DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.3.5>

УДК 551.577.21; 551.501.86

Сокур К.С., Паламарчук Л.В.

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, м. Київ

СУПУТНИКОВІ ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ОПАДІВ ТА ЇХ ВЕРИФІКАЦІЯ

Головним завданням у дослідженні було встановлення доцільності роботи з даними дистанційного зондування атмосфери (супутникові дані GPM IMERG), а саме оцінювання визначеної дистанційно інтенсивності окремих подій дуже сильних опадів (50 мм і більше за 12 годин і менше), що спостерігаються над територією України. Для цього. проводилася верифікація супутникових даних результатами спостережень наземних станцій (дані плівіографів). Дослідження полягало в опрацюванні даних та карт-продуктів IMERG, побудові на їх основі таблиць та графіків, розрахунку статистичних індексів та їх оцінюванні. Всього було використано 7 статистичних параметрів, а саме: систематична похибка (*bias*), середня абсолютна помилка (*e*), середня квадратична похибка (σ), коефіцієнт кореляції Пірсона (*r*), фактор 2-х (FA2), фактор 5-ти (FA5), індекс узгодженості (*Index of Agreement*, IOA).

Розрахунок статистичних параметрів проводився як для окремих випадків дуже сильних опадів, так і для добових сум опадів. Встановлено, що зв'язки супутникового та наземного рядів даних статистично не значимі. Дані IMERG при оцінці окремих подій дуже сильних опадів над рівнинною Україною демонструють суттєві похибки, що може бути спричинено як невідповідністю дистанційних спостережень самих по собі для такого роду використання, так і зміщенням наземних точок вимірювання у координатній сітці супутникових даних, або часу визначення величин інтенсивності та сум опадів дистанційними та наземними спостереженнями. Тому існує необхідність пошуку нових та вдосконалення запропонованих методичних підходів до аналізу супутникової інформації.

Ключові слова: дистанційні методи вимірювання опадів, дуже сильні опади, GPM IMERG, верифікація, статистичні параметри та індекси.

Вступ. Кількість атмосферних опадів та режим їх випадання є визначальним чинником формування режиму зволоження будь якого регіону і однією з основних характеристик його клімату. На тлі сучасних кліматичних змін дослідники відмічають збільшення кількості випадків небезпечних та стихійних метеорологічних явищ, в тому числі явищ пов'язаних з формуванням, випаданням та нерівномірним просторово-часовим розподілом опадів. Незважаючи на локальний характер таких явищ як, наприклад, сильні опади, екстремальність їх проявів призводить до значних матеріальних збитків, особливо у великих містах, створюючи загрози для населення, сприяє збільшенню площинної та лінійної ерозії, формуванню паводків та селевих потоків та ін. У зв'язку з цим, дослідження особливостей умов утворення небезпечних та сильних опадів в окремих регіонах, визначення величин, що дозволяють оцінювати їх динаміку та основні параметри випадання є актуальними.

На території України у теплий періоду року значна частина опадів носить зливовий характер і супроводжується несприятливими атмосферними явищами та фізико-географічними процесами. Для оцінювання таких процесів та прогнозування їх наслідків, необхідні дані про суми опадів, їх інтенсивність, зміну величин у часі та просторі. Отримати інструментальні дані можливо такими способами: а) у результаті стандартних метеорологічних вимірювань з використанням плівіографа; б) радарними вимірюваннями; в) використанням супутникової інформації. У [1] вказано на переваги, недоліки та доступність даних отриманих першими двома способами. На території України є 34 метеорологічні станції, де встановлено плівіографи. Вимірювання сум та інтенсивності опадів виконується тут з достатньою достовірністю для окремої точки простору, але при

цьому не забезпечуються повні дані про просторовий розподіл величин. На основі радарних спостережень можливо отримати просторовий розподіл, але точність результатів недостатня, крім того існують труднощі в отриманні самих радарних даних. Очевидною є необхідність пошуку таких масивів даних, які з достатньою точністю представляють просторово-часовий розподіл опадів у досліджуваному регіоні і задовольнити такі вимоги можуть результати супутникових спостережень.

У останнє десятиріччя з'явилися роботи, переважно зарубіжних авторів, що висвітлюють проблеми відновлення полів опадів, їх сум та інтенсивності за супутниковими даними. Такі роботи виконувалися переважно у рамках крупних міжнародних проектів таких як GPCP (the Global Precipitation Climatology Project), TRMM (the Tropical Rainfall Measuring Mission) та інших. У роботах [8,11] показано оцінювання та порівняння супутникових та наземних спостережень за опадами, розглядаються результати співставлення значень інтенсивності та сум опадів отриманих різними способами, а також вимоги Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) до супутникової інформації про характеристики опадів залежно від мети їх використання.

Сучасні супутникові дані про опади мало використовуються у дослідженні опадів на території України, тому запропоноване у роботі використання результатів дистанційних спостережень може допомогти у вирішенні багатьох практичних задач і проведенні розрахунків параметрів, що визначають режим зволоження.

Мета дослідження – оцінювання можливості використання супутникових даних про інтенсивність та суми опадів, що представлені на (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>) для теплого періоду року на окремих метеорологічних станціях території України; верифікація супутникових даних результатами наземних вимірювань та статистична оцінка сумісності рядів даних встановлених різними способами. На основі отриманих результатів будуть сформульовані висновки про можливе подальше використання у розрахунках параметрів опадів для оцінок несприятливих погодних явищ та для визначення трендів величини за тривалі періоди часу.

