

О.А. Щеглов¹

aleshcheglov@gmail.com

В.М. Шпиг¹

vitold82@i.ua

Н.Р. Фомічев²

nikitafofomich2002@gmail.com

УДК 551.515+551.57

АТМОСФЕРНІ РІКИ: ПОТЕНЦІЙНИЙ ВПЛИВ НА АТМОСФЕРНІ ПРОЦЕСИ ТА МЕТЕОРОЛОГІЧНІ ЯВИЩА НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

¹ Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

У статті проведено огляд наукових публікацій, які присвячені відносно новому для вітчизняного наукового метеорологічного співтовариства поняттю "атмосферні ріки", піднімається питання щодо необхідності його введення в вітчизняну термінологію. На основі зарубіжних наукових праць проаналізовано зв'язок атмосферних рік із великомасштабною атмосферною циркуляцією та екстремальними опадами, наведено підходи та методи ідентифікації атмосферних рік. Аналіз вітчизняних досліджень дозволив дійти висновку, що в Україні не розглядають питання щодо запасів вологи в атмосфері та умов формування екстремальних опадів крізь призму концепції атмосферних рік. Проаналізувавши наукові праці, зроблено припущення, що із високою ймовірністю АР відмічаються і на території України. Найбільш імовірний прояв АР може бути під час переміщення південних циклонів з півдня або південного заходу на північ або північний схід Східноєвропейського регіону. Окреслено основні напрями подальшого вивчення атмосферних рік: зв'язок атмосферних рік з великомасштабною циркуляцією; роль атмосферних рік у транспортуванні вологи на макро- та мезомасштабному рівнях; зв'язок атмосферних рік з екстремальними та стихійними метеорологічними явищами, зокрема сильними опадами.

Ключові слова: атмосферна ріка, атмосферна циркуляція, адвекція, волога, небезпечні атмосферні явища.

ВСТУП

Відповідно до Метеорологічного глосарію Американського метеорологічного товариства, термін "атмосферна ріка" (далі — АР) означає довгу й вузьку смугу інтенсивного горизонтального перенесення водяної пари, що пов'язана зі струминним течіями низького рівня та передує холодному фронту позатропічного циклону [14]. Термін остаточно закріпився в глосарії в 2017 році, тобто поняття є відносно новим в метеорології, не зважаючи на тривалу історію дослідження суміжних питань та тривалу дискусію щодо коректності та формулювання самого терміну [15]. Більшість наукових праць доводить, що значна кількість екстремальних опадів пов'язана з наявністю АР [16, 36, 37, 44, 45, 53]. Питання щодо міри впливу АР на віддалені від океанічного узбережжя території, до яких можна віднести територію України, є менш дослідженим. У вітчизняних наукових працях питання впливу Атлантики на вологовміст повітря та його роль в формуванні синоптичних процесів та метеорологічних явищ саме крізь призму концепції АР не розглядалося.

Тому аналіз сучасних зарубіжних досліджень щодо АР, їх узагальнення, а також проведення подібних досліджень для території України, з метою оцінки запасів вологи та процесів її переносу в атмосфері на регіональному рівні, є важливою та актуальною темою.

Враховуючи сказане вище, варто зауважити, що серед праць українських вчених можна виділити публікацію [26], у якій явище АР розглядається як фактор, що сприяє екстремальним опадам, особливо в рідкій фазі в районі Антарктичного півострова.

Метою даної статті є аналіз сучасних досліджень щодо явища "атмосферна ріка".

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Концепція АР формувалася на базі досліджень 1970-х та 1980-х років з синоптичної метеорології, у 1990-х та 2000-х — за рахунок розвитку супутникової метеорології, методів асиміляції даних та появи глобальних баз даних реаналізу. Наприкінці 1990-х рр. запропоновано один із перших алгорит-

мів ідентифікації АР [56]. В 2000-х та 2010-х актуальність дослідження перенесення тепла та вологи в атмосфері в струминних течіях нижнього рівня закріпилася рядом експедиційних досліджень із застосуванням літакового зондування [18, 42, 43]. Вивчення фізичної суті та характеристик АР відбувалося протягом серії кампаній NOAA та NASA, використовуючи літаки та скидні зонди: "Ghost Nets" (2005 рік), "WISPAR" (2011 рік), "CalWater" (2014–2015 роки) та "AR Recon" (2016 рік) [42]. У ході досліджень встановлено, що середня ширина АР — близько 850 ± 250 км, при цьому переміщується $4,7 \pm 2,0 \times 10^8$ кг·с⁻¹ водяної пари, що еквівалентно приблизно 25-кратно збільшеному об'єму води річки Міссісіпі, яка впадає в океан (або в 2,5 рази більше відповідного показника річки Амазонки) [15]. Більшість досліджень АР присвячена територіям, що безпосередньо межують з океаном, як джерелом забезпечення атмосфери вологою [27, 35, 40]. В останні роки інтерес до явища АР зростає, оскільки все більше авторів пов'язують його із екстремальними метеорологічними явищами, особливо з опадами [16, 36, 37, 44, 45, 53].

