

Атмосферні ріки та їх вплив на аномальні опади на заході України

Олександр Щеглов¹

к. геогр. н., ст. наук. співробітник,

¹ Українській гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ, Україна,
e-mail: shcheglov@w.uhmi.org.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-5702-6285>;

Віталій Шпиг¹

к. геогр. н., зав. відділу фізики атмосфери,

e-mail: vitol82@i.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-1055-7120>;

Тетяна Повшик²

студентка, кафедра метеорології та кліматології,

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
e-mail: tatianapovshik@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0006-3653-7469>;

Нікіта Фомічев²

студент, кафедра метеорології та кліматології,

e-mail: nikitafomich2002@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0004-2246-2326>

В роботі використано каталог атмосферних рік, ідентифікованих за методикою Д. Валісера та Б. Гуана для аналізу прояву атмосферних рік (АР) на території західної частини України. На прикладі днів з аномальними опадами (вище 95 процентилів для кожної метеостанції та кожного місяця) у Львівській та Волинській областях України показано, що в більшості випадків опади супроводжувалися явищем атмосферних рік на території України. Смуги АР при опадах найчастіше мали дугоподібну форму і простягалися з Північної Африки, через Середземне море та Туреччину до території України. Деяко рідше форма атмосферної ріки мала різко меридіональне простягання зі східної частини Середземного моря в напрямку України. Однак аналіз показав, що наявність атмосферної ріки, виділеної за методикою Д. Валісера та Б. Гуана не є виключною причиною випадіння інтенсивних опадів. Наприклад, частина аномальних опадів пов'язані з синоптичними ситуаціями (опади на холодних фронтах або фронтах оклюзії), при яких не виконуються всі умови для виділення АР як явища (розмір смуги, меридіональна складова потоку та інтенсивність потоку). У межах двох областей за період 1991-2020 рр. у більшості днів (в середньому по метеостанціям показник склав 72,36%) АР не відмічалось. При цьому опади за відсутності АР відмічалися в середньому у 32,2% днів (відносно загальної кількості днів). При наявності АР у регіоні приблизно у третині випадків опади не фіксувалися взагалі. У вибірці днів при відсутності АР та наявності АР приблизно рівна частка опадів 10-20 мм (2,73% проти 2,64%), 20-50 мм (1,37% проти 1,63%) та понад 50 мм (0,19% проти 0,16%). Навесні існує певна узгодженість із негативним добовими значенням індексу NAO саме у випадку орієнтації осі АР з південного заходу на територію України. Так, протягом 5 діб до моменту прояву АР на території України відмічаються значення індексу <-0.5, однак вони змінюються в процесі перебудови баричного поля. На основі обмеженої вибірки (94 випадки) не вдалося встановити закономірності ані стосовно залежності інтенсивності опадів від орієнтації АР, ані стосовно залежності кількості станцій з аномальними опадами від орієнтації АР. При порівнянні площі АР в межах як регіону дослідження, так і в межах території Східної та Південно-Східної Європи з кількістю опадів у західних областях України лінійної залежності не виявлено.

Ключові слова: атмосферна ріка, аномальні опади, перенесення вологи, циркуляція атмосфери.

Як цитувати: Щеглов Олександр. Атмосферні ріки та їх вплив на аномальні опади на заході України / Олександр Щеглов, Віталій Шпиг, Тетяна Повшик, Нікіта Фомічев // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 60. – С. 292-304. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-21>

In cites: Shcheglov Oлександр, Shpyg Vitalii, Povshyk Tetyana, Fomichev Nikita (2024). Influence of atmospheric rivers on extreme precipitation in western Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (60), 292-304. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-21> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. «Атмосферна ріка» (далі – АР), відповідно до Метеорологічного глосарію Американського метеорологічного товариства – довга і вузька смуга інтенсивного горизонтального перенесення водяної пари, що пов'язана зі струминними течіями низького рівня, що передують холодному фронту позатропічного циклону [1]. В останні роки інтерес до явища АР зростає, оскільки все більше авторів пов'язують його із екстремальними опадами [5-11]. Згідно [12] від трьох до п'яти АР присутні в кожній півкулі в будь-який момент часу, і вони зде-

більшого переважають над позатропічними акваторіями океанів. Більшість досліджень АР присвячені територіям, що безпосередньо межують з океаном, як важливим джерелом забезпечення атмосфери вологою [2-4]. Питання щодо міри впливу АР на режим опадів на територіях, що віддалені від океанічного узбережжя є менш вивченим. В даній статті ми намагаємося визначити взаємозв'язок аномальних опадів у західній частині України з АР в Східноєвропейському регіоні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Над океанічними поверхнями відбувається інте-

нсивне насичення повітря вологою, а особливості циркуляції в Північній частині Тихого океану та в Північній Атлантиці сприяють переміщенню вологих повітряних мас на континенти за рахунок західного перенесення [13]. Циклонічна активність в районі Північної Атлантики (додатна фаза NAO або ПАК – Північно-Атлантичного коливання) може супроводжуватися появою потужних АР, що передусім впливають на північну та північно-західну частину Європейського субконтиненту. За оцінками [4] близько 20-30% опадів на західному узбережжі Європи пов'язані з АР. За іншими оцінками з жовтня по квітень на заході Франції та Британії ця частка складає навіть до 40%. Особливу важливу роль АР відіграють у формуванні зимових опадів і особливо пов'язані з екстремальними випадками, наприклад, у Великобританії, на Піренейському півострові та у Норвегії. Так, в роботі [14] на основі вибірки випадків АР за 1979–2018 роки було показано, що південно-західна частина Норвегії є регіоном, де більшість екстремальних опадів (~78,5%) пов'язані з АР. Окрім Європейського континенту, АР досліджувались для низки інших регіонів планети [2, 3, 13, 15]. В роботі [22] проведено аналіз результатів двох кампаній літакового зондування і зроблено висновки щодо вкладу різних синоптичних ситуацій при наявності АР, циклонів, фронтів (або одночасно кількох або усіх перелічених об'єктів) в загальну суму опадів та їх інтенсивність в арктичній зоні. Вказується, що лише частина випадків АР пов'язана з наявністю одночасно і фронтів, і атмосферних рік (16% та 19% відповідно) [22]. Більш детально огляд праць щодо вивчення явища АР представлено в [23].

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Визначення повторюваності АР при наявності або відсутності аномальних опадів є важливим пунктом для подальшого відбору матеріалу для детального дослідження явища та його моделювання. Для території України такі оцінки на даний момент відсутні в науковій літературі. Оцінка того, як часто АР проявляються при аномальних опадах, або наскільки часто вони відсутні в окремо взятому регіоні важливі для виявлення неоднозначностей та протиріч. Виявлені аспекти важливо врахувати, перш ніж переходити до вивчення окремих випадків (case study).

Метою статті є оцінка частоти прояву атмосферних рік, виділених за методикою [13] при аномальних опадах в західних областях України (Львівська та Волинська області).

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі дослідження:

1. Оцінити повторюваність прояву АР на території України чи прилеглих територіях сусідніх з нею держав під час аномальних опадів у західних областях України.

2. Дослідити, чи існує зв'язок між інтенсивністю опадів на метеорологічних станціях у визначеному регіоні та просторовою орієнтацією осі АР, а також зв'язок між кількістю станцій з аномальними опадами та орієнтацією АР.

