

**Міністерство освіти і науки України**  
**Київський національний університет імені Тараса Шевченка**  
**Географічний факультет**  
**Кафедра метеорології та кліматології**

**Оцінка чисельних прогнозів приземної температури  
повітря та їх коригування за допомогою статистичного  
постпроцесингу**

Галузь знань: 10 Природничі науки

Спеціальність: 103 Науки про Землю

Освітня програма: Метеорологія

Кваліфікаційна робота магістра  
студентки 2-го курсу  
освітнього рівня агістр  
Судики Єлизавети Олегівни

Науковий керівник:  
Щеглов Олександр Андрійович  
кандидат географічних наук  
ст.н.с. відділу фізики атмосфери  
Українського гідрометеорологічного інституту

Київ 2024

## Зміст

|   |    |
|---|----|
| <b>Зміст</b> .....  | 2  |
| <b>Вступ</b> .....  | 3  |
| <b>Розділ 1. Практика застосування глобальних та мезомасштабних моделей прогнозу погоди для прогнозів температури повітря</b> ..... | 5  |
| <b>Розділ 2. Методи та дані дослідження</b> .....   | 19 |
| <b>2.1 Загальний опис моделі WRF 4.0</b> .....  | 19 |
| <b>2.2 Опис статистичних методів, що використані в роботі</b> .....   | 20 |
| <b>Розділ 3. Аналіз похибок прогнозу та їх корекція</b> .....   | 24 |
| <b>3.1 Кліматична характеристика території в районі обраної станції (Бориспіль/Київ)</b> .....                                      | 24 |
| <b>3.2 Оцінка помилок прогнозу моделі WRF 4.0 за період 2021-2022 рр.</b> .   | 27 |
| <b>3.3 Корекція помилок та оцінка запропонованого методу</b> .....  | 37 |
| <b>Висновки</b> .....   | 40 |
| <b>Список використаних джерел</b> .....   | 41 |
| <b>Додатки</b> .....  | 43 |

## Вступ

**Актуальність дослідження.** Прогноз погоди є однією з ключових задач метеорології, адже він суттєво впливає на різні сфери життя суспільства, такі як безпека, економіка та управління природними ресурсами. Сучасні чисельні моделі прогнозування погоди дозволяють з високою точністю передбачати метеорологічні умови. Моделі чисельного прогнозу погоди (ЧПП) часто мають систематичні зміщення через недосконалість фізики моделі, параметризації та початкових умов. Методи постобробки, такі як корекція статистичних зміщень, можуть коригувати вихідні дані моделі, щоб зменшити ці зміщення та підвищити точність прогнозу.

**Мета роботи** – оцінити точність прогнозів приземної температури повітря за моделлю WRF4.0 та провести коригування прогнозів за допомогою статистичної обробки.

**Об’єкт дослідження** – температурний режим на метеорологічній станції Київ та Бориспіль.

**Предмет дослідження** – точність прогнозування температури повітря за моделлю WRF4.0 та оцінка покращення прогнозів за рахунок введення статистичних поправок.

**Використані дані:** Архів прогнозів моделі WRF4.0 відділу фізики атмосфери УкрГМІ ДСНС та НАН України та фактичні дані на метеорологічній станції Бориспіль, надані Українським гідрометеорологічним центром. Архів даних містить в собі прогнози із завчасністю 24, 48, 72 та 96 годин за період з 2021 по 2023 рр.

### **Задачі дослідження:**

- Проаналізувати температурний режим на станції Бориспіль за наявними фактичними даними, зокрема, в контексті сезонних і добових змін.

- Визначити статистичні параметри прогностичного та фактичного часових рядів, перевірити наявність систематичного зсуву та провести корекцію прогнозів.
- Оцінити залежність помилки прогнозу температури повітря від абсолютного значення прогнозованої величини та визначити, чи змінюється ця залежність для прогнозів у різний час доби, у різні сезони та з різною завчасністю.
- Оцінити ступінь покращення точності прогнозів після корекції систематичної помилки.

## **Розділ 1. Практика застосування глобальних та мезомасштабних моделей прогнозу погоди для прогнозів температури повітря**

Мезомасштабна модель — це модель чисельного прогнозування погоди (ЧПП) із достатньо високою горизонтальною та вертикальною роздільною здатністю для прогнозування мезомасштабних явищ погоди. Ці явища часто зумовлені топографією чи береговими лініями або пов'язані з конвекцією. Вони представляють одні з найскладніших завдань прогнозування. Більші несприятливі умови виникає на мезомасштабному рівні, включаючи торнадо та мезомасштабні конвективні системи. Видимість, турбулентність, сприятлива погода та стан моря можуть значно змінюватися протягом усього кількох кілометрів.

Фізичні закони руху та збереження енергії керують еволюцією атмосфери. Ці закони можна виразити серією складних математичних рівнянь, які складають ядро того, що називається числовим прогнозом погоди. Ці рівняння називаються прогнозними або прогностичними рівняннями, оскільки вони передбачають, що станеться в майбутньому. Змінні в рівняннях представляють різні аспекти погоди. Оскільки ці рівняння визначають, як змінні змінюються з часом, якщо відомий початковий стан атмосфери, то можливо розв'язати рівняння на пізніший час і отримати нові значення цих змінних.

Ранні оперативні моделі погоди могли розрізняти лише характеристики синоптичного масштабу. Зі збільшенням обчислювальних ресурсів стало можливим своєчасно моделювати та прогнозувати мезомасштабні явища погоди. Прогнозування мезомасштабних особливостей погоди вимагає значно

більшої роздільної здатності моделі, а також деяких інших суттєвих змін у традиційних синоптичних і глобальних підходах до моделювання.

Моделі NAM NCEP [1], COAMPS [2] військово-морського флоту, а також різні AFWA та університетські версії MM5 [3] і WRF [4] працюють із різною горизонтальною роздільною здатністю з відстанню сітки, як правило, менше 30 км. Через їхню відносно високу роздільну здатність ці моделі зазвичай працюють на обмеженій території, і вимагають інформації про межі своїх доменів.

*Роздільна здатність* — це інтервал сітки або хвильове число, яке представляє середню площу навколо кожної точки сітки в моделі точок сітки або кількість хвиль, що використовуються в спектральній моделі.

Важливість запуску та використання результатів мезомасштабної моделі залежить від масштабу явищ, які необхідно спрогнозувати. Порівнюючи глобальні та мезомасштабні моделі, загалом вихідні дані мезомасштабних моделей не приносять користі в ситуаціях, де погоду визначають великомасштабні об'єкти циркуляції і погода мало змінюється протягом цього відтинку часу. Однак у регіонах, де умови навколишнього середовища швидко змінюються в часі та просторі, мезомасштабні моделі можуть надати кращий прогноз. Ці моделі здатні достатньо точно відобразити перебіг та інтенсивність дрібних погодних явищ, які цікавлять синоптиків. Крім того, мезомасштабні моделі часто дають кращі прогнози в прибережних і гірських регіонах, порівняно з глобальними моделями. В мезомасштабних моделях використовуються набори топографічних даних високої роздільної здатності та детальна інформація про температуру поверхні моря (якщо вони доступні).

*Горизонтальна роздільна здатність моделі* ЧПП безпосередньо пов'язана з масштабом метеорологічних процесів, який вона може імітувати. Чим вища роздільна здатність, тим менш масштабний процес може успішно

відобразити модель. Ця роздільна здатність пов'язана або з відстанню між точками сітки для точкових моделей, або з кількістю хвиль, які використовуються для представлення погодних даних для спектральних моделей. З точки зору роботи COAMPS, NAM, MM5 і WRF — це моделі точок сітки. Моделі точок сітки – це моделі, які розв'язують рівняння прогнозу в рівновіддалених точках сітки. Прогнозні змінні вказуються на наборі точок сітки.

Зазвичай потрібно щонайменше п'ять точок сітки, щоб визначити функцію в моделі точок сітки. Найменша характеристика погоди, яку можна відобразити навіть у короткострокових прогнозах, охоплює п'ять-сім точок сітки. У цьому випадку 20-кілометровий інтервал означає, що модель не може передбачити об'єкти розміром менше 100 км. У горбистій або гірській місцевості навіть відстань сітки 5 км може не відтворити особливості циркуляції, зумовленої місцевою орографією.

Збільшення роздільної здатності висуває високі вимоги до обчислювальних ресурсів, оскільки модель повинна обчислювати значення для більшої кількості точок сітки. Коли зменшується відстань між точками сітки, то зазвичай зменшується тривалість часу між проміжними кроками прогнозу. Як наслідок, необхідні додаткові проміжні кроки прогнозу, щоб створити прогноз такої ж довжини. Вища роздільна здатність вартує додаткових обчислювальних вимог з багатьох причин, включаючи покращення здатності моделі відображати рельєф. Це, у свою чергу, впливає на те, наскільки точно модель може передбачити метеорологічні явища, викликані або посилені рельєфом місцевості.

Подібно до того, як достатня горизонтальна роздільна здатність необхідна для зображення різних атмосферних явищ, моделі ЧПП також повинні бути розроблені з адекватною вертикальною роздільною здатністю

для прогнозування вертикальної структури та наслідків різноманітних метеорологічних явищ. Співвідношення горизонтальної та вертикальної роздільної здатності має відповідати масштабу погодних явищ, які необхідно змодельовувати. Якщо узгодженість не підтримується, прогнози моделі з високою роздільною здатністю лише можуть бути навіть гіршими, ніж прогнози з нижчою роздільною здатністю. При цьому необхідно використовувати рівномірний інтервал сітки. Визначаючи оптимальну вертикальну роздільну здатність моделі, користуються тим фактом, що певні атмосферні процеси зазвичай приурочені до певних вертикальних рівнів атмосфери. Відповідно, доцільно задавати найвищу вертикальну роздільну здатність там, де це найбільше потрібно. Наприклад, вертикальна роздільна здатність має бути досить високою (порядку кількох мілібар) біля земної поверхні. Це дозволяє моделі фіксувати передачу тепла та вологи в граничний шар, утворений денним нагріванням поверхні. Така сама детальна роздільна здатність не потрібна в середній тропосфері (~ 600-300 мб), хоча збільшення роздільної здатності необхідно поблизу та нижче тропопаузи для точного прогнозування струминних течій.

*Сигма-координати.* Різні числові моделі використовують різні типи вертикальних координат для представлення атмосферних шарів. Кожен має свої переваги, а також свої обмеження. Важливо розуміти, як характеристики вертикальної роздільної здатності системи координат будь-якої конкретної моделі впливають на її здатність відображати погодні особливості. Багато моделей, включаючи GFS, COAMPS і AFWA WRF, представляють вертикально складені горизонтальні шари за допомогою сигми координат( $\sigma$ ). У сигма-системі координат нижній і верхній визначаються як ті рівні, де вертикальні рухи є незначними. Нижня частина знаходиться біля поверхні землі ( $\sigma = 1,0$ ), тоді як верхня частина має дуже низьке значення тиску, де

вертикальний рух вважається незначним ( $\sigma = 0,0$ ). Таким чином, біля поверхні сигма-шари точно імітують рельєф, тоді як угорі шари з низькими значеннями сигма вирівнюються і стають майже горизонтальними.

Використання сигма-координат, а не тиску чи висоти, дозволяє уникнути ускладнень, які виникають, коли поверхня постійного тиску чи висоти перетинає землю. У цьому прикладі поверхня на вертикальному рівні 920 мб (і будь-яка інша поверхня нижче 920 мб) перетинатиме гору, тоді як шар 0,92 сигма слідуватиме рельєфу. Зверніть увагу також на те, як рельєф зменшується на прогресивно вищих сигма-шарах.

