

УДК: 551.501.7, PACS: 92.60.-e, 92.60.hv, 06.20.Dk, 92.90.+x

МЕТОД КРИТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ДАНИХ РАДІОЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ В ОБЛАСТІ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ВІДХИЛЕНЬ

М. В. Савенець

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС
України та НАН України, пр. Науки, 37, 03028, Київ, Україна,
savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

У статті представлено новий метод критичного контролю даних радіозондування атмосфери в області екстремальних відхилень для температури повітря, висоти ізобаричного рівня, відносної вологості та складових вітру. Метод розроблено на основі даних радіозондування атмосфери 9 аерологічних станцій України за період 1973–2018 рр. В основі розробленого методу лежить використання «плаваючих» граничних показників, що визначаються як межа відхилення, де статистичний розподіл аерологічної характеристики вперше переходить у нуль. Відмова від сталих граничних показників на користь «плаваючих» дозволила врахувати особливості розкиду значень аерологічних характеристик, залежність від висоти та відмінність параметрів розподілу для різних строків спостережень. Встановлення потенційно помилкових значень в області екстремальних відхилень відбувається за умови виходу значень за межі «тіла» розподілу. Загальна кількість таких виходів досягає 0.2% у середній та верхній тропосфері, 0.3–1.8% у нижній тропосфері та до 2% у стратосфері. На другому етапі розробленого методу потенційно помилкові значення перевіряються із застосуванням часткового вертикального, часткового горизонтального та часового контролю. Другий етап контролю реалізується для рівнів, де ряди спостережень досягають не менше 3700 значень, що забезпечує точне визначення середніх багаторічних значень, необхідних для реалізації горизонтального контролю. Потенційно помилкове значення вважається реальним за наявності трьох підтверджень екстремальних відхилень із набору «сусідні станції – сусідні строки спостережень – сусідні ізобаричні рівні», тобто не менше ніж двома різними видами контролю. На значних висотах достатнім є два підтвердження за умови, що висновок зроблено за результатами двох різних видів контролю. Розроблений метод критичного контролю дозволив за загальний період спостережень відкинути твердження про помилковість 568 значень, максимальні відхилення яких досягали 6.2 та -6.4σ. Разом з контролем на фізично допустимі межі, контроль екстремальних відхилень є складовою частиною комплексного критичного контролю даних радіозондування атмосфери та формує вхідну інформацію до проведення горизонтального, вертикального та гідростатичного контролю.

Ключові слова: критичний контроль; радіозондування атмосфери; екстремальне відхилення; аерологічні характеристики

1. ВСТУП

Радіозондування атмосфери – дистанційне вимірювання в атмосфері метеорологічних величин з використанням вимірювальних перетворювачів [1, 2]. Особливістю таких спостережень є те, що вони виконуються не в одній точці, як під час наземних метеорологічних вимірювань, впродовж руху приладу у вертикальній та горизонтальній площині. Вимірювання та передача результатів виконується за допомогою спеціального приладу, що називається радіозондом, який являє собою сукупність відповідних первинних перетворювачів та радіопередавача [1-4]. Ре-

зультати радіозондування атмосфери є основним джерелом інформації щодо стану метеорологічних величин над поверхнею землі та використовується у чисельних методах прогнозу погоди, визначенні стабільності атмосфери, прогнозуванні хмарності, дослідженні забруднення атмосферного повітря, озонового шару, вивчення та прогнозування особливостей атмосферної рефракції електромагнітного випромінювання [3-5]. Цивільна авіація, військова артилерія, запуск балістичних ракет (в тому числі і космічних засобів) потребують наявності аерологічної інформації [3-5]. У результаті, важливо отримувати точні дані, мати методики визначення помилок,

що виникають під час спостережень.

У зв'язку із великою кількістю джерел різноманітних похибок, точність вимірювань метеорологічних величин під час реалізації радіозондування атмосфери суттєво нижче наземних метеорологічних вимірювань [2]. Точність визначення вертикальної структури полів метеорологічних величин у тропосфері надзвичайно важливе для усіх типів прогнозу погоди, особливо регіональних та локальних. Дані радіозондування атмосфери є життєво необхідними для вивчення клімату вільної атмосфери [4,6,7]. Точніші ряди аерологічної інформації надаватимуть кращу оцінку висотних кліматичних змін [3,4].

Аналіз даних радіозондування атмосфери характеризується своєю специфікою по відношенню до інших метеорологічних спостережень, пов'язаною із великою кількістю пропусків. Основними причинами цього є недостатня висота підйому аерологічного зонду та технологія радіозондування [8,9]. Тому виникає потреба розвитку методів контролю якості аерологічної інформації. Такі методи повинні бути адаптовані до формування «безпомилкових» рядів спостережень з метою дослідження клімату, та для аналізу оперативної інформації. На сьогодні існує велика кількість методів критичного контролю даних радіозондування атмосфери, але використання лише одного методу не задовольняє сучасні вимоги до проведення аналізу та пошуку помилкових значень. У результаті основною вимогою стає проведення комплексного контролю даних радіозондування атмосфери [9-12].

Комплексний контроль умовно можна розділити на два етапи. Перший етап є підготовчим, із застосуванням контролю на фізично-допустимі межі та кліматичного контролю. Другим етапом є проведення детального аналізу показників аерологічних характеристик із залученням основних компонентів комплексного контролю: горизонтального, часового, вертикального та гідростатичного [9]. Від якості проведення підготовчого етапу залежить кількість даних, що будуть детально перевірятися основними компонентами комплексного контролю.