3. Отримати типові просторові конфігурації АР шляхом групування випадків за принципом геометричної подібності АР.

4. Дослідити, чи існують відмінності повторюваності прояву та просторової орієнтації атмосферних рік для різних сезонів при аномальних опадах у регіоні дослідження.

Матеріали та методи дослідження. В роботі використано дані Галузевого державного архіву матеріалів гідрометеорологічних спостережень Державної служби України з надзвичайних ситуацій, який входить до складу Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського, щодо добової кількості атмосферних опадів по метеорологічним станціям Волинської та Львівської областей за період 1991-2020 рр. Також залучалися дані щодо індексу циркуляції NAO з офіційного сайту National Weather Service Climate Prediction Center [16]. Проведено кореляційний аналіз місячних даних індексу NAO та місячної кількості опадів на обраних станціях. Розраховано порогові значення добової кількості опадів (95 перцентиль для кожної станції та кожного місяця) для виявлення аномальних випадків. У цій статті зроблено фокус на вибірці найбільш показових випадків аномальних опадів. До таких випадків були віднесені такі дні, в які добові суми опадів одночасно перевищували встановлені порогові значення на більш ніж 10 станціях регіону дослідження. Для зіставлення аномальних опадів у різних сезонах із епізодами АР в Східноєвропейському регіоні використано каталог випадків АР за методикою [13], який було створено на основі реаналізу ERA-Interim з електронного ресурсу [17]. Для методики ідентифікації АР [13] основою є інтегральне перенесення водяної пари (IVT). Показник IVT враховує меридіональну та зональну складову перенесення повітря та вологи [13, 18]. При цьому в каталозі [17] АР фіксуються у випадку, якщо виконуються наступні умови: 1) IVT має перевищувати значення 85-го перцентилья та не бути меншим 100 кг/м/с, 2) орієнтація потоку у зоні вказаних значень IVT має бути в межах відхилення на 45 градусів відносно напрямку на північ, 3) довжина АР має як мінімум в два рази перевищувати ширину.

Виклад основного матеріалу дослідження. Фактор ПАК відіграє важливу роль в формуванні та поширенні АР на територію Європи. Наприклад, при негативній фазі NAO, азорський антициклон послаблюється, а ісландський мінімум стає менш глибоким, як наслідок, інтенсивність західного перенесення в атмосфері над континентальною частиною Європи знижується. Натомість, траєкторії циклонів спрямовані більше на

південь Європи (Середземномор'я) [24], що забезпечує транспортування вологих повітряних мас саме в південну частину Європи. Враховуючи наявність меридіональної складової потоку при АР, такі умови є сприятливими для формування та прояву АР на території України. Розглянемо кореляційний зв'язок між опадами в регіоні дослідження та індексом NAO (табл. 1).

В табл. 1. наведені коефіцієнти кореляції з

Таблиця 1 / Table 1

Кореляція місячної кількості опадів з індексом NAO (вибірка 1991-2020 рр.),

показано лише значущі коефіцієнти /

Monthly precipitation correlation with the NAO index (1991-2020), only significant coefficients are shown

	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Володимир-Волинський		-0.38	-0.38			-0.40		-0.53				
Ковель				-0.41		-0.47		-0.49				
Любешів						-0.30		-0.48	-0.35			
Маневичі					-0.32	-0.46						
Світязь								-0.47		-0.34		
Броди			-0.40	-0.38		-0.32		-0.37				
Кам'янка-Бузька		-0.42	-0.43					-0.39				
Мостиська			-0.53		-0.31							
Рава-Руська			-0.36	-0.40								
Луцьк		-0.31						-0.40	-0.30			
Турка			-0.37	-0.43	-0.49							
Славське				-0.37	-0.53				-0.35			
Стрий			-0.53	-0.51	-0.45	-0.38				-0.34		
Дрогобич			-0.52	-0.48								
Яворів			-0.46	-0.42						-0.31		
Львів			-0.44	-0.36	-0.32							

індексом NAO та місячною кількістю атмосферних опадів на метеорологічних станціях у двох західних областях України – Волинській та Львівській за період 1991-2020 рр. Найбільше значущих коефіцієнтів кореляції Пірсона ($r < -0.361$ або $r > 0.361$, за рівня значущості $p=0.05$ [19]) відзначено у березні та квітні (10 та 9 станцій відповідно), дещо менше – у серпні (7), травні та червні (по 6). Усі значущі коефіцієнти є від'ємними і відгук аномально високої кількості опадів є саме на від'ємну фазу індексу NAO, тобто при циклонічній активності, зміщеній в район Середземного моря. Тобто циклонічна активність в Середземномор'ї та конфігурація висотної фронтальної зони у формі висотної улоговини над Західною Європою може формувати АР з Середземного моря через Анатолійський півострів, Чорне море та Україну. Сприятливим фактором формування АР в Східній та Південно-Східній Європі буде чергування зонального про-

цесу, як передумови інтенсивного перенесення повітряних мас із Атлантики, з подальшою перебудовою на меридіональний процес. Останній буде супроводжуватися формуванням висотної улоговини над Західною Європою та встановленням меридіонального перенесення у східній та південно-східній частині Європи.

Для того, щоб оцінити, наскільки часто АР проявляються на території України чи суміжній території під час аномальних опадів у західних областях України, сформовано вибірку найбільш показових випадків. Для фіксації аномальних опадів обрано невеликий регіон (дві західні області), оскільки спроба аналізувати процеси на території всієї країни призводить до певних складнощів, обумовлених віддаленістю регіонів. Наприклад, в такому випадку опади можуть фіксуватися в різні дні. Тому обрано ті випадки, для яких на понад 10-ти станціях з 16-ти одночасно спостерігалась аномальна кількість опадів (табл. 2).

Таблиця 2 / Table 2

Випадки з аномальною добовою кількістю опадів у Волинській та Львівській областях, весна /
Cases of extreme precipitation days in the Volyn and Lviv regions, spring

Дата	Число станцій з аномальною кількістю опадів	Середня добова кількість опадів, мм	Індекс NAO за 5 днів (мін...макс)	Орієнтація AP по відношенню до території України	Дата	Число станцій з аномальною кількістю опадів	Середня добова кількість опадів, мм	Індекс NAO за 5 днів (мін...макс)	Орієнтація AP по відношенню до території України
14.03.2013	16	39.1	-0.32...0.24	Із південного заходу	15.03.2013	16	29.7	-0.07...0.24	Із півдня
18.04.1999	16	39.1	-1.06...0.22	Із південного заходу	06.04.2000	16	40.7	-0.5...0.13	Із півдня
19.04.1999	16	49.8	-1.06...0.57	Із південного заходу	24.05.2013	15	43.2	-0.63...0.2	Із півдня
05.04.2000	16	38.8	-0.75...-0.06	Із південного заходу	08.03.2009	14	19.6	0.53...0.85	Із півдня
23.05.2013	15	40.8	-0.63...0.31	Із південного заходу	30.05.2020	14	31	0.17...0.61	Із півдня
05.05.2019	15	33.6	-1.73...-1.63	Із південного заходу	28.03.1993	13	16.3	0.22...0.82	Із півдня
05.03.2005	14	16.8	-1.26...-0.86	Із південного заходу	31.05.2014	13	34	-0.25...0.12	Із півдня
07.03.2009	14	20.8	0.53...0.89	Із південного заходу	25.03.2001	14	25.6	-0.32...0.03	Із заходу
20.04.1998	15	33.6	-0.58...0.42	Із південного сходу	26.05.2015	15	40	0.38...0.65	Не на території України
19.04.1998	14	30.2	-0.87...0.38	Із південного сходу	28.04.2019	14	27.7	-1.02...0.65	Не на території України
12.04.1995	13	18.2	0.59...1.08	Із південного сходу	15.05.2014	14	46.9	-1.25...0.02	Не на території України
					10.03.2006	13	14.7	-0.5...0.29	Не на території України

