

observed in September and October, with statistically significant changes in Uzhhorod, Beregovo, Dolyna (September) and Yaremche (October).

Conducting polynomial approximation of time series of precipitation amounts made it possible to identify a conditionally periodic (cyclic) change in the amount of precipitation. The assessment showed a relatively pronounced periodicity in changes in annual and monthly precipitation amounts, which is 40-46 years for both the annual and monthly precipitation time series.

**Key words:** ClimUAm database; homogenization; climatic homogeneity of series; linear approximation; polynomial approximation; Fisher's criterion; basic circulation processes; statistically significant temporal changes in precipitation.

**Надійшла до редколегії 24.09.2025**

**DOI:** <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2025.4.6>

УДК 551.58(551.576):[551.502.21+551.501.86+551.508.85+551.509.313]

**Ціла А.Ю., Шпиг В.М.**

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ХМАРНОГО ПОКРИВУ В УКРАЇНІ ТА ЗА КОРДОНОМ**

Хмарність є однією з ключових складових кліматичної системи та значною мірою впливає на радіаційний баланс Землі, циркуляцію атмосфери та опадоутворення, що робить її одним із основних кліматичних показників. Дана стаття присвячена аналізу українських та іноземних досліджень хмарного покриття у контексті кліматології, основних напрямів та джерел даних, які використовувалися при їх проведенні.

В Україні дослідження, які присвячені аналізу кількісних та якісних змін хмарного покриття у ХХ та ХХІ століттях, є нечисленними. Найбільш широко та змістовно висвітлені питання щодо ступеня покриття небосхилу хмарами, річного ходу загальної та нижньої хмарності, вкладу нижньої хмарності у загальну, повторюваності та річного ходу похмурого неба, добового ходу загальної хмарності, стійкості ясної та похмурої погоди, режиму хмарності за формою і висотою, просторової структури хмар. Також є дослідження, які у контексті змін клімату розкривають питання щодо зміни повторюваності хмар основних родів і взаємозв'язку хмарного покриття із атмосферною циркуляцією (шляхом аналізу баричного поля та індексів циркуляції атмосфери). Всі вони ґрунтуються на основі даних наземних спостережень, при цьому часто кількість метеорологічних станцій та довжина рядів (періоди дослідження), які використовувалися, є різними. Також варто відзначити наявність невеликої кількості досліджень, які були присвячені температурному режиму у хмарах і навколохмарному просторі, фазовому стану та водності хмар над Україною. Ці дослідження були проведені на основі архіву даних літакових зондувань, які були проведені упродовж другої половини ХХ століття.

Іноземні дослідження хмарності також часто ґрунтуються на даних наземних спостережень, проте варто відзначити декілька очевидних тенденцій. Поява дистанційних засобів визначення фізичних та геометричних характеристик хмар дала можливість вивчати кліматологію хмарності. Спочатку це були дослідження, в основу яких були покладені дані метеорологічних радіолокаторів. Пізніше широкого використання набуло залучення даних метеорологічних супутників. Бурхливий розвиток електронно-обчислювальної техніки став одним із факторів значного прогресу числового атмосферного моделювання. Починаючи з кінця ХХ – початку ХХІ століть і до сьогодні, триває процес широкого залучення атмосферних моделей для моделювання клімату минулого та майбутнього. Збільшується їх просторова роздільна здатність: відбувається поділ на глобальні та регіональні моделі. Відносно нещодавно виникає окремий клас таких моделей, які отримали назву «реаналіз». Найбільш відомими на даний момент у світі є реаналізи, які були створені в Європейському центрі середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), Національному центрі передбачення стану навколишнього середовища (NCEP, США) та Японською метеорологічною агенцією (JMA). Упродовж останніх двох десятиліть саме використання реаналізу у поєднанні із іншими джерелами даних набуло найбільшого поширення у світі.

**Ключові слова:** хмарність; метеорологічний супутник; метеорологічний радіолокатор; числова модель атмосфери; реаналіз; кліматологія.

**Вступ.** Хмарність – фундаментальна складова атмосферної системи та один з найбільш комплексних чинників формування погоди і клімату. Вона є результатом взаємодії динамічних і радіаційних процесів та має суттєвий вплив на формування енергетичного балансу. Відбивання або ж поглинання потоків радіації створює зворотні негативні кліматичні зв'язки, зумовлюючи формування температурного режиму тропосфери.

Важливість хмарності також пов'язана з процесами конденсації водяної пари, формуванням опадів і фазовими переходами вологи в атмосфері. Форма, висота і тривалість існування хмари впливають на кількість і просторово-часовий розподіл атмосферних опадів.

У практичній площині характеристики хмарності мають значення в багатьох галузях діяльності, таких як прогнозування погоди, визначення екстремальних погодних явищ, авіація, сонячна енергетика. Мінливість та тенденції щодо змін хмарності та її властивостей впливають не лише на глобальний радіаційний бюджет, але й на глобальний гідрологічний цикл (за рахунок опадів). Не менш важливим є її врахування у процесі досліджень зміни клімату у майбутньому, адаптації до зміни клімату та негативних проявів, які з нею пов'язані. Саме хмарність, напевно, є найбільшим джерелом невизначеності в кліматичній системі, і є вагомими причинами, чому наші знання про хмари та пов'язані з ними процеси дуже обмежені.

*Мета статті* проаналізувати вітчизняні та іноземні ретроспективні дослідження хмарного покриву у контексті кліматології, виокремити основні напрями та джерела даних, які використовувалися при їх проведенні.

#### **Виклад основного матеріалу.**

**Стан досліджень хмарного покриву та його змін над територією України.** В Україні проведено велику кількість досліджень, пов'язаних із хмарністю. В них виконано аналіз кількісних та якісних змін хмарного покриву у XX та XXI століттях, особливостей умов хмароутворення, їх залежність від різних атмосферних процесів та обернених зв'язків (вплив хмарності на атмосферні процеси), описано мікрофізичні характеристики хмар, розроблено моделі фронтальної хмарності тощо.

Більш детально зупинимося на дослідженнях кліматологічного спрямування. У плані кліматографічного опису на даний момент для території України найбільш широко та змістовно дані щодо ступеня покриття небосхилу хмарами, річного ходу загальної та нижньої хмарності, вкладу нижньої хмарності у загальну, повторюваності та річного ходу похмурого неба, добового ходу загальної хмарності, стійкості ясної та похмурої погоди, режиму хмарності за формою і висотою, просторової структури хмар викладено у [12]. Інформація, яка викладена у цій фундаментальній праці, носить статичний характер, тобто мова йде про багаторічні середні характеристики, їх повторюваність та розподіл по території і в часі. У той же час поза увагою залишилося багато аспектів, пов'язаних із змінами у полі хмарності та її мікрофізикою. Спробуємо розкрити їх нижче.

