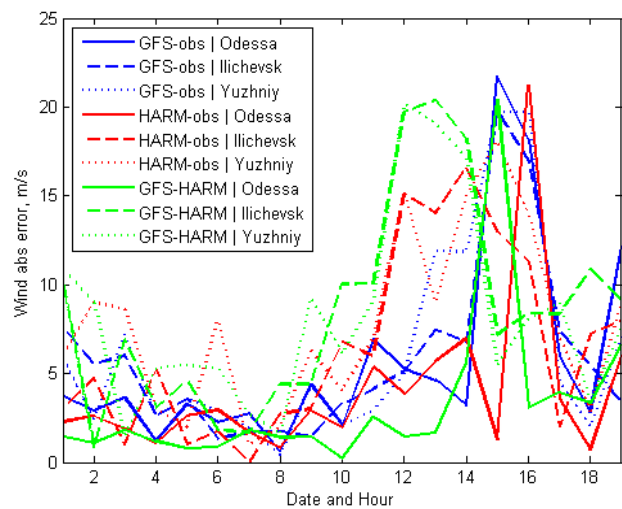


Рис. 5 – Еволюція у часі розбіжностей між спостереженнями та модельними розрахунками

В першу чергу слід відзначити значну мінливість відмінностей протягом аналізованого періоду, яка критичним чином залежить від атмосферної циркуляції. При слабких вітрах

Таблиця 1. – Інтегральна за часом за період експерименту оцінка розбіжностей розрахункових значень швидкості вітру (м/с) для трьох пунктів спостережень

	Одеса	Чорноморськ	Південний
GFS - спостереження	5.66	5.85	6.21
Harmonie-спостереження	3.95	6.43	7.74
GFS - Harmonie	3.18	8.42	8.21

західних румбів з боку берегу, в період з 10 жовтня 00:00 до 11 жовтня 12:00, узгодженість всіх розрахункових і спостережених значень швидкості вітру знаходиться в межах допустимої помилки прогнозу 5 м/с. При помірних вітрах тих же румбів 9 жовтня відмічаються істотні відмінності між модельними розрахунками і вимірюваннями швидкості вітру як за напрямком, так і за абсолютним значенням швидкості. При цьому слід зазначити, що розрахункові значення за обома моделями для цього періоду дають аналогічні результати, особливо для станції Одеса-порт. При посиленні вітру і зміні його напрямку на – з боку моря, починаючи з другої половини 11 жовтня і до кінця розрахункового періоду 13 жовтня, розбіжність між модельними результатами і спостереженнями досягає катастрофічних значень в 20-25 м/с. Такі значення обумовлені, зокрема, розбіжностями у визначенні напрямку вітру, які в більшості випадків перевищують 90°, а в окремих випадках на станції порт Південний досягають 180°.

Однак, необхідно відзначити, що саме при сильних вітрах східних румбів розрахунки за обома моделями узгоджуються дуже добре (~ 3 м/с), особливо в районі станції Одеса-порт. Такі результати порівняння однозначно вказують на нерепрезентативність спостережень вітру на станціях Чорноморськ і порт Південний.

4. ВИСНОВКИ

Порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання полів вітру із застосуванням Європейської моделі високого розділення Harmonie, прогностичних полів за моделлю GFS сайту американського центру прогнозів навколишнього середовища і спостережень на станціях північно-західного узбережжя Чорного моря для періоду зі складними погодними умовами і штормовими вітрами показав таке:

1. Модель GFS має просторову роздільну здатність 25 км і в стані адекватно відтворювати

великомасштабні атмосферні процеси над регіоном. Однак, при різкій зміні циркуляції, що супроводжується зміною напрямку вітру на протилежний і посиленням вітру, зазначається запізненням опису еволюції полів вітру в моделі. Крім того, модель, в силу грубого просторового розрішення, не в змозі враховувати мезомасштабні особливості атмосферної циркуляції, обумовлені відмінностями в типах підстильної поверхні, орографією, термічними контрастами і т.п.