Основні поняття. Найчастіше показником, що характеризує АР є інтегральне перенесення (потік) водяної пари (IVT), який, насамперед базується на розрахунку інтегрального вмісту водяної пари (IWV) [32]. IWV зазвичай розраховується таким чином, щоб охопити приземні шари з максимальною концентрацією та шари в середній тропосфері, що характеризують переважаючий потік повітря в тропосфері. Так, наприклад, відповідно до методики [28], IWV розраховується як:

$$IWV = \int_{1000}^{300} q \frac{dp}{g} \quad (1)$$

де q — питома вологість; g — гравітаційна стала; dp — вертикальний градієнт тиску; значення 300 та 1000 вказують на межі вертикального стовпа повітря в термінах абсолютної топографії (АТ–1000 та АТ–300 відповідно).

Показник IVT відрізняється від IWV тим, що враховує меридіональну та зональну складову перенесення повітря [28, 32]:

$$IVT = Q(\lambda, \varphi, t) = Q_{\lambda} + Q_{\varphi} \quad (2)$$

де λ та φ — довгота та широта відповідно, t — час, Q_{λ} та Q_{φ} — зональна та меридіональна компоненти IVT , що розраховуються як:

$$Q_{\lambda} = - \int_{1000}^{300} q u \frac{dp}{g} \quad (3)$$

$$Q_{\varphi} = - \int_{1000}^{300} q v \frac{dp}{g} \quad (4)$$

де u — зональна компонента вітру, v — меридіональна компонента вітру, решта позначень — аналогічні формулі (1).

У контексті наукової метеорологічної термінології, яка використовується у країнах Східної Європи, країнах Балтії, Кавказу та Середньої Азії, поняття АР не виділяється, і його можна порівняти з визначенням адвективних потоків тепла та вологості. Відповідно до сучасних уявлень, водяна пара у АР постачається з тропічних та/або позатропічних джерел вологи. Атмосферні ріки часто призводять до сильних опадів, коли вологі повітряні маси піднімаються вгору в зоні висхідних рухів теплого сектору циклону (в англійській літературі щодо цієї зони застосовується термін "warm conveyor belt"). Горизонтальне перенесення водяної пари в середніх широтах в АР відбувається максимально інтенсивно саме у нижній тропосфері [14].

Ідентифікація АР. Як показано в роботі [29], джерелом даних для ідентифікації АР можуть слугувати глобальні дані реаналізу, наприклад, ERA-Interim [20], MERRA-2 [24] тощо. Алгоритми виявлення АР включають у себе етап виділення осередків з аномальним значенням IVT або IWV , яке виділяється статистично, вище певного порогу. Потім визначається геометрія осередків з аномальними значеннями IVT або IWV [28, 30]. Наприклад, у [29] пороговим значенням є 85-й перцентиль, розрахований з урахуванням сезонності на основі багаторічної вибірки даних реаналізу ERA-Interim та MERRA-2. Автори закладають ряд інших умов: значення IVT мають не тільки перевищувати порогове значення 85-го перцентилля, але й бути не менше $100 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; для підтвердження наявності АР необхідною є суттєва меридіональна складова $IVT > 50 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ за умови, що більше половини площі АР має напрямок перенесення у межах 45° від середнього потоку IVT ; довжина об'єкта АР > 2000 км при співвідношенні довжини до ширини > 2 [29].

Критерії в алгоритмах виявлення АР можуть дещо відрізнитись, у залежності від специфіки регіону дослідження чи інших міркувань, але здебільшого по своїй суті вони близькі [13, 25, 34, 51, 54, 56]. Відмінності в середніх значеннях IVT дозволяють авторам в рамках кліматологічних розрахунків поділяти АР за інтенсивністю. Наприклад, в [45] запропонована шкала АР: від слабких ($250\text{--}500 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), помірних ($500\text{--}750 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), сильних ($750\text{--}1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), екстремальних ($1,000\text{--}1,250 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) до виняткових ($\geq 1,250 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$).

Сказане вище стосується виділення АР як просторового об'єкта в один момент часу. Окреме складне питання — це визначення траєкторії зміщення АР. Трекінг АР є більш складним, порівняно з мето-

дами визначення траєкторій циклонів та антициклонів, що базуються на визначенні центру баричних утворень і подальшого виявлення їх зміщення. На відміну від баричних утворень, АР мають більш складну форму, що зазнає зміни у часі: розширення, скорочення, видовження, розділення на частини тощо [29]. Тому методи "трекінгу" АР базуються на авторських розробках програмного коду, що вирішують задачу розпізнавання образів, наприклад [48, 49, 55].

