

УДК 528.88:551.583

ВАЛІДАЦІЯ ОПАДІВ ОТРИМАНИХ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ GPM ТА H-SAF З ДАНИМИ НАЗЕМНИХ МЕТЕОСТАНЦІЙ УКРАЇНИ

О.С. Заболотна, О. О. Кривошеїн, О. А. Кривобок

Український гідрометеорологічний інститут,
03028, м. Київ, проспект Науки, 37, zabolotnaolena@ukr.net

Метою даної роботи є проведення валідації супутникових даних опадів GPM та H-SAF для території України. Валідація здійснювалась шляхом порівняння супутникових даних з даними наземних метеостанцій Українського гідрометцентру і включала такі етапи: збір та опрацювання даних, приведення даних до однакової просторово-часової розмірності, розрахунок коефіцієнтів кореляції та побудова матриць похибок. Коефіцієнти кореляції були розраховані для кожної станції за два досліджуваних періоди (перший період – квітень-вересень 2020 року, другий – квітень-вересень 2021 року). Крім того для більш детального аналізу було побудовано матриці похибок, на основі розділення опадів на класи по різній кількості. Порівняльний аналіз показав, що більша кількість станцій (117) має коефіцієнт кореляції 0.5 - 0.8 для даних GPM, а для даних опадів HSAF більша кількість станцій (59) має низький коефіцієнт кореляції (0 - 0.3). Матриці похибок були розраховані для чотирьох класів кількості опадів (мм): “0-2”, “2-5”, “5-10”, “>10”. Коефіцієнти для матриць похибок показують, що незначні опади чи їх відсутність, а також велика кількість опадів визначаються супутником з високою точністю відповідно до визначень наземних вимірювань метеостанцій. Так, за показником “specificity” найвищий рівень відповідності супутникових даних (H-SAF, GPM Late, GPM Early) наземним даним мають опади класу >10 мм. Значення коефіцієнтів “precision” показують, що супутникові дані є дійсно надійними, тобто, наявність чи відсутність опадів буде визначена точно, оскільки найвище значення цього коефіцієнту характерне саме для низьких та значних опадів (в середньому 0.76 та 0.66 відповідно). Сильні опади або їх відсутність, що зафіксовано супутником, підтверджуються станціями з високою частотою. На основі отриманих результатів можемо стверджувати, що супутникові дані можуть бути використані для моніторингу опадів, оскільки мають високу точність вимірювань і їх варто розглядати як додаткове джерело метеорологічної інформації.

Ключові слова: опади; супутникові дані; наземні дані; порівняння.

1 ВСТУП

Протягом теплого періоду року важливим є постійний моніторинг та прогнозування опадів. Ці вимірювання крім наукових досліджень використовуються переважно в агрометеорологічних моделюваннях та з метою попередження значних збитків від стихійних явищ. Для детальних наукових досліджень, розроблень моделей та програмного забезпечення різних призначень в гідрології чи інших галузях, для яких важливий моніторинг опадів, частота замірів їх інтенсивності чи накопичення за певний період та детальна картина просторового розподілу цих величин мають велике значення. Використання опадомірів з цією метою часто супроводжується труднощами. Метеостанції розташовані досить віддалено (наприклад, в Україні середня відстань

між метеорологічними станціями становить близько 45 км), через що великі площі земної поверхні залишаються недослідженими. Дані метеостанцій не можуть достатньо задовольнити вимогу надання детальної інформації розподілення інтенсивності опадів у часі. Супутникові дані надають таку можливість, оскільки виміряні величини мають тривалість часового проміжку між отриманням 15 хвилин або півгодини, залежно від використовуваної системи супутників [1]. Також перевагою супутникового методу є значна просторова щільність розташування точок заміру, що дозволяє отримати детальний опис ситуативної картини опадів. Так, просторова сітка має регулярну відстань між вузлами 0.1 градус (8-10 км). Також до переваг супутникових даних опадів відносять можливість отримання різного рівня точності даних, що в наукових

дослідженнях, наприклад зміни клімату, відіграє визначальну роль. І важливим також є високий рівень зручності опрацювання інформації про інтенсивність опадів та можливість автоматизації проміжних етапів обробки даних [2]. Супутникові методи мають важливе значення при оцінці локального значення опадів, оскільки звичайна інтерполяція наземних вимірювань може призвести до помилкового результату, оскільки точки, які беруться для аналізу є настільки віддаленими, що між ними інтенсивність опадів відрізняється значно і не може бути визначена шляхом інтерполяції значень метеостанцій. Тому висока просторова розрізненість супутникових вимірювань дозволяє вирішити такі ускладнення при визначеннях локальних значень інтенсивності опадів, що в свою чергу дозволяє підвищити якість агрометеорологічних, гідрологічних, кліматичних та інших прикладних досліджень.