2. Конвективно-роздільна модель Harmonie з просторовим кроком 2.5 км і кроком за часом 60 сек дає можливість детально відтворювати всю просторову мінливість до зазначеного масштабу та її еволюцію. Зокрема:

- виділяти окремі мезомасштабні, порядку десятків км, циркуляційні структури над однорідною морською поверхнею і відстежувати їх еволюцію і взаємодію;

- встановлювати положення смуг конвергенції в умовах збіжності потоків;

- визначати просторові характеристики вздовж берегу, підвітряні смуги послаблення вітру за умов, якщо вітер дме від берегу;

- деталізувати опис полів вітру в затоках і при складній конфігурації берегової смуги з урахуванням орографії;

- відтворювати послаблення вітру над областю міської забудови за рахунок збільшення шорсткості поверхні.

3. Порівняння результатів модельних розрахунків зі спостереженнями на станціях Одеса-порт, Чорноморськ і порт Південний у період складних погодних умов з 9 по 13 жовтня 2016 р. показало таке:

- осереднена за весь період розбіжність між модельними розрахунками і спостереженнями входить в допустимий інтервал помилки прогнозу (5 м/с) тільки для станції Одеса-порт за моделлю Harmonie;

- узгодженість модельних розрахунків за обома моделями зі спостереженнями знаходиться в межах допустимого інтервалу помилки прогнозу при слабких західних вітрах (з боку берегу);

- при помірних вітрах з боку берегу розбіжність між модельними результатами і спостереженнями незначно (до 5-7 м/с) перевищує допустимий інтервал помилки прогнозу;

- при сильних вітрах східних румбів з боку моря розбіжність між модельними результатами і спостереженнями досягає катастрофічних значень в 20-25 м/с. Такі значення обумовлені, головним чином, розбіжностями у визначенні напрямку (до 180°) вектору швидкості вітру. Од-

нак, необхідно відзначити, що саме при сильних вітрах східних румбів розрахунки за обома моделями узгоджуються дуже добре (≈ 3 м/с), особливо в районі станції Одеса-порт;

- такі результати порівняння однозначно вказують на сумнівну репрезентативність спостережень вітру на станціях Чорноморськ та порт Південний.

Результати наведені в роботі свідчать, що застосування атмосферної мезомасштабної моделі високої роздільної здатності для прогнозування вітрових умов в північно-західній частині Чорного моря дозволить значно підвищити якість оперативних прогнозів мінливості океанографічних характеристик в прибережних зонах моря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Spatial and temporal characteristics of summer precipitation over central Europe in a suite of high-resolution climate models / Lind P., Lindstedt D., Kjellström E. *J. Climate*. 2016. №29. С. 3501–3518. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0463.1>.
2. Malardel S., Ricard D. An alternative cell-averaged departure point reconstruction for pointwise semi-Lagrangian transport schemes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2015. № 141. С. 2114–2126. <https://doi.org/10.1002/qj.2509>.
3. Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. / Baldauf M., Seifert A., Furstner J. *Monthly Weather Review*. 2011. № 139(12). С.3887-3905.
4. Вильфанд Р. Б., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU. *Метеорология и гидрология*. 2010. № 1. С. 5–17.
5. Rontu L., Wastl C., Niemelä S. Influence of the details of topography on weather forecast-Evaluation of HARMONIE experiments in the Sochi Olympics domain over the Caucasian Mountains. *Front. Earth Sci.* 2016. № 4. С. 13. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00013>.
6. Baklanov A., Tijm S., Rontu L. HIRLAM/HARMONIE-Atmospheric Chemical Transport Models. *Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models* / Edited by Baklanov A., Mahura A., Sokhi R. Springer, 2011. С. 215-228.
7. Unified modelling and prediction of weather and climate: A 25 year Journey / Braun A., Milton S., Cullen M. et al. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012. № 93(12). С. 1865-1877.
8. A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere / Davies T., Cullen M.J.P., Malcolm A.J. et al. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2005. № 131. С. 1759-1768.
9. The Canadian Meteorological Center Data Assimilation and Forecasting System. *Weather and Forecasting*. / Fillion L., Tanguay M., Lapalme E. et al. 2010. № 25(6). С. 1645–1669.
10. High-Resolution GEM-LAM Application in Marine Fog Prediction: Evaluation and Diagnosis / Yang D., Ritchie H., Desjardins S. et al. *Weather and Forecasting*. 2010. № 25(2). С. 727-748.
11. Ефимов В. В., Барабанов В. С., Крупин А. В. Моделирование мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в Крымском регионе Черного моря. *Мор. гидрофиз. журнал*. 2012. № 1. С. 64-74.
12. The HARMONIE-AROME Model Configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP System / Bengtsson, L. et al. *Mon. Wea. Rev.* 2017. № 145. С. 1919-1935.
13. Иванов С. В., Рубан И. Г., Тучковенко Ю. С. Преимущества использования атмосферной мезомасштабной модели Harmonie для воспроизведения динамики вод в прибрежных районах моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 107-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.10>
14. ECMWF, Operational implementation 12 May 2015. Part III: Dynamics and numerical procedures. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts IFS Doc. Cy41r1, 2015a, 29 с. URL: <http://www.ecmwf.int/en/elibrary/9210-part-iii-dynamics-and-numerical-procedures> (Accessed 20.05.2019)
15. ECMWF, Operational implementation 12 May 2015. Part IV: Physical processes. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts IFS Doc. Cy41r1, 2015b, 213 с. URL: <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16648-part-iv-physical-processes.pdf> (Accessed 18.03.2019)
16. Single interval shortwave radiation scheme with parameterized optical saturation and spectral overlaps / Mašek J., Geleyn J.-F., Brožková R. et al. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2016. №142. С. 304–326. <https://doi.org/10.1002/qj.2653>.
17. AROME-MetCoOp: A Nordic convective-scale operational weather prediction model / Müller M. et al. *Wea. Forecasting*. 2017. №32. С. 609–627. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0099.1>
18. Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system / Brousseau P., Seity Y., Ricard D. et al. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2016. № 142. С. 2231–2243. <https://doi.org/10.1002/qj.2822>.