Зв'язок з великомасштабною циркуляцією. Згідно з [56] від трьох до п'яти АР присутні в кожній півкулі в будь-який момент часу, і вони частіше зустрічаються над позатропічними частинами океанів. Над океанічними поверхнями відбувається інтенсивне насичення повітря вологою, а особливості циркуляції в Північній частині Тихого океану та в Північній Атлантиці сприяють винесенню вологих повітряних мас на континенти в межах західного перенесення [28]. Географічний прояв АР залежить в першу чергу від стану ключових центрів дії атмосфери: Тихоокеанського максимуму та Алеутського мінімуму — в Північно-Тихоокеанському регіоні; Азорського максимуму та Ісландського мінімуму — в Північноатлантичному регіоні відповідно. Важливим моментом є також стан циркумполярного вихору, інтенсивність якого описується індексом арктичного коливання (англ. *Arctic oscillation*, далі — АО). Стан циркуляції у Північно-Тихоокеанському регіоні описано Тихоокеансько-Північноамериканським коливанням (англ. *Pacific North American Oscillation*, далі — PNA), а в Атлантиці — Північно-Атлантичним коливанням (англ. *North Atlantic Oscillation*, далі — NAO). Взаємозв'язок АР та PNA розкрито в [27], а висновки щодо узгодження частоти прояву АР в Європі з NAO продемонстровано в [36]. Також отримано оцінки щодо стійкого зв'язку явища АР з Ель-Ніньйо — Південним коливанням (англ. *El Niño* — *Southern Oscillation*, далі — ENSO) та коливанням Маддена — Джуліана (англ. *Madden* — *Julian Oscillation*, далі — MJO), що представлені у працях [28, 40].

АР та екстремальні метеорологічні явища. У багатьох роботах описується ефект "обвалу" (англ. *landfall*) АР на прибережні частини континентів [21, 41, 46, 53]. Процес передбачає зменшення вологості повітряних мас за рахунок випадання вологи у вигляді атмосферних опадів. Винесення вологих повітряних мас на поверхню з іншими фізичними характеристиками супроводжується орографічним ефектом підсилення опадів. Особливо цей ефект проявляється на західному узбережжі Північної Америки, яке обрамляють Кордильєри [27, 44]. Окрім згаданих вище регіонів Америки та Європи, питанню впливу АР на екстремальні опади присвя-

чені роботи в багатьох інших регіонах, наприклад, у Туреччині та на Близькому Сході [17], Японії [33], Індії [22, 52], Південній Азії [51, 54], Північній Африці [13], Гренландії [38], у Антарктиці [50] тощо.

Прояв АР у Європі. Як зазначено вище, значну роль у формуванні режиму опадів, особливо на західному узбережжі, відіграє фаза NAO. При додатній фазі NAO може відбуватися формування потужних АР, що передусім впливають на північну та північно-західну частину Європейського субконтиненту [23]. За оцінками [35], близько 20–30% опадів на західному узбережжі Європи пов'язані з АР. З жовтня по квітень для західної частини Франції та Британії ця частка може досягати до 40%. Часто АР пов'язані з екстремальними випадками опадів, наприклад, у Великобританії, на Піренейському півострові та Норвегії, відіграючи важливу роль у формуванні значної кількості опадів за зимовий сезон. Так, у роботі [39] на основі вибірки випадків АР за 1979–2018 роки описано, що південно-західна Норвегія є регіоном, де більшість екстремальних опадів (~78,5%) пов'язані з АР. Цей зв'язок спостерігається в основному восени та на початку зими, коли АР найбільш часті (~37% АР трапляються з жовтня по січень). При чому всі випадки екстремальних опадів у комбінації з АР були пов'язані з проходження теплого фронту та теплого сектора циклону [39].

Натомість при негативній фазі NAO траєкторії циклонів, що переміщуються з Північної Атлантики в Європу, пролягають південніше, у Середземноморському регіоні. У статті [19] проаналізовано випадок кількадечного стаціонарування циклону над Західною Європою з екстремальною кількістю опадів, штормовими явищами та паводками. Стихійність процесу багато в чому була зумовлена значною кількістю водяної пари, що транспортувалася у Середземноморський басейн із тропічної зони Атлантичного океану та уздовж вузького коридору через Африканський континент.