Однією з найбільших проблем на сьогодні є проведення кліматичного контролю – тобто контролю екстремальних відхилень. Основне завдання такого контролю – діагностувати можливі помилкові та реальні значення серед показників, що суттєво відхиляються від своїх середніх багаторічних значень. Зазвичай, для даного виду контролю використовують достатньо «неточні»

методи, так як очікується, що подальша перевірка повинна вловлювати усі помилки. Найбільш популярним методом на сьогодні є видалення значень, що знаходяться за межами сталих граничних показників (наприклад, $\pm 5\sigma$), та подальший перехід до горизонтального контролю [9]. Подібну методика застосовано для даних українських станцій у попередніх дослідженнях [13]. Але використання подібного підходу показало два основні недоліки. По-перше, можуть бути видалені реальні значення, що у результаті аномальності погодних умов перевищили сталий граничний показник. Такі значення є надзвичайно важливими для вивчення екстремальних випадків з метою застосування у нормативах будівництва, метеорологічного забезпечення польотів, тощо. Більш того, втрачається важлива кліматична інформація. По-друге, горизонтальний, вертикальний, часовий методи контролю характеризуються зменшенням чутливості зі збільшенням відхилень від середніх значень. Таким чином, у області екстремальних відхилень може бути видалена велика кількість реальних показників.

З урахуванням вказаних недоліків, *метою даної роботи* є розробка нового методу контролю екстремальних відхилень даних радіозондування атмосфери, який дозволить би покращити якість діагностики реальних аномальних відхилень аерологічних характеристик.

2. ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Розробку методу контролю екстремальних відхилень даних радіозондування атмосфери здійснено з використанням відкритих електронних баз даних Університету Вайомінг [14]. Представлена інформація охоплює значний період проведення спостережень та дозволяє одразу проводити автоматизацію роботи із завантаженими файлами. Для розробки методу контролю використано результати спостережень 9 аерологічних станцій території України: Київ (код станції 33345), Шепетівка (33317), Львів (33393), Ужгород (33631), Чернівці (33658), Кривий Ріг (33791), Одеса (33837), Харків (34300) та Сімферополь (33946). Єдину станцію, яку не враховано для проведення досліджень – Білогірськ (33966), у зв'язку із малою кількістю спостережень на станції (224 випуски зонду за весь час). Початком періоду спостережень є 1 січня 1973 р. (початок періоду у базах даних Вайомінгу), кінець періоду – 31 липня 2018 р. Аналіз виконується для 4 стандартних строків спостережень: 0 UTC

(строк 00), 6 UTC (строк 06), 12 UTC (строк 12), 18 UTC (строк 18).

На жаль, на сьогодні станції Ужгород, Чернівці та Сімферополь не проводять радіозондування. Більшість станцій випускають аерологічний зонд лише в один строк спостережень: 0 UTC на станціях Одеса, Харків, Львів; та 12 UTC у Кривому Розі та Шепетівці. Станція Київ запускає зонд двічі на добу у строки 00 та 12 UTC. Несистематичність проведення радіозондування атмосфери у повному обсязі ускладнює розробку методів комплексного контролю аерологічних даних, що потребує індивідуального підходу до деяких видів контролю на станціях (наприклад, горизонтального). Незважаючи на це, комплексний контроль та окремі його складові необхідно розробляти для усіх станцій та усіх строків спостережень. Таким чином, за умови відновлення спостереження у ті строки, де наразі радіозондування не проводиться, розроблені методи дозволять одразу перейти до критичного контролю отриманої інформації без їх додаткової розробки.

Методи критичного контролю розроблено для усіх 17 стандартних ізобаричних рівнів: 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 5 гПа, тобто охоплюють увесь профіль тропосфери та нижньої стратосфери до висот близько 35 км. Винятком є показники вологості повітря, так як при низьких температурах датчики перестають давати правильну інформацію щодо вмісту вологи в атмосфері [3]. Тому характеристики вологості проаналізовано лише на 4-х стандартних ізобаричних рівнях: 1000, 925, 850 та 700 гПа до висот близько 3–3.5 км.

Загальний алгоритм розробки комплексного контролю якості даних радіозондування атмосфери наступний: першим розробляється та проводиться контроль на фізично допустимі межі, наступними йдуть контроль екстремальних відхилень, горизонтальний, вертикальний та гідростатичний. На цих етапах дозволяється вносити уточнення, об'єднуючи окремі види контролю та додатково залучати часовий контроль, або спрощені варіанти горизонтального та вертикального контролю [9].

У роботі представлено розроблений контроль екстремальних відхилень даних радіозондування атмосфери. Вхідною інформацією до даного контролю стали ряди спостережень, що пройшли контроль на фізично-допустимі межі. Таким чином, одразу видалено усі значення, що фізично не можуть існувати у природі, та, безсумнівно, є помилковими. Контроль на фізично допус-

тимі межі проводився для висоти ізобаричного рівня, температури повітря, відносної вологості, напрямку та швидкості вітру, з урахуванням прийнятних меж для вказаних аерологічних характеристик [9].