Супутникові дані представляють собою вимірювання фізичних параметрів атмосфери, які підлягають обробці комп'ютерними алгоритмами. Але розрахунки необхідних даних на основі отриманих фізичних параметрів часто потребують поправок у вигляді додаткових коефіцієнтів, оскільки містять похибки, які виникають на різних етапах обчислень. Тому початкова супутникова інформація підлягає валідації – оцінці отриманих даних незалежними методами [3]. Валідація представляє собою аналітичне порівняння оцінюваних даних з еталонними даними, які вважаються об'єктивно правильними. При оцінці точності даних дистанційного зондування земної поверхні зазвичай проводять валідацію з використанням наземних вимірювань аналізованих величин [4, 5]. Наземній валідації підлягають супутникові вимірювання, які лежать в основі класифікації типу земної поверхні, властивостей ґрунту чи водоймищ, значень фізичних величин верхнього шару ґрунту на сільськогосподарських полях, типу та інтенсивності опадів. Процедура валідації даних є етапом формування супутникової інформації про навколишнє середовище в роботі Національного управління океанографії та атмосфери (NOAA), Європейської організації по експлуатації супутникових даних EUMETSAT, Європейського космічного агентства (ESA), Глобальної системи спостереження за кліматом (GCOS), а також NASA, COPERNICUS та іншими.

Для дослідження процесів опадів, водної циркуляції в атмосфері та динаміки гідрологічних ресурсів командою NASA спільно з японським космічним агенством JAXA було запроваджено проект GPM (Global Precipitation Measurement) [1], який засновується на супутникових методах моніторингу формування опадів. В рамках цієї програми наземна валідація була проведена для прибережної території штату Вірджинія, включаючи проведення польових вимірювань параметрів фізичних характеристик опадів, наприклад, їх інтенсивність, розподіл, форма часток і вид. Наземна валідація використовує інфраструктуру наземних приладів, розроблену для спостереження, кількісного визначення та документування фізичних властивостей опадів [6].

Для валідації даних опадів для різних територій земної поверхні було проведено статистичні аналізи, які описані у роботах для різних територій земної поверхні [7-16].

Метою даної роботи є проведення валідації супутникових даних опадів GPM та H-SAF для території України.

2 ВХІДНІ ДАНІ

В якості вхідних даних в роботі були використані супутникові дані опадів та дані опадів з мережі наземних метеостанцій Українського гідрометцентру. Найбільш поширеними провайдерами супутникових даних інтенсивності опадів є проекти GPM (Global Precipitation Measurement) та H-SAF (Hydrology Satellite Application Facility) [1,2].

2.1 Наземні дані метеостанцій

Станом на періоди, що досліджувались (квітень - вересень 2020 року та квітень - вересень 2021 року) в Україні функціонувало 155 метеостанцій (рис.1), які підпорядковуються Українському гідрометеорологічному центру (УкрГМЦ). Дані з метеостанцій надходять в головний телекомунікаційний центр УкрГМЦ у форматі телеграми SYNOP [17]. У телеграмі дані опадів представлені у вигляді суми за різні періоди: у телеграмі, яка отримується о 9:00 сума кількості опадів надана за три години, у телеграмі, яка отримується о 12:00 сума кількості опадів надана за шість годин. За 18:00 - сума кількості опадів надана за 12 годин. Для даного дослідження було використано дані суми опадів за найдовший період - за 12 годин, а саме - з 6:00 по 18:00.