Спочатку розглянемо низку робіт, в яких наводяться дані щодо зміни основних показників хмарності (загальна та нижня хмарність, повторюваність ясної, напів'ясної та похмурої погоди, частоти появи основних форм / родів хмар). Так, в [7] було досліджено зв'язок змін хмарності з кліматичними змінами. Для цього використовувалися дані спостережень за загальною та нижньою хмарністю, повторюваністю ясною та похмурого стану неба та основних форм хмар на 34 метеостанціях України. Дані охоплювали період 1961-2010 рр. В [7] показано, що основні зміни хмарного покриву відбувались у період з 1971 по 1990 роки, що зумовлювалося пануванням антициклонального поля. У 1961-1970 і 1990-2010 рр. зміни були незначними.

Динамку змін хмарного покриву та чинники, що її зумовлюють, досліджено у [1]. Було проаналізовано дані спостережень за атмосферним тиском та хмарністю на 26 метеостанціях за 1961-2008 рр. та виведено середні десятирічні значення та їх тридцятирічні ковзні. Отримані у [1] результати свідчать про зменшення кількості хмар у досліджуваній період, при чому зміни нижньої хмарності переважають над змінами загальної. Окремо відмічається зростання хмарності протягом 1971-1980 рр. і, відповідно, зменшення кількості ясних днів. У подальших періодах відбувається зворотній процес. У кінці досліджуваного періоду зміни були незначними. Зміни показників хмарного покриву узгоджуються зі змінами атмосферного тиску, що зумовлено змінами регіональних та глобальних циркуляційних процесів [1].

Кліматичні зміни показників хмарного покриву за даними спостережень на 29 метеостанціях досліджено у [5]. Для цього було використано дані щодо атмосферного тиску, загальної та нижньої хмарності, кількості ясних та похмурих днів у період з 1961 по 2008 роки. Показано, що для західних областей України характерним було зростання загальної хмарності, а на сході відмічалось зменшення, зміни на всій території були незначними. Більш вагомим було зменшення нижньої хмарності по всій території [5].

Зміну кількості хмар за даними за два окремих тридцятирічних періоди (1936-1965 рр. та 1961-1990 рр.) проаналізовано у [6]. У цій роботі показано, що у другому періоді в західних областях спостерігаються незначні зміни повторюваності ясних та похмурих днів, а також істотне зменшення нижньої хмарності. У центральних та східних областях переважає зменшення загальної та нижньої хмарності, проте інтенсивність його менша. У цих районах частіше спостерігається напів'ясний стан неба. На півдні відзначається значне зменшення повторюваності ясних днів, у той час як кількість похмурих днів майже не зменшується. Хмарність збільшується найбільше у теплий період року.

Зміни повторюваності основних форм хмар у період з 1961 по 2009 рр. за даними наземних спостережень описані у [9]. За вищевказаний період у верхньому ярусі фіксувалося переважно зменшення повторюваності перистих та перисто-шаруватих хмар, а також зростання повторюваності перисто-купчастих. У середньому ярусі по всій території відбувалося зростання високо-купчастих та зменшення високо-шаруватих хмар. У нижньому ярусі – зменшення шаруватих (окрім півночі), шарувато-дощових та розірвано-дощових (окрім сходу), а також зростання купчасто-шаруватих (окрім південного заходу та північного сходу). Серед конвективних хмар відмічається зменшення повторюваності купчастих та збільшення повторюваності купчасто-дощових.

Зміни повторюваності ясного та похмурого стану неба за загальною та нижньою хмарністю за даними спостережень, які проводилися на 29 метеостанціях у період з 1961 по 2010 років, описано у [10]. Відповідно до результатів, отриманих у цьому дослідженні, повторюваність ясного стану неба за загальною хмарністю зменшилася на 2-3 % (найбільше в центрі), а похмурого – на 2-4% (найбільше на сході). За нижньою хмарністю на півночі, сході та півдні фіксувалося збільшення ясного стану неба на 1 %, а на заході – зменшення на 1 %, у центрі ж змін не зафіксовано. Повторюваність похмурого неба за нижньою хмарністю зменшувалась на всій досліджуваній території на 3-6 % (найбільше на півночі, півдні та у центральних регіонах України).

До іншої групи досліджень хмарного покриву над територією України належать роботи, в яких описано особливості мікрофізичних (та інших) параметрів хмар та їх відмінності залежно від виду хмари на основі даних багатолітніх аерологічних та літакових зондувань.

Так, у [3] на основі даних, отриманих за п'ятнадцятирічний період, для шаруватоподібних (St, Ns, Ns – As, As) та шарувато-купчастих та висококупчастих хмар (Sc, Ac) описано статистичні характеристики (середні значення та середньоквадратичні відхилення) таких параметрів, як висота верхньої та нижньої меж, товщина, температура на нижній та верхній межах. Відмічається, що річний хід досліджуваних форм хмар неоднорідний. Більшість хмар частіше зустрічаються в холодний період і тільки високо-купчасті мають майже однакову повторюваність у всі сезони. Висота нижньої та верхньої межі хмар зростає при переході від холодного до теплого сезону, також у теплий період ця характеристика менш мінлива. Максимальна товщина спостерігається влітку у шарувато-купчастих та високо-шаруватих, а навесні у шаруватих, шарувато-дощових та високо-шаруватих. Найвищі температури на нижній та верхній межах хмар відмічаються у липні-серпні, найнижчі у січні-лютому.

Хід температури з висотою у хмарах та навколохмарному просторі досліджено у [2]. Для цього використано дані зондування атмосфери за 1950-1964 рр. Дослідження проводилися для шаруватоподібних, шарувато-купчастих та висококупчастих хмар, а також для навколишнього середовища на 500 метрів вище і нижче хмари. Виділяється п'ять основних станів атмосфери при наявності хмари, які впливають на хід температури: 1) характеризується наявністю блокуючого шару над верхньою межею або поряд, 2) блокуючий шар розташований під хмарою, 3) блокуючий шар знаходиться у хмарі або її частині, 4) блокуючий шар відсутній, 5) наявність двох блокуючих шарів у хмарі або поблизу неї. Відмічається, що при будь-якому стані атмосфери коливання вертикального градієнта температури незначні, але твердження актуальне, якщо розглядається один і той же тип хмар. Для всіх станів характерне зменшення градієнта із висотою.

На основі багаторічних даних літакових зондувань у [11] побудовано вертикальні профілі водності для хмар різних форм (шаруваті, шарувато-купчасті, шарувато-дощові, системи шарувато-дощових та високошаруватих, високо-купчасті, високо-шаруваті). Для

дослідження використовувалися тільки результати повного зондування хмар із чіткою фіксацією їх меж. Відповідно до отриманих результатів, середня водність у межах 0,01-0,20 г/м<sup>3</sup> найчастіше (у 86 % випадків) фіксується у високо-купчастих хмарах, у високо-шаруватих – 83 %, у шарувато-купчастих – 71 %, у шарувато-дощових – 64 %, у шаруватих – 57 %.