Використані дані та методи їх обробки. У роботі використані дані супутникових спостережень (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>) - супутниковий масив опадів IMERG версії 6B-Final, що базується на однойменному алгоритмі (Integrated MultisatellitE Retrievals from GPM) програми GPM. В основі алгоритму лежать дані двох інструментів (двухчастотного радіолокатора і багатоканального пасивного радіометра) основного супутника програми - GPM Core Observatory, виведеного на прецесуючу орбіту з нахилом 65°, періодом близько 95 хв, висотою 407 км. Крім цього, в алгоритмі IMERG акумулюються дані низки інших доступних пасивних мікрохвильових радіометрів, які піддаються обробці і калібруванню (NOAA AMSU, MetOp, DMSP і ін. – зараз 10 інструментів). В областях, що не охоплені траєкторіями супутників з мікрохвильовими радіометрами дані про опади розраховуються за допомогою інфрачервоних радіометрів з геостаціонарних супутників (Meteosat, GOES, Himawari і ін.) відкаліброваних по GPM (GPM constellation). Також, одним з ключових елементів GPM є система обробки опадів PPS, а також валідація з наземними даними (GPM Ground Validation). Оцінки опадів від пасивних мікрохвильових датчиків, що входять в групу GPM, розраховуються з використанням алгоритму профілювання Годдарда (Goddard Profiling Algorithm (GPROF2017) версії 2017 року, прив'язуються до сітки, інтеркалібруються до продукту GPM Combined Radar Radiometer Analysis (з кліматологічним калібруванням GPCP) та об'єднуються у 30-хв поля $0.1 \times 0.1^\circ$. Дані надаються з номінальними півгодинними інтервалами по UTC, кожен набір даних 3IMERGHH являє собою 30-хвилинний період часу починаючи з 00 чи 30 хв. Таким чином, перше зображення доби включає в себе дані за інтервал 00:00:00-00:29:59 UTC. Сітка, на якій представлено кожне поле значень, являє собою $0.1 \times 0.1^\circ$ lat/lon (10 км / $0,1^\circ$), її розмір становить 1800×3600. Існує декілька циклів роботи системи залежно від часу спостережень: спочатку швидка оцінка (IMERG Early Run), потім послідовне надання більш точних оцінок по мірі надходження більшої кількості даних (IMERG Late Run). На останньому етапі використовуються місячні дані датчиків для створення продукту дослідницького рівня (IMERG Final Run).

Дані наземних станцій – дані кількості та інтенсивності опадів за піввіографом,

отримані з метеорологічної мережі України (Метеорологічні щомісячники); використовувались дані 17 метеорологічних станцій.

Рис. 1. Розподіл метеорологічних станцій по території України, дані яких було використано в дослідженні

Територія дослідження охоплює територію рівнинної України ($45^{\circ}23'-51^{\circ}24'$ пн.ш. та $23^{\circ}59'-35^{\circ}57'$ сх.д.) з середньою висотою над рівнем моря в середньому 175 м.

Період часу, охоплений дослідженням: березень 2005 –жовтень 2018рр. Протягом даного періоду було обрано випадки дуже сильних опадів (50 мм і більше за 12 годин і менше) для обраних станцій, всього 94 випадки.

Підготовка та опрацювання даних проводились в декілька етапів. Спочатку з загального масиву даних плювіографів було виокремлено випадки дуже сильних опадів (50 мм і більше за 12 год і менше). Саме для обраних випадків завантажувались дані IMERG. Ця процедура виконувалася для виявлення того, наскільки точно дистанційні вимірювання відтворюють окремі події опадів значної інтенсивності, на скільки відрізняються між собою значення інтенсивності зафіксовані наземним приладом та приладами дистанційного зондування. Точки на супутниковому зображенні вибирались відповідно до координат наземних станцій.

В роботі використовувався продукт IMERG Final Run. Спочатку, завантажені дані IMERG, представлені в мм/год, переводились в мм/хв. За допомогою програми STATISTICA для узгодження даних (плювіограф має крок вимірювань -10-20 хв; дані IMERG - 30 хв) будувались діаграми розсіювання залежності інтенсивності (плювіограф, супутник) від часу (рис 2), підбиралась лінія тренду (поліноміальна 5 ступеня), за допомогою лінії тренду проводилась інтерполяція даних, що дозволило отримати значення інтенсивності як для супутника, так і для плювіографа з кроком 10 хв. Отримані ряди даних були основою для верифікації (табл. 2).

Також, з сайту <https://disc.gsfc.nasa.gov/> завантажувались карти, що представляють візуалізацію даних для обраного квадрату території та показані у вигляді комірок ($0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$). Колір комірки відповідає величині інтенсивності. За допомогою програми Surfer, на карти накладався шар з точками станцій (за відомими координатами).

Окрім даних інтенсивності IMERG та карт, третім продуктом є значення випадкової похибки (Random error). Випадкова похибка є оцінкою несистематичної складової похибки (табл 1).

Рис. 2. Діаграми розсіяння залежності інтенсивність-час: а) плівіограф, б) супутник

На відміну від, наприклад, Австрії (рис.3), де на територію розміром 300 км² припадає 153 метеорологічні станції (1 станція на 2 км²). Одна комірка 10×10 км на супутниковому зображенні охоплює близько 50 наземних точок вимірювання. На території України в 1 комірку входить максимум одна станція.

На рис.3 показана кількість наземних станцій, що входять в 1 комірку 0,1×0,1° IMERG на території Австрії, на рис. 4 –на території України. Як доведено в ряді робіт, зокрема F. Tian et all, однією з причин неузгодженості супутникових та наземних даних є відсутність достатньої кількості метеорологічних станцій.

Рис.3. Мережа станцій WEGN (регіон Фельдбах, південно-східна Австрія: кількість наземних станцій, які входять в 1 комірку 0,1×0,1° IMERG

Карти полів опадів та розташування метеорологічних станцій в їх межах показані на рис.4. Як вже було зазначено вище, точки на супутниковому зображенні вибирались відповідно до дійсних координат станцій.