На кожній станції для кожного місяця визначено поріг добової суми опадів вище 95 перцентилі в якості показника аномально високої кількості опадів. Опираючись на результати кореляційного аналізу (див. табл. 1), можна помітити, що у весняний період року з березня по травень фіксується найбільша кількість метеостанцій, на яких місячні кількості опадів мають обернений зв'язок із NAO. Виходячи із міркувань, наведених кількома абзацами вище, щодо процесів, що можуть супроводжуватися появою AP на території Східної Європи і стати причиною аномальних опадів, сформовано вибірку аномальних опадів на метеорологічних станціях регіону дослідження.

Для того, щоб перевірити наявність та конфігурацію AP в дні з аномальними опадами, використано каталог випадків AP на основі даних реаналізу ERA-Interim за методикою Guan та Waliser [13] з електронного ресурсу [17]. Оцінити конфігурацію AP можна за допомогою даних змінної "shape" з netCDF-файлу даного каталогу. "Shape" являє собою набір даних у вузлах регулярної сітки, в яких були виявлені AP за пороговими значеннями IVT. Характеристика положення AP відносно території України в день з аномальними опадами приведена в останній колонці таблиці 2. Для даної вибірки випадків аномальних опадів на Заході України є кілька типових конфігурацій AP і лише 4 випадки із 23 не пов'язані із AP безпосередньо над територією України. Однак при цьому AP спостерігалися південніше України.

Враховуючи оцінки [4], щодо ролі NAO у формуванні AP, проаналізовано добові значення індексу в межах 5 діб до моменту появи AP на території Східної Європи. Як можна бачити з табл. 2, є певна узгодженість із негативним значенням індексу NAO саме у випадку орієнтації осі AP з південного заходу на територію України. Так, протягом 5 діб до моменту прояву AP на території України відмічаються значення індексу < -0.5 , однак вони змінюються в процесі перебування поля тиску.

З метою узагальнення отримано композитні карти форми AP у дні з аномальними опадами. Для цього дані з каталогу AP у вузлах сітки перетворено у бінарний формат за принципом: при наявності AP у вузлі сітки бінарному значенню присвоюється одиниця, при відсутності – нуль. Для кожної доби використовувалося одне поле з чотирьох доступних (00, 06, 12 або 18 UTC), що описувало максимальну площу AP за добу. Сума бінарних чисел обраховувалась окремо для 4 груп, попередньо виділених візуально за конфігурацією AP. Для більш якісної візуалізації використана кригінг-інтерполяція (рис. 1).

Найбільш повторюваний варіант конфігурації AP – з дугоподібною віссю від північних регіонів Африки (Алжир, Туніс), через Грецію та західну частину Туреччини, причорноморські регіони Румунії в напрямку до центральної та західної частини України (рис. 1а). Інша досить часта конфігурація – при якій вісь AP направлена чітко із півдня на північ зі Східного Середземномор'я, через Туреччину, Чорне море та центральну частину України (рис. 1б).

Характерною особливістю розглянутих епізодів з аномальними опадами є те, що вони не обов'язково пов'язані із від'ємною фазою NAO у добовому розрізі (див. табл. 2). Однак у більшості випадків за попередні 5 діб індекси NAO були з від'ємним знаком, що може свідчити про певну роль передісторії процесів в надходженні насичених океанічною вологою повітряних мас до Середземномор'я.

Здебільшого для інших сезонів спостерігаються ті ж самі конфігурації просторового положення AP, що і навесні. На рис. 2 наведено по два найбільш повторювані типи конфігурації AP для кожного сезону. Показовим моментом є те, що для літа другим найбільш повторюваним типом конфігурації є AP з віссю, що орієнтована зі сходу на північний захід України (32% випадків). Для літа також характерною є значна кількість епізодів аномальних опадів, при яких AP взагалі не проявлялася на території України чи навіть Східної Європи (близько 27%).

Ще більша кількість аномальних опадів, що не пов'язані з AP – восени (близько 32%), тоді як навесні таких випадків менше (близько 17%), а найменше – взимку (близько 8%). Такі випадки можуть бути пов'язані із випаданням опадів на активізованих холодних фронтах або фронтах оклюзії, які переміщуються із заходу та північного заходу [21]. Можна допустити, враховуючи умову, що для виділення AP, орієнтація потоку у зоні відповідних значень IVT має бути в межах відхилення на 45 градусів стосовно напрямку на північ, не є дивним відсутність AP при таких випадках, особливо при західній траєкторії переміщення фронту. При цьому найбільш типова конфігурація для усіх сезонів, а саме – орієнтація осі AP з південного заходу на північний схід по сезонам охоплює: навесні – 35%, влітку – близько 40%, восени – 64%, взимку – близько 58%.

З метою виявлення спільних рис, характерних для синоптичної ситуації на середньому рівні тропосфери (500 гПа), побудовано осереднені, або так звані «композитні» карти просторового розподілу геопотенціалу з використанням ресурсу [20] (рис. 3). При цьому, не зважаючи на відмінності у розмірах та траєкторіях баричних утворень (біля землі), випадки першої групи (див.