Контроль екстремальних відхилень розроблено для висоти ізобаричного рівня, температури повітря, відносної вологості, зональної та меридіональної складових вітру. Перехід від напрямку і швидкості вітру до зональної та меридіональної складової здійснено у зв'язку із неможливістю застосування однакових алгоритмів програмування для характеристик вітру, так як дані напрямку вітру представлені у полярних координатах.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

В основі розробленого методу контролю екстремальних відхилень покладено «плаваючі» граничні показники, що обчислюються для кожної окремої вибірки. Вибіркою є часовий ряд аерологічної характеристики на заданій висоті за окремою станцією. На відміну від існуючих методів контролю екстремальних відхилень, де використовуються сталі показники, такий підхід з максимальною чутливістю дозволяє врахувати особливості різних аерологічних характеристик. Теоретичним підґрунтям є побудова статистичних розподілів вибірок. Зі збільшенням відхилення будуть спостерігатися зменшення числа випадків потрапляння у градацію розподілу. На певній відстані від моди статистичної вибірки повторюваність значень у градації дорівнюватиме 0, тобто відсутність випадків потрапляння величини у градацію. Та частина розподілу, значення яких знаходяться між градаціями з повторюваністю рівною 0, будемо називати «тілом» розподілу (рис. 1). Проте, для кожної вибірки можуть існувати такі значення, зазвичай помилкові, що характеризуються більшими відхиленнями (рис. 1 – крайні області відхилень). Саме ці значення будуть видалені із вибірок як помилкові, але після їх додаткової перевірки. У результаті застосування «плаваючого» граничного показника, є можливість вловлювати реальні аномальні відхилення, що формуються для конкретного аерологічного параметру на конкретній станції та ізобаричному рівні.

На рис. 1 наведено приклад виділення «тіла» розподілу для однієї із вибірок (температура у строк 00 на рівні 500 гПа станції Київ (33345)). «Тіло» розподілу знаходиться у межах від -5 до 3.25σ. Таким чином, усі значення, що потрапили до «тіла» не будуть перевірятися контролем екс-

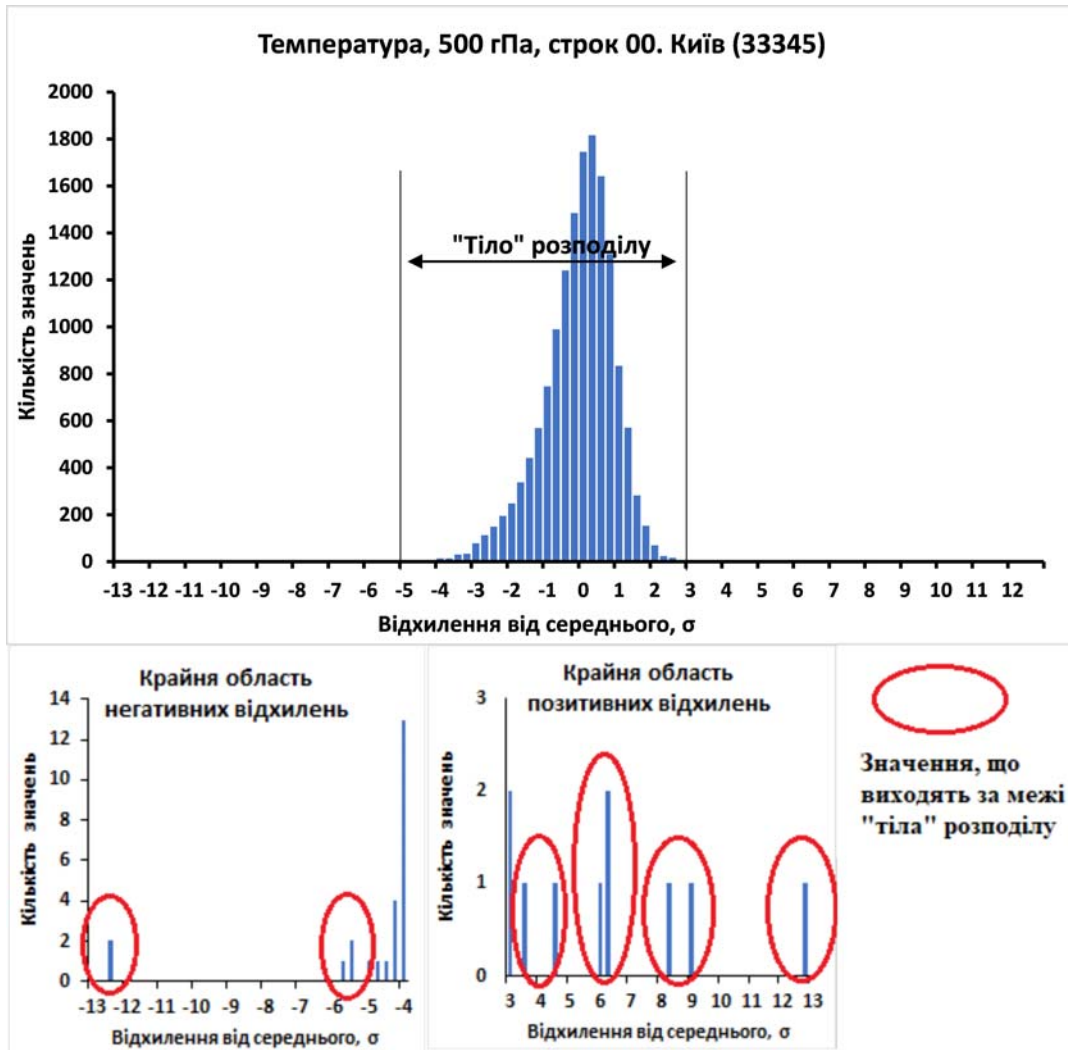


Рис. 1 – Розподіл значень температури у строк 00 на рівні 500 гПа станції Київ, та крайні області позитивних і негативних відхилень.

тремальних відхилень та перейдуть до подальшої перевірки іншими видами контролю, зокрема горизонтальним, що повинен проводитися наступним.