Оскільки найнижчі шари в сигма-системі координат імітують топографію, можливо легко підвищити вертикальну роздільну здатність біля поверхні, збільшуючи кількість там шарів. Підвищена роздільна здатність у нижніх шарах атмосфери дає змогу моделям краще визначати процеси та особливості граничного шару, які суттєво впливають на чутливі погодні явища, такі як слабкі вітри, турбулентність, температура тощо. Однак сигма-координати мають деякі недоліки. Іноді вони можуть призводити до нереалістично сильних і вертикально перебільшених прогнозів хвиль у підвітряній частині гірських хребтів. Вони можуть також бути не в змозі адекватно вловити блокування вертикальних рухів у випадках, коли інверсія знаходиться нижче вершини гори.

*Гідростатичні та негідростатичні моделі.* Більшість моделей точок сітки та всі спектральні моделі в поточних робочих наборах ЧПП є гідростатичними. Навпаки, багато мезомасштабних моделей, таких як COAMPS і AFWA WRF, є негідростатичними. Гідростатичні моделі припускають гідростатичну рівновагу, за якої вага атмосфери, спрямована вниз, урівноважує силу градієнта тиску, спрямовану вгору. Це гідростатичне припущення справедливе для синоптичних і глобальних систем і для деяких

мезомасштабних явищ. Негідростатичні процеси та їхні ефекти стають важливими, коли довжина об'єкта приблизно дорівнює його висоті. Оскільки висота більшості погодних явищ обмежена висотою тропосфери, це стає проблемою для об'єктів розміром приблизно 10 км і менше. Важливі приклади погоди зі значними негідростатичними процесами включають конвективні процеси, фронти та інші лінії конвергенції, а також гравітаційні хвилі, включаючи гірські хвилі та турбулентність.

Для чисельного прогнозування погоди негідростатичні моделі включають рівняння для вертикального руху, яких бракує гідростатичним моделям. Як наслідок, негідростатичні моделі безпосередньо прогнозують погоду внаслідок вертикального руху внаслідок змін плавучості та інших вертикальних прискорень. Навпаки, гідростатичні моделі можуть лише зробити висновок про погодні явища, що є результатом таких вертикальних рухів.

Негідростатичні моделі високої роздільної здатності можуть дещо реалістично прогнозувати зміни в атмосферній плавучості та пов'язаному з цим потенціалі конвекції. Щоб досягти цього, вони включають додаткове прогнозне рівняння, яке безпосередньо враховує вертикальні прискорення та вертикальні рухи. Концептуально, зміна вертикального руху в квадраті сітки моделі може бути розрахована як така, що дорівнює змінам, спричиненим як адвекцією, так і процесами плавучості, мінус негідростатична сила вертикального градієнта тиску та опір, спричинений опадами. Щоб правильно розрахувати вертикальні рухи та плавучість, негідростатичні моделі повинні включати багато деталей про процеси хмарності та опадів у рівняннях прогнозу температури та вологи. Але ця деталь також створює великий потенціал для помилок. Отже, негідростатичні моделі можуть бути дуже чутливими до невеликих відмінностей у структурі атмосфери.

*Вертикальні координати та роздільна здатність у негідростатичних моделях.* Оскільки негідростатичні моделі мають розв'язувати додаткове прогностичне рівняння для вертикального руху, розумний вибір вертикальних координат обмежений, а час обчислення моделі збільшується. Цей вплив на обчислювальні ресурси конкурує з прагненням до дрібнішої горизонтальної та вертикальної роздільної здатності. Як результат, більшість негідростатичних моделей використовують вертикальну координату на основі висоти ( $z$ ). Лише деякі використовують координати на основі тиску ( $p$ ), ще рідше використовуються ізентропічні ( $\theta$ ) координати. COAMPS використовує сигма-координату на основі висоти  $\sigma_z$ .

На практиці більшість негідростатичних прогнозних моделей жертвують вертикальною роздільною здатністю, щоб запускати моделі в реальному часі з високою горизонтальною роздільною здатністю. Це не є серйозною проблемою при прогнозуванні глибокої конвекції, але зменшення вертикальної роздільної здатності перешкоджає здатності моделі прогнозувати кілька важливих характеристик. Ці особливості включають структуру граничного шару, тонкі шари вологи, що втягуються в похилі бароклінічні зони, та/або детальну структуру тропопаузи. Зі збільшенням обчислювальної потужності вертикальна роздільна здатність покращується, і цей компроміс зменшується.

*Вплив параметризації.* Моделі NWP не можуть вирішувати функції та/або процеси, які відбуваються в межах однієї сітки. Таким чином, навіть мезомасштабні моделі не можуть вирішити локальні потоки, завихрення або перешкоди. У цьому прикладі показано складний потік, де турбулентні вихори створюються навколо перешкод. Тертя більше біля високих дерев і будівель, ніж на відкритих ділянках. Ми не можемо реалістично очікувати, що моделі погоди розрізнятимуть функції в такому масштабі, незалежно від того,

наскільки висока роздільна здатність. У результаті вони повинні врахувати загальний вплив цих перешкод і поверхонь на потік за допомогою єдиного числа, яке представляє тертя всередині коробки сітки. Метод розрахунку таких впливів без безпосереднього їх розрахунку називається параметризацією.

Багато фізичних процесів як у граничному шарі атмосфери, такі у хмарах параметризуються. Ефекти цих процесів повинні бути параметризовані в моделі з трьох основних причин:

- Комп'ютери ще недостатньо потужні, щоб безпосередньо моделювати їх, оскільки явища або надто малі, або надто складні, щоб їх можна було розв'язати чисельно;
- Процеси часто недостатньо добре вивчені, щоб їх представити рівнянням;
- Ці процеси впливають на поля моделі та є вирішальними для створення реалістичних прогнозів.

Існує багато схем параметризації для імітації значних впливів конвективних процесів у моделях ЧПП. Навіть мезомасштабні моделі з використанням вкладених сіток високої роздільної здатності, які можуть моделювати конвекцію без використання схем параметризації, зазвичай повинні використовувати схему конвективної параметризації у своїх зовнішніх гніздах. Наприклад, схема Кейна-Фріча використовується у всіх зовнішніх вкладених сітках моделі COAMPS, коли відстань сітки перевищує кілька кілометрів. Він є фізично реалістичним у багатьох відношеннях, включаючи керування обміном вологи між вихоровими об'єктами в атмосфері і навколишнім середовищем. З усіх поточних конвективних схем вона має найбільш реалістичне трактування перекриваючих інверсій, початку конвекції та низхідних потоків. Його недоліки включають тенденцію залишати насичені шари, які є нереально глибокими під час постконвекційного зондування та

значно довший час роботи, ніж у простіших схемах. Схеми конвективної параметризації були розроблені для зменшення атмосферної нестабільності в моделях. Прогноз опадів насправді є лише побічним продуктом того, як це робить схема. Отже, ця схема не може передбачити місце та час випадання конвективних опадів так добре, як очікують синоптики.

Навіть у внутрішніх вкладених сітках мезомасштабних моделей із дуже високою роздільною здатністю все ще існують інші значні метеорологічні явища, які можуть суттєво вплинути на прогнози моделі, тому їх необхідно параметризувати. Наприклад конденсацію водяної пари, що призводить до зіткнення та злиття крапель і виділення прихованого тепла. Все це відбувається в крихітній області в межах 1-кілометрової сітки і має бути параметризовано.

Проблеми, пов'язані з використанням параметризації, можуть бути наслідком збільшення складності параметризації та взаємодії між схемами параметризації. На жаль, помилки прогнозу, створені взаємодією схем параметризації, важче відстежити, ніж помилки, що є результатом однієї схеми.

*Граничні умови та ініціалізація.* Граничні умови мезомасштабної моделі обмеженої площі, або (англ. Limited Area Model – LAM), надають ще один аспект у визначенні її здатності правильно передбачати мезомасштабні характеристики погоди. Ці граничні умови є метеорологічними умовами, представленими математично, на краях області моделі. Розраховані поля моделі повинні узгоджуватися з цими граничними умовами.

Більшість мезомасштабних моделей покладаються на глобальні або регіональні моделі порівняно грубої роздільної здатності зі значно більшим інтервалом сітки, щоб надати їм початкові та граничні умови. Звичайно, глобальна модель із такою ж роздільною здатністю та фізикою, що й

мезомасштабна модель, є кращою за версію, що охоплює обмежену область, оскільки немає проблем із граничними умовами. Але, як зазначалося раніше, глобальні мезомасштабні моделі в даний час не є практичними для короткострокових прогнозів. На даний момент більшість мезомасштабних моделей можуть бути настільки якісними, наскільки якісними є інформація, отримана від більш масштабної моделі. Отже, використання будь-якого мезомасштабного LAM має починатися з перевірки синоптичного прогнозу, який використовується для меж області LAM. Майже на всі важливі погодні особливості може впливати заломлення або перенаправлення атмосферних хвиль, коли вони проходять через межі моделі обмеженої області у внутрішню вкладену сітку. Помітні зміни можуть відбуватися в полях опадів, температурних полях, структурі струминного потоку, полі вертикального руху, а також в інтенсивності та розміщенні приземних мінімумів і фронтів.

Окрім проблем із граничними умовами, LAM можуть мати проблеми під час першого запуску. Багато з цих проблем виникають через «розкручування». Розкручування означає початок вертикальних рухів і розбіжних циркуляцій у моделі та їх розгортання на повну силу. Коли спочатку запускається модель, ці циркуляції часто занадто слабкі або неузгоджені. Це відбувається, якщо дані для початкових граничних умов надходять виключно зі спостережень без використання моделі для створення динамічної узгодженості між масою та вітром. Коли це відбувається, потрібен деякий час, щоб розгорнути вихід моделі до повної амплітуди. Крім того, протягом цього часу модель може генерувати багато помилкових гравітаційних хвиль, коли вона адаптується до динамічного балансу моделі.

Проблема розкручування залежить від того, чи мала модель *«теплий старт»* або *«холодний старт»*. На початковому етапі модель використовує систему асиміляції даних для включення даних, таких як спостереження

поверхні та зондування, протягом тривалого часу, щоб допомогти створити аналіз. Система асиміляції даних об'єднує спостереження з модельним циклом таким чином, щоб зберегти поточну циркуляцію. Таким чином, отриманий аналіз не точно збігатиметься зі спостереженнями на поверхні, а відображатиме постійну еволюцію умов безпосередньо перед аналізом. Навпаки, холодний старт зазвичай використовує аналіз з іншого джерела, наприклад, глобальної моделі, виконаної з більш грубою сіткою, для запуску мезомасштабної моделі.

Перевага «теплого старту» полягає в тому, що у цьому випадку немає проблем із «розкручуванням» моделі (англ. spin-up). Модель працює, створюючи вертикальні циркуляції, пов'язані з фронтами та смугами струменів, прихованим теплом, пов'язане з опадами тощо, і ці поля включаються в аналіз. «Холодний старт» вимагає, щоб модель поступово створювала дивергентні циркуляції, вертикальний рух і опади, звідси і термін «розкручування». Модель також може відреагувати деякими коливаннями на початку прогнозованого періоду, оскільки модель пристосовується до початкових умов, які не відповідають її числовим і фізичним показникам.

*Гарячі запуски та пропуски даних.* На початку система асиміляції даних моделі використовує спостереження, щоб виправити прогноз моделі, який є основою аналізу. Якщо в цьому прогнозі немає спостережень за місцем розташування дрібномасштабної фальшивої функції, система асиміляції залишає функцію без змін. Ці фальшиві функції можуть створити серйозну проблему. Наприклад, у синоптичному масштабі подумайте про відстеження шторму через Тихий океан. Запуски операційної моделі з циклом асиміляції даних є гарячими стартами. Однак великі ділянки Тихого океану є пустотами даних. За відсутності даних для виправлення помилкового прогнозу помилкова функція в прогнозі моделі йде на аналіз для наступного циклу

моделі. У результаті модель прогнозу інцестуально поширює власні помилки, стаючи все гіршими й гіршими в міру того, як шторм просувається крізь порожнечу даних.