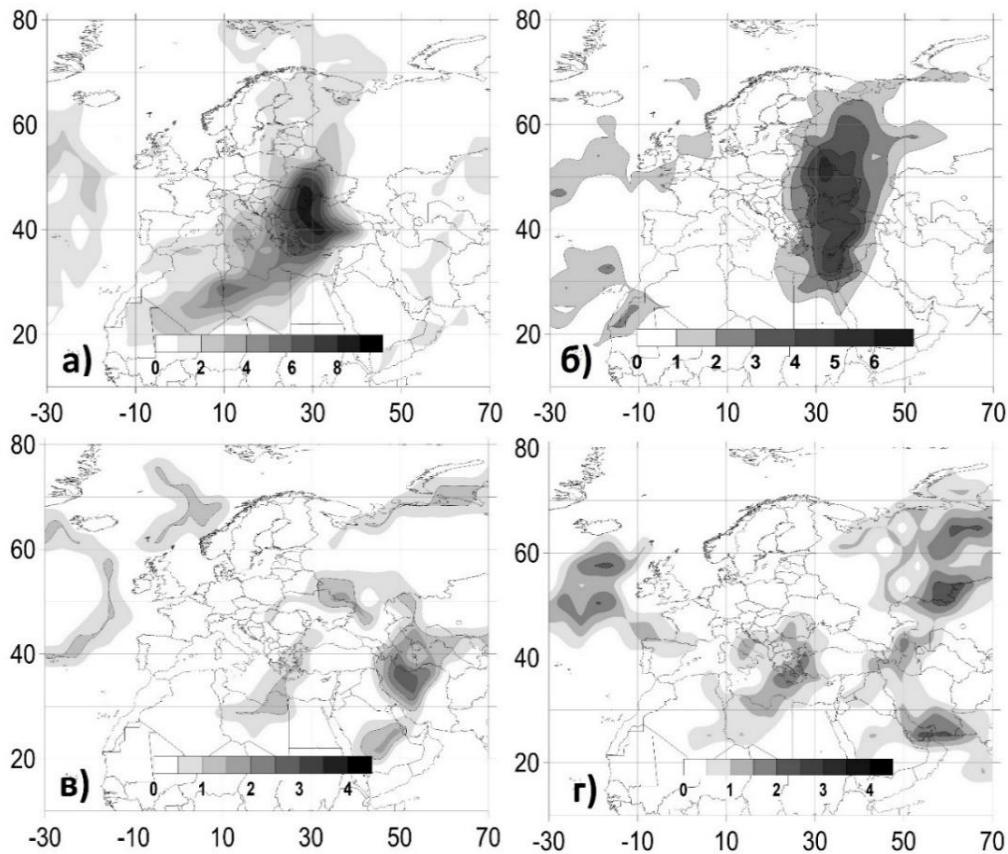


Рис. 1. Кількість випадків АР при аномальних опадах у Волинській та Львівській областях (див. табл. 2) при різній орієнтації осі АР: а) з південного заходу, б) з півдня, в) з південного сходу, г) поза територією України /

Fig. 1. The number of AR cases during extreme precipitation in the Volyn and Lviv regions (see Table 2) with different orientations of the AR axis: a) from the southwest, b) from the south, c) from the southeast, d) outside the territory of Ukraine

рис. 1а) загалом узгоджуються між собою в контексті положення та форми висотної фронтальної зони (далі – ВФЗ). ВФЗ формує висотну улоговину над Західною Європою, тоді як АР оконтурює її південну та південно-східну периферію (рис. 3а,б).

Дні із різко меридіональним орієнтуванням АР (див. рис. 1б) не обов'язково супроводжується синоптичними ситуаціями, відмінними від згаданої найбільш повторюваної групи. Навпаки, ці дні в хронологічному відношенні є продовженням тих процесів, наприклад, коли висотна улоговина зміщується із Західної Європи далі на схід та видовжується у південному напрямку, формуючи більш виражений меридіональний потік повітря (рис. 3а,б).

Виявлено всього 3 випадки навесні, що пов'язані із АР, орієнтованою із південного сходу на північний захід вздовж території України (рис. 1в). Ці випадки пов'язані із циклонічною діяльністю над Чорним морем при розвитку висотної улоговини або висотного циклону над південно-східною частиною Європи. Синоптична ситуація при цьому сприяє перенесенню во-

логи, в тому числі з Середземного або Червоного моря. Деяка частина випадків з аномальними опадами взагалі не пов'язана з наявністю АР в межах України (рис. 1г).

На рис. 4 графічно зображено всі випадки з аномальними опадами з вибірки в залежності від просторової орієнтації АР у вигляді діаграми розсіювання. Всього вибірка включає в себе 94 випадки із зафіксованою сумою опадів вище 95-го перцентилля на 11 станціях і більше.

Випадки було розділено за наявністю, положенням та формою АР в межах Атлантико-Європейського сектора та Східної Європи зокрема. Перша категорія випадків включає в себе дні, коли АР або відсутні, або знаходились далеко поза межами території України (21,3%). Випадки з південного заходу, при яких АР бере початок в районі північно-західної частини Африканського континенту або навіть північно-західного узбережжя склали 22,3% вибірки. Найбільш повторюваний варіант орієнтації АР (27,7%) – коли вона бере початок з центральної частини Середземного моря і через Балкани поширюється в напрямку України. Орієнтація АР з

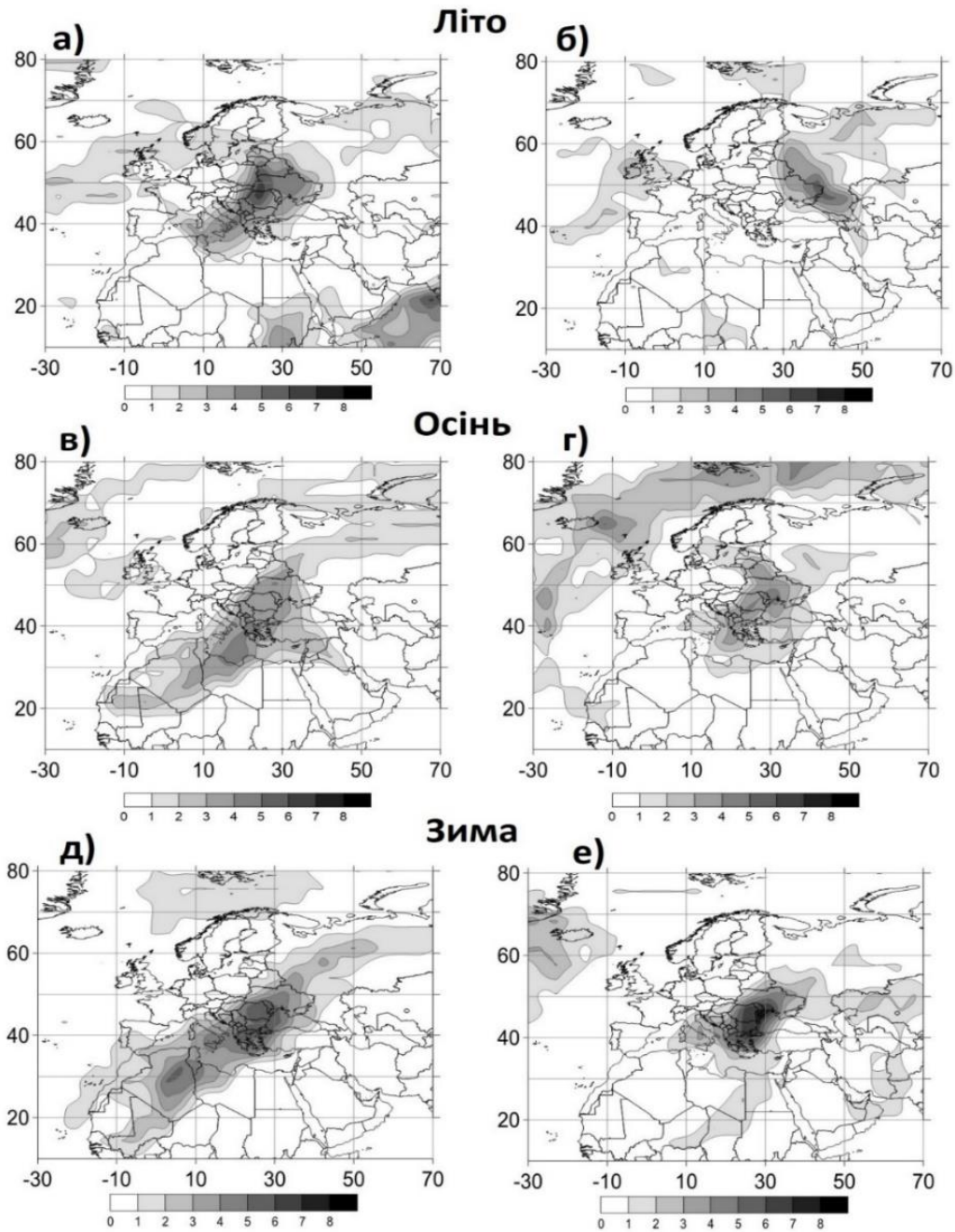


Рис. 2. Найбільш типові конфігурації просторового поширення АР при аномальних опадах у Волинській та Львівській областях при різній орієнтації осі АР (на шкалі – кількість випадків) / Fig. 3. The most typical configurations of the spatial distribution of AR during extreme precipitation in the Volyn and Lviv regions with different orientation of the AR axis (number of cases is on the scale)