Просторову неоднорідність розподілу водності у хмарах по горизонталі описано у [8]. Це дослідження виконано для шаруватих, шарувато-купчастих, шарувато-дощових, високо-шаруватих та високо-купчастих хмар. Для кожного виду хмар вказано їх межі, температура, товщина (потужність), рівні вимірів водності відносно нижньої межі та розраховані флуктуації водності у хмарах. У [8] показано, що у шаруватих та шарувато-купчастих хмарах флуктуації водності виражені менше, більш значущими вони є у шарувато-дощових, високо-шаруватих та високо-купчастих відповідно. Характер розподілу цих флуктуацій є біноміальним. З імовірністю 75 % флуктуації водності присутні в межах 0-0,08 г/м<sup>3</sup> у шаруватих, в межах 0-0,06 г/м<sup>3</sup> у шарувато-купчастих, в межах 0-0,13 г/м<sup>3</sup> у шарувато-дощових, в межах 0-0,15 г/м<sup>3</sup> у високо-шаруватих та високо-купчастих хмарах.

Розподіл фазового стану та його повторюваність у хмарах різних форм для території України досліджено у [4]. З цією метою було використано дані літакових зондувань атмосфери за період 1960-1990 рр. У кожній хмарі визначалися прошарки з різним фазовим станом, їхня товщина, температура, відносна вологість, форма та концентрація крапель і кристалів. Визначено горизонтальну протяжність ділянок із різним станом. Досліджувалися основні форми хмар (шаруваті, шарувато-купчасті, шарувато-дощові, системи шарувато-дощових та високошаруватих, високо-купчасті та високо-шаруваті). Виділено 16 типів вертикального розподілу фазового стану та визначено їх імовірність у кожній хмарі. Горизонтальний аналіз змін фазового стану на різних рівнях відносно нижньої межі шарувато-купчастих, високо-купчастих, шарувато-дощових та систем шарувато-дощових і високо-шаруватих хмар вказує на значну просторову мінливість як типу фазового стану, так і на концентрацію та розміри крапель та кристалів у кожній формі хмар, що свідчить про складний механізм хмароутворення [4].

Таким чином, кліматологічні дослідження хмарного покриву та його фактичних змін над територією України виконувалися виключно на основі даних наземних спостережень. Особливості просторового розподілу окремих характеристик було отримано із використанням багаторічних спостережень однакової довжини на всіх метеостанціях вітчизняної мережі. Мікро- та макрофізичні характеристики хмарності було отримано на основі даних літакових та аерологічних зондувань. Вітчизняні дослідження, які присвячені коливанням хмарності внаслідок змін клімату, ґрунтуються на даних наземних спостережень, причому у залежності від мети дослідження та часу його проведення, на рядах різної довжини.

**Зарубіжні дослідження хмарного покриву у регіональному та глобальному масштабах.** За кордоном хмарний покрив є об'єктом багатьох масштабних досліджень та проєктів, що охоплюють періоди починаючи з 19-го століття. Просторово-часові ряди, обрані характеристики та методи дослідження часто мають значні відмінності. Проте, на основі цих досліджень ми маємо чіткі тенденції змін хмарного покриву, які добре корелюють між собою, а також оцінку причин та наслідків цих змін. Нижче представлені приклади таких досліджень.

У дослідженнях для Європейського сектору розглянуто один із способів моделювання змін хмарного покриву у період глобального потепління [19, 27]. Аналіз проводився з обмеженими рядами метеорологічних спостережень. Досліджуються зміни хмарного покриву над територією західної Європи за висотою і формою хмар на прикладі порівнюваних періодів (1901-1920 та 1934-1953 рр.). За отриманими результатами, у другому (теплому) періоді, порівняно із першим (холодним), майже на всій досліджуваній території хмарність переважно зростає, і тільки у центральній її частині відбувається зменшення кількості хмар. У той же час, в аналізі змін хмарності за сезонами висувається гіпотеза, що зі збільшенням температури хмарність переважно має тенденцію до зменшення. В якості можливого пояснення зростання хмарності над більшістю досліджуваної території при умові зростання температури виступають циркуляційні процеси [13].

Продовженням вектору досліджень щодо зміни загальної хмарності у контексті зміни клімату стала робота [20], яка також ґрунтується на основі даних наземних спостережень, що охоплюють період з 1900 року до 1985 року. Аналіз проводився за даними 350 метеорологічних станцій, які розташовані на чотирьох континентах: Північна Америка, Європа, Азія (територія Індії) та Австралія. Було показано, що на 86% станцій мало місце збільшення загальної кількості хмар або фіксувалася відсутність змін. На всіх чотирьох континентах отримано факти збільшення загальної хмарності. У [20] зазначається, що тенденція до зростання була статистично значущою принаймні для двох регіонів: Північна Америка та Австралія.

Результати дослідження реакції хмарного покриву на зміни в атмосферній циркуляції (проведеного за допомогою програмного забезпечення COST 733, яке дозволяє оцінювати, порівнювати та класифікувати типові погодні умови на регіональному рівні) викладено у [32]. Було використано дані щодо хмарності за період з 1981 по 2014 рік над територією Європи. По всій досліджуваній території переважно відмічається зменшення загальної хмарності, у першу чергу над східною Європою. Це пов'язується із збільшенням розвитку циркуляційних процесів із центрами високого тиску у центрі та на півночі досліджуваної території. Також, відмічається незначне збільшення загальної хмарності над південно-західною Європою через послаблення впливу Азорського антициклону. Також автори [32] припускають, що у майбутньому циркуляційні процеси переміщуватимуться із заходу на північ, зменшуючи загальну хмарність, що формуватиме антициклональний тип погоди та впливатиме на кількість короткохвильової радіації.

Для території Іспанії проаналізовано довгострокову динаміку загальної хмарності з 1866 по 2010 рік із використанням даних наземних спостережень [31]. Ряди даних спочатку були відновлені із використанням спеціально запропонованого параметра хмарності, розрахованого за кількістю безхмарних та похмурих днів, потім вони були піддані гомогенізації. Від початку досліджуваного періоду до 1960-х років було виявлено стійку тенденцію до збільшення хмарності на більшості території країни. Надалі збільшилась кількість слабших або ж негативних трендів, що вказує на більш значні просторово-часові масштаби зменшення хмарності в другій половині ХХ-го століття та на початку ХХ-го. Усереднені значення загальної хмарності все ще мають додатну тенденцію до змін, що корелює із результатами дослідження [31].

Результати неперервних спостережень за хмарним покривом в період з 1792 по 1999 рік на метеостанції при кафедрі кліматології Ягеллонського університету у Кракові представлено у [15]. У даній роботі приведено інформацію щодо ступеня покриття неба хмарами та форм хмар, а також повного обсягу метаданих за весь період спостережень. У [30] стверджується, що часові зміни хмарності над Краковом є репрезентативними для всього регіону Центральної Європи. відповідно до аналізу метеорологічних рядів, у Кракові, як і в інших регіонах [26, 28], спостерігається зростання частоти виникнення Ci, Ac, Sc, Cu і Cb, та зменшення частоти виникнення Cc, Cs, Ns, St. Досліджено антропогенний вплив на формування хмарності шляхом аналізу змін хмарності у місті та поза ним. Збільшення конвективної хмарності відбувається за рахунок антропогенного тепла та конвекції. Також, зменшується кількість шаруватої хмарності через зменшення вмісту вологи у повітрі. Додатково акцентується увага на кліматичних умовах міста залежно від географічного розташування. У період з 1906 по 1960 рік тут відмічалася хмарність у середньому на 10 % більше, ніж в інших містах через розташування у передгірному районі.