Крім того, було визначено кореляцію між максимальним значенням інтенсивності за супутниковими даними в обраному квадраті та значенням інтенсивності, отриманим плівіографом в точці станції. Такий підхід виявив ще більшу неузгодженість між величинами, ніж у випадку порівняння значень з відповідними координатами.

Рис 4. Розташування метеорологічної станції в межах поля опадів

Карта, що відображає накопичені суми опадів за проміжок часу їх випадання

Map, Accumulated

- a) Запоріжжя (02.09.09): супутник- 39,7 мм; плювіограф- 61,8 мм.
 $k=-0,373$, зливові в масивах облогових

Map, Accumulated of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM GPM_3IMERGHH v06] mm over 2009-09-02 00:30Z - 2009-09-02 12:00:00Z, Region 30.0586E, 46.2744N, 36.2988E, 49.9658N

- b) Чернігів (28.07.2010): супутник – 61,6 мм; плювіограф-69,4 мм.
 $k=0,482$, зливові

Map, Accumulated of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM GPM_3IMERGHH v06] mm over 2010-07-28 06:00Z - 2010-07-28 12:00:00Z, Region 30.52E, 48.9111N, 35.0244E, 52.5806N

- c) Одеса (21.09.08): супутник – 46,22 мм; плювіограф-54,9 мм.
 $k=0,549$, облогові

Map, Accumulated of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM GPM_UK v06] mm over 2008-09-21 03:00Z - 2008-09-21 15:00:00Z, Region 28.8062E, 44.6704N, 32.1899E, 48.3838N

- d) Комісарівка (18.07.2008): супутник-2,57 мм; плювіограф-84,8 мм.

$k=-0,001$, зливові

Map, Accumulated of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM GPM_3IMERGHH v06] mm over 2008-07-18 03:30Z - 2008-07-18 07:30:00Z, Region 30.0146E, 46.8896N, 35.8594E, 49.834N

Отримані результати та їх обговорення. На відміну від наземних, супутникові дані характеризуються широкою територією охоплення, тривалим періодом спостережень, високою просторово-часовою роздільною здатністю. Однак, завдяки переліченим перевагам, супутникові дані скоріше є кращим інструментом великомасштабного моніторингу опадів, ніж окремих локальних процесів, як і буде доведено нижче.

В табл.1 представлено значення інтенсивності за супутником (дані IMERG) з 30-хв інтервалом, а також значення випадкової похибки; дані наведено в мм/год, мм/хв.

Таблиця 1. Дані інтенсивності опадів GPM IMERG + випадкові похибки

Час UTC	мм/год (мм/хв)	Random Error, мм/год (мм/хв)
Комісарівка (18.07.2008)		
03:30	0,73 (0,01)	4,40 (0,07)
04:00	0,75 (0,01)	4,50 (0,08)
04:30	0,55 (0,01)	3,60 (0,06)
05:00	0,38 (0,01)	2,81 (0,05)
05:30	0,19 (0,0)	1,78 (0,03)
06:00	0,15 (0,0)	1,52 (0,03)
06:30	0,0	0,24 (0,0)
Одеса (21.09.2008)		
03:00	0,21 (0,0)	6,58 (0,11)
03:30	0,16 (0,0)	7,88 (0,13)
04:00	0,17 (0,0)	8,01 (0,13)
04:30	1,40 (0,0)	22,96 (0,38)
05:00	2,52 (0,02)	23,60 (0,39)
05:30	4,31 (0,07)	22,95 (0,38)
06:00	3,67 (0,06)	24,14 (0,40)
06:30	4,80 (0,08)	24,90 (0,42)
07:00	2,70 (0,05)	24,94 (0,42)
07:30	1,21 (0,02)	25,00 (0,42)
08:00	5,43 (0,09)	27,07 (0,45)
08:30	5,15 (0,09)	26,54 (0,44)
09:00	3,85 (0,06)	23,66 (0,39)
09:30	4,76 (0,08)	26,21 (0,44)
10:00	4,43 (0,01)	25,99 (0,43)
10:30	4,96 (0,08)	28,39 (0,47)
11:00	5,09 (0,08)	28,89 (0,48)
11:30	5,63 (0,09)	29,93 (0,50)
12:00	4,47 (0,07)	21,54 (0,36)
12:30	5,05 (0,08)	16,51 (0,28)
13:00	5,23 (0,09)	26,20 (0,44)
13:30	4,38 (0,07)	25,93 (0,43)
14:00	3,55 (0,06)	18,56 (0,31)
Запоріжжя, АМСЦ (02.09.2009)		
00:30	0,02 (0,0)	0,50 (0,01)
01:00	0,64 (0,01)	4,02 (0,07)
01:30	0,28 (0,0)	2,29 (0,04)
02:00	0,0	0,24
02:30	0,0	0,24
03:00	0,0	0,24
03:30	0,03 (0,0)	0,62 (0,01)
04:00	0,06 (0,0)	0,85 (0,01)
04:30	2,45 (0,04)	10,53 (0,18)
05:00	3,28 (0,05)	13,05 (0,23)
05:30	3,16 (0,05)	12,77 (0,21)
06:00	1,61 (0,03)	7,78 (0,13)
06:30	3,07 (0,05)	12,42 (0,21)
07:00	2,79 (0,05)	11,60 (0,19)
07:30	2,68 (0,04)	11,27 (0,19)
08:00	1,85 (0,03)	8,58 (0,14)
08:30	2,03 (0,03)	9,19 (0,15)
09:00	3,13 (0,05)	12,60 (0,21)
09:30	4,35 (0,07)	16,06 (0,27)
10:00	7,32 (0,12)	23,58 (0,39)
10:30	7,24 (0,12)	23,39 (0,39)
11:00	10,08 (0,17)	29,89 (0,50)
11:30	8,99 (0,15)	27,45 (0,46)