REFERENCES

1. Lind, P., Lindstedt, D., Kjellström, E. et al. (2016). Spatial and temporal characteristics of summer precipitation over central Europe in a suite of high-resolution climate models. *J. Climate*, 29, pp. 3501–3518. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0463.1>.
2. Malardel S. & Ricard, D. (2015). An alternative cell-averaged departure point reconstruction for pointwise semi-Lagrangian transport schemes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141, pp.2114–2126. <https://doi.org/10.1002/qj.2509>.
3. Baldauf, M., Seifert, A., Furstner, J. et al. (2011). Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. *Monthly Weather Review*, 139(12), pp. 3887-3905.
4. Vil'fand, R.M., Rivin, G.S., Rozinkina, I.A. (2010). Mesoscale weather short-range forecasting at the Hydrocenter of Russia, on the example of COSMO-RU. *Russian Meteorology and Hydrology*, 35, pp. 1-9.
5. Rontu, L., Wastl C. & Niemelä, S. (2016). Influence of the details of topography on weather forecast-Evaluation of HARMONIE experiments in the Sochi Olympics domain over the Caucasian Mountains. *Front. Earth Sci.*, 4, p.13, <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00013>.
6. Baklanov, A., Tijm, S., Rontu, L. (2011). HIRLAM/HARMONIE-Atmospheric Chemical Transport Models. In: Baklanov, A., Mahura, A., Sokhi, R. (eds) *Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models*. Springer, pp. 215-228.