У роботі [34] проаналізовано дані щодо змін глобальної загальної хмарності та різних форм хмар за 26-річний період з 1971 по 1996 рік. Для дослідження було обрано близько 5400 станцій. Відповідно до отриманих результатів, тенденції до зміни загальної хмарності над територією Євразії слабо виражені. Зміни хмарного покриву за формами неоднозначні та мають регіональний характер. Наприклад, відмічаються негативні тренди повторюваності перистих хмар, проте збільшується кількість хмар конвективного типу у нижньому та середньому ярусах. У цілому, мають місце значні регіональні зміни у повторюваності і суттєві зміни в осереднених глобальних показниках різних форм хмар. Ці зміни компенсують одна одну і призводять лише до незначної зміни тенденцій загальної хмарності.

У [16] було проаналізовано зміни хмарності у період з 1954 по 2008 рік та сформовано

карти розподілу загальної хмарності та основних форм хмар над океанами. Основний акцент робиться на змінах загальної хмарності у досліджуваний період. Відмічається, що над океанами у порівнянні з сушею кількість хмар переважає, особливо це стосується нижнього ярусу. У первинному масиві рядів даних спостерігаються десятирічні коливання ходу більшості форм хмар, проте після порівняння зі спостереженнями над островами ці коливання виявляються хибними. Для усунення похибки з часових рядів використовується фільтр Баттерворта (*англ. Butterworth filter*). У скоригованих рядах присутня кореляція хмарності з температурою поверхні океанів та нестійким станом тропосфери. Значна негативна кореляція спостерігається у шаруватій хмарності із температурою поверхні океанів, тоді як позитивна – між хмарами нижнього ярусу і нестійким станом тропосфери. Інші атмосферні величини (тиск, відносна вологість і ін.) теж корелюють з нижнім ярусом. Хмари верхнього ярусу також мають додатну кореляцію із температурою поверхні океанів, проте зв'язок виражений менше. Спостерігається як зростання, так і зменшення загальної хмарності (залежно від регіону).

Кліматологічні дослідження потребують довгих рядів даних, що обмежувало використання супутникової інформації для подібних цілей наприкінці 80-х – на початку 90-х років ХХ століття. Накопичення відповідних архівів дало змогу проводити дослідження за хмарним покривом на великій території (від окремо взятих країн до планетарного масштабу). Використання метеорологічних супутників дає можливість отримувати інформацію у важкодоступних і малонаселених регіонах Землі та над океанами, де мережа наземних спостережень має надзвичайно низьку щільність і забезпечується в основному за допомогою кораблів погоди, а також вирішити проблему нерівномірного розподілу кількості спостережень між Північною та Південною півкулями планети.

В якості прикладу подібного роду досліджень можна навести [22], де за даними спектрорадіометра середньої роздільної здатності (MODIS) вивчалися зміни в глобальному хмарному покриві за період 2003-2012 рр. Так статистичний аналіз, який було проведено у [22], показав, що у середньому в досліджуваний період глобальна хмарність зростала. Над суходолом, особливо Північною Америкою, Антарктидою та Європою, вона зазнала зменшення, тоді як над океанами, особливо Індійським та Тихим, збільшилася. Найбільш значне зростання спостерігалось над Південно-Східною Азією та Океанією, тоді як зменшення – над Антарктидою та Північною Америкою. Зазначається, що просторово-часові коливання хмарності можуть бути головною причиною зміни тенденції глобальної температури поверхні.

Аналіз даних, які охоплювали кілька десятиліть періоду, що характеризується швидким зростанням температури та змінами радіаційного бюджету Землі, показав, що він (радіаційний бюджет) впливає на формування хмар і також сильно залежить від їх існування [28].

Окрім метеорологічних супутників для дослідження фізичних характеристик та кліматичних показників хмарності використовуються й метеорологічні радіолокатори. В якості прикладу таких досліджень можна навести [14], де описано результати спостереження за хмарами, які проводилися за допомогою міліметрового радара із січня 1999 р. по грудень 2005 р. у південній частині Великих рівнин (США) та у тропічній західній частині Тихого океану. У даній роботі зазначається, що це не перше подібне дослідження, яке було проведене вченими США. Всі вони виконувалися у межах Програми вимірювання атмосферного випромінювання, яка фінансувалася Міністерством енергетики США і була покликана покращити розуміння хмарних процесів та їхній радіаційний вплив на кліматичну систему Землі, з метою подальшого їх уточнення у кліматичних моделях. Всі ці спостереження носили довгостроковий характер і проводилися за допомогою наземних пасивних та активних радарів. Безпосередньо у [14] було проаналізовано приблизно 10 000 годин записів про перисті хмари, отримано дані про фізичні властивості хмар (розмір хмарних часток, оптичну товщину, вертикальні рухи повітря в хмарі тощо). Вся ця інформація була проаналізована з точки зору їх географічних відмінностей, сезонних і добових коливань. Було показано, що тропічні кристалічні хмари дуже відрізняються від кристалічних хмар Великих рівнин, причому тропічні хмари мають дещо більші розміри хмарних часток і більшу масу льоду. Тропічні перисті хмари вище розташовані і мають більш низькі температури хмар (щоправда, вони не вимірювалися, а визначалися непрямим

чином). Також було виявлено, що вони більш потужні вранці (мають більшу товщину) і зменшуються вдень. Для перистих хмар, що виникають взимку над Великими рівнинами, немає очевидних добових варіацій. Однак, перисті хмари, що спостерігаються влітку, також розташовані на більшій висоті та мають більшу потужність вдень. У [14] також зазначається, що перисті хмари помірних широт демонструють сильні сезонні коливання, причому влітку частіше трапляються хмари більшої потужності, ніж взимку. Дуже ледь помітні сезонні коливання спостерігаються для тропічних кристалічних хмар.

Також заслуговує на увагу [24], де на основі даних, які збиралися упродовж 1967–1970 рр. (чотири роки) протягом червня, липня та серпня, описано кліматологію літніх конвективних хмар в районі гірського хребта Блек Хіллс (*англ. Black Hills*), який розташований у північній частині Великих рівнин на Середньому Заході США. Було отримано, що просторова орієнтація хребта сприяє формуванню подвійних максимумів радіолокаційного відлуння, які розташовані над північно-східною та південно-східною частинами гірського масиву. Максимуми пов'язані із потоком повітря із південного заходу та північного заходу відповідно та утворюються внаслідок його руху вгору по схилу та конвергенції потоку повітря на підвітряному боці хребта у поєднанні з нагріванням схилів.

Новим напрямом у кліматологічних дослідженнях хмарності, де не використовуються дані наземних (візуальних) спостережень, прямих (літакові зондування) чи дистанційних вимірювань (метеорологічні радіолокатори та супутники), є атмосферний реаналіз. Реаналіз у дослідженнях може використовуватися як єдине джерело даних, так і в комплексі з наземними спостереженнями [17], даними метеорологічних супутників [18] та наземних радіолокаторів [21].