Час UTC	мм/год (мм/хв)	Random Error, мм/год (мм/хв)
Чернігів (28.07.2010)		
05:30	0,31 (0,01)	2,40 (0,04)
06:00	28,24 (0,47)	64,27 (1,07)
06:30	27,81 (0,46)	63,55 (1,06)
07:00	30,13 (0,50)	67,45 (1,01)
07:30	1,70 (0,03)	8,08 (0,13)
08:00	0,0	0,24 (0,0)
08:30	0,87 (0,01)	4,98 (0,08)
09:00	1,49 (0,02)	7,36 (0,12)
09:30	2,43 (0,04)	10,49 (0,17)
10:00	7,53 (0,13)	24,07 (0,40)
10:30	2,63 (0,04)	11,10 (0,19)
11:00	2,21 (0,04)	9,79 (0,16)
11:30	0,27 (0,0)	2,23 (0,04)

Для оцінки точності продуктів GPM IMERG за допомогою статистичних параметрів проводилась їх верифікація відносно даних наземних спостережень. В роботі використовувались такі статистичні параметри та індекси: систематична похибка (bias), середня абсолютна помилка ($\bar{e}$), середня квадратична похибка (σ), коефіцієнт кореляції Пірсона (r), фактор 2-х (FA2), фактор 5-ти (FA5), індекс узгодженості (Index of Agreement, IOA) (табл 3).

Для оцінки точності продуктів GPM IMERG за допомогою статистичних параметрів проводилась їх верифікація відносно даних наземних спостережень. В роботі використовувались такі статистичні параметри та індекси: систематична похибка (bias), середня абсолютна помилка ($\bar{e}$), середня квадратична похибка (σ), коефіцієнт кореляції Пірсона (r), фактор 2-х (FA2), фактор 5-ти (FA5), індекс узгодженості (Index of Agreement, IOA) (табл 3).

Перелічені вище статистичні параметри розраховуються за допомогою формул (1) – (7):

$$\text{Систематична похибка (bias)} \quad bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{mi} - U_{oi}) \quad (1)$$

$$\text{Середня абсолютна помилка } (\bar{e}) \quad \bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |U_{mi} - U_{oi}| \quad (2)$$

$$\text{Середня квадратична похибка } (\sigma) \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{mi} - U_{oi})^2} \quad (3)$$

$$\text{Коефіцієнт кореляції Пірсона (r)} \quad r = \frac{\sum_{i=1}^N (U_{mi} - \bar{U}_m)(U_{oi} - \bar{U}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (U_{mi} - \bar{U}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (U_{oi} - \bar{U}_o)^2}} \quad (4)$$

Фактор 2-х (FA2)

$$FA2 = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N a_i, \quad (5)$$

де $a_i = 1$, якщо $\frac{1}{2} \leq \frac{U_{mi}}{U_{oi}} \leq 2$

або $a_i = 0$, якщо $\frac{1}{2} > \frac{U_{mi}}{U_{oi}} > 2$

Фактор 5-ти (FA5)

$$FA5 = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N a_i, \quad (6)$$

де $a_i = 1$, якщо $\frac{1}{5} \leq \frac{U_{mi}}{U_{oi}} \leq 5$

або $a_i = 0$, якщо $\frac{1}{5} > \frac{U_{mi}}{U_{oi}} > 5$

Індекс узгодженості (Index of Agreement, IOA)

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (U_{mi} - U_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N \left(|U_{mi} - \overline{U_o}| + |U_{oi} - \overline{U_o}| \right)^2} \quad (7)$$

де U_{mi} , U_{oi} – змодельовані та фактичні швидкості вітру, $\overline{U_o}$ – середня фактична швидкість, N – загальна кількість значень, що порівнюються між собою.

Базовою характеристикою, що дає початкове уявлення про характер систематичних відхилень розрахованих значень від вимірених є систематична похибка. Систематична похибка вказує на ступінь переоцінки або недооцінки даних наземних спостережень. Найменше систематичне зміщення з незначною похибкою у від'ємну сторону (приблизно -0,03) спостерігалось на станціях Чернівці (18.08.05), Одеса (21.09.08), Долина (24.07.08); найбільше систематичне відхилення у від'ємну сторону (приблизно -0,3,-0,4) спостерігалось на станціях Комісарівка (18.07.08), Ромни (18.07.08), Сміла (11.07.12). Певним недоліком оціночного параметру є те, що він показує лише загальне перевищення чи заниження фактичних значень, характер розкиду похибок залишається невідомим [2]. Найменші значення $\bar{e}$ по модулю швидкості отримані на станціях Одеса (21.09.08), Долина (24.07.08), значення становили приблизно 0,04 - 0,06; найбільші значення (приблизно 0,4) спостерігались на станціях Комісарівка (18.07.08), Запоріжжя (26.06.15). Середня квадратична похибка найбільша на станціях Комісарівка (18.07.08), Сміла (11.07.12) та Запоріжжя (26.06.15), і становить приблизно 0,6; найменше значення на станції Одеса (21.09.08) – 0,06. Для того, щоб оцінити відсоток розрахованих значень, що потрапляють у задані межі використовують індекси FA2 і FA5. Найбільший відсоток потраплянь модулів швидкості за критеріями фактор 2-х та фактор 5-ти спостерігається на ст. Одеса (21.09.08) - 64 і 93% відповідно. Кореляції Пірсона та індекс узгодженості відображають статистичний зв'язок між рядами змодельованих та фактичних значень. Значення коефіцієнту кореляції коливається в широких межах в діапазоні приблизно від -0,5 до +0,5. Найбільші значення приблизно 0,5 спостерігались на станціях Світловодськ (06.09.07), Одеса (21.09.08), Чернігів (28.07.10) значення індексу IOA на цих станціях знаходиться у межах 0,6 і є найвищими; найменші значення коефіцієнту Кореляції становили приблизно -0,4-0,5 на станціях Лубни (11.07.12), Запоріжжя (02.09.09).