3.1 Пошук та статистика потенційно помилкових значень

Перший етап проведення контролю екстремальних відхилень полягає у розрахунках середніх значень для усіх вибірок, та побудови статистичних розподілів. Після визначення «тіла» кожного із розподілів, виокремлюються усі значення, що знаходяться поза його межами. Загалом, серед усіх аерологічних характеристик найменша ширина «тіла» розподілу характерна для відносної вологості, що дорівнює 6–7 σ (рис. 2) та зменшується з висотою. Таким чином, відносна вологість характеризується найменшим розкидом значень серед усіх аерологічних хара-

ктеристик, що визначаються під час радіозондування атмосфери. Найбільшим розкидом значень характеризуються меридіональна та зональна складові вітру (рис. 2).

У середньому «тіло» розподілу для температури і характеристик вітру має ширину 7–9 σ . Висота ізобаричного рівня характеризується малою шириною «тіла» розподілу у шарі 30–5 гПа, зменшуючись до 2.5–5 σ , у порівнянні з 7–8.5 σ у тропосфері. Для усіх аерологічних характеристик спостерігається чіткий добовий хід ширини «тіла» розподілу. У нічні години розподіли усіх показників у тропосфері характеризуються більшою шириною, ніж у денні.

Таким чином, чітко виявляється необхідність використання «плаваючих» граничних показників на етапі контролю екстремальних відхилень аерологічних даних. Це обумовлено відмінністю у розкиді значень різних аерологічних хара-

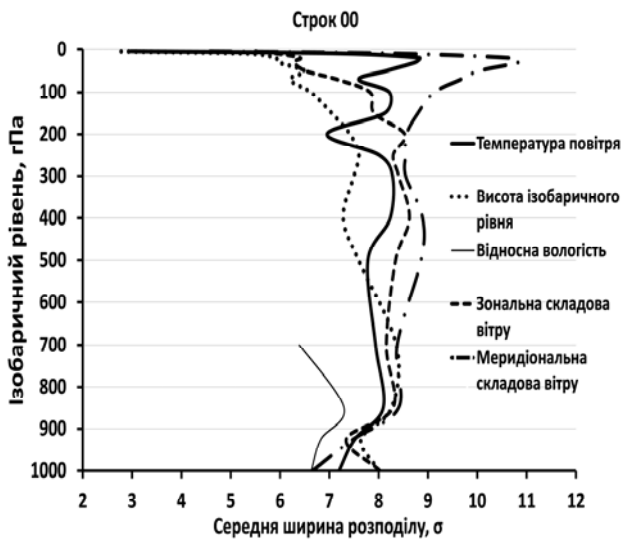


Рис. 2 – Вертикальні профілі середньої ширини «тіла» розподілу аерологічних характеристик у строк 00, обчислених для станцій території України

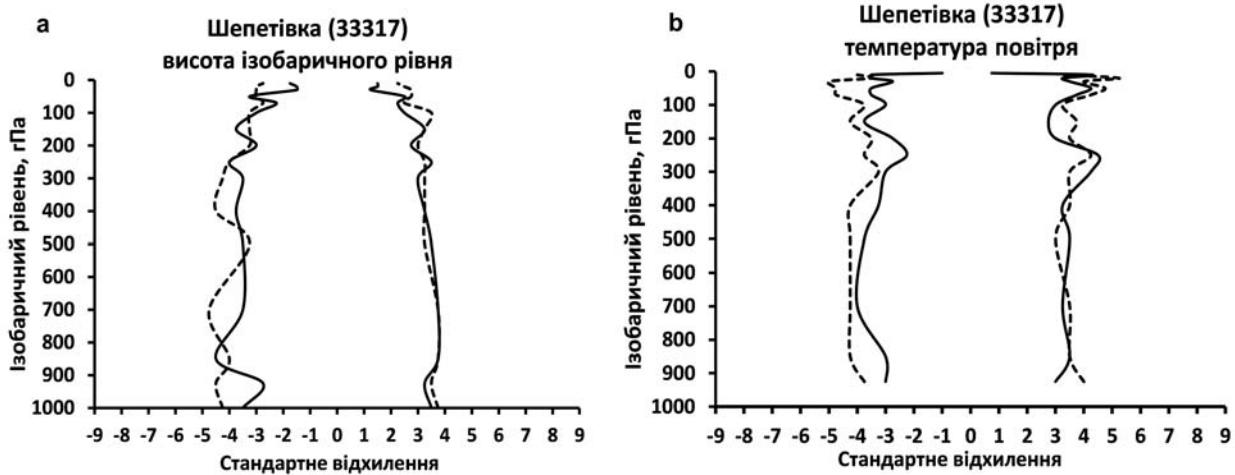


Рис. 3 – Вертикальні профілі лівої та правої межі «тіла» розподілу висоти ізобаричного рівня (а) та температури (б) на станції Шепетівка (штрихова лінія – строк 00, суцільна лінія – строк 12)

Особливо це характерно для найвищих стандартних ізобаричних рівнів 20, 10 та 5 гПа. Це явище не пов'язане зі зменшенням розкиду значень на значних висотах та не є причиною природних закономірностей. Зменшення числа випадків, коли аерологічний зонд досягав таких висот, призводить до зменшення числа значень, за якими будується статистичний розподіл. У результаті ширина «тіла» розподілу є меншою за нижче розташовані рівні. Продовження радіозондування атмосфери дозволить поповнювати вибірки, та уточнювати межі «тіла» розподілу на значних висотах.

Для температури повітря характерна симетричність абсолютних значень лівої та правої межі «тіла» розподілу, що знаходяться, в основ-

ристик, залежністю розкиду значень від висоти та, навіть, наявністю добового ходу ширини «тіла» розподілу. Враховуючи таку варіативність розподілів різних аерологічних характеристик, сталі граничні показники не здатні об'єктивно виявити помилки у аномальних відхиленнях.