*Переважа холодного запуску.* З моделями з високою роздільною здатністю дрібномасштабні функції можуть швидко з'явитися в прогнозі. Деякі з цих функцій, хоча й виглядають реалістично, можуть бути повністю вигаданими. Оскільки моделі з високою роздільною здатністю запускаються на обмежених ділянках, вони, ймовірно, зіткнуться з пропусками даних. Це підвищує ймовірність того, що аналіз гарячого старту міститиме ці фіктивні характеристики, які, у свою чергу, потенційно можуть порушити наступні дії. прогноз. Якщо використовується «холодний старт», то прогноз не включається в аналіз, тому немає помилкових прогнозів, які потрібно виправити.

Загалом, однак, теплий старт зазвичай дає кращий прогноз, за винятком проблеми з помилковими функціями. Найбільша різниця спостерігатиметься протягом перших кількох годин, а потім експоненціально зменшуватиметься. Помітні відмінності можуть зберігатися протягом 6 годин протягом прогнозованого періоду, але, як правило, вони повинні бути незначними після 12 годин.

Основна причина використання холодного старту полягає в тому, що виконання циклу асиміляції даних із моделлю високої роздільної здатності споживає набагато більше комп'ютерних ресурсів, ніж у більшості доступних. Отже, з точки зору обчислень, гарячий старт просто не завжди можливий.

*Використання мезомасштабних моделей.* Негідростатичні моделі з високою роздільною здатністю здатні передбачати деталі мезомасштабних явищ, таких як мезомасштабні конвективні системи.

Мезомасштабні деталі метеорологічних полів, як правило, можна найнадійніше передбачити, коли це залежить від топографії чи берегової лінії. Детальні прогнози, створені за допомогою мезомасштабних моделей, часто найкраще використовувати як орієнтир, маючи на увазі, що можуть мати місце зсуви у часі та певні похибки. Це особливо вірно за відсутності орографічного впливу та стає більш імовірним із збільшенням часу прогнозу.

Щоб визначити, чи відповідає прогноз мезомасштабної моделі меті, перше, що має зробити прогнозіст, це порівняти аналіз моделі та короткостроковий прогноз із фактичними спостереженнями. Також варто переглянути ряд попередніх прогнозів, щоб визначити, наскільки точною була модель останнім часом, і визначити, наскільки останній прогноз відхилився від тенденції.

У деяких випадках запуск моделі, ініціалізований з неточними граничними умовами, може виявитися корисним. Уявіть собі випадок, коли аналіз пропустив коротку хвилю, що просувається в область LAM. Протягом короткого проміжку часу модель все ще може надати корисний прогноз для регіонів, які лежать подалі від шахрайської короткої хвилі. Це особливо вірно для прогнозів погодних явищ, пов'язаних з топографічними або береговими умовами. Коли шахрайська коротка хвиля вплине на погоду в регіоні, модельний прогноз стане крахом. Але до цього часу мезомасштабна модель може працювати набагато краще, ніж глобальна модель прогнозування погоди, завдяки своїй вищій роздільній здатності. Ситуація такого типу може виникнути, коли модель не може виявити реальну погодні погоду, або вона вважає, що спотворення є, а його насправді немає. У будь-якому випадку урок полягає в тому, що не поспішайте викидати модель, яка погано ініціалізована. Залежно від вашого місцезнаходження та характеру вашої конкретної

проблеми з прогнозом модельний прогноз все одно може надавати корисні вказівки.

Іншим гарним прикладом розумного використання мезомасштабної моделі є інтерпретація модельних прогнозів гірських хвиль. Навіть при мезомасштабних роздільних здатностях дрібні деталі гірської хвилі згладжуються у більшому масштабі, ніж показують реальні дані. Однак той факт, що гірські хвилі взагалі з'являються в прогнозному продукті (згладженому чи ні), повинен насторожити прогнозиста про можливість турбулентності та сильного вітру.

*Прогнозування опадів.* Користувачам вихідних даних моделей важливо знати, що загалом усі моделі числового прогнозу погоди є найменш досвідченими для прогнозування опадів. У цьому відношенні більшість мезомасштабних моделей кращі, ніж моделі більшого масштабу, оскільки вони можуть запускати складні схеми, які безпосередньо передбачають опади та хмари. Вони також враховують внутрішні хмарні процеси. Ці складні схеми хмар прогнозують типи гідрометеорів, які не прогнозуються моделями з простішими схемами, включаючи краплі дощу, крупу та сніг.

## Розділ 2. Методи та дані дослідження

### 2.1 Загальний опис моделі WRF 4.0

Модель дослідження та прогнозування погоди (Weather Research & Forecasting (WRF)) — це сучасна мезомасштабна система чисельного прогнозування погоди, розроблена як для атмосферних досліджень, так і для операційного прогнозування. Він має два динамічних ядра, систему асиміляції даних і програмну архітектуру, що підтримує паралельні обчислення та розширюваність системи. Модель служить для широкого спектру метеорологічних застосувань у масштабах від десятків метрів до тисяч кілометрів. Розробка WRF розпочалася наприкінці 1990-х років і була спільним партнерством Національного центру атмосферних досліджень, Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (в особі Національних центрів прогнозування навколишнього середовища і Лабораторії дослідження системи Землі (Centers for Environmental Prediction (NCEP)), ВПС США, Військово-морська науково-дослідна лабораторія, Університет Оклахоми та Федеральне управління цивільної авіації [12].

Для дослідників WRF може створювати симуляції на основі реальних атмосферних умов (тобто на основі спостережень і аналізів) або ідеалізованих умов. WRF пропонує оперативне прогнозування як гнучку й обчислювально-ефективну платформу, яка водночас відображає останні досягнення у фізиці, чисельній обробці та асиміляції даних, внесені розробниками з великої дослідницької спільноти. Наразі WRF використовується в NCEP та інших національних метеорологічних центрах, а також у конфігураціях прогнозування в реальному часі в лабораторіях, університетах і компаніях.

WRF має велику світову спільноту зареєстрованих користувачів (загалом понад 57 800 у понад 160 країнах станом на 2021 рік), а NCAR проводить регулярні семінари та навчальні посібники з цього питання[13][14].

В системі державного гідрометеорологічного забезпечення використовують модель WRF ARW v.4.0, що слугує для обчислення оперативних прогнозів. Двічі на добу о 00 та 12 год. За Гринвічем відбуваються розрахунки з використанням даних глобальної моделі погоди GFS. Крок моделі по горизонталі становить 12 км. Кількість вузлів сітки моделі: із заходу на схід - 192; із півдня на північ - 150.

## **2.2 Опис статистичних методів, що використані в роботі**

### *1. Безперервні змінні*

#### 1.1. Стандартне відхилення (СВ)

Це міра величини варіації (або відхилення), яку можна очікувати між спостережуваним значенням і прогнозованим значенням. Це дуже стислий і потужний спосіб передати рівень невизначеності в прогнозі. Чим менше стандартне відхилення, тим менше невизначеність.[5]

#### 1.2. Середня помилка (СП) або зсув

Це середня помилка, задана прогнозами. Вона являє собою просту та інформативну оцінку поведінки даної змінної. Якщо  $СП > 0$  ( $< 0$ ), модель показує понад (нижче) прогнозування. Однак це неточний показник, оскільки він не надає інформації про величину помилок. Значення коливається від  $-\infty$  до  $+\infty$ . Ідеальна оцінка дорівнює 0.

$$СП = (1/N) \sum (f_i - f_o)$$

### 1.3. Середня абсолютна похибка (САП)

Це середня величина похибок у заданому наборі прогнозів. Таким чином, це лінійна міра точності. Однак вона не розрізняє помилки позитивного та негативного прогнозу. Значення коливається від 0 до  $+\infty$ . Ідеальна оцінка дорівнює 0.

$$САП = (1/N) \sum |f_i - f_o|$$

### 1.4. Середньоквадратична відхилення (СКВ)

Вимірює середнє відхилення, зважену відповідно до квадрата відхилення. Не вказує на напрямок відхилень. СКВ більше впливає на великі відхилення, ніж на малі, що може бути корисним, якщо великі відхилення не є бажаними, але також може сприяти консервативному прогнозуванню. Діапазон значень від 0 до  $+\infty$ . Ідеальна оцінка дорівнює 0.

$$СКВ = (1/N) \sum (f_i - f_o)^2$$

## 2. Дихотомічні змінні: обчислення балів за допомогою таблиці непередбачуваності

### 2.1. Зміщення частоти

Зміщення частоти, відноситься до зміщення, що використовується лише граничні суми таблиць непередбачених ситуацій. Воно порівнює прогноз і спостереження появи події у вибірці. Прогноз вважається неупередженим,

якщо подія прогнозується з тією самою частотою, з якою вона спостерігається, так що частотне зміщення 1 представляє найкращий результат.[6]

$$\text{Зміщена частка} = a + b/(a + c)$$

## 2.2. Ймовірність виявлення (ЙВ) (коефіцієнт влучання (КВ) або префігурація)

Коефіцієнт влучання (КВ, англ. – hit rate) має діапазон 0-1, де 1 є ідеальним прогнозом. Він використовує лише спостережувані події та в таблиці надзвичайних ситуацій, та реагує лише до пропущених подій, а не до помилкових відхилень. КВ сам по собі є неповним, тому його використовують у поєднанні з хибнопозитивним рівнем або частотою помилкових випадків.

$$\text{ЙВ} = \text{КВ} = a/(a + c)$$

## 2.3. Хибнопозитивний рівень (ХПР)

Хибнопозитивний рівень (ХПР) є відношенням загальної кількості помилкових відхилень (b) до загальної кількості прогнозованих подій (a+b). Він коливається від 0-1, де 0 є ідеальним балом. Він нечутливий до пропущених подій. Це також неповна оцінка, тому її слід використовувати у зв'язку з коефіцієнтом влучання.

$$\text{ХПР} = b/(a + b)$$

## 2.4. Оцінка загрози (ОЗ) (індекс критичного успіху (ІКУ))

Оцінка загрози (ОЗ) або критичний індекс успіху (ІКУ) часто використовується, як стандартний захід перевірки. Він чутливий до влучень, промахів і помилкових випадків. Він коливається від 0 до 1, де 1 це ідеальний бал і 0 як рівень навичок. Однак він чутливий до кліматичної частоти подій.

$$\text{ІКУ} = a/(a + b + c)$$

## 2.5. Оцінка майстерності Хайдке (ОМХ)

Навички – це точність прогнозу в порівнянні з точністю стандартного прогнозу. ОМХ коливається від негативного значення до +1.

$$OMX = 2(ad - bc)/[(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)]$$

## 2.6. Частота помилкового випадку (ЧПВ)

Частота помилкового випадку — це просто частка спостережуваних випадків, які є помилковими значеннями. Як зазначено у визначенні, Частота помилкового випадку чутливий лише до помилкової випадків, а не відсутніх випадків. Найкращий результат для ЧПВ це 0. ЧПВ використовується у зв'язку з КВ.

$$FA = b/(b + d)$$

## 2.7. Оцінка Ганссена-Койперса (ОГК) (оцінка Пірса) (справжня статистика навичок (TSS))

Оцінка Ханссена-Кейперса (ОГК) це різниця між частотою звернень і частотою помилкових випадків. Вона вимірює здатність прогнозу розрізняти настання та відсутність події. Вона коливається від -1 до 1, де 1 означає відмінну оцінку, а 0 означає відсутність рівня навичок.

$$ОГК = ad - bc / [(a + c)(b + d)]$$

$$ОГК = ad - bc / [(a + c)(b + d)]$$

## Розділ 3. Аналіз похибок прогнозу та їх корекція

### 3.1 Кліматична характеристика території в районі обраної станції (Бориспіль/Київ)

Київ розташований на широті приблизно  $50,5^{\circ}$  пн. ш. Монументальний знак біля Головногоштамту, що являється географічним центром Києва на Майдані Незалежності вказує на координати  $50^{\circ}27'01''$ . Оскільки широта змінюється від  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ , це означає, що Київ знаходиться ближче до Північного полюса, ніж до екватора. Тому Київ отримує від Сонця менше тепла, ніж середня температура на Землі, і його температура повітря нижча, ніж загалом на планеті. [10]