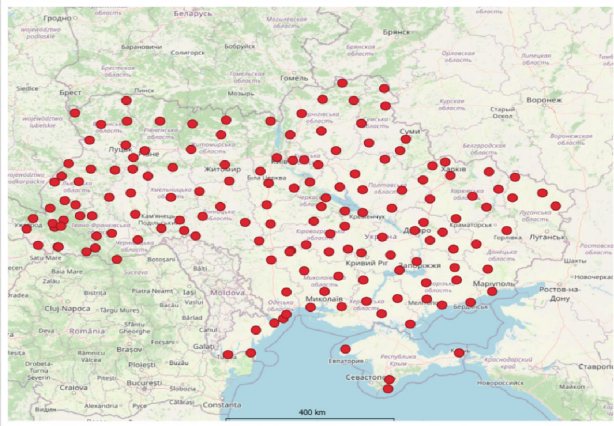


Рис. 1 – Мережа метеостанцій Українського Гідрометцентру

Fig. 1 – Network of weather stations of the Ukrainian Hydrometeorological Center

2.2 Супутникові дані GPM

В рамках проекту GPM опади вимірюються на широтах від 65°Пн.ш до від 65°Пд.ш. Основна обсерваторія (геостационарний супутник) GPM має перший космічний двочастотний радар вимірювання опадів Ku/Ка-діапазону (DPR) і багатоканальний мікрохвильовий тепловізор GPM (GMI). Прилад DPR складається з радара опадів Ка-діапазону (КаPR), що працює на частоті 35,5 ГГц, і радара опадів Ku-діапазону (KuPR), що працює на частоті 13,6 ГГц. DPR забезпечує тривимірні вимірювання структури та характеристик опадів в смузі до 245 км для обох радарів. Порівняно з радаром опадів TRMM [3], DPR більш чутливий до невеликого дощу та снігопаду. Крім того, одночасні вимірювання за допомогою перекриття Ка/Ku-смуг DPR можуть надати інформацію про розподіл розмірів крапельчастинок при помірній інтенсивності опадів. Прилад GMI є багатоканальним мікрохвильовим радіометром із конічним скануванням, що охоплює смугу довжиною 885 км і має тринадцять каналів із діапазоном частот від 10 ГГц до 183 ГГц. GMI використовує набір частот, які були оптимізовані протягом останніх двох десятиліть для отримання сильних, помірних і незначних опадів, використовуючи різницю поляризації в кожному каналі як індикатор оптичної товщини, вмісту води в опадах. Дані проекту GPM представляють собою інтенсивність опадів мм/год, отримуються кожні півгодини.

Алгоритм для обробки первинних супутникових вимірювань Integrated MultisatellitE Retrievals for GPM (IMERG) поєднує інформацію з угруповання супутників

GPM для оцінки опадів на більшій частині поверхні Землі. Цей алгоритм призначений для інтер калібрування, об'єднання та інтерполяції супутникових мікрохвильових даних по визначенню опадів разом із інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням для аналізу опадів в глобальному масштабі. Розрізняють три режими відновлення інтенсивності опадів: early, late і final. Early - формується за 4 години після супутникового вимірювання. Late- формується за 14 годин, final - через 3,5 місяців після супутникових вимірювань [1].

2.3 Супутникові дані H-SAF

Вимірювання опадів системою супутників EUMETSAT входить до загального проекту по прикладній гідрології та раціональному використанню водних ресурсів Operational Hydrology and Water Management: Hydrology – Satellite Application Facility (H-SAF), який був затверджений 3 липня 2005 року організацією EUMETSAT [18]. Дані HSAF були отримані супутниковою системою EUMETCAST. Дані проекту H-SAF формуються кожні 15 хвилин та є кількістю опадів в мм/год. Дані, які отримувались для аналізу - це H03В (P-IN-SEVIRI – інтенсивність опадів на поверхні, виміряна за допомогою геостационарних супутників з інфрачервоним вимірюванням (GEO/IR (Geostationary Earth Orbit/infrared). Алгоритм отримання опадів заснований на інтеркалібруванні вимірювань GEO/IR зображень з даними низько-орбітальних мікрохвильових сенсорів пасивного зондування. В якості GEO/IR зображень використовуються дані радіометру SEVIRI на борту супутників METEOSAT другого покоління (MSG). Роздільна здатність змінюється від трьох км біля підсупутникової точки до 8 км в середньому над Європою. Просторове покриття включає площу H-SAF (Європа та басейн Середземного моря) та Африку і південну частину Атлантичного океану в межах координат LAT 60°S – 67°N, LON 80°W – 80°E.

2.4 Опрацювання та підготовка даних

Для аналізу відповідності супутникових даних вимірюванням наземних метеостанцій бралися показники опадів за два періоди (квітень-вересень 2020 року та квітень-вересень 2021 року). Теплий період є найоптимальнішим для аналізу опадів в помірних широтах, оскільки

для цього періоду притаманна висока активність конвективних процесів, що дає можливість аналізувати різну інтенсивність опадів. В холодний період року на території України спостерігається переважно шарувата хмарність, яка не дозволяє виявляти опади різної інтенсивності.