Вітчизняні дослідження запасів вологи в атмосфері та умов формування екстремальних опадів. Як вже зазначалося, АР та їх вплив на погодні умови на території України не досліджувалися, проте існує низка сучасних робіт, які присвячені вивченню запасів вологи в атмосфері, макро- та мезомасштабним особливостям атмосферних процесів, котрі супроводжувалися сильними опадами та іншими небезпечними стихійними гідрометеорологічними явищами як для теплого, так і для холодного періоду року. Умовно їх можна поділити на три групи: 1) синоптичні умови утворення стихійних явищ погоди на території України [2, 5, 6, 7, 10]; 2) мінливість інтенсивності конвективних процесів

та динаміка інтенсивності опадів у теплий період року [1, 9]; 3) водні ресурси фронтальних хмарних систем [3, 4, 11].

Просторовий розподіл небезпечних та стихійних явищ погоди, пов'язаних із фронтальною хмарністю, та їх інтенсивність пояснюються так: 1) має місце зростання меридіональної і послаблення зональної циркуляції атмосфери, що зумовила зміну районів формування циклонів та траєкторій їх переміщення [2]; 2) циклонічні утворення на території України виходять більш глибокими і рухаються значно повільніше, ніж у середині ХХ століття [2]; 3) наявність блокуючого процесу (тривалість процесів при цьому становить декілька діб), що призводить до квазістаціонарного стану циклону [5, 6, 7, 9], або гальмівного руху з ознаками стаціонарування фронтальних систем (тривалість процесів — в межах однієї доби) [6]; 4) одночасна наявність арктичної та полярної фронтальних систем [6, 7]; 5) наявність мезомасштабних комірок висхідних рухів у зонах атмосферних фронтів, що забезпечують багаторазове відтворення запасів водяної пари, необхідної для підтримки процесів опадоутворення [10]; 6) значні запаси вологи в атмосфері та їх відтворення [1, 4, 5, 10, 11].

Варто зауважити, що вітчизняні роботи у своїй більшості побудовані на дослідженні низки окремих випадків, а тому не можуть дати відповідь на питання щодо потенційної ролі АР чи адвекції вологи у процесах формування опадів на регіональному масштабі у кліматичному аспекті.

Потенційний прояв АР на території України.

Автори роботи [35] зазначають, що наслідки АР в Європі зазвичай відчуються на більшій відстані від океану (наприклад, у Польщі), ніж на заході Сполучених Штатів. Це пояснюється більшою висотою гірських масивів на західному узбережжі Північної Америки. Варто відзначити, що Європа між 49 та 58 град. пн. ш. має відносно рівнинний рельєф, що менше перешкоджає перенесенню вологого повітря вглиб континенту без передчасної втрати вологовмісту за рахунок орографічного ефекту. З цього впливає припущення, що вологе повітря, перенесене з АР у цих широтах може проникати й на територію України, у першу чергу — у західні області. Для того, щоб вісь АР проходила в зоні 49–58 град. пн. ш., центр циклону має розташовуватись у районі Скандинавського півострова. Однак меридіональні потоки в такому випадку також направлені в північному напрямку, мало охоплюють при цьому Україну. Оскільки, зі збільшенням відстані від узбережжя у глиб континенту запаси атмосферної вологи будуть зменшуватися враховуючи той факт, що у високих широтах вологозапаси в атмосфері є

меншими, ніж у помірних та низьких, то очевидним є припущення про визначальну роль меридіональної складової перенесення повітряних мас АР у випадках формування сильних опадів. У випадку циклонів із більш південною траєкторією, вздовж континентальної частини Європи, повітряні маси в теплому секторі будуть на своєму шляху наштовкуватися на гірські масиви Альп та Карпатських гір. У такому випадку в межах України наявність атмосферної ріки найбільш суттєвий вплив може мати на регіон Закарпаття. Західні циклони рідше пов'язані з інтенсивними та тривалими опадами і, зазвичай, переміщуються територією швидше, супроводжуючись частою зміною холодного і теплового фронтів, і відповідно змінами погоди [8, 12].

У роботі [2] зазначено, що більшість циклонів, які призводять до екстремальних опадів в Україні, є саме південні та південно-західні. З південних циклонів, що зміщуються на територію України, 48% утворюються над акваторією Середземного моря, а 52% — Чорного моря [12]. Траєкторії циклонів, що проходять вздовж Середземного моря, насамперед, пов'язані із циркуляційними процесами, які описані індексом циркуляції NAO, а саме із від'ємною фазою індексу [31].

При цьому варто розуміти, що і Середземне, і Чорне та Азовське моря, над якими може проходити траєкторія АР, також є джерелами вологи. Так, наприклад, у роботі [47] отримано оцінки впливу випаровування в акваторії Середземного моря на опади на суміжних континентах. За оцінками авторів, деяка частка вологи середземноморського походження міститься і в опадах на території України.