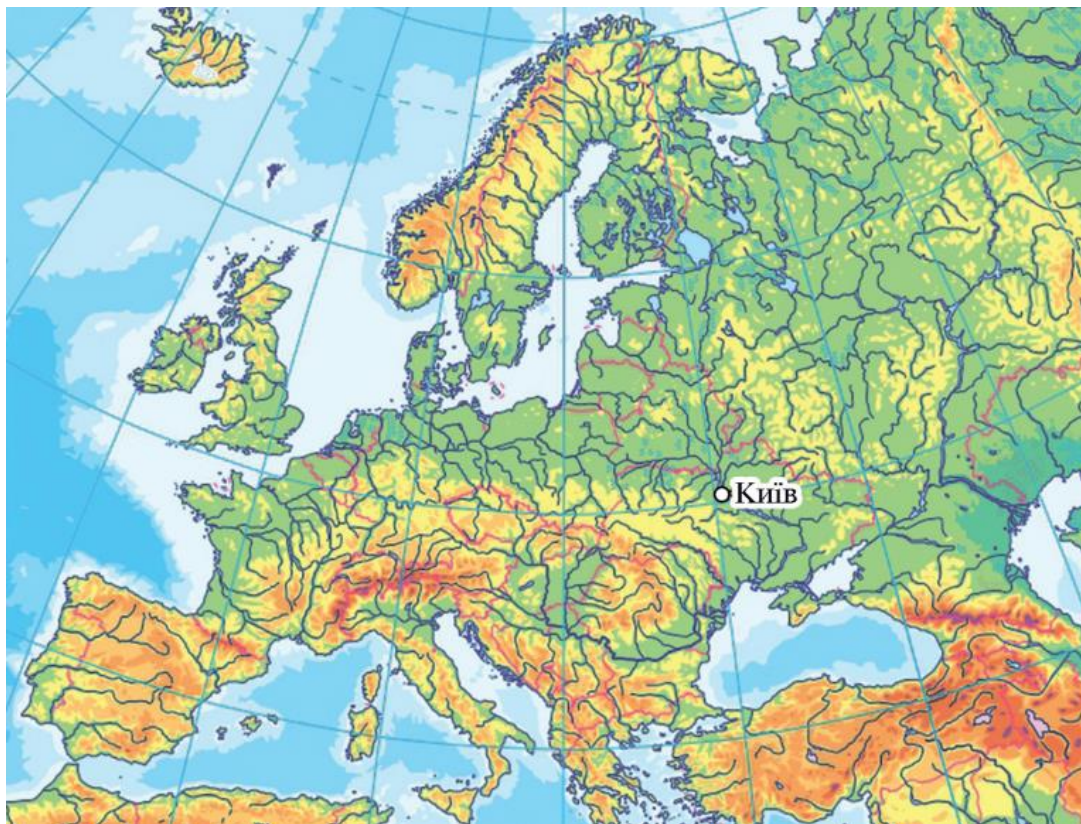


Рис. 3.1.1. Розташування Києва на карті Європи

Київ розташований у помірному поясі, що охоплює більшу частину Європи, і знаходиться трохи південніше його центру. На півночі Європи простягається субарктичний пояс, а на півдні — субтропічний, характерний для середземноморських країн. В межах помірного поясу Європи виділяють території з морським, помірно континентальним та континентальним кліматом залежно від коливань температури і зволоженості. Клімат Києва є помірно континентальним.

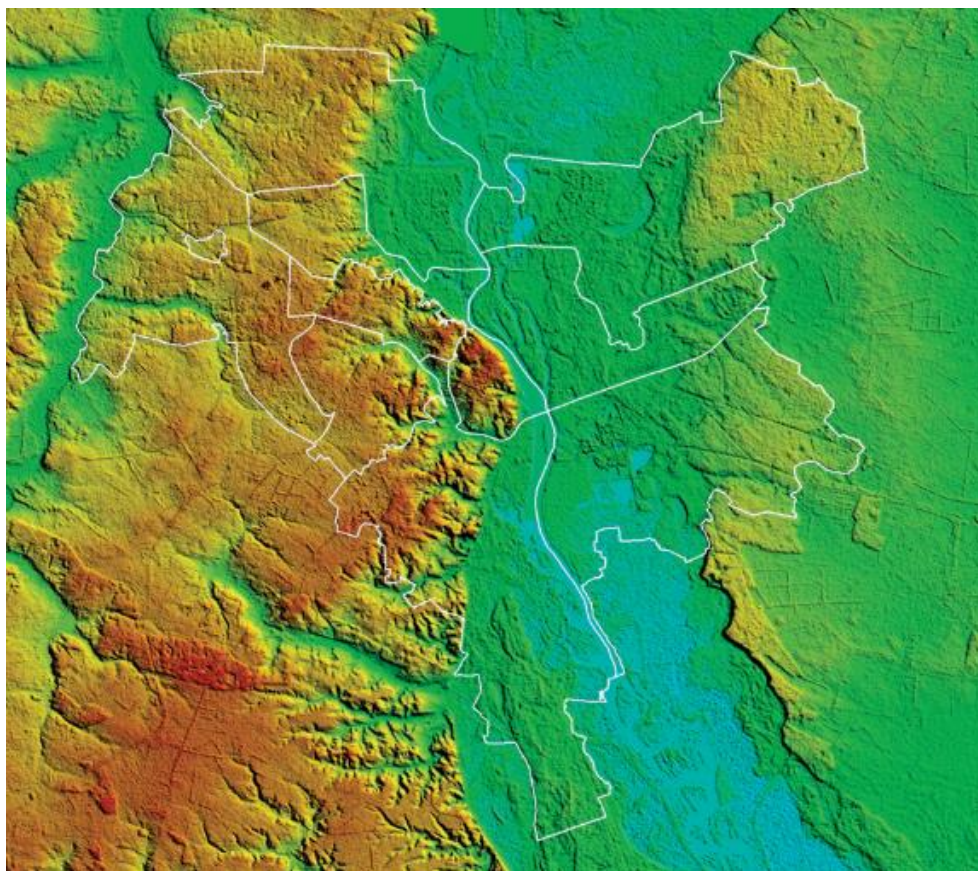


Рис. 3.1.2. Об'ємне зображення рельєфу Києва

Клімат Києва загалом сприятливий як для мешканців міста, так і для господарської діяльності. В столиці не часто бувають сильні морози або екстремальна спека. Кількість опадів є оптимальною, а швидкість вітру невелика. Сильні тумани та хуртовини трапляються рідко.[11]

Зазвичай температура повітря на Території Києва на декілька градусів вища за навколишні території.

Аналіз за 10 років, а саме за періоду з 2011-го по 2020-й показав, що найхолоднішим роком був 2012 рік, коли середньорічна температура сягала +9,4 °С. Найтеплішим же роком був 2020, середньорічна температура становила 11,2 °С. Найнижча середньомісячна температура спостерігалась в лютому 2012 році і становила -9,8 найвижча – спостерігалась в липні 2012 року та червні 2019 року, що становила +23,9 °С.

Найхолоднішим місяцем за даний період спостереження являється січень з середньою температурою -3,2 °С, а найтеплішим липень – +3,2 °С.

Абсолютно мінімальні температури були зафіксовані 3 лютого 2012 року – -26,8 °С, а абсолютний максимум 7 серпня того ж року і становила +37,6 °С.

За даний період спостереження було прослідковано збільшення температури по Києву на 0,1 – 0,4 градуси.

|                         | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI   | XII  |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Абсолютний мінімум, °С  | 9.5  | 11.9 | 20.8 | 30.2 | 31.2 | 34.0 | 35.4 | 37.6 | 35.7 | 25.8 | 19.4 | 15.2 |
| Середній максимум, °С   | 1.0  | 2.7  | 7.1  | 13.6 | 19.2 | 23.9 | 23.9 | 22.8 | 18.9 | 12.9 | 6.5  | 2.8  |
| Середня температура, °С | -3.2 | -1.6 | 3.8  | 11.2 | 16.8 | 21.0 | 22.0 | 21.5 | 16.6 | 9.6  | 3.5  | -0.2 |
| Середній мінімум, °С    | -5.5 | -9.8 | -1.6 | 10.0 | 12.9 | 18.5 | 20.3 | 19.7 | 13.0 | 6.8  | 0.5  | -4.7 |

Рис. 3.1.3. Клімат Києва за 10 років (січень 2011 - грудень 2020)

### 3.2 Оцінка помилок прогнозу моделі WRF 4.0 за період 2021-2022 рр.

Для аналізу помилок прогнозу моделі WRF 4.0 було використано дані з метеорологічної станції Бориспіль. Для дослідження фактичних даних було використані дані надані Українським гідрометеорологічним центром, а модельні дані WRF отримані в ході експлуатації моделі в оперативному режимі у відділі фізики атмосфери УкрГМІ: архів даних містить в собі прогнози із завчасністю 24, 48, 72 та 96 годин за період з 2021 по 2023 рр.

Дослідження виконані із застосуванням класичних методів математичної статистики. Розрахунки та графічні побудови виконані за допомогою пакету прикладних програм статистичної обробки даних «Microsoft Excel».

Характеристика даних показує, що середньорічна температура складає  $8,6^{\circ}\text{C}$  за 2021 рік та  $9,4^{\circ}\text{C}$  за 2022 рік (Рис.3.2.1.). Найбільша середньомісячна температура спостерігається в літній період і становить  $21,2^{\circ}\text{C}$ ,  $24,3^{\circ}\text{C}$  та  $21,2^{\circ}\text{C}$  в червні липні та серпні відповідно для 2021 року і  $21,4^{\circ}\text{C}$ ,  $20,7^{\circ}\text{C}$  та  $21,6^{\circ}\text{C}$  для 2022 року.

Максимальні середньодобові строкові значення припадають на строки за 12 годин і становлять  $11,4^{\circ}\text{C}$  у 2021 році і  $12,5^{\circ}\text{C}$  у 2022 році. Найменші значення по строкам фіксуються за 03 години і становлять  $5,6^{\circ}\text{C}$  у 2021 (Рис.3.2.2.) році і  $6,4^{\circ}\text{C}$  у 2022 році (Додаток Б). Такий середній добовий хід є типовим, коли температура зростає до полудня і потім йде на спад до мінімуму перед сходом сонця. Загалом 2022 рік являється теплішим за 2021.