7. Braun, A., Milton, S., Cullen, M. et al. Unified modelling and prediction of weather and climate: A 25 year Journey. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2012, № 93(12), pp. 1865-1877.
8. Davies, T., Cullen, M.J.P., Malcolm, A.J. et al. (2005). A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 131, pp. 1759-1768.
9. Fillion, L., Tanguay, M., Lapalme, E. et al. (2010). The Canadian Meteorological Center Data Assimilation and Forecasting System. *Weather and Forecasting*, 25(6), pp. 1645-1669.
10. Yang, D., Ritchie, H., Desjardins, S. et al. (2010). High-Resolution GEM-LAM Application in Marine Fog Prediction: Evaluation and Diagnosis. *Weather and Forecasting*, 25(2), pp. 727-748.
11. Efimov, V.V., Barabanov, V.S., Krupin, A.V. (2012). Modelirovanie mezomasshtabnykh osobennostey atmosfery cirkulyatsii v Krymskom regione Chernogo morya [Modeling of mesoscale features of the atmospheric circulation in the Crimean Black Sea region]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal [Physical Oceanography J.]*, 1, pp. 64-74. (In Russ.).
12. Bengtsson, L. et al. (2017). The HARMONIE-AROME Model Configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP System. *Mon. Wea. Rev.*, 145, pp. 1919-1935.
13. Ivanov, S.V., Ruban, I.G., Tuchkovenko, Y.S. (2018). Advantages of using the Harmonie atmospheric mesoscale model for simulating water dynamics in offshore area. *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 1, 22, pp. 107-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.10>
14. ECMWF, *Operational implementation 12 May 2015. Part III: Dynamics and numerical procedures. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts IFS Doc. Cy41r1, 2015a.* Available at: <http://www.ecmwf.int/en/elibrary/9210-part-iii-dynamics-and-numerical-procedures> (Accessed 20.05.2019)
15. ECMWF, *Operational implementation 12 May 2015. Part IV: Physical processes. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts IFS Doc. Cy41r1, 2015b.* Available at: <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16648-part-iv-physical-processes.pdf> (Accessed 18.03.2019)
16. Mašek, J., Geleyn, J.-F., Brožková, R., et al. (2016). Single interval shortwave radiation scheme with parameterized optical saturation and spectral overlaps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142, pp. 304-326. <https://doi.org/10.1002/qj.2653>.
17. Müller, M. et al. (2017). AROME-MetCoOp: A Nordic convective-scale operational weather prediction model. *Wea. Forecasting*, 32, pp. 609-627. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0099.1>
18. Brousseau, P., Seity, Y., Ricard D. et al. (2016). Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142, pp. 2231-2243. <https://doi.org/10.1002/qj.2822>.

HIGH RESOLUTION MODELLING OF SEVERE WIND PATTERNS OVER THE NORTH-WEST BLACK SEA REGION

**R. V. Zazimko, S. E. Romanenko,
I. G. Ruban, S. V. Ivanov,
Yu. S. Tuchkovenko, O. V. Derik**

*Odessa State Environmental University,
15 Lvivska Str., Odesa, 65016, Ukraine,*

science@odeku.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

The research studies the performance of the convective-permitting Harmonie model in reproducing mesoscale features of the wind regime over the north-western part of the Black Sea. It allowed establishing the optimum configuration, projection and geometry of the model's high spatial resolution area over Ukrainian part of the Black Sea, preparing a digital format for a coastline based on the resolution and conducting numerical experiments to verify informativeness and stability of computations. It also presents a detailed description of the forecasting procedure which includes a data flow from the Meteorological Archiving and Retrieving System (MARS) of the European Center, creating boundary conditions, forecast computations and a model output composition for the particular region and domain resolution.

The results have shown that the Harmonie model with the 2.5 km spatial resolution and the 60 second time step is able to reproduce detailed spatial variability of a near-surface wind field and its evolution to the corresponding scales. In particular, the model is able to simulate mesoscale circulation features of approximately ten km over a homogeneous sea surface and to track their evolution; to monitor the position of convergence zones; to highlight the spatial characteristics of a lee-side wind attenuation band along the coast line when wind blows from the shore; to specify mesoscale wind patterns in bays and along the coastline with complex orogra-

phy; to reproduce the weakening of a wind velocity over an urban area due to increased surface roughness.

Two operational forecasting systems, GFS-WRF and ARPEGE/IFS-Harmonie are compared by the following components: numerical solvers, sub-grid parameterizations, efficiency of computer resources and intellectual potential. The GFS model output with the 25 km spatial resolution is able to correctly reproduce over the region only large-scale atmospheric patterns. However, for rapid changes in the atmospheric circulation accompanied by changes in the wind direction to the opposite and wind increase, the model simulations are delayed in terms of wind field evolution. Additionally, because of crude spatial resolution, the GFS model is unable to describe mesoscale atmospheric features due to differences in surface types, orography, thermal contrasts, etc. Comparison of the both model outputs versus observations from Odesa, Chornomorsk and Yuzhnyi port during severe wind conditions has shown that the discrepancy between the models and observations within the allowable error value (5 m/s) occurred only for Odesa port with regard to the Harmonie model for weak wind velocity. The difference partially increases for moderate wind from the shore, while for strong wind from east and south directions indicates disagreement between the model results and observations and achieves critical values of 20-25 m/s. Such values are mainly determined by the discrepancy in wind direction (up to 180°). The comparison results clearly indicate the doubtful representativeness of wind observations at Chornomorsk and Yuzhnyi stations in general, and at Odesa station in particular.