Цікавими є саме комплексні дослідження. Так, у [23] проведено оцінку характеристик низьких хмар над океанами для глобальної кліматичної моделі CAM5 у двох конфігураціях: CAM5-Base (стандартна версія) та CAM-CLUBB (версія з удосконаленою параметризацією купчастих та шарувато-купчастих хмар) на основі супутникових даних MODIS та реаналізу ERA-Interim. В роботі проаналізовано відтворення зв'язку між характеристиками хмар нижнього ярусу і показником стійкості тропосфери. Порівняння показує, що CAM5-Base має суттєві регіональні похибки у відтворенні чутливості хмар до великомасштабної циркуляції. В той же час, CAM-CLUBB більш узгоджена з супутниковими даними, проте все ще залишається недостатньо якісною, що вказує на необхідність подальшого вдосконалення параметризації в кліматичній моделі.

Реаналіз використовується багатьма країнами для всіх континентів. Так, у [25] розглянуто ефективність реаналізу ERA-Interim, MERRA, MERRA-2, NCEP R1 та NCEP R2 для оцінки відображення аномалій арктичного хмарного покриву в порівнянні з супутниковими даними MODIS та CALIPSO з 2000 по 2014 рік. Було визначено здатність моделей відтворювати міжрічну мінливість та екстремуми в ході хмарності. Особливу увагу приділено холодному сезону, коли вплив хмарності на радіаційний баланс є найбільшим, але, водночас з тим, моделювання має найбільшу похибку. Порівняння з супутниковими даними вказує на систематичні похибки реаналізу, особливо в певних регіонах досліджуваної території, або ж залежно від сезону. Пов'язано це з особливостями параметризації хмарності і обмеженою кількістю спостережень в Арктиці.

Іншим прикладом подібних досліджень, вже для Азії є [33], де на основі реаналізу ERA5 над Східним Китаєм проаналізовано просторово-часові особливості гідрометеорів у хмарних системах з опадами для теплого періоду протягом 1979-2020 років. Автори досліджують вертикальний розподіл і сезонну мінливість чотирьох видів гідрометеорів (вода і лід в хмарах, дощ і сніг) та їхній внесок у формування опадів за різних метеорологічних умов. Визначено, що характеристики гідрометеорів суттєво відрізняються залежно від регіону в межах досліджуваної території, сезону та інтенсивності опадів, а «теплі» і «холодні» мікрофізичні процеси хмароутворення відіграють різну роль у механізмах випадіння опадів. Зокрема, «теплі» процеси є домінуючими для слабких і помірних опадів, тоді як для інтенсивних опадів типовішими є «холодні» процеси і вертикальний розвиток хмар. Дослідження підтверджує зв'язок між гідрометеорами і кількістю опадів та демонструє можливість використання ERA5 для кліматичного аналізу, що має важливе значення для покращення розуміння процесів опадоутворення та вдосконалення чисельних моделей погоди і клімату.

У дослідженні [35] проведено порівняння супутникових даних CERES з аналізом ECMWF та реаналізом ERA-40 для оцінки здатності останніх відтворювати фізичні властивості тропічних глибоких конвективних хмар. В цій роботі було проаналізовано такі параметри як висота та температура верхньої межі, оптична товщина, потоки сонячної та інфрачервоної радіації. Додаткову увагу приділено систематичним похибкам, пов'язаним зі спрощенням параметризації хмар, що призводить до відмінностей у представлених даних. Визначено, що в порівнянні з CERES, просторово-часові закономірності тропічної конвекції загалом відтворюються коректно, за виключенням окремих характеристик. Отримані результати підкреслюють важливість використання додаткових спостережень для валідації результатів та необхідність подальшого вдосконалення моделі ECMWF.

**Висновки.** У результаті проведеного аналізу вітчизняних та іноземних досліджень, які присвячені кількісним та якісним змінам хмарності та її характеристикам у кліматологічному аспекті, можна виділити наступні джерела даних, які використовуються для їх проведення:

1. Наземні метеорологічні станції.
2. Літакові зондування.
3. Метеорологічні радіолокатори.
4. Меторологічні супутники.
5. Числові кліматичні моделі (глобальні та регіональні).
6. Реаналіз (атмосферний).

Найбільш поширеними у світі були і залишаються дані наземних спостережень. Їх основною перевагою перед іншими видами даних є довжина рядів спостережень, а головними недоліками – нерегулярність сітки метеорологічних станцій і нерівномірність їх розташування (у густо заселених регіонах їх більше, у мало заселених та важко доступних навпаки менше; у Північній та Південній півкулях; на суходолі та в акваторії океанів тощо).

Найменш поширеними є дані літакових зондувань. Їх основною перевагою є можливість безпосереднього і точного визначення (*англ. in-situ*) мікрофізичних характеристик хмар. Головним лімітуючим фактором – велика вартість подібних досліджень, які мали виконуватися упродовж тривалого часу над однією і тією ж територією. Варто зауважити, що довгі ряди даних таких вимірів є лише для території США, України та низки країн, які входили до складу бувшого СРСР (його європейської частини та Кавказу). Серед недоліків цього виду даних – також міра просторового охоплення, адже літакові зондування проводилися по маршрутам і не могли одномоментно охопити навіть окремо взятую країну.

Поява дистанційних засобів визначення фізичних та геометричних характеристик хмар дала можливість вивчати кліматологію хмарності. Спочатку це були дослідження, в основу яких були покладені дані метеорологічних радіолокаторів. Особливу цінність мали доплерівські радіолокатори, оскільки вони дозволяли отримувати інформацію не лише про розташування хмар у просторі, але й оцінювати їх мікрофізичні характеристики. Радіус їх дії суттєво перевищує радіус огляду спостерігача на метеостанції, проте цей вид даних також суттєво залежить від наявності радіолокаційної мережі та її щільності (наявності суцільного радіолокаційного поля).

Вдосконалення приладів, які встановлюються на метеорологічні супутники (особливо тих, що проводять виміри в інфрачервоному спектрі і не залежать від видимого сонячного світла), створення і накопичення відповідних архівів даних з часом дали змогу проводити кліматологічні дослідження хмарного покриву над великими площами (від окремо взятих країн, материків до планети в цілому). Це – перше джерело, яке дозволило отримати дані на регулярній сітці, проте й воно має недоліки: 1) час перебування на орбіті та активної експлуатації метеорологічних супутників є обмеженим (~10 років); 2) мікрофізичні характеристики хмарності вимірюються не прямим чином, а розраховуються опосередковано за спеціально розробленими алгоритмами (для їх валідації необхідні дані літакових зондувань та / або метеорологічних радіолокаторів).

На початку 90-х років ХХ століття відбувся значний прогрес у сфері числового атмосферного моделювання, одним із факторів якого став бурхливий розвиток електронно-обчислювальної техніки. Від тоді і до теперішнього часу триває процес широкого використання атмосферних моделей у задачах моделювання клімату минулого та майбутнього. Збільшується їх просторова роздільна здатність: відбувається поділ на

глобальні та регіональні моделі. Відносно нещодавно виникає окремий клас таких моделей, які отримали назву «реаналіз». Найбільш відомими на даний момент у світі є реаналізи, які були створені в Європейському центрі середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), Національному центрі передбачення стану навколишнього середовища (NCEP, США) та Японською метеорологічною агенцією (JMA). Упродовж останніх двох десятиліть саме використання реаналізу у поєднанні із іншими джерелами даних (особливо наземних та супутникових) набуло найбільшого поширення у світі.