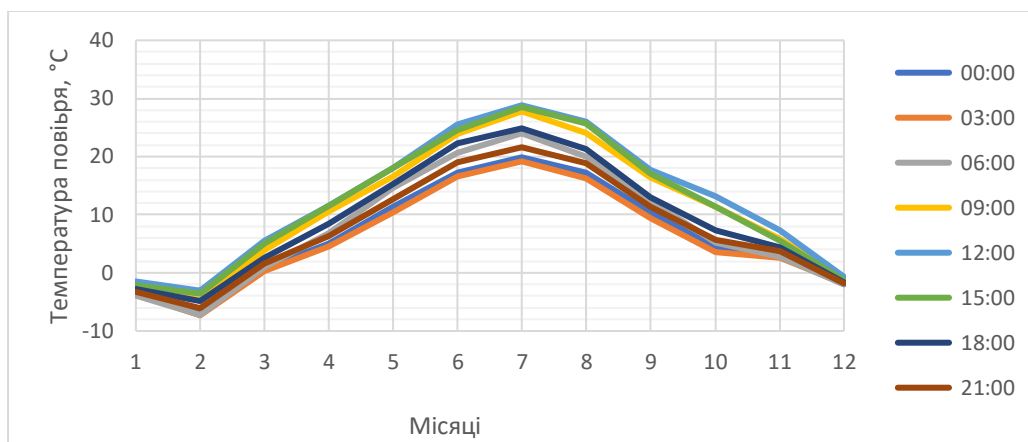


Рис.3.2.1. Річний хід строкових температур за 2021 рік

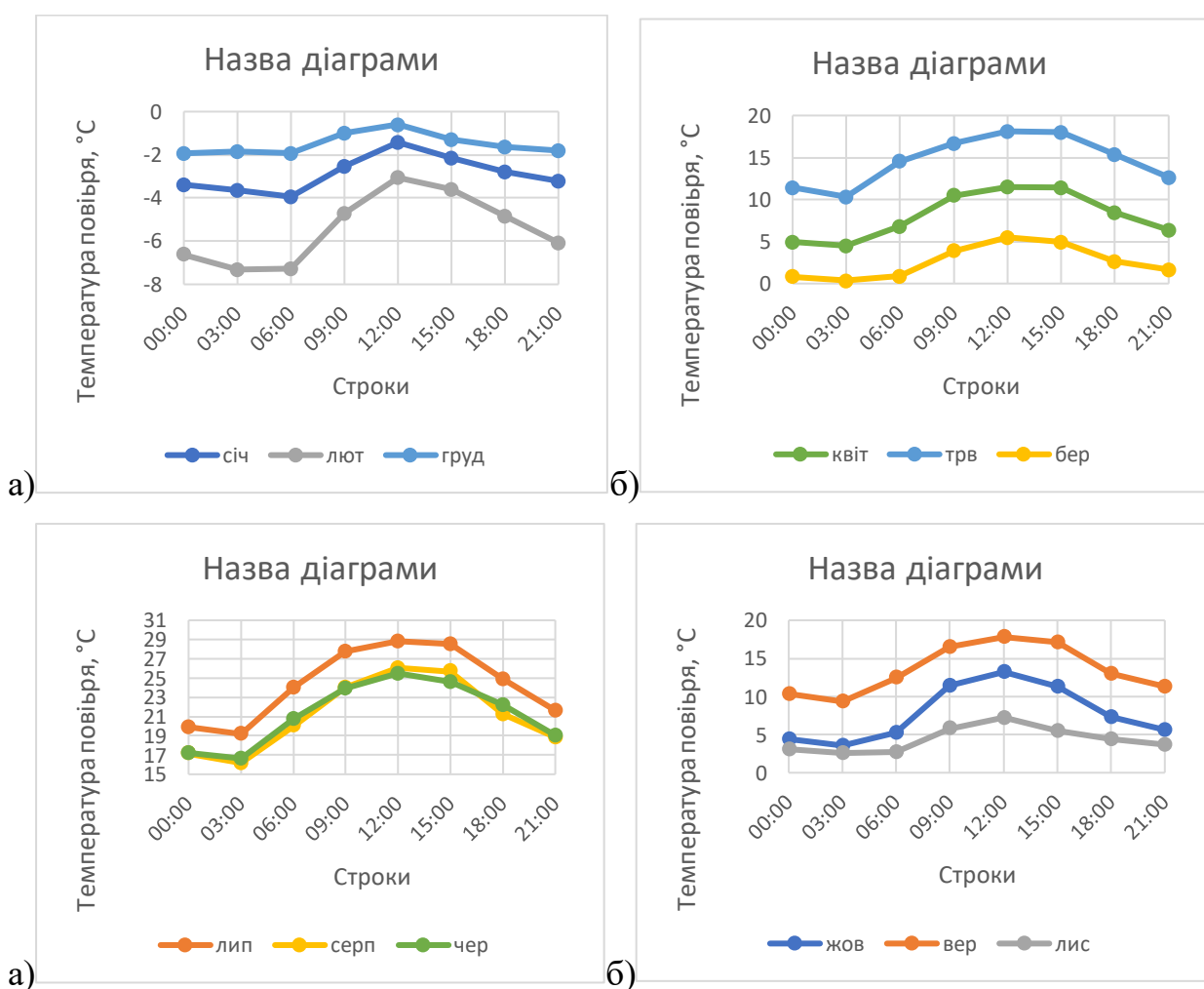


Рис.3.2.2. Хід середньомісячних температур по строкам за 2021 рік. а) зима; б) весна; в) літо; г) осінь

Температури повітря, змодельовані WRF, мають значні похибки[7], тому корекція зміщення результатів моделювання WRF є корисним методом для отримання середньодобової температури в день прогнозу[8].

Для визначення похибок у прогнозі погоди за моделлю WRF 4.0 було проведено порівняльний аналіз фактичної температури та завчасних прогнозів на 24, 48, 72 та 94 годин.

*Сезонна похибка.* Сезоні похибки характеризують, в який сезон спостерігається заниження чи завищення даних та наскільки вони великі. Дослідження цього питання показали (Рис. 3.2.3.), що переважно похибка менша у перехідний осінній період з вересня по листопад, коли похибка не перевищує  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  по модулю. Варто зазначити, що в жовтні спостерігається найменша похибка і в середньому складає від  $-0,2$  до  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  по всім завчасним прогнозам, як за 2021 так і за 2022 роки. Найбільше відхилення припадає на теплий перехідний період з травня по червень, де похибка занижує значення більше ніж на  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Середні значення прогнозів на цей період складає від  $-1,8$  до  $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Найбільші похибки прогнози дають на 72 та 96 годин, що в середньому на  $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  у 2021 році та на  $-0,7^{\circ}\text{C}$  у 2022 році занижують температуру. Найменшу похибку дають прогнози на 48 години для обох років, які в середньому занижують температуру на  $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що пов'язано з ефектом холодного старту (розділ 1).

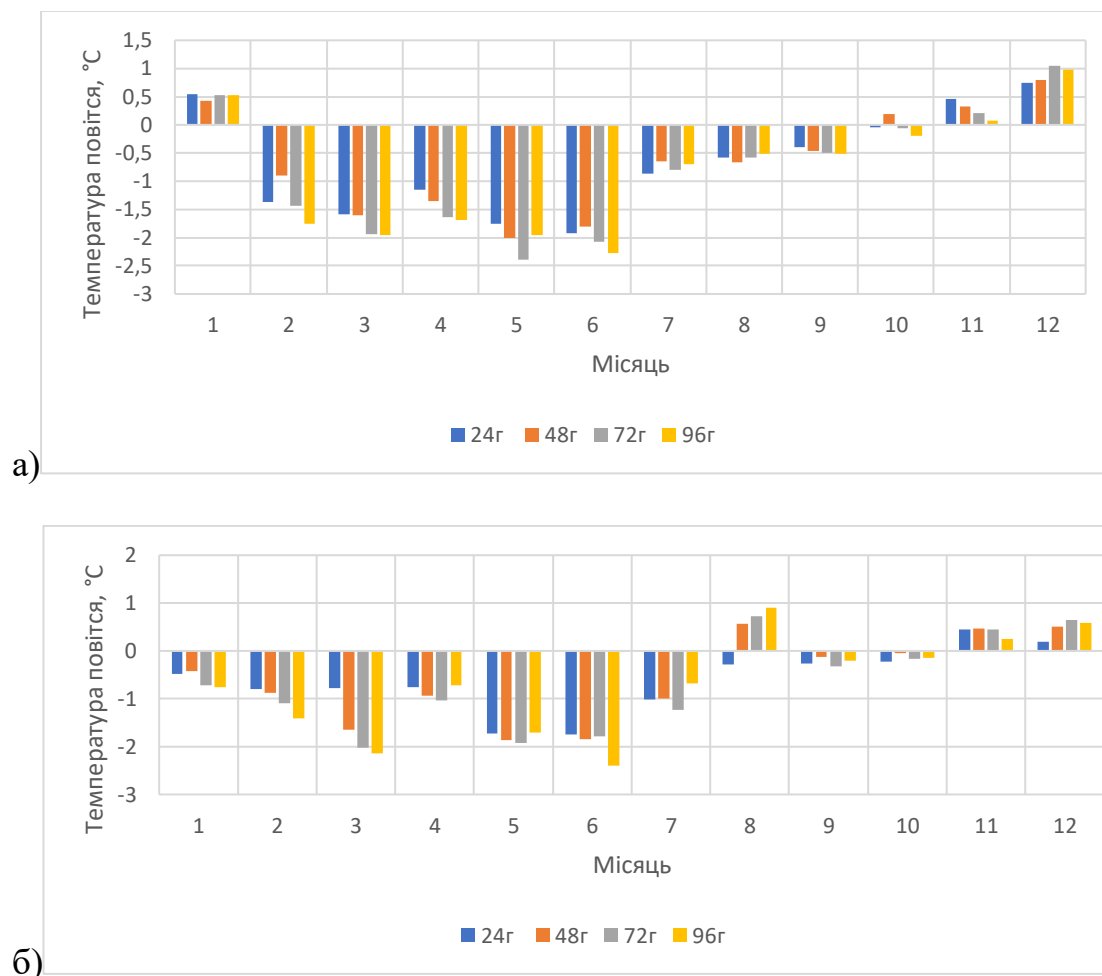


Рис. 3.2.3. Середні річні похибки прогнозу погоди на 24, 48, 72 та 96 години за 2021 (а) та 2022 (б) рр.

*Строкова похибка.* Строкові похибки показують на скільки в середньому прогнози занижують чи завищують значення в добовому ході. Так аналіз даних показав, що найбільша середня добова похибка припадає на 09 та 12 години за завчасність прогнозу на 12, 72 та 96 годин і занижує прогноз від -1,2 до -1,7 °С (Рис. 3.2.4). Тут варто зазначити, що похибка на 48 годин на ці години є навпаки – однією з найменших, що становить від -0,1 до 0,1°С .

Найменша середня похибка спостерігається о 21, 00 то 03 годинах, де середня похибка по всім прогнозам не перевищує 0,5°С. Але в той час, як в

прогнозах на 24, 72 та 94 годин середня похибка залишається в межах від  $-0,4$  до  $0,1$  °С, похибка в прогноз на 48 годин за 15, 18 та 21 та години являється найбільшою і становить в межах від  $-1,4$  до  $-1,1$ °С.

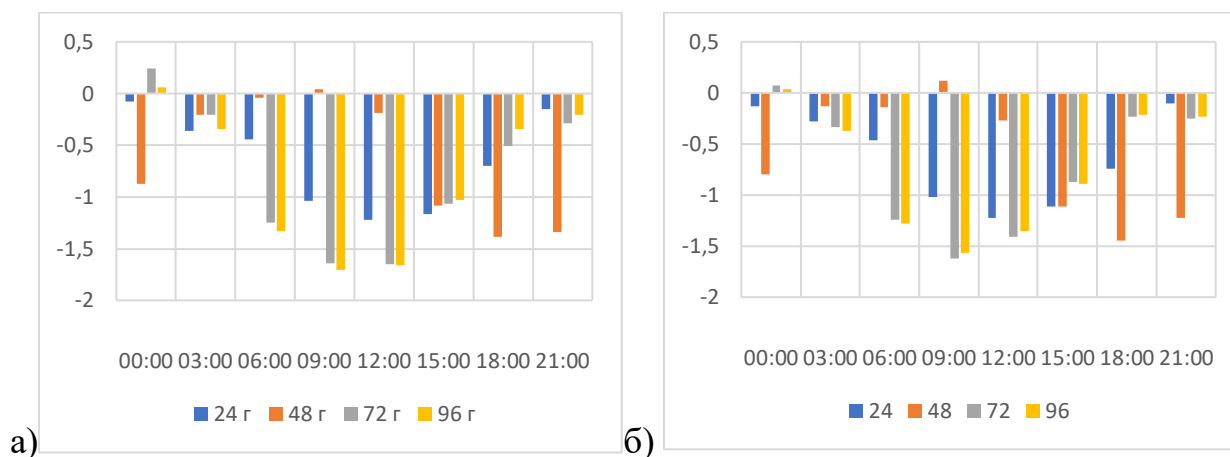


Рис. 3.2.4. Середні строкові похибки за прогнози на 24, 48, 72 та 96 годин за 2021(а) та 2022(б) рр.