На основі проведеного аналізу відповідності супутникових даних та наземних вимірювань, можна зробити висновок, що кореляційний зв'язок інтенсивності при випаданні

зливових опадів слабкий, в багатьох випадках від'ємний. При облогових опадах та облогових зі зливовими включеннями зв'язок між рядами інтенсивності більш тісний, але величини коефіцієнту кореляції статистично незначимі.

Рис.5.-Значення коефіцієнту кореляції, розраховані для окремих випадків опадів

Таблиця 2. Узгоджені дані інтенсивності (дані наземних спостережень та дані IMERG)

Дані наземних спостережень		Дані IMERG	Дані наземних спостережень		Дані IMERG
Одеса (21.09.08)-облогові			Чернігів (28.07.2010)-зливові		
180	0,003580787	0	360	0,146667	0
190	0	0,03	370	0,297171	0,7
200	0,00261995	0,025014552	380	0,427816	1,92
210	0,002668736	0,026911112	390	0,393167	0,46
220	0,011457614	0,028700741	400	0,559502	0,66
230	0,015325833	0,030448444	410	0,566634	0,09
240	0,002894057	0,01	420	0,671	0,598029955
250	0,021732992	0,034668755	430	0,507494	0,526762772
260	0,026735293	0,035971028	440	0,463944	0,455508568
270	0,023407813	0,02	450	0,386	0,01
280	0,032728817	0,041076324	460	0,324619	0,05
290	0,037254725	0,03	470	0,267863	1,01
300	0,041980385	0,05	480	0,181833	0,46
310	0,043508346	0,12	490	0,132051	0,214002212
320	0,046370928	0,07	500	0,08101	0,202738589
330	0,0718888	0,055734709	510	0,02733	0,20080713
340	0,050728542	0,059316218	520	0,011456	0,207945436
350	0,053836465	0,063099479	530	0	0,218504251
360	0,061187303	0,067069818	540	0,0315	0,230555326
370	0,057252909	0,05	550	0,002422	0
380	0,059623696	0,059623696	560	0,024	0,47
390	0,080012155	0,061200959	570	0,025	0,17
400	0,062161669	0,062615885	580	0,099895	0
410	0,063878811	0,06	590	0,14843	0,228892629
420	0,045059553	0,093594915	600	0,033333	0,200753841
430	0,06567772	0,098208995	610	0,251612	0,11
440	0,066875863	0,02	620	0,298085	0,42
450	0,020173277	0,05	630	0,6935	0,07
460	0,068348766	0,16	640	0,355537	0,051326308
470	0,068970798	0,24	650	0,354433	0,04
480	0,090481838	0,03	660	0,0665	0,019011182

Дані наземних спостережень		Дані IMERG	Дані наземних спостережень		Дані IMERG
Одеса (21.09.08)-облогові			Чернігів (28.07.2010)-зливові		
490	0,070059674	0,15	670	0,257295	0
500	0,070555494	0,127746526	680	0,145081	0
510	0,085766292	0,23	690	0,042167	0
520	0,071518854	0,134275378	360	0,146667	0
530	0,072011789	0,09	370	0,297171	0,7
540	0,064219788	0,139496276	380	0,427816	1,92
550	0,073075915	0,14	390	0,393167	0,46
560	0,073665516	0,143668269	400	0,559502	0,66
570	0,079293333	0,09	410	0,566634	0,09
580	0,074993816	0,2	420	0,671	0,598029955
590	0,075740534	0,14564601	430	0,507494	0,526762772
600	0,07379845	0,145415963	440	0,463944	0,455508568
610	0,077402897	0,1	450	0,386	0,01
620	0,078312764	0,24	460	0,324619	0,05
630	0,08259705	0,12	470	0,267863	1,01
640	0,080254914	0,140093443	480	0,181833	0,46
650	0,081264219	0,17	490	0,132051	0,214002212
660	0,084799633	0,1	500	0,08101	0,202738589
670	0,083277074	0,06	510	0,02733	0,20080713
680	0,084237039	0,03	520	0,011456	0,207945436
690	0,093886607	0,27	530	0	0,218504251
700	0,085926062	0,12126659	540	0,0315	0,230555326
710	0,086587523	0,11739694	550	0,002422	0
720	0,07449731	0,07	560	0,024	0,47
730	0,08734208	0,05	570	0,025	0,17
740	0,087340163	0,11	580	0,099895	0
750	0,0841436	0,14	590	0,14843	0,228892629
760	0,086302875	0,18	600	0,033333	0,200753841
770	0,085141672	0,1	610	0,251612	0,11
780	0,087217808	0,094572986	620	0,298085	0,42
790	0,081177778	0,093025299	630	0,6935	0,07
800	0,078215027	0,092865374	640	0,355537	0,051326308
810	0,073032372	0,094021902	650	0,354433	0,04
820	0,069881728	0,01	660	0,0665	0,019011182
830	0,064313491	0,08	670	0,257295	0
840	0,059112378	0,26	680	0,145081	0
			690	0,042167	0

Рис. 6. Розподіл значень інтенсивності опадів, виміряних супутником, плівіографом в межах окремого процесу ст. Чернігів 28.07.2010

Рис. 7. Розподіл значень інтенсивності опадів, виміряних супутником, плівіографом в межах окремого процесу ст. Одеса 21.09.2008