Узагальнення отриманих різними авторами (як іноземними, так і вітчизняними) результатів дає можливість стверджувати наступне: 1) зміни хмарного покриву мають регіональний характер (є неоднаковими по території); 2) зміни хмарного покриву на фоні загального тренду мають певні осциляції (тенденції до збільшення та зменшення на менших часових проміжках), що, очевидно, пов'язано з атмосферною циркуляцією; 3) збільшення або зменшення хмарності відбувається переважно за рахунок зміни кількості окремо взятих видів хмар, які є характерними для даної території (у більш грубому наближенні – шляхом перерозподілу конвективної та шаруватої хмарності).

### Список літератури

1. *Заболоцька Т.М.* Динаміка змін хмарного покриву над територією України в умовах сучасного клімату. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. 2010. Вип. 259. С. 91–103.
2. *Заболоцька Т.Н., Крочак С.А., Рудько Ю.С.* Температурний режим в хмарах і навколохмарному просторі. Праці УкрНДІ Держкомгідромета. 1989. Вип. 229. С. 86–95.
3. *Заболоцька Т.Н., Крочак С.А., Рудько Ю.С.* Характеристики шарувато- та хвилеподібних хмар, що спостерігаються над територією України. Праці УкрНДІ Держкомгідромета, 1989. Вип. 229. С. 76–86.
4. *Заболоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М.* Вертикальний і горизонтальний розподіл фазового стану в хмарах різних форм. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. 2011. Вип. 260. С. 80–94.
5. *Заболоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М.* Особливості змін хмарного покриву над територією України протягом 1961-2008 рр. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. 2011. Вип. 260. С. 54–66.
6. *Заболоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М.* Просторово-часові зміни кількості хмар над територією України. Наук. праці УкрНДГМІ. 2002. Вип. 250. С. 100–106.
7. *Заболоцька Т.М., Шпиг В.М.* Кількісні зміни хмарності як індикатор періоду глобального потепління. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. 2015. Вип. 267. С. 23–27.
8. *Заболоцька Т.М., Шпиталь Т.М.* Горизонтальний розподіл водності у хмарах різних типів. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. 2009. Вип. 258. С. 106–113.
9. *Заболоцька Т.М., Шпиталь Т.М.* Кліматичні зміни повторюваності основних форм хмар. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. 2012. Вип. 261. С. 87–105.
10. *Заболоцька Т.М., Шпиталь Т.М.* Кліматичні зміни повторюваності ясного й похмурого стану неба за загальною та нижньою хмарністю. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. 2013. Вип. 265. С. 7–14.
11. *Заболоцька Т.М., Шпиталь Т.М., Підгурська В.М.* Вертикальний розподіл водності в хмарах різних форм. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. 2010. Вип. 259. С. 121–131.
12. *Ліпінський В.М., Дячук В. А., Бабіченко В. М.* Клімат України. Київ: Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.
13. *Barrett, E. C.* 'Cloud and Thunder', in T. J. Chandler and S. Gregory (eds.) *The Climate of the British Isles*. London: Longmans Group, 1976. P. 199–210.
14. *Deng M., Mace G.G.* Cirrus Microphysical Properties and Air Motion Statistics Using Cloud Radar Doppler Moments. Part I: Algorithm Description. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2006. Vol. 45(12). P. 1690–1709. URL: <https://doi.org/10.1175/JAM2433.1>
15. *Dorota Matuszko.* Long-term observations of cloud cover in Cracow (1792-1999). *Geographia Polonica*. 2001. Vol. 74(2). P. 41–56.
16. *Eastman R., Stephen G. Warren.* Variations in cloud cover and cloud types over the ocean from surface observations. *Journal of Climate*. 2011. Vol. 24(22). P. 5914–5934. URL: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3972.1>

17. *Free M., Sun B., Yoo H.L.* Comparison between Total Cloud Cover in Four Reanalysis Products and Cloud Measured by Visual Observations at U.S. Weather Stations. *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29(6). 2015-2021. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0637.1>
18. *Griggs J.A., Bamber J.L.* Assessment of Cloud Cover Characteristics in Satellite Datasets and Reanalysis Products for Greenland. *Journal of Climate*. 2008. Vol. 21(9). P. 1837–1849. URL: <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1570.1>
19. *Henderson-Sellers A.* Cloud changes in a warmer Europe. *Climate Change*. 1986. Vol. 8. P. 25–52.
20. *Henderson-Sellers A.* Continental cloudiness changes this century. *GeoJournal*. 1992. Vol. 27. P. 255–262.
21. *Kalesse H., Kollias P.* Climatology of High Cloud Dynamics Using Profiling ARM Doppler Radar Observations. *Journal of Climate*. 2013. Vol. 26(17). P. 6340–6359. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00695.1>
22. *Kebiao M., Zijin Yu., Zhiyuan Z., Tongren X., Xinyi S., Chunyu G.* Changes in Global Cloud Cover Based on Remote Sensing Data from 2003 to 2012. *Chinese Geographical Science*. 2019. Vol. 29(2). P. 306–315. URL: <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1030-6>
23. *Kubar T.L., Stephens G.L., Lebsock M., Larson V.E., Bogenschutz P.A.* Regional Assessments of Low Clouds against Large-Scale Stability in CAM5 and CAM-CLUBB Using MODIS and ERA-Interim Reanalysis Data. *Journal of Climate* 2015. Vol. 28(4). P. 1685–1706. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00184.1>
24. *Kuo J., Orville H.D.* A Radar Climatology of Summertime Convective Clouds in the Black Hills. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 1973. Vol. 12(2). P. 359–368. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1973\)012<0359:ARCOSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1973)012<0359:ARCOSC>2.0.CO;2)
25. *Liu Y., Key J.R.* Assessment of Arctic Cloud Cover Anomalies in Atmospheric Reanalysis Products Using Satellite Data. *J. Climate*. 2016. Vol. 29(17). P. 6065–6083. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0861.1>
26. *London J. et al.* Thirty Years Trend of Observed Greenhouse Clouds Over the Tropical Ocean. *Adv. Space Res.* 1991. Vol. 11. P. 45–49. URL: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(91\)90401-5](https://doi.org/10.1016/0273-1177(91)90401-5)
27. *Lough J. M., T. M. L. Wigley and J. P. Palutikof.* Climate and Climate Impact Scenarios for Europe in a Warmer World. 1983. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 22, 1673–1684. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1673:CACISF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1673:CACISF>2.0.CO;2)
28. *Nicholls N., Gruza G.V., Jouzel J., Karl T.R., Ogallo L.A., Parker D.E.* Observed Climate Variability and Change. *Climate Change 1995, The Science of Climate Change*, IPCC, Cambridge University Press, 1996. P. 133–192.
29. *Norris J. R., Slingo A.* Trends in Observed Cloudiness and Earth's Radiation Budget. From the Strüngmann Forum Report, *Clouds in the Perturbed Climate System: Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation* Edited by Jost Heintzenberg and Robert J. Charlson. MIT Press, 2009. P. 17–36. URL: <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262012874.003.0002>
30. *Obrębska-Starkłowa B.* The Role of the Climatological Stations of the Jagiellonian University in Cracow in the Research on the Climatic Conditions in Central Europe. *Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr.*, 1993. Vol. 95. P. 17–23.
31. *Sánchez-Lorenzo, A., Calbó, J. and Wild, M.* Increasing cloud cover in the 20th century: review and new findings in Spain. *Climate of the Past*, 2012. Vol. 8(4). P. 1199–1212. URL: <https://doi.org/10.5194/cp-8-1199-2012>
32. *Sfičá L., Beck C., Nita A., Mirela M., Birsan M., Philipp A.* Cloud cover changes driven by atmospheric circulation in Europe during the last decades. *International journal of climatology*, 2021. Vol. 41(1). P. E2211–E2230. URL: <https://doi.org/10.1002/joc.6841>
33. *Tang L., Gao W., Xue L., Zhang G., Guo J.* Climatological Characteristics of Hydrometeors in Precipitating Clouds over Eastern China and Their Relationship with Precipitation Based on ERA5 Reanalysis. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2023. Vol. 62. P. 625–641. URL: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0076.1>
34. *Warren S., Eastman R., Hahn C.* A Survey of Changes in Cloud Cover and Cloud Types over Land from Surface Observations, 1971-96. *Journal of Climate*, 2007. Vol. 20(4). P. 717–738. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI4031.1>
35. *Xu K.* Evaluation of Cloud Physical Properties of ECMWF Analysis and Re-Analysis (ERA) against CERES Tropical Deep Convective Cloud Object Observations. *Monthly Weather Review*. 2009. Vol. 137(1). P. 207–223. URL: <https://doi.org/10.1175/2008MWR2633.1>

