

УДК 504.35;551.515.3

<https://doi.org/10.31713/vt420254>

Клименко М. О. [1; ORCID ID: 0000-0003-0892-0648],

д.с.-г.н., професор,

Кухнюк О. М. [1; ORCID ID: 0000-0002-4632-9771],

к.т.н., доцент

¹Національний університет водного господарства та природокористування, Україна

СМЕРЧІ: НОВА КЛІМАТОЛОГІЯ СМЕРЧІВ: ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ДИНАМІКА УТВОРЕННЯ ТА ПРОБЛЕМИ В ХХІ СТОЛІТТІ

Кліматологія смерчів у ХХІ столітті переживає критичну трансформацію, яка розбиває застарілі географічні кордони та кидає фундаментальний виклик системам цивільного захисту. Традиційна парадигма «Алеї Торнадо» у Великих Рівнинах США більше не відповідає емпіричній реальності. На основі аналізу даних NOAA та SPC [5], дослідження підтверджує не просто зміну, а просторово-часову реконцентрацію ризику (Н2 – *зміщення активності на схід та її кластеризація*). Загроза зміщується зі спокійних аграрних регіонів на схід – до густонаселеної та більш вразливої «Алеї Діксі», концентруючись у все частіших «мега-спалахах».

Ключові слова: Смерч; Торнадогенез; Алея Торнадо; Кліматологія; Реконцентрація Ризику; Причинно-наслідковий зв'язок; CAPE; (Shear).

Встановлення прямого причинно-наслідкового зв'язку цих змін до глобального потепління (Н1 – *вплив клімату ускладнений некліматичними факторами*) ускладнене парадоксальною динамікою ключових атмосферних інгредієнтів: потепління посилює «паливо» (CAPE ↑), але може послаблювати «двигун обертання» (Shear ↓) [6]. Це свідчить про те, що зміна клімату діє як **модулятор**, перерозподіляючи ризик, а не лінійно збільшуючи його загальну кількість.

Водночас, в Європі, яка донедавна жила в ілюзії безпеки, прогностичні моделі EURO-CORDEX б'ють на сполох: зростання CAPE при відсутності значного зменшення (Shear) може **подвоїти** частоту умов, сприятливих для торнадогенезу, до кінця століття. Це підтверджує Н3 – *суттєве зростання потенціалу торнадогенезу в Центральній та Східній Європі* – та перетворює регіон на нову зону критичного ризику. Результати формулюють концепцію динамічної кліматології смерчів, що є основою для негайного перегляду будівельних норм та стратегій моніторингу.



1. Вступ

Кліматологія смерчів (торнадо) увійшла у фазу глибокої та непередбачуваної трансформації. Традиційна кліматологія смерчів (торнадо), парадигма якої була сформована в середині ХХ століття, історично закріпила фокус на чітко визначеному географічному регіоні – так званій «Алеї Торнадо» (*Tornado Alley*) у Великих Рівнинах США. Ця модель, що описує максимум активності у весняні місяці, десятиліттями слугувала глобальним еталоном для оцінки ризиків [4]. Однак дані, накопичені в перші десятиліття ХХІ століття, демонструють дедалі більшу **невідповідність** цій статичній картині, фіксуючи значні просторово-часові збурення у стабільних патернах торнадогенезу [5].

Актуальність цього питання визначена критичними соціально-економічними та науково-методологічними факторами. Сильні конвективні шторми (***Severe Convective Storms, SCS***), до яких належать смерчі, руйнівний град та шквали, стали однією з найдорожчих категорій природних катастроф у світі. Згідно з останніми світовими звітами, збитки від SCS лише застрахованим активам у Європі є значно вищими, ніж в інших регіонах світу [2]. Хоча загальна кількість подій тут історично нижча, кожен випадок сильного смерчу завдає непропорційно великої шкоди через вищу щільність населення та інфраструктури, яка не була розрахована на подібні навантаження [1; 2]. Це підкреслює, що ризик торнадо вийшов за межі класичних географічних кордонів і вимагає глибокого аналізу динаміки небезпеки в контексті **зміни клімату**.