Ліва межа «тіла» розподілу висоти ізобаричного рівня варіює приблизно в інтервалі $-3...-5\sigma$, тоді як права межа $+2...+4\sigma$ (рис. 3а). Таким чином, область додатних відхилень характеризується меншими аномаліями, тобто для статистичного розподілу висоти ізобаричного рівня характерна асиметрія. Це означає, що існує потреба у виділенні двох різних граничних показників для області від'ємних та додатних відхилень, а не єдиного сталого показника.

З рис. 3 чітко прослідковується зменшення абсолютних значень лівої та правої межі з висотою, тобто зменшення ширини «тіла» розподілу.

ному, в межах $\pm 3.5...4.5\sigma$. Зменшення числа випадків, за яких аерологічний зонд досягав ізобаричних рівнів 30–5 гПа, також зумовлює суттєве зменшення ширини розподілу.

Для відносної вологості характерна асиметричність «тіла» розподілу, із більшими показниками в області позитивних відхилень. Ліва межа, зазвичай, не перевищує -4σ , тоді як права межа досягає $+4...+5\sigma$.

Ліва та права межа «тіла» розподілу характеристик вітру симетричні та знаходяться у межах $\pm 3...5\sigma$. Особливості циркуляційних процесів стратосфери призводять до відсутності явища зменшення ширини «тіла» розподілу на ізобаричних рівнях 30–10 гПа, тобто менша кількість зондувань на таких висотах не призводить до

відмінностей характеристик розподілу. У зв'язку із характерною циклічністю швидкості вітру та чергуванням напрямку вітру із західного (холодний сезон) на східний (теплий сезон), менші за кількістю значень вибірки характеризуються високою варіативністю значень зональної та меридіональної складових. Винятком є тільки ізобаричний рівень 5 гПа, де довжини вибірок відіграють провідну роль у формуванні недостатньо точної оцінки статистичного розподілу.

Після визначення «тіла» розподілу вибірок, знаходяться усі значення, відхилення яких перевищили граничні показники. Найбільша кількість виходів характерна для температури повітря, найменша – для відносної вологості та висоти ізобаричного рівня.

У строк 00 для температури за загальний період на кожному ізобаричному рівні спостерігалось, в основному, 10–14 випадків виходу за межі граничних значень «тіла» розподілу. Винятками є рівні нижньої тропосфери, де кількість виходів приблизно вдвічі менша, та рівні стратосфери, де виходів близько 20. Для висоти ізобаричного рівня, а також зональної й меридіональної складових вітру, на більшості висотах діагностовано 5–9 випадків виходу за межі «тіла» розподілу. У нижній тропосфері 1–3 випадки, у стратосфері до 13–15 випадків. Відносна вологість у шарі 1000–700 гПа характеризується лише 2–6 випадками виходів за «тіло» розподілу за загальний період досліджень.

У строк 06 та 18, кількість виходів для усіх аерологічних характеристик значно менша, через меншу довжину вибірок. Так, зазвичай, спостерігається 2–4 випадки перевищень граничних показників для висоти ізобаричного рівня та відносної вологості, 4–7 для температури повітря та характеристик вітру.

За загальний період досліджень у денний строк спостерігалось 8–12 випадків виходу за межі «тіла» розподілу для температури, 5–8 – для характеристик вітру, та до 7 – для висоти ізобаричного рівня і відносної вологості. Число виходів у стратосфері, зазвичай, більше ніж у тропосфері.

Незважаючи на подібність вертикальних профілів абсолютного числа випадків виходу за межі «тіла» розподілу, відносні показники кількості виходів поблизу земної поверхні, та у стратосфері характеризуються різким збільшенням. Так, для шару 850–70 гПа загальне число виходів за граничні показники, незалежно від часу проведення радіозондування, не перевищує 0.2%. У шарі 1000–925 гПа кількість виходів за межі «тіла» розподілу спостерігається у 0.3–

1.8% спостережень. У стратосфері кількість таких виходів може перевищувати 2% вимірних значень.

Таким чином, кількість значень, що може бути відфільтрована контролем екстремальних відхилень, надзвичайно мала. Але, наявність серед цих значень підтверджень, є надзвичайно важливим для статистики екстремальності метеорологічних умов, розрахунків ймовірностей настання рідкісних явищ. Відхилення, що реально спостерігалися, а не були помилковими, здатні вносити суттєву різницю у статистичні характеристики рядів та впливати на об'єктивність їх аналізу. Більш того, сьогодні під час формування історичних рядів радіозондування атмосфери (для аналізу кліматичних змін) рівень забезпеченості менше 99.9% є неприйнятним, що наведено під час створення глобальної бази даних аерологічних спостережень CARDS [9]. Тому, просте видалення із рядів спостережень навіть 0.2% значень, що потрапляють в область екстремальних відхилень, без їх перевірки не задовольняє сучасні вимоги комплексного контролю якості даних.

У цілому, за загальний період спостережень під час проведення кліматичного контролю для 9 станцій аерологічного зондування на території України діагностовано наступну кількість можливих помилкових значень:

- 1694 – для висоти ізобаричного рівня;
- 3766 – для температури повітря;
- 1520 – для відносної вологості повітря (у шарі 1000–700 гПа);
- 1906 – для зональної складової вітру;
- 2478 – для меридіональної складової вітру.