півдня (початок зони – в районі східної частини Середземного моря) спостерігалась в 10,6% випадків. Аналогічна частка випадків припадає на АР з південного сходу. Найбільш рідкісна ситуація (7,4%) для даної вибірки випадків – коли зона АР починалась в межах континентальної частини Європи та перетинала західну частину України, поширюючись далі у північно-східному напрямку.

Оскільки вибірка випадків днів з аномальними опадами, для яких ми встановили форму та орієнтацію АР є досить обмеженою, додатково

порівнювались ряди даних опадів та було розраховано кількість точок, класифікованих як АР в межах сектору, який охоплює регіон дослідження: 22,5-27,0 град. сх. д.; 48,0-52,0 град. пн. ш. На рис. 5 наведено статистику щодо кількості днів з опадами або їх відсутності, що отримана шляхом осереднення по 16 метеорологічним станціям.

У межах сектору за період 1991-2020 рр. у більшості днів (72,36%) АР не відмічалось. При цьому опади за відсутності АР в межах сектору відмічалися в середньому у 32,2% днів (відносно

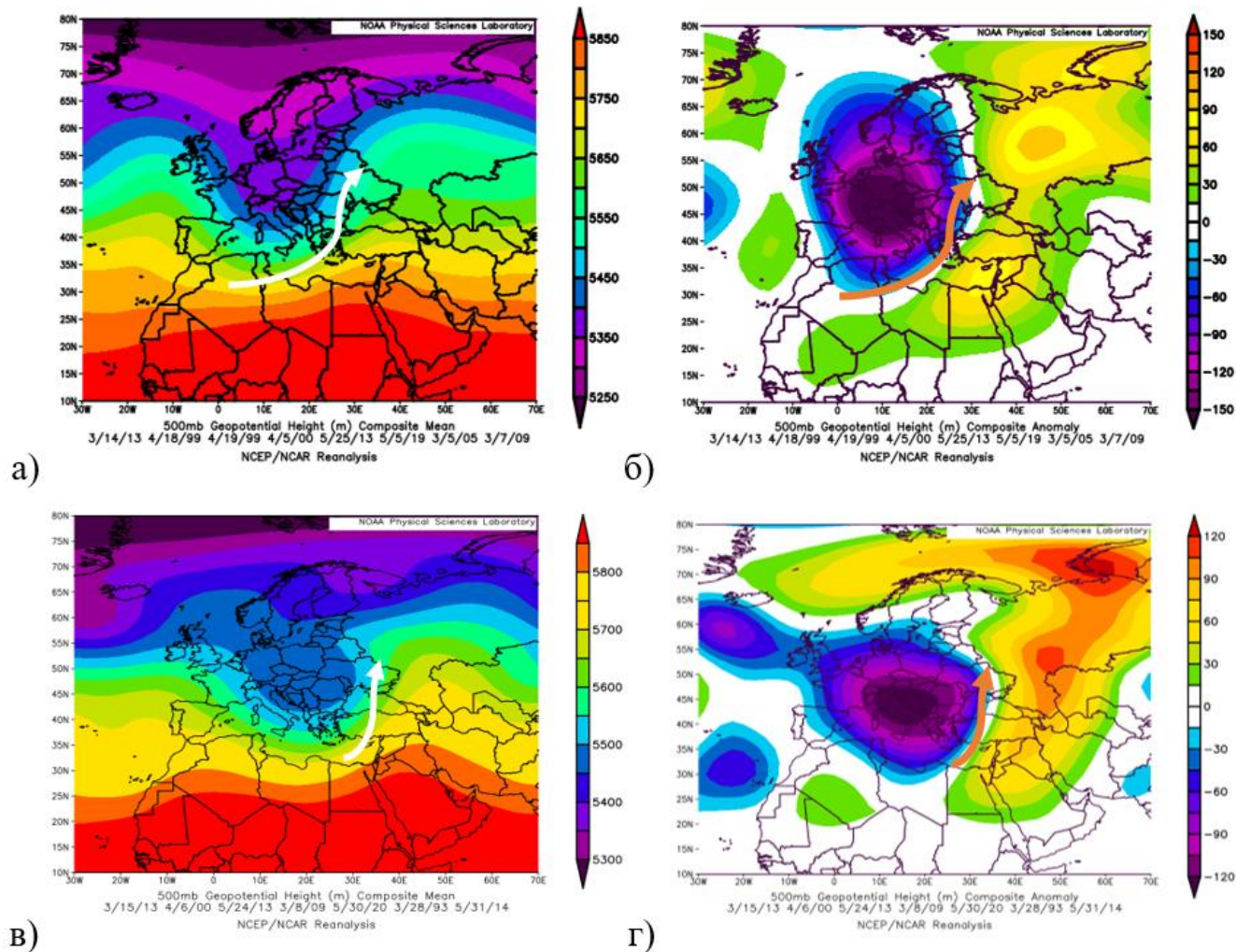


Рис. 3. «Композитні карти» та карти аномалій відносно 1991-2020 рр. на рівні 500 гПа для днів з аномальними опадами навесні при різних орієнтаціях АР (на рисунку відображені кривими): з південного-заходу на північний схід (а – композитна, б – аномалія) та з півдня на північ (в – композитна, г – аномалія) /

Fig. 2. Composite maps anomalies maps (relative to 1991-2020) at the 500 hPa level for days with extreme precipitation in spring at different orientations of AR (shown by curves in the figure): southwest to northeast (a – composite, b – anomaly) and south to north (c – composite, d – anomaly)

загальної кількості днів). Наявність АР в секторі зафіксована у 27,64% днів. При наявності АР у регіоні приблизно у третині випадків опади не фіксувалися взагалі. Також варто відзначити, що інтенсивні опади зафіксовано як при наявності, так і при відсутності АР у межах зазначеного регіону. Таким чином, виходячи із рис. 5, гіпотезу щодо обов'язкової наявності АР в межах регіону, де випадають аномальні опади варто відкинути. Так, у вибірці днів при відсутності АР та наявності АР приблизно рівна частка опадів 10-20 мм (2,73% проти 2,64%), 20-50 мм (1,37% проти 1,63%) та понад 50 мм (0,19% проти 0,16%). Оскільки каталог АР [44] не містить поля з розрахованою характеристикою ІВТ, в межах даної статті не можемо відповісти на питання стосовно залежності інтенсивності опадів від ІВТ. Порівняння ж площі АР в межах регіону з

інтенсивністю опадів на метеорологічних станціях показує суттєвий розкид значень відносно лінії розсіювання, а отже, й відсутність лінійної залежності.