#### References

1. *Zabolotska T.M.* Dynamika zmin khmarnoho pokryvu nad terytoriiu Ukrainy v umovakh suchasnoho klimatu [Dynamics of changes in cloud cover over the territory of Ukraine in modern climate

conditions]. Scientific works of the UHMI, 2010. Vol. 259. P. 91-103.

2. *Zabolotska T.M., Krochak S.A., Rudko Yu.S.* Temperaturnyi rezhym v khmarakh i navkolokhmarnomu prostori [Temperature regime in clouds and near-cloud space]. Scientific works of the UHMI, 1989. Vol. 229. P. 86-95.

3. *Zabolotska T.M., Krochak S.A., Rudko Yu.S.* Kharakterystyky sharuvato- i khvyliastopodibnykh khmar shcho sposterihaiutsia nad terytoriiu Ukrainy [Characteristics of stratiform and undulatus clouds observed over the territory of Ukraine]. Scientific works of the UHMI, 1989. Vol. 229. P. 76-86.

4. *Zabolotska T.M., Pidhurska V.M., Shpytal T.M.* Vertykalnyi i horyzontalnyi rozpodil fazovoho stanu v khmarakh riznykh form [Vertical and horizontal distribution of phase state in various cloud types]. Scientific works of the UHMI, 2011. Vol. 260. P. 80-94.

5. *Zabolotska T.M., Pidhurska V.M., Shpytal T.M.* Osoblyvosti zmin khmarnoho pokryvu nad terytoriiu Ukrainy protiahom 1961-2008 rr. [Features of changes in cloud cover over the territory of Ukraine during 1961-2008]. Scientific works of the UHMI, 2011. Vol. 260. P. 54-66.

6. *Zabolotska T.M., Pidhurska V.M., Shpytal T.M.* Prostorovo-chasovi zminy kilkosti khmar nad terytoriiu Ukrainy [Spatiotemporal changes in clouds over the territory of Ukraine]. Scientific works of the UHMI, 2002. Vol. 250. P. 100-106.

7. *Zabolotska T.M., Shpyh V.M.* Kilkisni zminy khmarnosti yak indyikator periodu hlobalnoho poteplinnia [Quantitative changes in cloud cover as an indicator of a global warming period]. Scientific works of the UHMI, 2015. Vol. 267. P. 23-27.

8. *Zabolotska T.M., Shpytal T.M.* Horyzontalnyi rozpodil vodnosti u khmarakh riznykh typiv [Horizontal distribution of water content in different clouds types]. Scientific works of the UHMI, 2009. Vol. 258. P. 106-113.

9. *Zabolotska T.M., Shpytal T.M.* Klimatychni zminy povtoriuvanosti osnovnykh form khmar [Climatic changes in the recurrence of cloud types]. Scientific works of the UHMI, 2012. Vol. 261. P. 87-105.

10. *Zabolotska T.M., Shpytal T.M.* Klimatychni zminy povtoriuvanosti yasnoho y pokhmuroho stanu neba za zahalnoi ta nyzhnoi khmarnosti [Climatic changes in the recurrence of clear sky and cloudy sky in total and low cloud cover]. Scientific works of the UHMI, 2013. Vol. 265. P. 7-14.

11. *Zabolotska T.M., Shpytal T.M., Pidhurska V.M.* Vertykalnyi rozpodil vodnosti v khmarakh riznykh form [Vertical distribution of water content in different clouds types]. Scientific works of the UHMI, 2010. Vol. 259. P. 121-131.

12. *Lipinskyi B.M., Diachuk B.A., Babichenko V.M.* Klimat Ukrainy [Climat of Ukraine]. Kyiv: Raievskiy publishing house, 2003. – 343 p.

13. *Barrett, E. C.* 'Cloud and Thunder', in T. J. Chandler and S. Gregory (eds.) *The Climate of the British Isles*. London: Longmans Group, 1976. P. 199–210.

14. *Deng M., Mace G.G.* Cirrus Microphysical Properties and Air Motion Statistics Using Cloud Radar Doppler Moments. Part I: Algorithm Description. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2006. Vol. 45(12). P. 1690–1709. URL: <https://doi.org/10.1175/JAM2433.1>

15. *Dorota Matuszko.* Long-term observations of cloud cover in Cracow (1792-1999). *Geographia Polonica*. 2001. Vol. 74(2). P. 41–56.

16. *Eastman R., Stephen G. Warren.* Variations in cloud cover and cloud types over the ocean from surface observations. *Journal of Climate*. 2011. Vol. 24(22). P. 5914–5934. URL: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3972.1>

17. *Free M., Sun B., Yoo H.L.* Comparison between Total Cloud Cover in Four Reanalysis Products and Cloud Measured by Visual Observations at U.S. Weather Stations. *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29(6). 2015-2021. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0637.1>

18. *Griggs J.A., Bamber J.L.* Assessment of Cloud Cover Characteristics in Satellite Datasets and Reanalysis Products for Greenland. *Journal of Climate*. 2008. Vol. 21(9). P. 1837–1849. URL: <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1570.1>

19. *Henderson-Sellers A.* Cloud changes in a warmer Europe. *Climate Change*. 1986. Vol. 8. P. 25–52.

20. *Henderson-Sellers A.* Continental cloudiness changes this century. *GeoJournal*. 1992. Vol. 27. P. 255–262.