ВИСНОВКИ

Таким чином, не зважаючи на деяку дискусію щодо терміну "атмосферні ріки" (АР), на даний час у зарубіжних фахових журналах цій темі присвячена велика кількість наукових статей. У контексті метеорологічної термінології, яка використовувалася у країнах Східної Європи, країнах Балтії, Кавказу та Середньої Азії у декількох попередніх десятиліттях, поняття АР не виділялося, і його можна підвести під визначення адвективних потоків вологості. На нашу думку, є сенс офіційного введення в наукову термінологію в Україні цього поняття та подальших досліджень явища в Східноєвропейському регіоні. Позаяк сама АР є не стільки явищем, скільки проявом механізмів обміну теплом і вологою в атмосфері, у тому числі в регіональному масштабі.

Виходячи із проаналізованих наукових праць, можна припустити, що із високою ймовірністю АР відмічаються і на території України. Найбільш імо-

вірний прояв АР може бути під час переміщення південних циклонів (з півдня або південного заходу на північ або північний схід Східноєвропейського регіону). Оскільки АР відмічаються в зоні теплового сектору циклону, варто очікувати виникнення різних атмосферних явищ, пов'язаних із проходженням фронтальних розділів, у першу чергу — випадіння інтенсивних опадів. Загалом для отримання підтвердження висловленим у даній статті припущенням та встановлення в подальшому закономірностей, пов'язаних із фактом проходження АР

над територією України, необхідним є проведення досліджень як окремих синоптичних ситуацій, так й обробки достатньо довгих рядів історичних даних та їх аналіз.

Актуальність подальшого вивчення даного питання розкривається, як мінімум, у трьох аспектах: 1) зв'язок АР з великомасштабною циркуляцією; 2) роль АР у транспортуванні вологи на макро- та мезомасштабному рівнях; 3) зв'язок АР з екстремальними та стихійними метеорологічними явищами, зокрема сильними опадами.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Балабух В.А. Межгодовая изменчивость интенсивности конвекции в Украине / Глобальные региональные изменения климата [под ред. Осадчего В. И]. Киев: Ника-Центр, 2011. 161–173.
[Balabukh V.A. Variability of power convection in Ukraine Global Regional Climate Changes [ed. Osadchy V.I.]. Kyiv: Nika-Center, 2011. 161–173]
2. Балабух В.О. Траекторії циклонів, що зумовлюють небезпечну і стихійну кількість опадів в Україні у теплий період року. *Наук. Праці УкрНДГМІ*. 2004. № 253. Ника-Центр, 2004. С. 103–119.
[Balabukh V.O. The trajectories of cyclones causing extreme precipitation in Ukraine during the warm period of the year. *Nauk. Pratsi UkrNDHMI*. 2004. 103–119]
3. Заблоцька Т.М., Кривобок О.А., Шпиг В.М. Водоресурси фронтальних хмарних систем за даними супутникових спостережень у теплий період року. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. № 3 (50). С. 66–72.
[Zabolotska T.M., Kryvobok O.A., Shpyg V.M. Liquid water content of frontal cloud systems estimated from satellite data during warm period of year. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. 2018. 3 (50). 66–72]
4. Заблоцька Т.М., Кривобок О.А., Шпиг В.М. Водоресурси фронтальних хмарних систем у холодний період року за даними супутникових спостережень. *Фізична географія та геоморфологія*. 2018. № 2 (90). С. 70–75.
[Zabolotska T.M., Kryvobok O.A., Shpyg V.M. Water balance of frontal cloud systems in cold period estimated by satellite measurements. *Physical geography and geomorphology*. 2018. 2 (90). 70–75]
5. Заблоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М. Небезпечно сильні опади в Україні та можливі причини їх утворення. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2006. № 255. С. 25–41.
[Zabolotska T.M., Pidgurska V.M., Shpital T.M. Extreme precipitation in Ukraine and possible reasons for their formation. *Nauk. Pratsi UkrNDHMI*. 2006. 255. 25–41]
6. Заблоцька Т.М., Шпиг В.М. Синоптичні умови утворення стихійних явищ погоди на території України. Частина I. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. № 1 (48). С. 57–67.
[Zabolotska T.M., Shpyg V.M. Synoptic conditions of formation of dangerous weather phenomena over Ukraine. Part I. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. 2018. 1 (48). 57–67]
7. Заблоцька Т.М., Шпиг В.М. Трансформація баричного поля та хмарності у випадку тривалих і сильних опадів. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2014. № 266. С. 12–19.
[T.M. Zabolotska, V.M. Shpyg Transformation of baric field and cloudiness in the case of long-term and heavy precipitation. *Scientific works of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute*. 2014. 266. 12–19]
8. Клімат України / за ред. В.М. Липінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. К.: Вид-во Раєвського. 2003. 343 с.
[Climate of Ukraine / Ed. V.M. Lipinsky, V.A. Dyachuka, V.M. Babichenko. K.: Raevsky Publishing House. 2003. 343 p.]
9. Паламарчук Л.В., Сокур К.С., Заблоцька Т.М. Динаміка інтенсивності опадів та мезоструктурні особливості їх полів у теплий період року на рівнинній частині території України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 4. С. 95–111.
[Palamarchuk L, Sokur K., Zabolotska T. Dynamics of rainfall intensity and mesostructural characteristics of their fields in the warm period of the year in the plain part of Ukraine. *Hydrology, hydrochemistry and hydrogeology*. 2019. 4. 95–111]
10. Паламарчук Л.В., Шпиг В.М., Гуда К.В. Умови формування сильних опадів холодного періоду року на рівнинній території України. *Фізична географія та геоморфологія*. 2014. № 2 (74). С. 110–120.
[Palamarchuk L.V., Shpyg V.M., Guda K.V. Conditions of formation of strong cold season precipitation in the plains territory of Ukraine. *Physical geography and geomorphology*. 2014. 2 (74). 110–120]
11. Ромаш Т.А., Шпиг В.М. Особливості зміни запасу вологи в атмосфері в період сильних снігопадів. *Часопис картографії*. 2013. № 7. С. 219–235.
[Romash T., Shpyg V. The peculiarities of stock moisture changes in atmosphere during heavy snowfalls. *Journal of cartography*. 2013. 7. 219–235]
12. Семенова І.Г., Назхмудінова О.М. Регіональна синоптика: підручник. Одеський державний екологічний університет. Одеса, 2019. 212 с.
[Semenova I.G., Nazhmutdinova O.M. Regional Synoptics: textbook. Odesa State Environmental University. Odesa, 2019. 212 p.]
13. Akbary M., Salimi S., Hosseini S.A., Hosseini M. Spatio-temporal changes of atmospheric rivers in the Middle East and North Africa region. *International Journal of Climatology*. 2019. 39 (10). 3976–3986. <https://doi.org/10.1002/joc.6052>
14. Atmospheric River. Glossary of Meteorology. American Meteorological Society. 2020. URL: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Atmospheric_river (дата звернення: 28.11.2022)
15. Atmospheric Rivers / eds. F. Ralph, M. Dettinger, J. Rutz, D. Waliser. Springer, Cham. 2020. 251. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28906-5_1
16. Benedict I., Ødemark K., Npien T., Moore R. Large-scale flow patterns associated with extreme precipitation and atmospheric rivers over Norway Mon. *Weather Rev.* 2019. 147 (4). 1415–1428. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0362.1>