Очевидним висновком із рис. 5 також є те, що наявність АР над територією регіону дослідження не є причиною випадіння інтенсивних опадів. В той самий час відсутність АР не означає неможливість випадання аномальних опадів. Дві останні тези мають місце у випадку виділення АР за методикою [13]. В цілому результат не суперечить висновкам, зробленим в роботі [22]. Таким чином, можна казати про ймовірність впливу АР на окремо взяті випадки з аномальними опадами, однак це потребує детального аналізу синоптичної ситуації.

Висновки. Таким чином, в статті вперше для низки північно-західних областей України

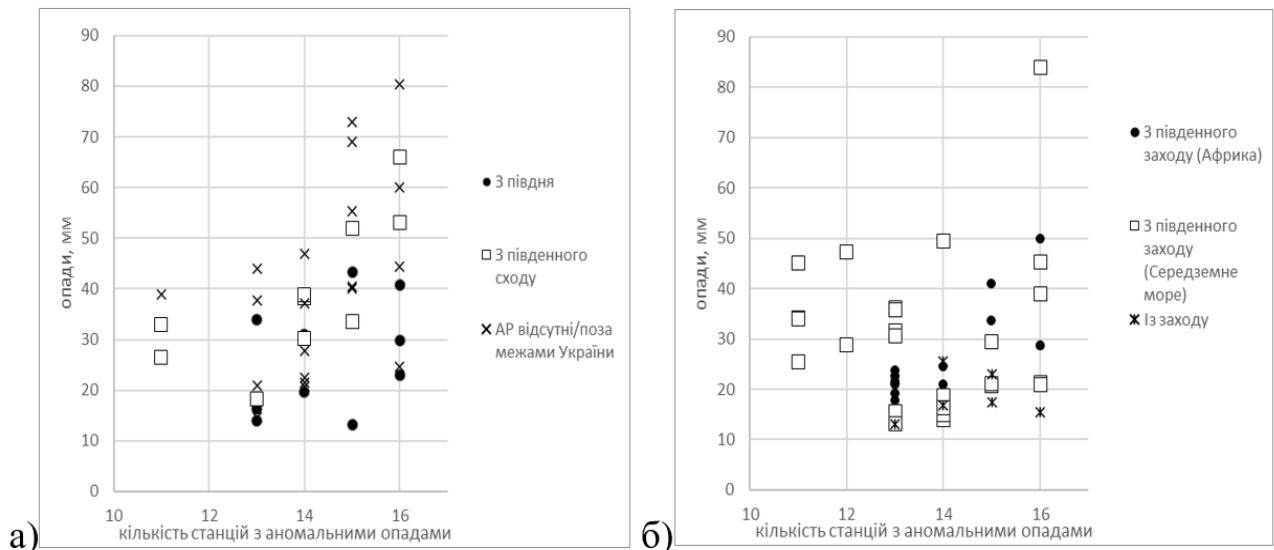
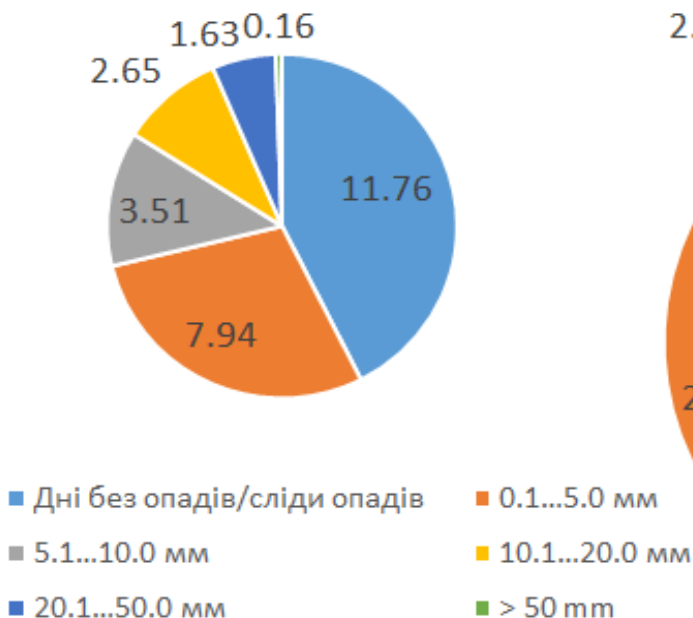


Рис. 4. Число станцій з опадами вище порогу аномальних опадів та середня добова кількість опадів на цих станціях в залежності від орієнтації АР: а) з півдня, з південного сходу та за відсутності АР; б) з південного заходу (початок АР в районі північної частини Африки), з південного заходу (початок АР в районі східної частини Середземного моря) та із заходу /
 Fig. 4. The number of stations with extreme precipitation and the average daily precipitation at these stations depending on the orientation of AR: a) from the south, from the southeast and in the absence of AR; b) from the southwest (the beginning of the AR is the northern part of Africa), from the southwest (the beginning of the AR is the eastern part of the Mediterranean Sea) and from the west

Наявність АР (27,64 % випадків)



Відсутність АР (72,36 % випадків)

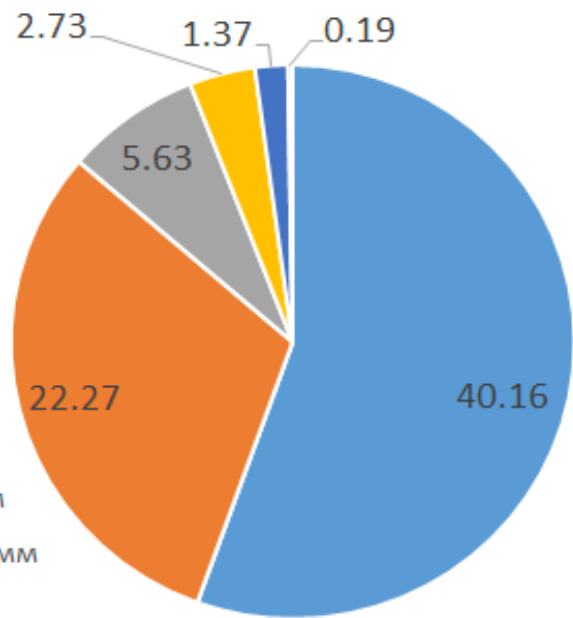


Рис. 5. Частка днів без опадів та днів з опадами різної градації, % від загальної кількості днів за період 1991-2020 рр. /

Fig. 5. Share of days without precipitation and days with different precipitation rate, % of the total number of days for the period 1991-2020

здійснено оцінку взаємопов'язаності явища АР з аномальними атмосферними опадами. Відповідно до поставлених задач отримано наступні висновки:

1. Дні з аномальними опадами у Львівській та Волинській областях України в більшості випадків супроводжувалися епізодами АР на території України. При цьому опади, які не відно-

сяться до аномальних, за відсутності АР в межах регіону відмічалися на станціях в середньому частіше (32,2% днів відносно загальної кількості днів), ніж за наявності АР (27,64% днів).