3.2 Перевірка потенційно помилкових значень

Наступним кроком розробленого методу контролю екстремальних відхилень є перевірка потенційно помилкових значень там, де її можливо провести. Алгоритм перевірки зводиться до наступного:

- перевіряються усі значення сусідніх станцій за цей строк спостережень на заданому рівні (спрощений горизонтальний контроль);
- перевіряються усі значення на заданій станції за цей строк спостережень рівнем вище та рівнем нижче (спрощений вертикальний контроль);
- перевіряються усі значення на заданій станції та ізобаричному рівні у попередній та наступний строки спостережень (часовий контроль).

Якщо аномальність можливого помилкового значення, що вийшло за межі «тіла» розподілу, знаходить підтвердження, значення залишається у вибірці. У іншому випадку, значення вважається помилковим та видаляється. Підтвердженням вважається випадок, якщо значення вимірної величини на сусідній станції, сусідньому вертикальному рівні, або сусідньому строку спостережень, не відрізняється від можливого помилкового більше ніж на $\pm 0.5\sigma$. З метою уникнення хибних висновків (наприклад, за несправності датчика, у результаті чого на сусідніх вертикальних рівнях отримані екстремальні відхилення), підтвердженням вважається наявність трьох випадків аномальних відхилень із набору «сусідні станції – сусідні строки спостережень – сусідні ізобаричні рівні». Таким чином, екстремальне відхилення буде підтверджено різними видами контролю, що є об'єктивним для діагностування значення як реальне. Проте, такий підхід обмежений на значних висотах, яких аерологічний зонд досягає не завжди. У такому разі, підтвердженням вважається аномальність відхилення у двох випадках із набору «сусідні станції – сусідні строки спостережень – сусідні ізобаричні рівні» за умови, що висновок зроблено за результатами двох різних видів контролю.

Проведення перевірки значень, що не потрапили до «тіла» розподілу, можливе лише за наявності розрахованих відхилень від середніх багаторічних значень для даного строку спостережень у заданий день. На жаль, не усі ряди спостережень дають можливість обчислити середні багаторічні значення, у зв'язку із малою довжиною вибірок. Тому, обов'язковою умовою є встановлення показника, який би визначав мінімальну кількість значень у вибірці, за якої можна проводити осереднення.

Як відомо, Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) рекомендує використовувати 30-річний період для встановлення кліматичної норми [15]. При цьому, наголошується, що період не є відображенням фізичних особливостей метеорологічних величин: для одних – цього періоду цілком достатньо, для інших – замало. Кожні 10 років рекомендовано проводити уточнення кліматичних норм. У випадку, якщо період спостережень на станції менший за 30 років, дозволяється проводити багаторічне осереднення за наявними даними та порівнювати отримані показники із тими, що розраховані для 30-річного періоду на інших станціях. Тобто, отримане осереднення (за період від 10 років) виступає на рівних правах під час аналізу кліматичних змін, а показник отримує назву «умовна кліма-

тична норма» [15]. З огляду на це, у розробленому методі кліматичного контролю вирішено виконувати багаторічне осереднення, якщо кількість запусків зонду відповідає 10 рокам, тобто вибірка містить 3660 значень. Для зручності використання, показник заокруглено до 3700.

Наведений показник визначає алгоритм проведення усього комплексного контролю даних радіозондування атмосфери. Якщо довжина вибірки дозволяє точно визначити середні багаторічні значення на станції за окремий строк спостережень окремого дня року, тоді контроль екстремальних відхилень та горизонтальний контроль (що повинен реалізовуватися наступним) проводяться у повному обсязі. Тобто, усі значення, що не потрапили до «тіла» розподілу перевіряються. Якщо довжина вибірки не дозволяє обчислити середні багаторічні значення, тоді проведення контролю екстремальних відхилень припиняється після етапу визначення значень, що не потрапили до «тіла» розподілу. Усі вони остаточно видаляються із вибірок та вважаються помилковими. Горизонтальний контроль, у майбутньому, також не буде реалізовуватися, оскільки немає можливості перейти від вимірних значень до їх відхилень від середніх багаторічних.

У нічний строк спостережень часові ряди усіх аерологічних станцій України дозволяють проводити повний контроль екстремальних відхилень у шарі 850 – 100 гПа. На ізобаричному рівні 1000 гПа не задовольняють умови часові ряди станцій Шепетівка, Львів, Чернівці, Сімферополь. У стратосфері у шарі до 20 гПа недостатньо даних для осереднення на станціях Шепетівка та Кривий Ріг. У зв'язку із відносно незначним числом випадків, коли аерологічний зонд досягав найвищих стандартних ізобаричних рівнів, у шарі 10–5 гПа на жодній станції території України неможливо провести повний контроль екстремальних відхилень.

У строк 06 лише дані станцій Київ, Львів та Сімферополь дозволяють проводити повний контроль екстремальних відхилень та подальший горизонтальний контроль у шарі 850–100 гПа.

У строк 12 даних усіх станцій України у шарі 850–100 гПа достатньо для проведення усіх видів контролю. Поблизу земної поверхні недостатня кількість значень станцій Київ, Ужгород, Кривий Ріг та Одеса. У стратосфері із 70 гПа неможливо провести повний контроль екстремальних значень на станціях Шепетівка та Кривий Ріг, а із 10 гПа – на усіх станціях України.

Таблиця 1 – Підтвержені значення серед випадків виходу за «тіло» розподілу

Характеристика	Кількість виходів	Кількість підтвержень	Максимальні підтвержені відхилення (σ)	
			Позитивне	Негативне
Висота ізобаричного рівня	1694	176 (10%)	5.9	-4.9
Температура	3766	105 (3%)	6.2	-4.5
Відносна вологість	1520	129 (8%)	-	-3.5
Зональна складова вітру	1906	59 (3%)	4.2	-4.6
Меридіональна складова вітру	2478	99 (4%)	6.2	-6.4

Строк 18 характеризується найгіршою якістю рядів спостережень. Достатня кількість даних для проведення повного кліматичного та горизонтального контролю наявна на станції Львів у шарі 850–100 гПа, та станції Київ у шарі 850 – 300 гПа.