З науково-методологічної точки зору, спостережувані зміни вимагають негайної ревізії методології досліджень. Необхідно відокремити реальні кліматичні сигнали від артефактів звітності (***Reporting Bias***) та переосмислити сам термін «стабільна кліматологія» торнадо, оскільки історичні середні показники більше не є надійною основою для прогнозування.

Постановка проблеми та наукові гіпотези. Ключова проблема полягає у верифікації та концептуалізації спостережуваних збурень у кліматології смерчів. Дослідження сфокусоване на перевірці наступних наукових гіпотез:

- **Гіпотеза Н1 (Складність встановлення кліматичних причин – Атрибуція):** Динаміка змін є результатом не лише кліматичних процесів, а й значною мірою залежить від методологічних артефактів (покращення моніторингу, зростання населення), що ускладнює пряму прив'язку до глобального потепління.

- **Гіпотеза Н2 (Реконцентрація ризику):** У XXI столітті спостерігається просторово-часова реконцентрація ризику торнадо, що виражається у зміщенні активності до раніше менш уражених регіонів та скупченні подій в екстремальних спалахах (кластеризація).
- **Гіпотеза Н3 (Європейський виклик):** Прогностичні моделі вказують на суттєве зростання частоти умов, сприятливих для торнадогенезу, у Центральній та Східній Європі, що перетворює цей регіон на нову зону пріоритетної уваги в контексті глобального ризику.

2. Методологія

Для забезпечення наукової достовірності аналізу динаміки смерчів та відокремлення реального кліматичного сигналу від методологічних артефактів, було застосовано комплексний підхід, що поєднує емпіричний аналіз найбільш надійних баз даних та проксі-аналіз кліматичних індикаторів.

2.1. Джерела даних та обмеження

Використано три основні масиви даних:

1. База даних NOAA Storm Prediction Center (SPC): «Золотий стандарт» для аналізу торнадо у США (з 1950 року).
2. Європейська База Даних Небезпечних Погодних Явищ (ESWD): Основний ресурс для верифікації подій у Європі [1].
3. Прогностичні Моделі (EURO-CORDEX): Ансамбль регіональних кліматичних моделей (RCM) для оцінки майбутніх тенденцій [6].

2.2. Проксі-аналіз кліматичних індикаторів

На сьогодні ми не можемо «зловити» кожен окремий смерч за допомогою найсучасніших кліматичних моделей (RCM). Оскільки торнадо – це явище, розміри якого вимірюються сотнями метрів, тоді як сучасні моделі працюють із «сіткою» (роздільною здатністю) у кілька кілометрів [5; 6]. Тому замість того, щоб моделювати сам смерч, ми пропонуємо метод проксі-аналізу. Наш метод полягає у пошуку не фінального руйнівного явища, а ключових атмосферних умов, які його створюють. Моделі концентруються на двох ключових атмосферних умовах, які повинні «зійтися», щоб створити потужний шторм:

Основними проксі-індикаторами є:

- **Конвективна доступна потенційна енергія (CAPE):** Міра атмосферної нестабільності («паливо» для шторму).



- **Вертикальний зсув вітру ((Shear)):** Зміна швидкості та/або напрямку вітру з висотою («двигун обертання») [5].

2.3. Мінімізація Reporting Bias

Ключовий виклик (H1) – **Reporting Bias** (артефакт звітності). Зростання загальної кількості торнадо значною мірою є артефактом, спричиненим покращенням моніторингу. Для виділення чистого кліматичного сигналу аналіз довгострокових трендів був сфокусований виключно на смерчах середньої та високої інтенсивності **F/EF1+**. Сильніші смерчі майже завжди залишають очевидний слід руйнувань, що робить цей часовий ряд надійнішим для аналізу реальних кліматичних трендів [5].

3. Результати та динаміка ризику

3.1. Просторово-Часова реконцентрація ризику (США)

Аналіз довгострокових рядів спостережень NOAA SPC для США, очищених від методологічних артефактів, надає вагомі емпіричні докази, що ризик якісно змінює свою природу, підтверджуючи H2.