17. Bozkurt D., Sen O.L., Ezber Y., Guan B., Viale M., Caglar F. Influence of African atmospheric rivers on precipitation and snowmelt in the near East's highlands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. **126** (4). e2020JD033646. <https://doi.org/10.1029/2020JD033646>
18. Cordeira J.M., Ralph F.M., Moore B.J. The development and evolution of two atmospheric rivers in proximity to western North Pacific tropical cyclones in October 2010. *Monthly Weather Review*. 2013. **141** (12). 4234–4255. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00019.1>
19. Davolio S., Della Fera S., Laviola S., Miglietta M.M., Levizzani V. Heavy Precipitation over Italy from the Mediterranean Storm “Vaia” in October 2018: Assessing the Role of an Atmospheric River. *Monthly Weather Review*. 2020. **148** (9). 3571–3588. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0021.1>
20. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. **137** (656). 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
21. Dettinger M.D., Ralph F.M., Rutz J.J. Empirical return periods of the most intense vapor transports during historical atmospheric river landfalls on the U.S. West Coast. *Journal of Hydrometeorology*. 2018. **19** (8). 1363–1377. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0247.1>
22. Dhana Lakshmi D., Satyanarayana A.N.V. Influence of atmospheric rivers in the occurrence of devastating flood associated with extreme precipitation events over Chennai using different reanalysis data sets. *Atmospheric Research*. 2019. **215**. 12–36. ISSN 0169–8095. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.016>
23. Doiteau B., Dournaux M., Montoux N., Baray J.-L. Atmospheric Rivers and Associated Precipitation over France and Western Europe: 1980–2020 Climatology and Case Study. *Atmosphere*. 2021. **12** (8). 1075. <https://doi.org/10.3390/atmos12081075>
24. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*. 2017. **30** (14). 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
25. Gorodetskaya I.V., Tsukernik M., Claes K., Ralph M.F., Neff W.D., Van Lipzig N.P.M. The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica. *Geophysical Research Letters*. 2014. **41** (17). 6199–6206. <https://doi.org/10.1002/2014GL060881>
26. Gorodetskaya I., Rowe P., Zou X., Chyhareva A., Krakovska S., Cordero R. Antarctic Peninsula warming and precipitation phase transition during atmospheric river events. DACH2022 Leipzig, Deutschland, 21–25 Mar 2022, DACH2022–309. <https://doi.org/10.5194/dach2022-309>
27. Guan B., Molotch N.P., Waliser D.E. et al. The 2010/2011 snow season in California's Sierra Nevada: role of atmospheric rivers and modes of large-scale variability. *Water Resources Research*. 2013. **49** (10). 6731–6743. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20537>
28. Guan B., Waliser D.E. Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 2015. **120** (24). 12514–12535. <https://doi.org/10.1002/2015JD024257>
29. Guan B., Waliser D.E. Tracking atmospheric rivers globally: Spatial distributions and temporal evolution of life cycle characteristics. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2019. **124** (23). 12523–12552. <https://doi.org/10.1029/2019JD031205>
30. Guan B., Waliser D.E., Ralph F.M. An inter-comparison between reanalysis and dropsonde observations of the total water vapor transport in individual atmospheric rivers. *Journal of Hydrometeorology*. 2018. **19** (2). 321–337. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0114.1>
31. Hurrell J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation. *Science (New York, N.Y.)*. 1995. **269**. 676–689. <https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676>
32. Ionita M., Viorica N., Guan B. Rivers in the sky, flooding on the ground: The role of atmospheric rivers in inland flooding in central Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. **24** (11). 2020. 5125–514. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5125-2020>
33. Kamae Y., Imada Y., Kawase H., Mei W. Atmospheric Rivers Bring More Frequent and Intense Extreme Rainfall Events Over East Asia Under Global Warming. *Geophysical Research Letters*. 2021. **48** (24). e2021GL096030. <https://doi.org/10.1029/2021GL096030>
34. Lavers D.A., Allan R.P., Wood E.F., Villarini G., Brayshaw D.J., Wade A.J. Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*. 2011. **38** (23). L23803. <https://doi.org/10.1029/2011GL049783>
35. Lavers D.A., Villarini G. The contribution of atmospheric rivers to precipitation in Europe and the United States. *Journal of Hydrology*. 2015. **522**. 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.010>
36. Lavers D.A., Villarini G. The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe. *Geophys. Res. Lett.* 2013. **40** (12). 3259–3264. <https://doi.org/10.1002/grl.50636>
37. Liberato M.L.R., Ramos A.M., Trigo R.M., Trigo I.F., Durán-Quezada A.M., Nieto R., Gimeno L. Moisture Sources and Large-Scale Dynamics Associated with a Flash Flood Event. *American Geophysical Union (AGU): Chapter 11*. 2012. 111–126. <https://doi.org/10.1029/2012GM001244>
38. Mattingly K.S., Mote T.L., Fettweis X. Atmospheric river impacts on Greenland Ice Sheet surface mass balance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2018. **123** (16). 8538–8560. <https://doi.org/10.1029/2018JD028714>
39. Michel C., Sorteberg A., Eckhardt S., Weijenborg C., Stohl A., Cassiani M. Characterization of the atmospheric environment during extreme precipitation events associated with atmospheric rivers in Norway — Seasonal and regional aspects. *Weather and Climate Extremes*. 2021. **34**. 100370. ISSN 2212–0947. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100370>
40. Mundhenk B.D., Barnes E.A., Maloney E.D. All-season climatology and variability of atmospheric river frequencies over the North Pacific. *Journal of Climate*. 2016. **29** (13). 4885–4903. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0655.1>
41. Neiman P.J., Ralph F.M., Wick G.A., Lundquist J.D., Dettinger M.D. Meteorological characteristics and overland precipitation impacts of atmospheric rivers affecting the West Coast of North America based on eight years of SSM/I satellite observations. *Journal of Hydrometeorology*. 2008. **9** (1). 22–47. <https://doi.org/10.1175/2007JHM855.1>
42. Ralph F.M., Neiman P.J., Wick G.A. et al. Dropsonde observations of total water vapor transport within North Pacific atmospheric rivers. *Journal of Hydrometeorology*. 2017. **18** (9). 2577–2596. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0036.1>
43. Ralph F.M., Neiman P.J., Wick G.A. Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific Ocean during the winter of 1997/98. *Monthly Weather Review*. 2004. **132** (7). 1721–1745. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1721:SACAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1721:SACAO>2.0.CO;2)
44. Ralph F.M., Neiman P.J., Wick G.A., Gutman S.I., Dettinger M.D., Cayan D.R., White A.B. Flooding on California's Russian River:

- role of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*. 2006. **33** (13). L13801. <https://doi.org/10.1029/2006GL026689>
45. Ralph F.M., Rutz J.J., Cordeira J.M., Dettinger M.D., Anderson M., Reynolds D., Schick L.J., Smallcomb C. A scale to characterize the strength and impacts of atmospheric rivers. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2019. **100** (2). 269–289. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0023.1>
 46. Rutz J.J., Steenburgh W.J., Ralph F.M. The inland penetration of atmospheric rivers over western North America: A Lagrangian analysis. *Monthly Weather Review*. 2015. **143** (5). 1924–1944. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00288.1>
 47. Schicker I., Radanovics S., Seibert P. Origin and transport of Mediterranean moisture and air. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 2009. **10**. 5089–5105. <https://doi.org/10.5194/acp-10-5089-2010>
 48. Sellars S.L., Kawzenuk B., Nguyen P., Ralph F. M., Sorooshian S. Genesis, pathways, and terminations of intense global water vapor transport in association with large-scale climate patterns. *Geophysical Research Letters*. 2017. **44** (24). 12, 465–475. <https://doi.org/10.1002/2017GL075495>
 49. Shields C.A. et al. Atmospheric River Tracking Method Intercomparison Project (ARTMIP): Project goals and experimental design. *Geoscientific Model Development*. 2018. **11** (6). 2455–2474. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2455-2018>
 50. Terpstra A., Gorodetskaya I. V., Sodemann H. Linking sub-tropical evaporation and extreme precipitation over East Antarctica: An atmospheric river case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. **126** (9). e2020JD033617. <https://doi.org/10.1029/2020JD033617>
 51. Thapa K., Endreny T.A., Ferguson C.R. Atmospheric rivers carry nonmonsoon extreme precipitation into Nepal. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2018. **123** (11). 5901–5912. <https://doi.org/10.1029/2017JD027626>
 52. Velloso Lyngwa R., Ahmad Nayak M. Atmospheric river linked to extreme rainfall events over Kerala in August 2018. *Atmospheric Research*. 2021. **253**. 105488. ISSN 0169–8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105488>
 53. Waliser D., Guan B. Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers. *Nat. Geosci.* 2017. **10**. 179–184. <https://doi.org/10.1038/NGEO2894>
 54. Yang Y., Zhao T., Ni G., Sun T. Atmospheric rivers over the Bay of Bengal lead to northern Indian extreme rainfall. *International Journal of Climatology*. 2018. **38** (2). 1010–1021. <https://doi.org/10.1002/joc.5229>
 55. Zhou Y., Kim H., Guan B. Life cycle of atmospheric rivers: Identification and climatological characteristics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2018. **123** (22). 12, 715–12, 725. <https://doi.org/10.1029/2018JD029180>
 56. Zhu Y., Newell R. E. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Monthly Weather Review*. 1998. **126** (3). 725–735. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0725:APAFMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0725:APAFMF>2.0.CO;2)