Для усіх рівнів, де кількість даних дозволяє проводити повний контроль екстремальних відхилень, проведено пошук підтвержень значень, що вийшли за межі «тіла» розподілу (табл. 1). Варто зазначити, що для відносної вологості відсутні виходи за межі «тіла» розподілу в області позитивних відхилень, що пов'язано із близькістю фізично-допустимої межі стану насичення у 100% до загальної групи значень статистичного розподілу.

Таким чином, перевірка контролем екстремальних відхилень дозволила не тільки провести виділення помилкових значень, але і відкинула твердження про помилковість 568 показників. Два види контролю – на фізично допустимі межі та контроль екстремальних відхилень – формують вхідну інформацію для проведення горизонтального контролю.

4. ВИСНОВКИ

Розроблено метод критичного контролю даних радіозондування атмосфери у області екстремальних відхилень, що базується на використанні «плаваючих» граничних показників. Такий підхід дозволив підвищити чутливість контролю до особливостей динаміки різних аерологічних характеристик, їх вертикальних розподілів та добового ходу. Загальний алгоритм контролю екстремальних відхилень передбачає проведення контролю після перевірки аерологічних характеристик на фізично допустимі межі та реалізується у два основних етапи: безпосереднє виділення потенційно помилкових значень та їх перевірка з метою виявлення реальних аномалій. Перевірка потенційно помилкових значень відбувається із

застосуванням часткових вертикального, горизонтального та часового контролю; та реалізується для рівнів, де ряди спостережень досягають не менше 3700 значень. Застосування методу для українських станцій радіозондування атмосфери дозволив виділити від 0.2 до 2 % не підтверджених екстремальних відхилень, серед яких за період 1973–2018 рр. діагностовано 568 реальних значень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Качурин Л. Г. Методы метеорологических измерений. Методы зондирования атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 457 с.
2. Киселев В. Н., Кузнецов А. Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосфера). Санкт-Петербург: Изд-во РГГМУ, 2004. 429 с.
3. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No 8. 7th edition. 2008. 681 p.
4. Harrison R. G. Meteorological Measurements and Instrumentation. Wiley Blackwell, 2015. 278 p.
5. Богаткин О. Г. Авиационная метеорология. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2005. 328 с.
6. Гаврилова Л. А. Аэроклиматология (климат свободной атмосферы). Ленинград : Из-во ЛГМИ, 1982. 156 с.
7. Oort A. H., Huanzhu L. Upper-air temperature trends over the globe, 1958 – 1989. *J. Climate*. 1993. 6(2). Pp. 292–307.
8. Зайцева Н. А. Аэрология. Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. 324 с.
9. Алдухов О. А., Черных И. В. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Контроль качества и обработки данных. Обнинск : ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2013. Т. 1. 307 с.
10. Парфиневиц Я. Комплексный контроль аэрологической информации. Москва : Гидрометеиздат, 1976. 67 с.
11. Collins W. G. Complex quality control of significant level rawinsonde temperatures. *J. of Atmos. and Oceanic Technology*. 1998. 15(1). Pp. 69–79.
12. Collins W. G. The operational complex quality control of radiosonde heights and temperatures at the National Centers for Environmental Prediction. Part I: Description of the method. *J. of Appl. Meteorol.* 2001. 40(2). Pp. 137–151.
13. Дворецька І. В., Савенець М. В. Розробка баз аерологічних даних для території України. *Фізична географія та геоморфологія*. 2017. Вип. 85. С. 130–136.
14. Upper air soundings. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (Accessed: 26.03.2019)

15. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. URL: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/Normals-Guide-to-Climate-190116_en.pdf (Accessed: 25.11.2018)
- ## REFERENCES
1. Kachurin, L.G. (1985). *Metody meteorologicheskikh izmereniy. Metody zondirovaniya atmosfery [The methods of meteorological measurements. The methods of atmosphere soundings]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
 2. Kiseliov, V.N. & Kuznetsov, A.D. (2004). *Metody zondirovaniya okruzhayushchei sredy (atmosfera) [The methods of environment soundings]*. Sankt-Peterburg: RHHMU. (in Russ.)
 3. World Meteorological Organization (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. WMO-No8. Seventh edition.
 4. Harrison, R.G. (2015). *Meteorological Measurements and Instrumentation*. Wiley Blackwell.
 5. Bogatkin, O.G. (2005). *Aviatsionnaya meteorologiya [Aviation Meteorology]*. Sankt-Peterburg: RHHMU. (in Russ.)
 6. Gavrilo, L.A. (1982). *Aeroklimatologiya (klimat svobodnoy atmosfery) [Aeroclimatology (climate of the free atmosphere)]*. Leningrad: LGMI. (in Russ.)
 7. Oort, A.H. & Huanzhu, L. (1993). Upper-air temperature trends over the globe, 1958 – 1989. *J. Climate*, 6(2), pp. 292–307.
 8. Zaitseva, N.A. (1990). *Aerologiya [Aerology]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
 9. Aldukhov, O.A. & Chernykh, I.V. (2013). *Metody analiza i interpretatsii dannykh radiozondirovaniya atmosfery [The methods of analysis and interpretation of the atmospheric radiosoundings data]*. Obninsk: FGBU VNIIGMI-MCD. Vol. 1. (in Russ.)
 10. Parfinevych, Y. (1976). *Kompleksnyi control aerologicheskoy informatsii [The complex control of aerological information]*. Moscow: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
 11. Collins, W.G. (1998). Complex quality control of significant level rawinsonde temperatures. *J. of Atmos. and Oceanic Technology*, 15(1), pp. 69–79.
 12. Collins, W.G. (2001). The operational complex quality control of radiosonde heights and temperatures at the national centers for environmental prediction. Part I: Description of the Method. *J. of Appl. Meteorol.*, 40(2), pp. 137–151.
 13. Dvoretzka, I.V. & Savenets, M.V. (2017). [Development of the aerological databases for Ukrainian territory]. *Fizychna heohrafiia i heomorfolohiia. [Physical Geography and Geomorphology]*, 85, pp. 130–136 (in Ukr.)
 14. *Upper Air Soundings*. Available at: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (Accessed: 26.03.2019)
 15. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. Available at: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/Normals-Guide-to-Climate-190116_en.pdf (Accessed: 25.11.2018)