2. Виділено три типові просторові конфігурації АР під час аномальних опадів у західних областях України: 1) вісь із південного заходу: з північних регіонів Африки або Середземного моря через Балкани та територію України; 2) із півдня, меридіонально-орієнтована АР: зі східної частини Середземного моря через Туреччину, Чорне море на територію України; 3) із південного сходу: через Каспійське море та Кубань на територію України. Лише в кількох випадках при аномальних опадах орієнтування АР було із заходу. Найчастіше зона прояву АР має дугоподібну форму і простягається з Північної Африки, через Середземне море та Туреччину до території України.

3. На основі вибірки, яка використовувалася у даному дослідженні (94 випадки), не вдалося

встановити закономірності ані стосовно залежності інтенсивності опадів від орієнтації АР, ані стосовно залежності кількості станцій з аномальними опадами від орієнтації АР. Також аналіз показав, що наявність АР, виділеної за методикою Д. Валісера та Б. Гуана, не є виключною причиною випадіння інтенсивних опадів. Наприклад, частина аномальних опадів пов'язані з синоптичними ситуаціями (опаді на холодних фронтах або фронтах оклюзії), при яких не виконуються всі умови для виділення АР як явища (розмір смуги, меридіональна складова потоку та інтенсивність потоку).

4. Сезонні відмінності щодо типової конфігурації атмосферних рік при аномальних опадах не є вираженими. Загалом такі випадки визначаються станом великомасштабних процесів в Атлантико-Європейському секторі, і найчастіше узгоджуються із від'ємною фазою Північно-Атлантичного коливання за декілька днів до появи АР та аномальних опадів у регіоні.

Список використаної літератури

1. *Atmospheric River. Glossary of Meteorology. American Meteorological Society. 2020. URL: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Atmospheric_river (дата звернення: 28.10.2023)*
2. *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. Vol. 29 (13). 2016. pp. 4885–4903. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0655.1>*
3. *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. Vol. 49 (10). 2013. pp. 6731–6743. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20537>*
4. *Lavers D.A., Villarini G. The contribution of atmospheric rivers to precipitation in Europe and the United States. Journal of Hydrology. Vol. 522. 2015. pp. 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.010>*
5. *Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. and Coauthors. Dropsonde observations of total water vapor transport within North Pacific atmospheric rivers. Journal of Hydrometeorology. Vol. 18(9). 2017. pp. 2577–2596. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0036.1>*
6. *Benedict I., Ødemark K., Npien T., Moore R. Large-scale flow patterns associated with extreme precipitation and atmospheric rivers over Norway. Mon. Weather Rev. Vol. 147(4). 2019. pp. 1415–1428. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0362.1>*
7. *Liberato M.L.R., Ramos A.M., Trigo R.M., Trigo I.F., Dur'an-Quesada 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. pp. 111–126. <https://doi.org/10.1029/2012GM001244>*
8. *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. Vol. 100(2). 2019. pp. 269–289. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0023.1>*
9. *Waliser D., Guan B. Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers. Nat. Geosci. Vol. 10. 2017. pp. 179–184. <https://doi.org/10.1038/NGEO2894>*
10. *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. Vol. 33(13). 2006. L13801. <https://doi.org/10.1029/2006GL026689>*
11. *Lavers D.A., Villarini G. The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe. Geophysical Research Letters. Vol. 40(12). 2013. pp. 3259–3264. <https://doi.org/10.1002/grl.50636>*
12. *Zhu Y., Newell R. E. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. Monthly Weather Review. Vol. 126(3). 1998. pp. 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)*
13. *Guan B., Waliser D. E. Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. J. Geophys. Res.-Atmos. Vol. 120(24). 2015. pp. 12514–12535. <https://doi.org/10.1002/2015JD024257>*
14. *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. Vol. 34. 2021. 100370. ISSN 2212-0947. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100370>*

15. 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>
16. National Weather Service Climate Prediction Center. URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov> (дата звернення: 28.11.2022).
17. Guan B. AR Reanalysis Database. URL: <https://ucla.box.com/ARcatalog> (дата звернення: 28.10.2023).
18. 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*. Vol. 24(11). 2020. pp. 5125–514. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5125-2020>
19. Aspelmeier, J. (2005). Table of critical values for Pearson's r. Retrieved from: <https://pdf4pro.com/amp/view/table-of-critical-values-for-pearson-s-r-59198f.html> (Дата звернення: 01.12.2023)
20. Kalnay et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
21. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 рр.). За редакцією В.М. Лінінського, В.І. Осадчого, В.М. Бабіченко. – Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут. Державна гідрометеорологічна служба. – К.: Ніка-Центр, 2006. – 312 с.
22. Lauer, M. and Rinke, A. and Gorodetskaya, I. and Sprenger, M. and Mech, M. and Crewell, S. Influence of atmospheric rivers and associated weather systems on precipitation in the Arctic. *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 8705–8726, 2023 <https://doi.org/10.5194/acp-23-8705-2023>
23. Щеглов О.А., Шниг В.М., Фомічев Н.Р. Атмосферні ріки: потенційний вплив на атмосферні процеси та метеорологічні явища на території України. *Метеорологія, гідрологія, моніторинг довкілля*. 2022. №2. С. 4-10.
24. Семенова І.Г., Нажмудінова О.М. Регіональна синоптика: підручник. Одеський державний екологічний університет. Одеса, 2019. 212 с.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Influence of atmospheric rivers on extreme precipitation in western Ukraine

*Oleksandr Shchekhlov*¹

PhD (Geography), Senior Research,

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

*Vitalii Shpyg*¹

PhD (Geography), Head of Department of Atmospheric Physics;

*Tetyana Povshyk*²

Student, Department of Meteorology and Climatology,

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;

*Nikita Fomichev*²

Student, Department of Meteorology and Climatology

ABSTRACT

Formulation of the problem. In recent years, interest in the atmospheric river (AR) phenomenon is growing, as more and more researchers associate it with extreme precipitation. Relatively few works are devoted to the assessment of the influence of atmospheric rivers on precipitation in Eastern Europe.

The purpose of the article is to assess the occurrence of atmospheric river events during extreme precipitation in the western regions of Ukraine (Lviv and Volyn regions) and to analyze the geographical features of the spatial distribution of atmospheric river bends during extreme precipitation.

Methods. We used the catalog of atmospheric rivers identified according to the methodology of D. Walliser and B. Guan to analyze the occurrence of atmospheric river events on the territory of the western part of Ukraine. Also, we used the sample of days with extreme precipitation (greater than 95th percentile for each meteorological station and each month) in the Lviv and Volyn oblasts of Ukraine to match it with AR episodes. It is shown that in most cases extreme precipitation events were accompanied by the atmospheric river phenomenon detected on the territory of Ukraine or the bordering territories.