Для кожного конкретного процесу проводилось порівняння значень інтенсивності виміряних за допомогою плівіографа та супутника. На рисунку 6 представлено розподіл інтенсивності в межах процесу, що спостерігався на ст. Чернігів (зливові опади). Видно, що розподіл супутникових даних згладжений у порівнянні з розподілом плівіографа, хоча загальна тенденція зберігається. Максимальні значення інтенсивності, що спостерігались 28.07.10 за плівіографом становили 0,7-1,92 мм/хв (перша хвиля підсилення), 1,01-0,46 мм/хв (друга хвиля підсилення). Супутник цих коливань практично не відображає, максимальні значення інтенсивності за супутником 0,47-0,50 мм/хв спостерігались на початку процесу, можна відмітити також незначне підсилення інтенсивності (0,1 мм/хв) наприкінці (620-660 хв). На рисунку 7 (ст. Одеса) – облогові опади, видно, що піки або екстремальні значення інтенсивності знову ж таки згладжені, але відповідність прослідковується краще (особливо в першій частині процесу), ніж у випадку зливових опадів. Максимальні значення інтенсивності за плівіографом становили 0,24-0,27 мм/год. (прослідковувались в другій половині процесу 450-840 хв). Інтенсивності за супутником змінювались в межах 0,01-0,09.

Таблиця 3. Статистичні параметри, розраховані для окремих випадків дуже сильних опадів (дані IMERG -дані наземних спостережень)

Станція	Дата	k	bias	$\bar{e}$	Σ	FA2	FA5	IOA
Чернівці	18.08.05	0,203	-0,029	0,099	0,141	48,276	84,483	0,354
Яготин	08.08.05	0,155	-0,229	0,230	0,261	-	-	0,387
Світловодськ	25.08.05	-0,228	-0,092	0,152	0,225	26,829	63,415	0,315
Одеса	27.05.06	-0,147	-0,145	0,178	0,341	16,216	43,243	0,329
Світловодськ	06.09.07	0,560	-0,052	0,081	0,123	41,176	78,431	0,496
Ромни	18.07.08	0,013	-0,329	0,335	0,430	1,923	23,077	0,443
Комісарівка	18.07.08	-0,001	-0,423	0,424	0,613	-	-	0,460
Одеса	21.09.08	0,549	-0,033	0,044	0,063	64,179	92,537	0,576
Вилкове	13.09.08	0,135	-0,101	0,126	0,182	23,077	46,154	0,448
Долина	24.07.08	0,283	-0,035	0,061	0,122	61,017	81,356	0,351
Лубни	26.06.09	0,263	-0,153	0,216	0,370	26,923	65,385	0,423
Запоріжжя	02.09.09	-0,373	-0,075	0,113	0,158	23,881	49,254	0,282
Чернігів	28.07.10	0,482	-0,120	0,211	0,344	29,730	51,351	0,596
Гадяч	28.07.10	-0,076	-0,111	0,204	0,311	27,273	69,697	0,319
Золочів	07.07.10	0,480	-0,291	0,297	0,479	-	15,789	0,447
Сміла	11.07.12	-0,312	-0,330	0,332	0,613	6,667	46,667	0,373
Лубни	11.07.12	-0,579	-0,209	0,254	0,433	12	24	0,402
Запоріжжя	01.07.13	-0,049	-0,240	0,282	0,539	32	48	0,353
Золочів	19.06.15	-0,234	-0,203	0,267	0,362	8	16	0,419
Запоріжжя	26.06.15	-0,182	-0,339	0,406	0,618	18,75	43,75	0,401
Комісарівка	15.08.15	0,291	-0,207	0,242	0,577	16	32	0,269
Вилкове	19.09.16	0,166	-0,080	0,104	0,143	27,273	40	0,377
Долина	17.07.16	-0,242	-0,145	0,206	0,297	20	45,714	0,344

Також було проведено верифікацію сум опадів за добу, виміряних супутником та плівіографами (табл. 4). Суми опадів, виміряні супутником як правило в 3-4 рази менші за наземні.

Таблиця 4. Статистичні параметри, розраховані для добових сум опадів (дані IMERG - дані наземних спостережень)

k	bias	e	σ	FA2	FA5	IOA
0,058	-30,295	32,210	39,504	52,127	81,914	0,319

Результати було отримано також незадовільні. Коефіцієнт кореляції незначний, і дорівнює 0,058; систематичне відхилення дорівнює -30,295; середня абсолютна помилка 32,210; середня квадратична похибка 39,504; фактор 2-х та фактор 5-ти 52,127 та 81,914 відповідно, значення індексу узгодженості 0,319.

Висновки. Зроблено спробу оцінити можливість використання даних IMERG для визначення інтенсивності окремих подій дуже сильних опадів над рівнинною територією України. Для оцінки продукту IMERG було використано 7 статистичних індексів. Порівняння проводились з даними 17 наземних метеорологічних станцій. Дослідження показали, що в цілому, супутниковий та наземний ряди даних демонструють низький ступінь узгодженості.

Використання продуктів GPM IMERG для оцінки окремих випадків дуже сильних, а особливо зливових опадів є недоцільним. В 48% випадків коефіцієнти кореляції-від'ємні, найменше значення коефіцієнту кореляції дорівнює -0,579 (ст. Лубни 11.07.12); в 39 % випадків значення коефіцієнту кореляції припадає на інтервал від 0 до 0,5; коефіцієнт кореляції більше 0,5 лише в 2 випадках: Світловодськ (06.09.07): $k=0,560$; Одеса (21.09.08): $k=0,549$.

Як вже зазначалось в ряді робіт [3-5], найкраще продукти IMERG підходять для оцінки опадів незначної інтенсивності та при оцінці рядів даних більших часових масштабів.

В той час як суми опадів помірної та значної інтенсивності в більшості випадків у супутникових спостереженнях недооцінюються.

На результати дослідження могло вплинути використання обмеженої кількості станцій з наявними плівіографами.