**O.A. Shcheglov¹, V.M. Shpyg¹,
N.R. Fomichev²**

¹ Ukrainian Hydrometeorological Institute
of the State Emergency Service of Ukraine and
the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² Taras Shevchenko National University of Kyiv

ATMOSPHERIC RIVERS: POTENTIAL INFLUENCE ON ATMOSPHERIC PROCESSES AND METEOROLOGICAL PHENOMENA OVER THE TERRITORY OF UKRAINE

The article presents an overview of publications on the atmospheric rivers (AR) issue. AR events in recent years have got more attention from researchers due to the association with extreme precipitation. Several parameters are used to identify AR event, such as integrated water vapor (IWV) and integrated water transport (IVT). Several approaches to identifying and tracking AR have been developed and mentioned in this article. The foreign experience regarding AR connection with the general circulation of the atmosphere was analyzed. Most of the research on AR are devoted to the Eastern North Pacific and the North Atlantic regions. The key role in the variation of AR

occurrence over different areas of those two regions is given to the interaction of the atmospheric circulation patterns, such as Arctic Oscillation and the Pacific North American Oscillation in the North Pacific region, and in the North Atlantic by the Arctic and North Atlantic Oscillation. There also stable connections of the AR phenomenon with the El Niño –Southern Oscillation and the Madden — Julian Oscillation are noted. A significant part of the works is devoted to studying AR influence on precipitation extremes. AR is typically associated with a low-level jet stream and is formed in the warm conveyor belt zone of a cyclone, mainly in extratropical latitudes. An overview of modern research on atmospheric moisture and the heavy precipitation formation conditions over the territory of Ukraine shows that the vast majority of scientific works are based on the series of individual cases, and therefore cannot give an answer to the question of the potential role of AR or moisture advection in the processes of precipitation formation on a regional scale in the climatic aspect. The relevance of studying the AR issue consists of three aspects: the connection of AR events with large-scale circulation; the role of AR in the transport of moisture at the macro- and mesoscale levels; the connection of the AR with extreme and dangerous meteorological phenomena, in particular, heavy precipitation.

Keywords: atmospheric river, atmospheric circulation, advection, moisture, dangerous weather phenomena.