Results. The typical shape of atmospheric river bends during extreme precipitation most often is arc-shaped while the typical spatial coverage stretched from North Africa through the Mediterranean Sea and Turkey to the territory of Ukraine. Less often, the form of detected AR area had the form of a meridional bend extending from the eastern part of the Mediterranean Sea towards Ukraine. However, the analysis showed that the presence of atmospheric river phenomenon is not the exceptional reason for extreme precipitation. Part of the extreme precipitation events is associated with specific synoptic situations (precipitation caused by cold fronts or occluded fronts) whereas conditions for atmospheric

river detection are not fulfilled (bend size, meridional flow component, flow intensity). Atmospheric river episodes were not observed at most of the days of general sample (on average 72.36%) within the study area based on the period of 1991–2020. At the same time, precipitation events in the absence of AR were recorded on average in 32.2% of days (relative to the total number of days). In the presence of AR, precipitation was not recorded in about a third of cases. In the sample of days in the absence of AR and in the presence of AR, the proportion of precipitation of different gradations is as follows: for 10–20 mm is 2.73% and 2.64% respectively; for 20–50 mm is 1.37% and 1.63%; more than 50 mm is 0.19% against 0.16%. In the spring, there is a certain consistency with the negative daily value of the NAO index and the AR axis orientation from the southwest to the territory of Ukraine. Thus, within 5 days before the localization of AR on the territory of Ukraine, values of the NAO index <-0.5 are noted, but the index changes in the process of the pressure field change. Based on a limited sample of extreme precipitation (94 cases), we assessed the correspondence of the precipitation rate to the area of atmospheric rivers and their features of the spatial orientation. ARs extending from the southwest (north of Africa) and the south (western part of the Mediterranean Sea) are characterized by the greatest recurrence. No regularities were found either concerning the dependence of the precipitation rate on the orientation of the AR, or concerning the dependence of the number of stations with extreme precipitation on the orientation of the AR. No linear dependence was found for the area of atmospheric rivers within both the study region and the territory of Eastern and Southeastern Europe with daily precipitation in the western regions of Ukraine.

Keywords: atmospheric river, extreme precipitation, moisture transfer, atmospheric circulation.

References

1. Atmospheric River (2020). Glossary of Meteorology. American Meteorological Society. Retrieved from: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Atmospheric_river
2. Mundhenk, B. D., Barnes, E. A., & Maloney, E. D. (2016). All-Season Climatology and Variability of Atmospheric River Frequencies over the North Pacific. *Journal of Climate*, 29(13), 4885–4903. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0655.1>
3. Guan, B., N. P. Molotch, D. E. Waliser, E. J. Fetzer, and P. J. Neiman (2013), The 2010/2011 snow season in California's Sierra Nevada: Role of atmospheric rivers and modes of large-scale variability, *Water Resour. Res.*, 49, 6731–6743, <https://doi.org/10.1002/wrcr.20537>
4. Lavers, D.A., Villarini, G. (2015). The contribution of atmospheric rivers to precipitation in Europe and the United States. *Journal of Hydrology*. Vol. 522. pp. 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.010>
5. Ralph, F. M., Iacobellis, S. F., Neiman, P. J., Cordeira, J. M., Spackman, J. R., Waliser, D. E., Wick, G. A., White, A. B., & Fairall, C. (2017). Dropsonde Observations of Total Integrated Water Vapor Transport within North Pacific Atmospheric Rivers. *Journal of Hydrometeorology*, 18(9), 2577–2596. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0036.1>
6. Benedict, I., Ødemark, K., Nipen, T., & Moore, R. (2019). Large-Scale Flow Patterns Associated with Extreme Precipitation and Atmospheric Rivers over Norway. *Monthly Weather Review*, 147(4), 1415–1428. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0362.1>
7. Liberato, M.L.R., Ramos, A.M., Trigo, R.M., Trigo, I.F., Durán-Quesada, A.M., Nieto, R. and Gimeno, L. (2012). Moisture Sources and Large-Scale Dynamics Associated With a Flash Flood Event. In *Lagrangian Modeling of the Atmosphere* (eds J. Lin, D. Brunner, C. Gerbig, A. Stohl, A. Luhar and P. Webley). <https://doi.org/10.1029/2012GM001244>
8. Ralph, F. M., Rutz, J. J., Cordeira, J. M., Dettinger, M., Anderson, M., Reynolds, D., Schick, L. J., & Smallcomb, C. (2019). A Scale to Characterize the Strength and Impacts of Atmospheric Rivers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(2), 269–289. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0023.1>
9. Waliser, D., Guan, B. (2017). Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers. *Nat. Geosci.* 10. 179–184. <https://doi.org/10.1038/NGEO2894>
10. Ralph F.M., Neiman P.J., Wick G.A., Gutman S.I., Dettinger M.D., Cayan D.R., White A.B. (2006). Flooding on California's Russian River: role of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*.33(13), L13801. <https://doi.org/10.1029/2006GL026689>
11. Lavers, D.A., Villarini, G. (2013). The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe. *Geophysical Research Letters*, 40(12), 3259–3264. <https://doi.org/10.1002/grl.50636>
12. Zhu, Y., Newell, R. E. (1998). A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Monthly Weather Review*. 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)
13. Guan, B., Waliser, D. E. (2015). Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *J. Geophys. Res.-Atmos*, 120(24), 12514–12535. <https://doi.org/10.1002/2015JD024257>
14. Michel, C., Sorteberg, A., Eckhardt, S., Weijenborg, C., Stohl, A., Cassiani, M. (2021). Characterization of the atmospheric environment during extreme precipitation events associated with atmospheric rivers in Norway - Seasonal and regional aspects. *Weather and Climate Extremes*, 34, 100370. ISSN 2212-0947. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100370>
15. Gorodetskaya, I., Rowe, P., Zou, X., Chyhareva, A., Krakovska, S., Cordero, R. (2022). 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>
16. National Weather Service Climate Prediction Center. Retrieved from: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>
17. Guan, B. (2021). AR Reanalysis Database. Retrieved from: <https://ucla.box.com/ARcatalog>.

18. Ionita, M., Viorica, N., Guan, B. (2020). 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), 5125–514. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5125-2020>
19. Aspelmeier, J. (2005). Table of critical values for Pearson's *r*. Retrieved from: <https://pdf4pro.com/amp/view/table-of-critical-values-for-pearson-s-r-59198f.html> (Дата звернення: 01.12.2023)
20. Kalnay et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
21. Lipinsky, V.M., Osadchiy, V.I., Babichenko, V.M. (Eds.) (2006). *Hazardous meteorological phenomena on the territory of Ukraine during the last twenty years (1986-2005)*. Ukrainian Research Hydrometeorological Institute. State hydrometeorological service. Kyiv, Nika-Center. [in Ukrainian]
22. Lauer, M. and Rinke, A. and Gorodetskaya, I. and Sprenger, M. and Mech, M. and Crewell, S. (2023). Influence of atmospheric rivers and associated weather systems on precipitation in the Arctic. *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 8705–8726, <https://doi.org/10.5194/acp-23-8705-2023>
23. Shcheglov, O.A., Shpyg, V.M., Fomichev, N.R. (2022). Atmospheric rivers: potential impact on atmospheric processes and meteorological phenomena on the territory of Ukraine. *Meteorology, hydrology, environmental monitoring*, 2, 4-10. [in Ukrainian]
24. Semenova I.G., Nazhmudinova O.M. (2019). *Regional synoptics: textbook*. Odesa State Environmental University. Odesa. [in Ukrainian]

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 28 December 2023

Accepted 2 February 2024