Список літератури

1. Е.В.Волкова Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/ Meteosat-9,10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса / т.11, №4, С.163-177.
2. Ошурок Д.О. Вітроенергетичні ресурси України в сучасних кліматичних умовах: дис. к.г.н.: 17.05.2021/ Дмитро Олександрович Ошурок. К., 2021.203 с.
3. Morsy M., Scholten T., Michaelides S., Borg E., Sherief Y., Dietrich P. Comparative Analysis of TMPA and IMERG Precipitation Datasets in the Arid Environment of El-Qaa Plain Sinai. *Remote Sensing*. 2021, № 13(4), S. 2072-4292.
4. Liu J., Du J. Evaluating extreme precipitation estimations based on the GPM IMERG products over the Yangtze River Basin, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, № 11(1), S. 601-618.
5. M.S. Nashwan, S. Shahid, X. Wang Assessment of Satellite-Based Precipitation Measurement Products over the Hot Desert Climate of Egypt. *Remote Sensing*.2019, № 11(5), S. 2072-4292.
6. W. A. Yuda, R. Prasetya, Abd. R. As-syakur, T. Osawa, M. Nagai An assessment of IMERG rainfall products over Bali at multiple time scale. *E3S Web of Conferences*.2020,№ 153, S.1-12.
7. S. O, U. Foelsche, G. Kirchengast, J. Fuchsberger, J. Tan, and W. A. Petersen Evaluation of GPM IMERG Early, Late, and Final rainfall estimates using WegenerNet gauge data in southeastern Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017, № 21, S. 6559–6572.
8. W. Sun, Y. Sun, X. Li, T. Wang, Y. Wang, Q. Qiu, Zh. Deng Evaluation and Correction of GPM IMERG Precipitation Products over the Capital Circle in Northeast China at Multiple Spatiotemporal Scales. *Advances in Meteorology*. 2018. № 1, S.1-14.
9. M. Maranan, A. H. Fink, P. Knippertz A process-Based Validation of GPM IMERG and Its Sources Using a Mesoscale Rain Gauge Network in the West African Forest Zone. *Journal of Hydrometeorology*. 2020. №21, S.729-749.

10. Sh. Ning, J. Wang, J. Jin, H. Ishidaira Assessment of the Latest GPM-Era High-Resolution Satellite Precipitation Products by Comparison with Observation Gauge Data over the Chinese Mainland. *Water*. 2016, 8(11), S. 2073-4441.
11. M. T. Mahmoud, S. A. Mohammed, M. A. Hamouda, M. M. Mohamed Impact of Topography and Rainfall Intensity on the Accuracy of IMERG Precipitation Estimates in an Arid Region. *Remote Sens*. 2021, 13(1), S. 2072-4292.
12. F. Tian, Sh. Hou, L. Yang, H. Hu How Does the Evaluation of the GPM IMERG Rainfall Product Depend on Gauge Density and Rainfall Intensity? *Journal of Hydrometeorology*. 2018. №. 19 (2), S.339-349.

References

1. E.V.Volkova Opredelenie summ osadkov po dannym radiometrov SEVIRI/ Meteosat-9,10 i AVHRR/NOAA dlya Evropeyskoy territorii Rossii [Determination of precipitation amounts according to the data of SEVIRI / Meteosat-9,10 and AVHRR / NOAA radiometers for the European territory of Russia] / *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* / t.11, #4, S.163-177.
2. Oshurok D.O. Vitroenergetichni resursi Ukraïni v suchasni klimatichni umovah [Wind energy resources of Ukraine in modern climatic conditions]: dis. k.g.n. : 17.05.2021/ Dmitro Oleksandrovich Oshurok. K., 2021.203 s.
3. Morsy M., Scholten T., Michaelides S., Borg E., Sherief Y., Dietrich P. Comparative Analysis of TMPA and IMERG Precipitation Datasets in the Arid Environment of El-Qaa Plain Sinai. *Remote Sensing*. 2021, № 13(4), S. 2072-4292.
4. Liu J., Du J. Evaluating extreme precipitation estimations based on the GPM IMERG products over the Yangtze River Basin, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, № 11(1), S. 601-618.
5. M.S. Nashwan, S. Shahid, X. Wang Assessment of Satellite-Based Precipitation Measurement Products over the Hot Desert Climate of Egypt. *Remote Sensing*. 2019, № 11(5), S. 2072-4292.
6. W. A.Yuda, R. Prasetya, Abd. R. As-syakur, T. Osawa, M. Nagai An assessment of IMERG rainfall products over Bali at multiple time scale. *E3S Web of Conferences*. 2020, № 153, S.1-12.
7. S. O, U. Foelsche, G. Kirchengast, J. Fuchsberger, J. Tan, and W. A. Petersen Evaluation of GPM IMERG Early, Late, and Final rainfall estimates using WegenerNet gauge data in southeastern Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017, № 21, S. 6559–6572.
8. W. Sun, Y. Sun, X. Li, T. Wang, Y. Wang, Q. Qiu, Zh. Deng Evaluation and Correction of GPM IMERG Precipitation Products over the Capital Circle in Northeast China at Multiple Spatiotemporal Scales. *Advances in Meteorology*. 2018. № 1, S.1-14.
9. M. Maranan, A. H. Fink, P. Knippertz A process-Based Validation of GPM IMERG and Its Sources Using a Mesoscale Rain Gauge Network in the West African Forest Zone. *Journal of Hydrometeorology*. 2020. №21, S.729-749.
10. Sh. Ning, J. Wang, J. Jin, H. Ishidaira Assessment of the Latest GPM-Era High-Resolution Satellite Precipitation Products by Comparison with Observation Gauge Data over the Chinese Mainland. *Water*. 2016, 8(11), S. 2073-4441.
11. M. T. Mahmoud, S. A. Mohammed, M. A. Hamouda, M. M. Mohamed Impact of Topography and Rainfall Intensity on the Accuracy of IMERG Precipitation Estimates in an Arid Region. *Remote Sens*. 2021, 13(1), S. 2072-4292.
12. F. Tian, Sh. Hou, L. Yang, H. Hu How Does the Evaluation of the GPM IMERG Rainfall Product Depend on Gauge Density and Rainfall Intensity? *Journal of Hydrometeorology*

Спутниковые измерения интенсивности осадков и их верификация

Сокур К. С., Паламарчук Л.В.