- **Географічне Зміщення (*Eastward Shift*):** Спостерігається поступове, але стабільне зміщення географічного максимуму активності торнадо [5]. Традиційна «Алея Торнадо» (Оклахома, Канзас) демонструє помітне зниження кількості сильних смерчів (EF1+). Натомість, максимум активності зміщується на схід до регіону, який називають «Алея Діксі» (Міссісіпі, Алабама, Теннессі) [5]. Це переносить небезпеку у більш вразливі регіони з вищою щільністю населення та вищою частотою нічних смерчів.
- **Часова Кластеризація:** Емпіричні дані свідчать про якісну зміну у часовому розподілі небезпеки:
 - Загальна кількість днів у році, коли фіксується хоча б один смерч (F/EF1+), скорочується.
 - Водночас, дні, коли виникають великі спалахи (з 10, 20 або 30 і більше торнадо) стають більш частими та інтенсивними [5].
Ця особливість кластеризації означає, що ризик стає більш «вибуховим», концентруючи катастрофічний потенціал у короткі «мега-спалахи».

3.2. Прогностичні трендів у Європі (Верифікація гіпотези H3)

На відміну від США, європейська кліматологія смерчів довгий час жила під тягарем ілюзії безпеки. Наші історичні дані катастрофічно недостовірні через проблему Reporting Bias (прогалин у звітності). Залежність від добровільного збору інформації створює небезпечну картину нібито низького ризику [1]. Саме тому для оцінки реальної, прихованої загрози ми змушені прогностичних

кліматичних моделей EURO-CORDEX [6], що повністю підтверджують Гіпотезу Н3.

- **Надійне Зростання CAPE:** Як і за океаном, моделі прогнозують надійне, значне зростання атмосферного «палива» (CAPE) по всій Центральній та Східній Європі до кінця століття. Це прямий і неминучий наслідок того, що наша атмосфера стає теплішою та вологішою.
- **Сприятливий сценарій:** Якщо в Америці клімат може гальмувати «двигун обертання» (впевнене зменшення вертикального зсуву вітру (Shear)), то для Європи моделі не фіксують такої ж сприятливої тенденції. Це означає, що сприятливий (Shear) частіше накладатиметься на атмосферу з екстремально високим CAPE [6].
- **Подвоєння частоти:** Результатом цієї небезпечної комбінації є наступний прогноз: кількість днів із критично високими умовами, сприятливими для суперкомірок (а отже, і для сильних торнадо), може зрости до 100% у деяких східноєвропейських регіонах до кінця століття. Це не просто зростання ризику – це подвоєння потенціалу катастрофи.

Практичним підтвердженням реалізації цього потенціалу є торнадо класу **EF3** (за деякими оцінками, межував з EF4) у Південній Моравії (Чехія) у червні 2021 року [1], а отже – смерчі такої потужності більше не є прерогативою винятково американського континенту.

4. Обговорення: Кліматичний модулятор та нова ера вразливості

Результати, отримані шляхом емпіричного та прогностичного аналізу, виводять кліматологію смерчів зі стану статичної впевненості у фазу **динамічної та непередбачуваної загрози**. Наукова новизна полягає у відмові від пошуку лінійного зростання кількості торнадо на користь концепції **просторово-часової реконцентрації ризику** [5].

Це означає, що загроза не зникла; вона стала «хитрішою» і більш смертоносною: ризик покидає знайомі аграрні ландшафти і вривається у густонаселені регіони «Алеї Діксі», концентруючись у «мега-спалахах» [5].

4.1. Парадокс встановлення причин: зміна клімату як модулятор

Встановлення прямого причинно-наслідкового зв'язку між глобальним потеплінням та динамікою смерчів залишається



складним науковим завданням, що підтверджує Гіпотезу Н1. Складність зумовлена різноспрямованою динамікою ключових проксі-індикаторів: (CAPE↑) – зростання «палива» та (Shear↓) – послаблення «двигуна обертання») [6].

Висновок (концепція «Кліматичного модулятора»): Зміна клімату діє як «просторовий модулятор». Вона не обов'язково збільшує загальну кількість смерчів, але вона змінює їхнє географічне та часове розташування, модулюючи те, *де і коли* два необхідні інгредієнти накладаються один на одного. Це пояснює феномен екстремальної кластеризації.