Загалом найменша похибка пропадає на нічні строки 00, 03 та 21 годин, коли середня добова температура найнижча. Але це працює не для всіх прогнозів. Так середня похибка прогноз на 24, 72 та 96 годин мають тенденцію зростати від 00 годин до 12 і потім йти на спад, а похибка прогнозу на 48 годин залишається малою від 03 до 12 годин і потім помітне стрімке підвищення похибки з 15 до 00 години.

*Зимовий період.* Середня похибка прогнозу на 24 години за 2021 рік показує, що в лютому прогноз виключно занижує значення фактичні значення в середньому на  $-1,4$ °С, з найбільшою похибкою за 15 годин, де похибка становить  $-2,2$ °С та з найменшою за 06 годин з похибкою у  $-0,4$ °С. За грудень та січень спостерігається завищення прогнозу, що становить  $0,8$ °С для грудня та  $0,6$  для січня. Найбільша похибка спостерігається за 21 годину і становить

0,9°C та 1,1°C для січня та грудня відповідно. Найменша похибка в січні становить 0,1°C за 12 годину, а в грудні 0,5 за 03 годину (Рис. 3.2.5. (а)).

Прогноз на 48 годин показує, що в лютому найбільша середня похибка спостерігається за 18 годину і занижує прогноз на 2,0°C, а найменша похибка спостерігається за 12 годину – 0°C. В січні найбільша похибка за 03 години – 0,7°C, найменша 0,2°C за 00, 09 та 12 годин. В грудні найбільша похибка за 06 годин – 1,1°C, найменша за 18 годин – 0,6°C (Додаток В).

Прогноз на 72 годин вказує, що в лютому найбільша середня похибка спостерігається за 12 годину і занижує прогноз на -2,6°C, а найменша похибка спостерігається за 00 годину і завищує прогноз на 0,3°C. В січні найбільша похибка за 00 години – 0,8°C, найменша 0,2°C за 09 та 12 годин. В грудні найбільша похибка за 18 та 21 години – 1,3°C, найменша за 06, 09 та 12 годин – 0,9°C (Додаток Б).

Прогноз на 96 годин показує, що в лютому найбільша середня похибка спостерігається за 12 годину і занижує прогноз на -3°C, а найменша похибка спостерігається за 03 – 0,8°C. В січні найбільша похибка за 00 години – 1,1°C, найменша 0°C за 09 годин. В грудні найбільша похибка за 12 годин – 1,2°C, найменша за 21 годин – 0,8°C (Додаток В).

Зимовий сезон 2022 року зберігає схожу тенденцію похибок, порівняно з 2021 роком. Максимальне відхилення припадає за 09, 12 та 15 годин та прогноз із завчасністю 24, 72 та 96 годин і за 15, 18 та 21 на прогноз 48 годин.

*Весняний період.* За увесь весняний період спостерігаються заниження по всіх часових прогнозах. Середня похибка в прогнозі на 24 години в березні має найбільшу за 15 годин і становить -2,4°C. Найменша похибка спостерігається за 03 та 06 годин та становить -0,9°C. В квітні найбільша

похибка становить  $-2,3^{\circ}\text{C}$  за 15 годин, а найменша –  $-0,4^{\circ}\text{C}$  за 21 годину. Травень має найбільшу похибку  $-2,5^{\circ}\text{C}$  за 15 годин та найменшу за 03 годину, що становить  $-0,8^{\circ}\text{C}$  (Рис. 3.2.5. (б)).

Прогноз на 48 годин показує, що в березні, квітні та травні найбільша середня похибка спостерігається за 21 годину і занижує прогноз на  $-2,5^{\circ}\text{C}$ ,  $-2,6^{\circ}\text{C}$  та  $-2,8^{\circ}\text{C}$  відповідно, а найменша похибка спостерігається за 09 годин і відповідно становить  $-0,9^{\circ}\text{C}$ ,  $-0,4^{\circ}\text{C}$  та  $-0,5^{\circ}\text{C}$  (Додаток В).

Прогноз на 72 годин вказує, що в березні, квітні та травні найбільша середня похибка спостерігається за 12 годину і занижує прогноз на  $-3^{\circ}\text{C}$ ,  $-3^{\circ}\text{C}$  та  $-3,5^{\circ}\text{C}$  відповідно, а найменша похибка спостерігається за 00 годин і відповідно становить  $-0,8^{\circ}\text{C}$ ,  $-0,7^{\circ}\text{C}$  та  $-0,4^{\circ}\text{C}$  (Додаток В).

Прогноз на 96 годин вказує, що в березні та квітні найбільша середня похибка спостерігається за 12 годину і занижує прогноз на  $-3,1^{\circ}\text{C}$  та  $-3,4^{\circ}\text{C}$  відповідно, в травні за 09 годин –  $-3^{\circ}\text{C}$ . Найменша похибка спостерігається в березні, квітні та травні за 00 годин і відповідно становить  $-0,6^{\circ}\text{C}$ ,  $-0,7^{\circ}\text{C}$  та  $-0,5^{\circ}\text{C}$  (Додаток).

Весняний сезон 2022 року має приріст найбільших похибок за 09, 12 та 15 годин на прогноз завчасністю 24 години та за 18 і 21 годин на прогноз 48 годин.

*Літній період.* За літній період переважна кількість спостережень занижують середній прогноз. Червень по всім прогнозам має найбільшу похибку порівняно з іншими літніми місяцями. За прогноз на 24 години найбільша середня похибка становить  $-2,8^{\circ}\text{C}$  за 18 годину, найменша –  $1,0^{\circ}\text{C}$  за 00 годин. В Липні більша похибка показує  $-1,5^{\circ}\text{C}$  за 06 та 09 години, найменшу –  $-0,1^{\circ}\text{C}$  за 21 годину. Серпень має найбільшу похибку за 09 годину і становить  $0,8^{\circ}\text{C}$ , а найменшу  $-0,2^{\circ}\text{C}$  за 00 годин. (Рис. 3.2.5. (в)).

Прогноз на 48 годин показує, що в червні найбільша середня похибка спостерігається за 00 годину і занижує прогноз на  $-2,9^{\circ}\text{C}$ , а найменша похибка спостерігається за 09 годину –  $-0,5^{\circ}\text{C}$ . В липні найбільша похибка за 00 години –  $1,4^{\circ}\text{C}$ , найменша  $-0,1^{\circ}\text{C}$  за 06, 12 та 15 годин. В серпні найбільша похибка за 18 годин –  $1,6^{\circ}\text{C}$ , найменша за 12 годин –  $-0,1^{\circ}\text{C}$  (Додаток В).

Прогноз на 72 годин вказує, що в липні найбільша середня похибка спостерігається за 09 та 18 години і становить  $-3,1^{\circ}\text{C}$ , а найменша похибка спостерігається за 00 годину –  $-0,4^{\circ}\text{C}$ . В липні найбільша похибка за 15 години –  $1,6^{\circ}\text{C}$ , найменша  $0,2^{\circ}\text{C}$  за 00 годин. В серпні найбільша похибка за 09 години –  $-1,7^{\circ}\text{C}$ , найменша за 03 годин –  $0^{\circ}\text{C}$  (Додаток В).

Прогноз на 96 годин показує, що в червні найбільша середня похибка спостерігається за 09 годину –  $-3,5^{\circ}\text{C}$ , а найменша похибка спостерігається за 00 години –  $-0,6^{\circ}\text{C}$ . В липні найбільша похибка за 06 години –  $-1,3^{\circ}\text{C}$ , найменша  $-0,2^{\circ}\text{C}$  за 00 та 21 години. В серпні найбільша похибка за 09 годин –  $1,3^{\circ}\text{C}$ , найменша за 21 годин –  $0^{\circ}\text{C}$  (Додаток В).

Літній сезон 2022 року має певні розбіжності у сторону завищення похибок у серпні, ні відміну від значень у серпні 2021 року для прогнозу із завчасністю 48 годин, максимум якого припадає на 21 годину і становить  $1,5^{\circ}\text{C}$ . За інші прогнози найбільші похибки і ті ж часи, що і у 2021 році 09, 12 години.

*Осінній період.* За осінній період середня похибка прогнозу не має певної закономірності в заниженні чи завищенні по всім часовим прогнозам. Середня похибка в прогнозі на 24 години в вересні має найбільшу за 12 годин і становить  $-1,4^{\circ}\text{C}$ . Найменша похибка спостерігається за 03 годин та становить  $0,1^{\circ}\text{C}$ . В жовтні найбільша похибка становить  $-1,4^{\circ}\text{C}$  за 15 годин, а найменша –  $-0,4^{\circ}\text{C}$  за 18 годину. В липні спостерігається завищує прогнозів і найбільша

похибка становить  $0,9^{\circ}\text{C}$  за 06 годин та найменшу за 12 годину, що становить  $-0^{\circ}\text{C}$ . (Рис. 3.2.5. (г)).

Прогноз на 48 годин показує, що в вересні найбільша середня похибка спостерігається за 18 годину і занижує прогноз на  $-1,7^{\circ}\text{C}$ , а найменша похибка спостерігається за 03 та 12 години –  $0,1^{\circ}\text{C}$  та  $0,1^{\circ}\text{C}$ . В жовтні найбільша похибка за 21 години –  $-1,3^{\circ}\text{C}$ , найменша  $0,8^{\circ}\text{C}$  та  $-0,8^{\circ}\text{C}$  за 00 та 15 годин. В листопаді найбільша похибка за 09 та 12 години –  $1,0^{\circ}\text{C}$ , найменша за 15 та 21 годин –  $0^{\circ}\text{C}$ . (Додаток Б).

Прогноз на 72 годин вказує, що в вересні та жовтні найбільша середня похибка спостерігається за 12 годину і занижує прогноз на  $-1,6^{\circ}\text{C}$ , та  $-1,8^{\circ}\text{C}$  відповідно, а липні за 00 годин з похибкою  $0,9^{\circ}\text{C}$ . найменша похибка в вересні спостерігається за 03 годину і становить  $0^{\circ}\text{C}$ , за жовтень – за 15 годин з похибкою  $0,3^{\circ}\text{C}$  та в липні з похибкою  $0^{\circ}\text{C}$  за 06 годину (Додаток В).

Прогноз на 96 годин показує, що у вересні найбільша середня похибка спостерігається за 09 годину –  $-1,7^{\circ}\text{C}$ , а найменша похибка спостерігається за 15 години –  $0^{\circ}\text{C}$ . В жовтні найбільша похибка за 12 годину –  $-1,9^{\circ}\text{C}$ , найменша  $0,3^{\circ}\text{C}$  за 15 годин. В листопаді найбільша похибка за 00 та 09 годин  $-0,8^{\circ}\text{C}$  та  $-0,8^{\circ}\text{C}$ , найменша за 15 та 18 годин –  $-0,1^{\circ}\text{C}$  та  $0,1^{\circ}\text{C}$ (Додаток В).

Осінній сезон 2022 року аналогічно о 2021 до 2021 року мають нійбільші середні похибки за 12 та 15 годинах у прогнозі на 24 години, за 18 та 21 на прогноз 48 годин та за 06, 09 та 12 у прогнозі на 72 і 96 годин.