METHOD OF CRITICAL CONTROL OF ATMOSPHERIC RADIOSOUNDING DATA IN THE RANGE OF EXTREME DEVIATIONS

M. V. Savenets

Ukrainian Hydrometeorological Institute, 37, Nauky Pr., 03028 Kyiv, Ukraine,
savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

The paper presents a new method of critical control of atmospheric radiosounding data in the range of extreme deviations of air temperature, isobaric level elevation, relative humidity and wind components. The method was developed based on atmospheric radiosounding data taken from 9 Ukrainian aerological stations over the period of 1973–2018. “Buoyant” threshold values form the basis of the developed method. These values correspond to the deviation threshold for each of aerological characteristics where statistical distribution of such characteristics reaches a zero value for the first time. Departure from constant threshold values in favor of “buoyant” values allowed for consideration of the main features of aerological characteristics dispersion, dependence from altitude and difference of distribution parameters observed during daylight and at night time. Potential errors in the range of extreme deviations may be identified when the values go beyond the thresholds of “the distribution body”. The total percentage of such overrange amounts to 0.2% in the middle and upper troposphere, 0.3–1.8% in the lower troposphere, and up to 2% in the stratosphere. At the second stage of the developed method potential errors are checked using partial vertical, partial horizontal and temporal control techniques. The second stage of control is implemented for the levels where time series reach at least 3700 values. It allows for accurate calculation of average multi-year values required for performing the horizontal control. Potential errors are considered as real ones if there is a confirmation of existence of three extreme deviations taken from the “neighbor stations – neighbor observation periods – neighbor isobaric levels” set. It means that a potential error should be confirmed with at least two different types of critical control. At high altitudes two confirmations are enough provided a conclusion is made following the results of different types of control. The developed critical control method allowed rejection of the claim about incorrectness of 568 values with their maximum deviations reaching 6.2 and -6.4 σ for the total period of observation. The critical control of extreme deviations and the physical permissible limits control form necessary components of the complex critical control of

atmospheric radiosounding data. They provide input information used for horizontal, vertical and hydrostatic control techniques.

Keywords: critical control, atmospheric radiosounding, extreme deviation, aerological characteristics

МЕТОД КРИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

М. В. Савенець

Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС
Украины и НАН Украины, пр. Науки, 37, 03028, Киев, Украина,
savenetsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

В статье представлен новый метод критического контроля данных радиозондирования атмосферы в области экстремальных отклонений для температуры воздуха, высоты изобарического уровня, относительной влажности и составляющих ветра. Метод разработан на основе данных радиозондирования атмосферы 9 аэрологических станций Украины за период 1973–2018 гг. В основе разработанного метода лежит использование «плавающих» граничных показателей, которые определяются как границы отклонений, где статистическое распределение аэрологической характеристики впервые переходит в ноль. Отказ от постоянных граничных показателей в пользу «плавающих» позволило учесть особенности разброса значений аэрологических характеристик, зависимость от высоты и отличия параметров распределения для различных сроков наблюдений. Определение потенциально ошибочных значений в области экстремальных отклонений происходит при условии выхода значений за пределы «тела» распределения. Общее количество таких выходов достигает 0.2% в средней и верхней тропосфере, 0.3–1.8% в нижней тропосфере и до 2% в стратосфере. На втором этапе разработанного метода потенциально ошибочные значения проверяются с применением частичного вертикального, частичного горизонтального и временного контроля. Второй этап контроля реализуется для уровней, где ряды наблюдений достигают не менее 3700 значений, что обеспечивает точное определение средних многолетних значений, необходимых для реализации горизонтального контроля. Потенциально ошибочные значения считаются реальными при наличии трех подтверждений экстремальных отклонений из набора «соседние станции – соседние сроки – соседние изобарические уровни», то есть не менее, чем двумя различными видами контроля. На значительных высотах достаточным является два подтверждения при условии, что вывод сделан за результатами двух различных видов контроля. Разработанный метод критического контроля позволил за общий период наблюдений отбросить утверждение об ошибочности 568 значений, максимальные отклонения которых достигали 6.2 и -6.4σ. Вместе с контролем на физически допустимые пределы, контроль экстремальных отклонений является составной частью комплексного контроля данных радиозондирования атмосферы и формирует входящую информацию для проведения горизонтального, вертикального и гидростатического контроля.

Ключевые слова: критический контроль; радиозондирование атмосферы; экстремальное отклонение; аэрологические характеристики

Подання до редакції : 07. 05. 2019
Надходження остаточної версії : 21. 10. 2019
Публікація статті : 28. 11. 2019