Keywords: convective-permitting Harmonie model, north-western part of the Black Sea region, wind field

МОДЕЛИРОВАНИЕ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ СЛОЖНЫХ ВЕТРОВЫХ УСЛОВИЙ НАД СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТЬЮ ЧЕРНОГО МОРЯ

**Р. В. Зазимко, С. Е. Романенко,
И. Г. Рубан, С. В. Иванов,
Ю. С. Тучковенко, О. В. Дерик**

*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,
science@odeku.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

Исследованы возможности конвективно-разрешающей модели Harmonie при воспроизведении мезомасштабных особенностей ветрового режима над северо-западной частью Черного моря. Установлены оптимальные размеры, проекция и геометрия области высокого пространственного разрешения модели над украинской частью акватории Черного моря, подготовлен цифровой формат береговой линии соответствующего разрешения, и проведены эксперименты на информативность и устойчивость расчетов.

Результаты модельных расчетов показали, что модель с пространственным шагом 2.5 км и шагом по времени 60 сек дает возможность детально воспроизводить всю пространственную изменчивость ветровых условий указанного масштаба и ее эволюцию. В частности, выделять отдельные мезомасштабные, порядка десяти км, циркуляционные структуры над однородной морской поверхностью и отслеживать их эволюцию; устанавливать положения полос конвергенции в условиях сходимости потоков; отмечать пространственные характеристики вдольбереговых подветренных полос ослабления циркуляции при условии ветра дующего от берега; детализировать описание полей ветра в заливах и при сложной конфигурации береговой черты с учетом орографии; воспроизводить ослабление ветра над областью городской застройки за счет увеличения шероховатости поверхности.

Сравнительный анализ расчетных полей ветра по моделям Harmonie и GFS (Global Forecast System) показал, что последняя модель, имея пространственное разрешение 25 км, в состоянии адекватно воспроизводить только крупномасштабные атмосферные процессы над регионом. Однако, при резком изменении циркуляции, сопровождающейся изменением направления ветра на противоположный и усилением ветра, отмечается запаздывание эволюции полей ветра. Кроме того, модель GFS, вследствие грубого пространственного разрешения, не в состоянии учитывать мезомасштабные особенности атмосферной циркуляции, обусловленные различиями в типах подстилающей поверхности, орографией, термическими контрастами и т.п. Сравнение модельных расчетов с наблюдениями на станциях Одесса-порт, Черноморск и порт Южный в период сложных погодных условий показало, что осредненное за весь период расхождение между модельными результатами и наблюдениями входит в допустимый интервал ошибки прогноза (5 м/с) только для станции Одесса с моделью Harmonie. При умеренных ветрах со стороны берега расхождение между модельными результатами и наблюдениями незначительно (до 5-7 м/с) превышает допустимый интервал ошибки прогноза, тогда как при сильных ветрах восточных румбов со стороны моря расхождение между модельными результатами и наблюдениями достигает катастрофических значений в 20-25 м/с. Такие значения обусловлены, главным образом, различиями в определении направления (до 180 °) и скорости ветра. Результаты сравнения однозначно указывают на сомнительную репрезентативность наблюдений ветра на станциях Черноморск и порт Южный, и частично на станции Одесса-порт.

Результаты, приведенные в работе, свидетельствуют о том, что применение атмосферной мезомасштабной модели высокого разрешения для прогнозирования ветровых условий в северо-западной части Черного моря позволит значительно повысить качество оперативных прогнозов изменчивости океанографических характеристик в прибрежных зонах моря.

Ключевые слова: конвективно-разрешающая модель Harmonie, северо-западная часть Черного моря, поле ветра.

*Подання до редакції: 02. 06. 2020
Надходження остаточної версії: 20. 06. 2020
Публікація статті: 03. 07. 2020*