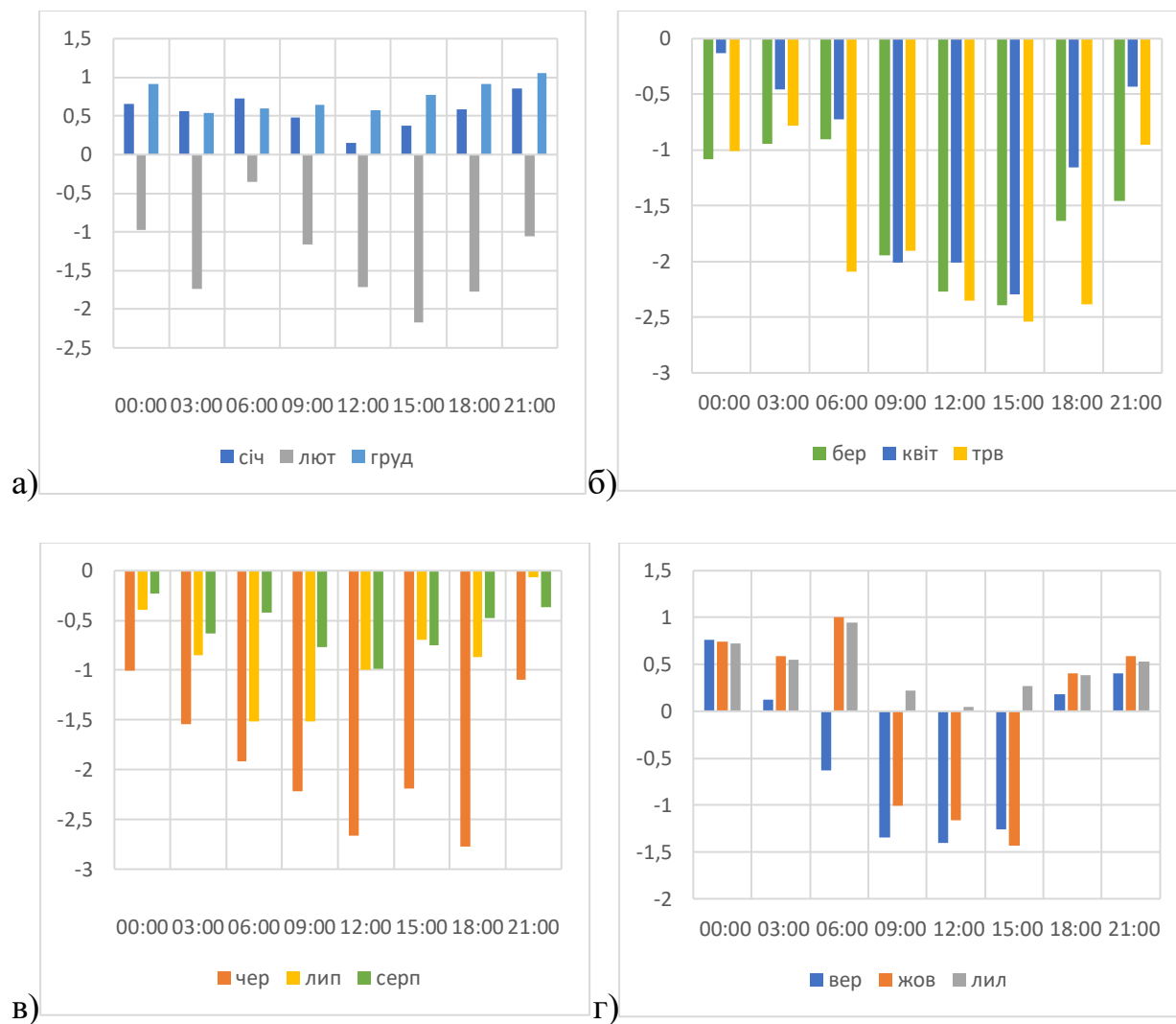


Рис. 3.2.5. Середні строкові сезонні похибки прогнозу на 24 годин за 2021: а)- зима; б) весна; в) літо; г) осінь

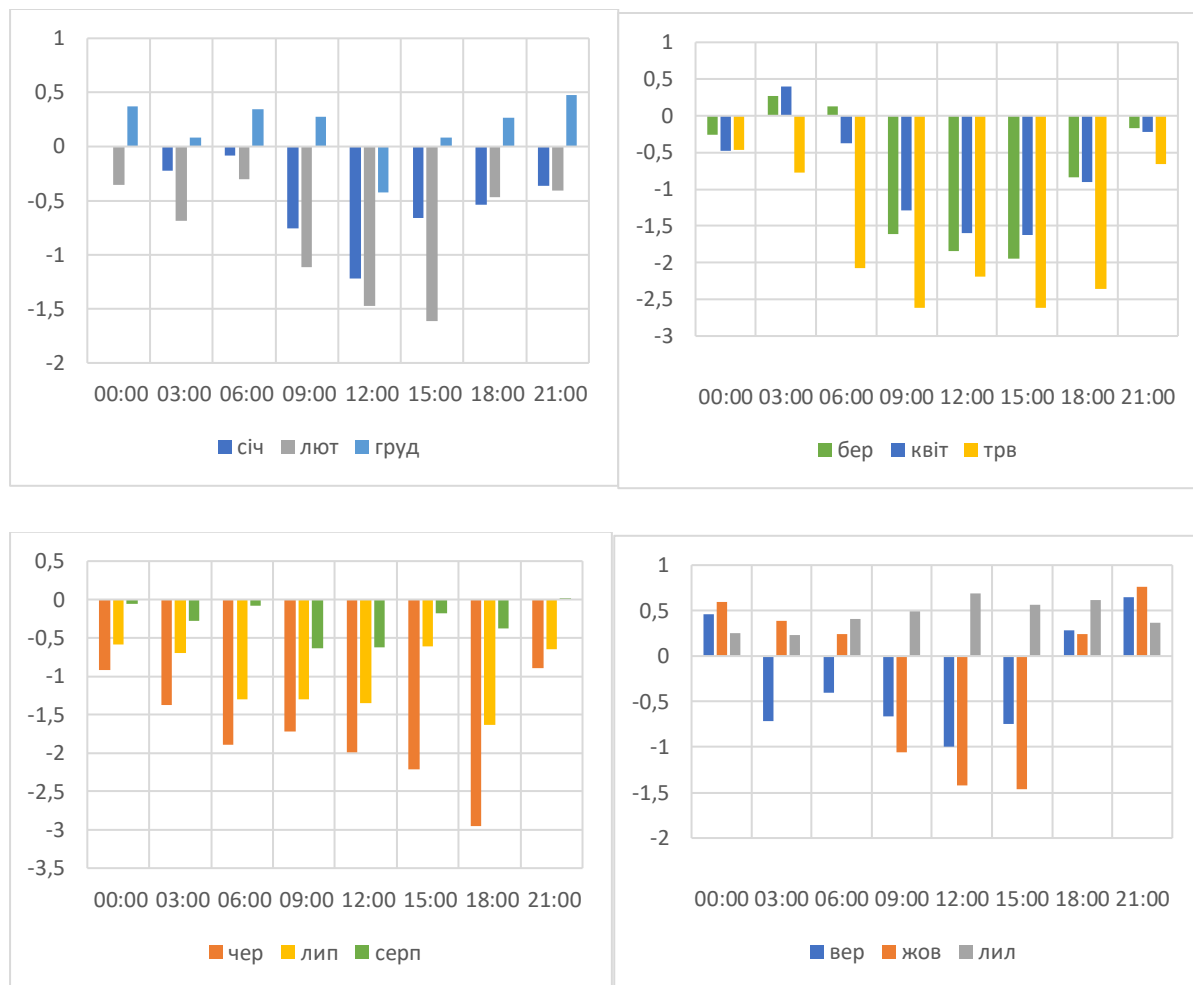


Рис. 3.2.6. Середні строкові сезонні похибки прогнозу на 24 годин за 2022: а)- зима; б) весна; в) літо; г) осінь

### 3.3 Корекція помилок та оцінка запропонованого методу

Моделі виправлення помилок були розроблені для підвищення точності числового результату шляхом навчання зв'язку між помилками передбачення та пов'язаними змінними. Застосування методів корекції зсуву стає все більш популярним для виконання локальної корекції вихідних даних детермінованої моделі за допомогою емпіричних рівнянь[8]. Моделі виправлення помилок

були розроблені для підвищення точності числового результату шляхом навчання зв'язку між помилками передбачення та пов'язаними змінними [9].

Адитивна корекція коригує прогноз на конкретній станції моніторингу шляхом додавання часового середнього виміряного відхилення за попередні дні до прогнозу детермінованої моделі, тоді як мультиплікативна корекція виконується шляхом множення прогнозу на співвідношення.

Для розрахунку корекції похибок було використано метод матриці усереднених значень похибок по строкам та місяцям за прогнози із завчасністю 24, 48, 72 та 96 годин. Так кожне середнє значення похибки порівнювалось з прогнозованим значенням по кожному строку і повторно вираховувалась похибка вже з корегованими прогностичними значеннями. Для перевірки цього методу було взято 2021 та 2022 роки, як залежні, на основі яких була розрахована корекція даних та 2023 рік, як не залежні дання, по яким буде перевірятись корекція.

По результатам корекції можна прийти до заключення, що певні покращення прогнозу спостерігаються, але не значні і в деяких випадках створюють більшу похибку (Додаток А).

Найкраща корекція спостерігається у місяці з найбільшою похибкою прогнозів, а саме у лютому, квітні, травні та червні по всім завчасних прогнозів. Так середня похибка за ці місяці становить  $-1,3^{\circ}\text{C}$ . Після корегування ці значення становлять в середньому  $0,3^{\circ}\text{C}$  (Рис. 3.3.1).

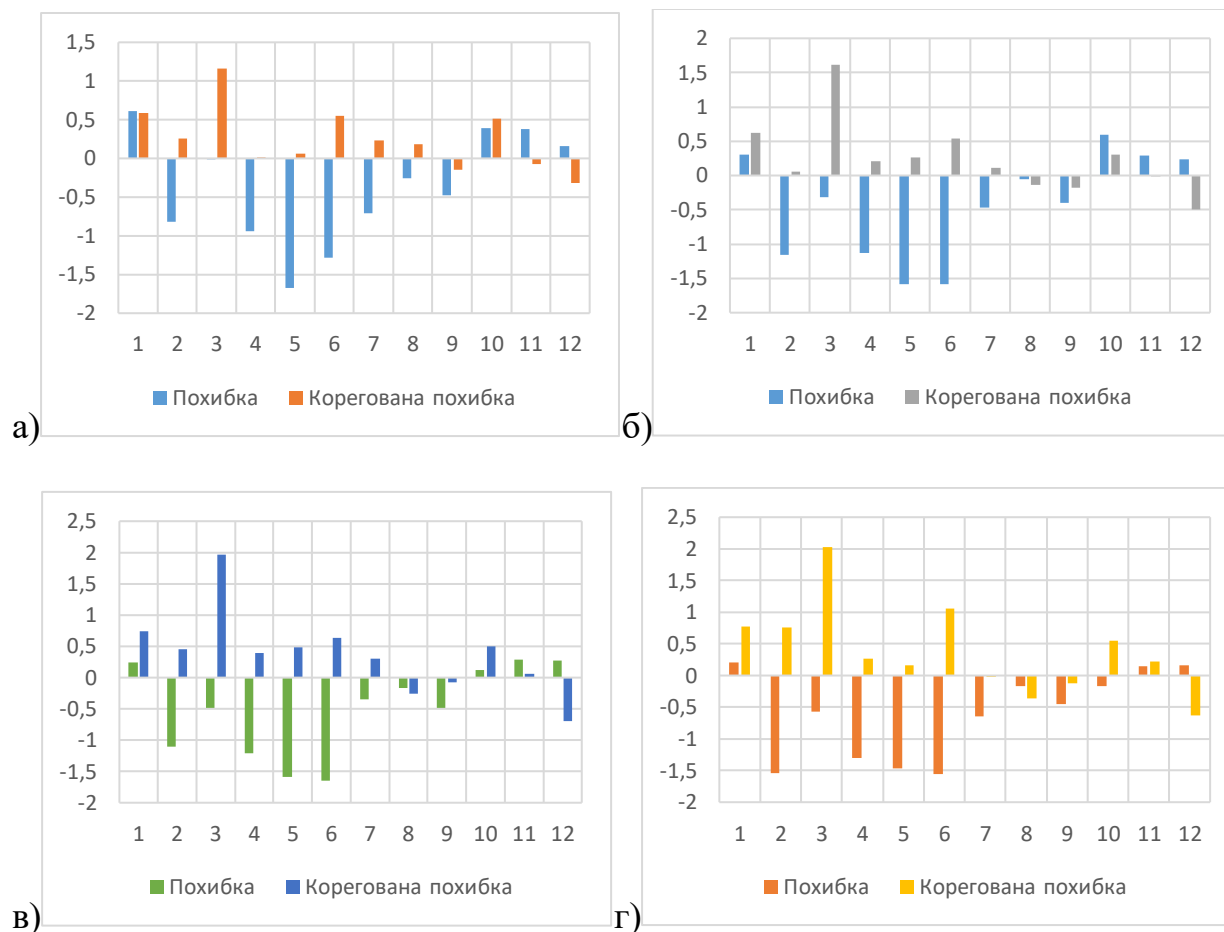


Рис. 3.3.1. Середньомісячні значення похибок за 2023 рік. а) на 24 годин ; б) 48 годин; в) 72 годин; г) 96 годин

В місяці з найменшою похибкою корекція не сильно змінила прогноз. Проте корекція в деякі місяці не зменшує, а навпаки збільшує похибку прогнозу. Так корекція по всім завчасним прогнозам показує значне завищення до  $2^{\circ}\text{C}$  у березні та незначне заниження в середньому на  $-0,5^{\circ}\text{C}$  у січні.