21. *Kalesse H., Kollias P.* Climatology of High Cloud Dynamics Using Profiling ARM Doppler Radar Observations. *Journal of Climate*. 2013. Vol. 26(17). P. 6340–6359. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00695.1>

22. *Kebiao M., Zijin Yu., Zhiyuan Z., Tongren X., Xinyi S., Chunyu G.* Changes in Global Cloud Cover Based on Remote Sensing Data from 2003 to 2012. *Chinese Geographical Science*. 2019. Vol. 29(2). P. 306–315. URL: [10.1007/s11769-019-1030-6](https://doi.org/10.1007/s11769-019-1030-6)

23. *Kubar T.L., Stephens G.L., Lebsock M., Larson V.E., Bogenschutz P.A.* Regional Assessments of Low Clouds against Large-Scale Stability in CAM5 and CAM-CLUBB Using MODIS and ERA-Interim Reanalysis Data. *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28(4). P. 1685–1706. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI->

24. Kuo J., Orville H.D. A Radar Climatology of Summertime Convective Clouds in the Black Hills. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 1973. Vol. 12(2). P. 359–368. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1973\)012<0359:ARCOSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1973)012<0359:ARCOSC>2.0.CO;2)

25. Liu Y., Key J.R. Assessment of Arctic Cloud Cover Anomalies in Atmospheric Reanalysis Products Using Satellite Data. *J. Climate*. 2016. Vol. 29(17). P. 6065–6083. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0861.1>

26. London J. et al. Thirty Years Trend of Observed Greenhouse Clouds Over the Tropical Ocean. *Adv. Space Res.* 1991. Vol. 11. P. 45–49. URL: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(91\)90401-5](https://doi.org/10.1016/0273-1177(91)90401-5)

27. Lough J. M., T. M. L. Wigley and J. P. Palutikof. Climate and Climate Impact Scenarios for Europe in a Warmer World. 1983. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 22, 1673–1684. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1673:CACISF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1673:CACISF>2.0.CO;2)

28. Nicholls N., Gruza G.V., Jouzel J., Karl T.R., Ogallo L.A., Parker D.E. Observed Climate Variability and Change. *Climate Change 1995, The Science of Climate Change*, IPCC, Cambridge University Press, 1996. P. 133–192.

29. Norris J. R., Slingo A. Trends in Observed Cloudiness and Earth's Radiation Budget. From the Strüngmann Forum Report, *Clouds in the Perturbed Climate System: Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation* Edited by Jost Heintzenberg and Robert J. Charlson. MIT Press, 2009. P. 17–36. URL: <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262012874.003.0002>

30. Obrębska-Starkłowa B. The Role of the Climatological Stations of the Jagiellonian University in Cracow in the Research on the Climatic Conditions in Central Europe. *Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr.*, 1993. Vol. 95. P. 17–23.

31. Sánchez-Lorenzo, A., Calbó, J. and Wild, M. Increasing cloud cover in the 20th century: review and new findings in Spain. *Climate of the Past*, 2012. Vol. 8(4). P. 1199–1212. URL: <https://doi.org/10.5194/cp-8-1199-2012>

32. Sfičá L., Beck C., Nița A., Mirela M., Birsan M., Philipp A. Cloud cover changes driven by atmospheric circulation in Europe during the last decades. *International journal of climatology*, 2021. Vol. 41(1). P. E2211–E2230. URL: <https://doi.org/10.1002/joc.6841>

33. Tang L., Gao W., Xue L., Zhang G., Guo J. Climatological Characteristics of Hydrometeors in Precipitating Clouds over Eastern China and Their Relationship with Precipitation Based on ERA5 Reanalysis. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2023. Vol. 62. P. 625–641. URL: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0076.1>

34. Warren S., Eastman R., Hahn C. A Survey of Changes in Cloud Cover and Cloud Types over Land from Surface Observations, 1971-96. *Journal of Climate*, 2007. Vol. 20(4). P. 717–738. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI4031.1>

35. Xu K. Evaluation of Cloud Physical Properties of ECMWF Analysis and Re-Analysis (ERA) against CERES Tropical Deep Convective Cloud Object Observations. *Monthly Weather Review*. 2009. Vol. 137(1). P. 207–223. URL: <https://doi.org/10.1175/2008MWR2633.1>

#### **Researches on cloudiness in Ukraine and abroad**

**Tsila A. Yu., Shpyg V.M.**

*Cloud cover is one of the key components of the climate system and significantly affects the Earth's radiation balance, atmospheric circulation and precipitation, and these reasons making it one of the main climate indicators. This article is devoted to the analysis of Ukrainian and foreign studies of cloud cover in the context of climatology, the main directions and data sources used for investigations.*

*In Ukraine the studies devoted to the analysis of quantitative and qualitative changes of cloud cover in the 20th and 21st centuries are not widespread. The most widely and meaningfully represented issues are the degree of cloudiness coverage, the annual course of total and low cloud cover, the contribution of low cloud cover to the total, the recurrence and annual course of cloudy sky, the daily course of total cloud cover, the stability of clear and cloudy weather, the cloudiness regime by its form and height, and the spatial structure of clouds. There are also studies that, in the context of climate change, reveal issues regarding changes in the repeatability of clouds of the main forms and the relationship of cloud cover with atmospheric circulation (by analyzing the baric field and atmospheric circulation indices). All of them are based on ground-based observation data, while often the number of meteorological stations and the length of the series (study periods) used are different. It is also worth noting the presence of a small number of studies devoted to the temperature regime in clouds and the surrounding cloud space, the phase state and water content of clouds over Ukraine. These studies were conducted on the basis of archive data from aircraft soundings conducted during the second half of the 20th century.*

*Cloud studies conducted abroad are also often based on ground-based observation data, but several obvious trends are worth noting. The appearance of remote sensing tools for determining the physical and geometric characteristics of clouds has made it possible to study their climatology. Initially, these were studies based on meteorological radar data. Later the use of meteorological satellite data became widespread. The rapid development of high-performance computing technology has become one of the factors for the significant progress of numerical atmospheric modeling. Since the late 20th and early 21st centuries and up to the present, the process of widespread use of atmospheric models for modeling the climate of the past and future continues. Their spatial resolution is*

*increasing: there is a division into global and regional models. Relatively recently, a separate class of such models has appeared, which has been called "reanalysis". The most famous in the world at the moment are reanalyses which were developed by the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the National Center for Environmental Prediction (the USA) and the Japan Meteorological Agency (JMA). Over the past two decades, the use of reanalysis in combination with other data sources has become the most widespread in the world.*

*Generalization of the results obtained by various authors (both Ukrainian and foreign) makes it possible to conclude the following: 1) changes in cloud cover are regional in nature (are not the same across the territory); 2) changes in cloud cover against the background of the general trend have certain oscillations (tendencies to increase and decrease during internal time periods), which is obviously related to atmospheric circulation; 3) an increase or decrease in cloud cover occurs mainly due to a change in the number of separate cloud forms that are characteristic of a given territory (in a rougher approximation - through the redistribution of the amount of convective and stratiform clouds).*

**Key words:** cloudiness; meteorological satellite; meteorological radar; numerical atmospheric model; reanalysis; climatology.

**Надійшла до редколегії 14.12.2025**