4.2. Європа: Зона критичної трансформації ризику

Виявлений Панантлантичний зв'язок у динаміці ризику SCS вимагає від Європи негайно відкинути ілюзію безпеки. Прогностичні моделі EURO-CORDEX є тривожним попередженням [6]. Зростання CAPE при відсутності впевненого зменшення (Shear) призводить до прогнозованого подвоєння кліматичної сприятливості для сильних смерчів у Центральній та Східній Європі [6]. Катастрофа в Чехії (2021) є доказом того, що цей кліматичний потенціал вже реалізується. **Для України** та сусідніх країн це означає: **ми вступаємо в нову зону критичного ризику** (Н3) [3].

5. Висновки та Нагальні Заходи

Кліматологія смерчів перетворилася зі статичної на **динамічну, мінливу та більш небезпечну**. Ігнорування цієї просторово-часової реконцентрації є прямою загрозою національній та регіональній безпеці.

5.1. Підтвердження Гіпотез

- **Гіпотеза Н2 (Реконцентрація ризику)** – Підтверджено. Ризик концентрується географічно (зсув на схід) та часово (кластеризація).
- **Гіпотеза Н3 (Європейський виклик)** – Підтверджено. Прогнозується надійне зростання кліматичної сприятливості (подвоєння частоти умов) у Центральній та Східній Європі.
- **Гіпотеза Н1 (Встановлення причин)** – Підтверджено (частково). Прямий причинно-наслідковий зв'язок ускладнений через різноспрямований вплив на CAPE та (Shear) та вплив артефактів звітності.

5.2. Рекомендації: Перехід до активної адаптації

1. **Заповнення «Прогалин у Звітності»:** Необхідно терміново посилити моніторинг у Східній Європі, співпрацюючи з **ESWD** та максимально використовуючи сучасні методи

- дистанційного зондування Землі (супутникові дані) для фіксації всіх подій [3].
2. **Перегляд інженерних стандартів:** Результати, що підтверджують зростання ризику, мають бути **інтегровані** у сферу інженерної стійкості. Україні та Європі необхідно використати досвід США (NIST) для перегляду будівельних норм та страхової політики [4], враховуючи, що потенціал EF3+ вже реалізований.
 3. **Зміна Фокусу Прогнозування:** Кліматичні моделі мають бути калібровані для регіональних особливостей (Shear). Системи попередження повинні перейти до **цілорічного моніторингу**, відмовляючись від застарілих сезонних рамок готовності.

1. Groenemeijer P., Kühne T. A climatology of tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*. 2014. Vol. 142, Iss. 12. P. 4775–4790. 2. Moody's. Europe severe convective storms: Unpick the complexity with the latest risk models. *Moody's Insurance Solutions*. 2024. URL: <https://www.moody's.com> (дата звернення: 14.11.2025). 3. Kryvobok O., Prokhorenko V. On the use of satellite data in forecasting severe storms in Ukraine. *Proceedings of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*. Zagreb, Croatia, 2014. 4. Levitan M. L., Kuligowski E. D., et al. Tornado Hazard Maps for the United States for ASCE 7-22. *NIST Technical Note*. 2022. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2203>. 5. NOAA. Tornadoes and Climate. *National Oceanic and Atmospheric Administration*. 2023. URL: https://www.noaa.gov/sites/default/files/2023-10/Tornadoes_Climate_OnePager_July2023.pdf. (дата звернення: 14.11.2025). 6. Rädler A. T. et al. Projected changes in severe convective storms in Europe and the United States. *Climatic Change*. 2018. Vol. 151. P. 131–143.

REFERENCES:

1. Groenemeijer P., Kühne T. A climatology of tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*. 2014. Vol. 142, Iss. 12. P. 4775–4790. 2. Moody's. Europe severe convective storms: Unpick the complexity with the latest risk models. *Moody's Insurance Solutions*. 2024. URL: <https://www.moody's.com> (data zvernennia: 14.11.2025). 3. Kryvobok O., Prokhorenko V. On the use of satellite data in forecasting severe storms in Ukraine. *Proceedings of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*. Zagreb, Croatia, 2014. 4. Levitan M. L., Kuligowski E. D., et al. Tornado Hazard Maps for the United States for ASCE 7-22. *NIST Technical Note*. 2022. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2203>. 5. NOAA. Tornadoes and Climate. *National Oceanic and Atmospheric Administration*. 2023. URL: https://www.noaa.gov/sites/default/files/2023-10/Tornadoes_Climate_OnePager_July2023.pdf. (data zvernennia: 14.11.2025). 6. Rädler A. T. et al. Projected changes in severe convective storms in Europe and the United States. *Climatic Change*. 2018. Vol. 151. P. 131–143.