## Висновки

1. Модель Weather Research Forecasting (WRF) є сучасною мезомасштабною системою чисельного прогнозування погоди, розробленою для атмосферних досліджень та оперативного прогнозування. Вона підтримує паралельні обчислення, має два динамічних ядра і систему асиміляції даних, і використовується в масштабах від десятків метрів до тисяч кілометрів.. Модель WRF дозволяє створювати симуляції на основі реальних або ідеалізованих атмосферних умов.

2. В сезонних похибках найменші похибки спостерігаються в осінній період з вересня по листопад, де вони не перевищують  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Найточніші прогнози були в жовтні з середньою похибкою від  $-0,2$  до  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Найбільші похибки трапляються в теплий перехідний період з травня по червень, де середні значення занижені на  $1,8$  до  $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Прогнози на 72 і 96 годин мають найбільші похибки, в середньому занижуючи температуру на  $0,7-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Найменша похибка характерна для прогнозів на 48 годин, які занижують температуру на  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  через ефект холодного старту.

3. За результатами корекції показують, що певні покращення прогнозу спостерігаються, але вони незначні і в деяких випадках збільшують похибку. Найбільші покращення відбулися у місяцях з найбільшою похибкою прогнозів, зокрема в лютому, квітні, травні та червні для всіх завчасних прогнозів. Середня похибка для цих місяців становила  $-1,3^{\circ}\text{C}$ , а після корекції - в середньому  $0,3^{\circ}\text{C}$ . У місяцях з найменшою похибкою корекція незначно вплинула на прогноз. Однак у деякі місяці корекція не зменшує, а навпаки збільшує похибку прогнозу. Так, корекція для всіх завчасних прогнозів показала значне завищення до  $2^{\circ}\text{C}$  у березні та незначне заниження в середньому на  $-0,5^{\circ}\text{C}$  у січні.

## Список використаних джерел

1. North American Mesoscale Forecast System (NAM) [12 km]; National Centers for Environmental Prediction (2004).
2. Richard M. Hodur (1997) / The Naval Research Laboratory's Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS) / Monthly Weather Review-1414–1430.
3. Grell, G. A., Dudhia, J., & Stauffer, D / (1994). A description of the fifth-generation Penn State / NCAR Mesoscale Model (MM5) (No. NCAR/TN-398+STR) - University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D60Z716B
4. Jordan G. Powers, Joseph B. Klemp, William C. Skamarock (2017) / The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions - Bulletin of the American Meteorological Society 1717–1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
5. Weather and Climate Services Division National Center for Hydrology and Meteorology (2020); WEATHER RESEARCH AND FORECASTING MODEL (WRF) VERIFICATION
6. World Meteorological Organization. (2014); Forecast Verification for African Severe Weather Forecasting; Demonstration Projects. Geneva, Switzerland; World Meteorological Organization.
7. Wang, J., & Kotamarthi, V. R. (2014) / Downscaling with a nested regional climate model in near-surface fields over the contiguous United States. Journal of Geophysical Research: Atmospheres - 119, 8778–8797. <https://doi.org/10.1002/2014JD021696>

8. Zhang G., Zhu S., Zhang N., Zhang G., Xu Y / (2022) / Downscaling Hourly Air Temperature of WRF Simulations Over Complex Topography: A Case Study of Chongli District in Hebei Province, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* - Volume 127, Issue 3. <https://doi.org/10.1029/2021JD035542>
9. Xu, W., Liu, P., Cheng, L., Zhou, Y., Xia, Q., Gong, Y., & Liu, Y / (2021) / Multi-step wind speed prediction by combining a WRF simulation and an error correction strategy. *Renewable Energy*, 163, 772–782. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.032>
10. Вишневський В.І., Доніч О.А., Куций А.В. / Клімат Києва та його околиць. Київ / Варто - 2023. 124 с.
11. Клімат Києва [за ред. В.І. Осадчого, О.О. Косовця, В.М. Бабіченко]; Київ: Ніка-Центр; 2010; 320 с.
12. William C. Skamarock Joseph B. Klemp Jimmy Dudhia; A Description of the Advanced Research WRF Version 3; Boulder, Colorado, USA; 113.
13. WEB-system for forecasting meteorological conditions for an arbitrary territory in the detailed grids // *Mathematical Machines and Systems*. – 2018. – № 1. – p. 78-89.(in Ukrainian)
14. 1. Система чисельного прогнозу погоди «WRF-Україна» / А.М. Гузий, И.В. Ковалец, А.А. Куцан [та ін.] // *Математичні машини і системи*. – 2008. – № 4. – С. 123 – 131.

## Додатки

Додаток А – Значення похибок прогнозів та кореговані похибки за 2023 р.

24 г

| Місяць         | Факт        | Прогноз     | Похибка     | Корегована похибка |
|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|
| 1              | -0.6        | 0.0         | 0.6         | 0.6                |
| 2              | 0.4         | -0.4        | -0.8        | 0.3                |
| 3              | 4.7         | 4.7         | 0.0         | 1.2                |
| 4              | 9.6         | 8.6         | -0.9        | 0.0                |
| 5              | 15.5        | 13.8        | -1.7        | 0.1                |
| 6              | 19.6        | 18.4        | -1.3        | 0.5                |
| 7              | 21.3        | 20.6        | -0.7        | 0.2                |
| 8              | 23.3        | 23.0        | -0.3        | 0.2                |
| 9              | 18.2        | 17.7        | -0.5        | -0.1               |
| 10             | 11.1        | 11.5        | 0.4         | 0.5                |
| 11             | 4.1         | 4.5         | 0.4         | -0.1               |
| 12             | 0.5         | 0.7         | 0.2         | -0.3               |
| <b>Середнє</b> | <b>10.9</b> | <b>10.6</b> | <b>-0.4</b> | <b>0.3</b>         |

48 г

| Місяць         | Факт        | Прогноз     | Похибка     | Корегована похибка |
|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|
| 1              | -0.6        | -0.1        | 0.3         | 0.6                |
| 2              | 0.4         | -1.0        | -1.2        | 0.1                |
| 3              | 4.7         | 4.3         | -0.3        | 1.6                |
| 4              | 9.6         | 8.4         | -1.1        | 0.2                |
| 5              | 15.5        | 13.9        | -1.6        | 0.3                |
| 6              | 19.6        | 18.0        | -1.6        | 0.5                |
| 7              | 21.3        | 20.8        | -0.5        | 0.1                |
| 8              | 23.3        | 23.2        | -0.1        | -0.1               |
| 9              | 18.2        | 17.9        | -0.4        | -0.2               |
| 10             | 11.1        | 11.8        | 0.6         | 0.3                |
| 11             | 4.1         | 4.7         | 0.3         | 0.0                |
| 12             | 0.5         | 0.7         | 0.2         | -0.5               |
| <b>Середнє</b> | <b>10.9</b> | <b>10.5</b> | <b>-0.4</b> | <b>0.2</b>         |

48 г

| Місяць | Факт | Прогноз | Похибка | Корегована похибка |
|--------|------|---------|---------|--------------------|
| 1      | -0.6 | -0.2    | 0.2     | 0.7                |
| 2      | 0.4  | -1.1    | -1.1    | 0.4                |
| 3      | 4.7  | 4.2     | -0.5    | 2.0                |
| 4      | 9.6  | 8.4     | -1.2    | 0.4                |
| 5      | 15.5 | 13.9    | -1.6    | 0.5                |
| 6      | 19.6 | 18.0    | -1.6    | 0.6                |
| 7      | 21.3 | 20.9    | -0.4    | 0.3                |
| 8      | 23.3 | 23.1    | -0.2    | -0.3               |
| 9      | 18.2 | 17.7    | -0.5    | -0.1               |
| 10     | 11.1 | 11.2    | 0.1     | 0.5                |
| 11     | 4.1  | 4.4     | 0.3     | 0.1                |
| 12     | 0.5  | 0.8     | 0.3     | -0.7               |

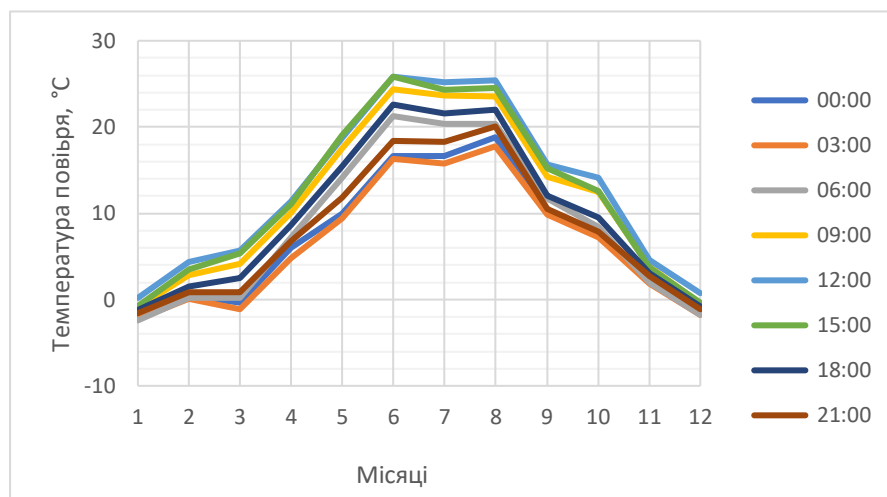
96 г

| Місяць | Факт | Прогноз | Похибка | Корегована похибка |
|--------|------|---------|---------|--------------------|
| 1      | -0.6 | -0.2    | 0.2     | 0.8                |
| 2      | 0.4  | -1.3    | -1.5    | 0.8                |
| 3      | 4.7  | 4.1     | -0.6    | 2.0                |
| 4      | 9.6  | 8.3     | -1.3    | 0.3                |
| 5      | 15.5 | 14.0    | -1.5    | 0.2                |
| 6      | 19.6 | 18.1    | -1.6    | 1.1                |
| 7      | 21.3 | 20.7    | -0.6    | 0.0                |
| 8      | 23.3 | 23.1    | -0.2    | -0.4               |
| 9      | 18.2 | 17.7    | -0.5    | -0.1               |
| 10     | 11.1 | 10.9    | -0.2    | 0.5                |
| 11     | 4.1  | 4.2     | 0.1     | 0.2                |
| 12     | 0.5  | 0.7     | 0.2     | -0.6               |

|               |             |             |             |            |
|---------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| <b>Середн</b> |             |             |             |            |
| <b>є</b>      | <b>10.9</b> | <b>10.4</b> | <b>-0.5</b> | <b>0.4</b> |

|               |             |             |             |            |
|---------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| <b>Середн</b> |             |             |             |            |
| <b>є</b>      | <b>10.9</b> | <b>10.4</b> | <b>-0.6</b> | <b>0.4</b> |

Додаток Б – Річний хід строкових температур за 2022 р.



Додаток В – Середні строкові сезонні похибки прогнозу на 48, 72 та 69 годин за 2021 р.