Главным заданием этого исследования было установление целесообразности работы с данными дистанционного зондирования атмосферы, а именно оценки установленной дистанционно интенсивности отдельных событий очень сильных осадков (50 мм и более за 12 часов и меньше), наблюдаемых над территорией Украины. Используя данные дистанционного зондирования атмосферы (спутниковые данные GPM IMERG), а также проведения верификации спутниковых данных с данными наземных станций (данные pluviографа). Исследование заключалось в обработке данных и карт – продуктов IMERG, построении на их основе таблиц и графиков, расчета статистических индексов и их оценке. Всего было задействовано 7 статистических параметров, а именно систематическая погрешность (bias), средняя абсолютная погрешность (ϵ), средняя квадратическая погрешность (σ), коэффициент корреляции Пирсона (r), фактор 2-х (FA2), фактор 5-ти (FA5), индекс согласованности (Index of Agreement, IOA).

Расчет статистических параметров проводился как для отдельных случаев очень сильных осадков, так и для суточных сумм осадков. В обоих случаях получено неудовлетворительные результаты, статистические связи спутникового и наземного рядов данных незначительные, данные IMERG при оценке отдельных событий очень сильных осадков над равнинной Украины демонстрируют существенные погрешности, что может быть вызвано как несоответствием данных самих по себе для такого рода использования, так и смещением в плане координат, и времени сбора данных. Поэтому необходимы

дополнительные исследования, поиск новых и усовершенствование предложенных методических подходов к анализу спутниковой информации.

Ключевые слова: дистанционные методы измерения осадков, очень сильные осадки, GPM IMERG, верификация, статистические параметры и индексы.

Satellite measurements of precipitation intensity and their verification

Sokur K., Palamarchuk L.

The main focus of this study was to establish the feasibility of working with the intensity data of individual events of very heavy precipitation (50 mm or more in 12 hours or less) observed over the territory of Ukraine using remote sensing data (satellite data GPM IMERG), as well as verification of satellite data with ground station data (self-recording rain gauge data). The study consisted of processing data and maps - IMERG products, building tables and graphs based on them, calculating statistical indices and evaluating them. A total of 7 statistical parameters were involved, namely systematic error (bias), mean absolute error (e), mean quadratic error (sound), Pearson correlation coefficient (r), factor 2 (FA2), factor 5 (FA5), Index of Agreement (IOA).

The calculation of statistical parameters was carried out both for individual cases of very heavy precipitation and for daily precipitation totals. In both cases, unsatisfactory results were obtained. Statistical links between satellite and ground data series are insignificant, IMERG data, when assessing individual events of very heavy precipitation over the flat territories of Ukraine, demonstrate significant errors, which can be caused both by a discrepancy between the data itself for this kind of use, and by a shift in terms of coordinates, as well as time of data collection. Therefore, additional research is needed, the search for new and improvement of the proposed methodological approaches to the analysis of satellite information.

Keywords: heavy precipitation, GPM IMERG, verification, statistical parameters and indices.

Надійшла до редколегії 07.07.2021

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.3.6>

УДК 551.574.42

Пясецька С.І.

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, м. Київ

ТЕНДЕНЦІЇ У РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВІДКЛАДЕНЬ ПАМОРОЗІ КАТЕГОРІЇ НЯ (небезпечна) НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ПРОТЯГОМ ОСТАННЬОГО ТРИДЦЯТИРІЧЧЯ 1991-2020 рр.

Стаття присвячена дослідженню просторово-часового розповсюдження відкладень паморозі категорії НЯ (небезпечна) по території України у продовж останніх 30-и років, які характеризують сучасний стан та динаміку кліматичної системи в Україні та її окремих елементів. Метою дослідження було встановити особливості просторово-часового розповсюдження таких відкладень по областях України по окремим десятиріччям досліджуваного періоду та окреслити тенденцію у їх розповсюдженні. Доведено переважання випадків таких відкладень у січні та грудні протягом 1991-2000 рр. Проте помічено певна тенденція у наступному десятиріччі до деякого збільшення випадків таких відкладень у окремих місяцях перехідних сезонів року. Для останнього десятиріччя помічено зростання таких випадків у січні та грудні порівняно із попередніми десятиріччями. Проте протягом останніх 2-х років кількість випадків відкладень паморозі категорії НЯ децю зменшилась. Доведено, що переважна більшість таких випадків спостерігалась на Закарпатті на метеорологічній станції Плай, що пов'язане із більшою частотою появи сприятливих умов для її утворення.

Ключові слова: відкладення паморозі категорії НЯ (небезпечна), стандартний ожеледний станок, розповсюдження відкладень паморозі категорії НЯ по території України, сучасні зміни клімату.

Вступ. Розповсюдження відкладень паморозі, як зернистої так і кристалічної на території України протягом зимового періоду та у перехідні сезони року є поширеним явищем. Такі відкладення спостерігаються практично на усіх метеорологічних станціях країни причому найбільш часто в регіонах зі складною ландшафтною структурою. Серед таких відкладень трапляються випадки відкладень паморозі категорії НЯ (небезпечна).

Під випадками відкладення паморозі категорії НЯ (небезпечна) розуміється відкладення паморозі (кристалічної та/або зернистої) на дротах стандартного ожеледного станка, який встановлений на кожній із метеорологічних станцій (МС) України, діаметром 50 та більше мм, причому із виміряного діаметру відкладення вилучається діаметр дроту у 5 мм, яким оснащено стандартний ожеледний станок. Зазвичай такі відкладення здебільшого