Klymenko M. O. [1; ORCID ID: 0000-0003-0892-0648],

Doctor of Agricultural Sciences, Professor,

Kukhniuk O. M. [1; ORCID ID: 0000-0002-4632-9771],

Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

TORNADOES: A NEW CLIMATOLOGY OF TORNADOES: SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF FORMATION AND CHALLENGES IN THE 21ST CENTURY

The climatology of tornadoes is undergoing a critical, unpredictable transformation in the 21st century, challenging outdated geographic boundaries and civil defense systems. Traditional reliance on the static «Tornado Alley» paradigm in the US Great Plains is increasingly inconsistent with empirical reality. Severe Convective Storms (SCS), including tornadoes, represent one of the costliest categories of natural disasters globally; in Europe, insured losses from SCS are disproportionately high due to dense populations and infrastructure unsuited for such loads.

This study verifies and conceptualizes observed disturbances using a comprehensive approach, combining empirical analysis of reliable databases (NOAA SPC, ESWD) with proxy climate indicators. Since modern climate models cannot resolve individual tornadoes, the methodology focuses on key atmospheric ingredients: Convective Available Potential Energy (CAPE), the storm's «fuel,» and Vertical Wind Shear ((Shear)), the «rotation engine». To isolate the true climatic signal, the long-term trend analysis focused exclusively on medium and high-intensity tornadoes (F/EF1+), thereby minimizing the Reporting Bias artifact (H1).

The findings strongly confirm Hypothesis H2 (Risk Reconcentration). In the US, risk is shifting both geographically and temporally. The traditional maximum of strong tornado activity (EF1+) is moving eastward from the Great Plains to the more vulnerable, densely populated «Dixie Alley» (Mississippi, Alabama, Tennessee). Temporally, risk is becoming «more explosive». The total number of days with tornado activity is decreasing, but days featuring intense «mega-outbreaks» (10, 20, or 30+ tornadoes) are becoming more frequent and severe, concentrating catastrophic potential into shorter periods.

Regarding Hypothesis H1 (Attribution), establishing a direct causal link between global warming and this dynamic remains complex. Climate change acts as a «spatial modulator,» altering when and where the necessary ingredients (CAPE and Shear) converge, rather than linearly increasing the overall tornado count. This complexity stems from the paradoxical dynamic: warming reliably increases CAPE (↑), but may simultaneously weaken the rotational component (Shear ↓).

Crucially, the study confirms Hypothesis H3 (The European Challenge). Utilizing prognostic EURO-CORDEX models, researchers found that Central and Eastern Europe face a substantial and reliable increase in atmospheric «fuel» (CAPE). Unlike potential moderating factors observed in the US, European models do not project a significant decrease in favorable Shear conditions. This hazardous combination suggests the frequency of critically favorable conditions for supercells could double (up to 100% increase) in parts of Eastern Europe by the end of the century. The destructive EF3 (potentially EF4) tornado in South Moravia, Czechia (2021), serves as practical evidence that this critical potential is already materializing, signaling that such powerful events are no longer exclusive to the American continent.

The results demand an immediate shift from static certainty to a concept of dynamic climatology. Recommendations include urgently addressing data gaps in Eastern Europe by enhancing monitoring (ESWD, remote sensing), revising engineering standards and building codes to integrate the new risk potential (EF3+), and shifting forecasting systems to year-round, non-seasonal vigilance. Central and Eastern Europe are entering a new zone of critical risk.

Keywords: Tornado; Tornadogenesis; Tornado Alley; Climatology; Risk Reconcentration; Causal Link; CAPE; (Shear).

Отримано: 08 жовтня 2025 року
Прорецензовано: 10 жовтня 2025 року
Прийнято до друку: 18 грудня 2025 року