Вимірні величини, які отримуються із супутникових серверів були відібрані для території України, в координатах, де знаходяться метеостанції (за методом «найближчого сусіда») і розраховані суми опадів з 6:00 до 18:00 за квітень – вересень 2020 та 2021 років. Для розрахунку були взяті дані GPM Late та GPM Early за 2020 та 2021 роки і дані H-SAF за 2021 рік. Кількість метеостанцій, для яких було розраховано порівняльні показники для GPM становить 155, для H-SAF – 127. Для порівняння супутникові та наземні дані приводилися до співставних величин, а саме денних сум опадів із 6:00 до 18:00. Для цього дані метеостанцій отримувалися у вигляді суми кількості опадів за даний період, а супутникові дані, які були завантажені за кожні півгодини даного періоду в одиницях інтенсивності (мм/год) – були перераховані в кількість за годину, після чого була розрахована сума за вказаний часовий період.

Таблиця 1 - Фрагмент таблиці вхідних даних опадів (наземні та супутникові дані GPM)

Table 1 – A fragment of the precipitation input data table (GPM ground-based and satellite data)

Станція	Дата	Значення опадів (станція),мм	Значення опадів (супутник),мм
33049	02.04.2021	2	0,11
33049	03.04.2021	0	0
33049	04.04.2021	0	0
33049	05.04.2021	0	0
33049	06.04.2021	0	0,07
33049	07.04.2021	7	4,17
33049	08.04.2021	0,3	0
33049	09.04.2021	0	0
33049	10.04.2021	0	0
33049	11.04.2021	0	0
33049	12.04.2021	0	0,44
33049	13.04.2021	0	1,58
33049	14.04.2021	0	0,97
33049	15.04.2021	0	0
33049	16.04.2021	4	1,71
33049	17.04.2021	3	3,06
33049	18.04.2021	0	0,01
33049	19.04.2021	0	0

В таблиці 1 показано фрагмент вхідного файлу для порівняння супутникових даних GPM Early із наземними. Такі таблиці формувались для опрацювання програмними засобами статистичного аналізу. В таблиці відображено номер станції, дату і денну суму опадів за вказаний вище період за даними метеостанцій та супутника, відповідно. Загальна кількість рядків (спостережень) для порівняння даних GPM Early (2020) становить 27906, GPM Early (2021) - 24482, GPM Late (2020) - 27906, GPM Late (2021) - 24482, HSAF – 18928. Різниця в кількості спостережень між даними GPM і H-SAF пов'язана з тим, що таблиця даних GPM включає денні суми опадів за період квітень-вересень на 155 метеостанціях, а таблиця даних H-SAF - квітень-серпень на 127 метеостанціях.

3 МЕТОДИКА

Для валідації супутникових даних було проведено їх порівняльний аналіз за допомогою розрахунку коефіцієнтів кореляції та матриць невідповідностей за класами кількості опадів. Коефіцієнти кореляції були розраховані для кожної станції за кожен із двох досліджуваних періодів, а також середні значення кореляції для кожного періоду. Матриці похибок застосовуються при оцінці точності комп'ютерної класифікації [19,20,21]. Як метод аналізу для валідації супутникових даних, матриці похибок будувалися для відображення точності вимірювань в межах певних діапазонів (класів) опадів. Тобто в якості класів бралися декілька діапазонів кількості опадів і визначалося, скільки супутникових значень в певному діапазоні співпадають із цим же діапазоном значень опадів метеостанцій. Всі значення кількості опадів були поділені на такі діапазони (класи): 0-2 мм, 2-5 мм, 5-10 мм, >10 мм за 12 годин.

Основні метричні показники та значення матриць невідповідностей (похибок), які були використані в даній роботі приведені нижче.

Accuracy (A) – ефективність класифікації – частота відповідності супутникового значення певного діапазону такому ж діапазону значення метеостанції. Визначається як:

$$A = (TP+TN)/(TP+TN+FP+FN), \quad (1)$$

де TP (True Positive) – правильно визначений клас, тобто значення супутника знаходиться в тому ж самому діапазоні (класі), що і значення метеостанції; TN (True Negative) – значення супутника не входить до даного класу як і

значення станції; FP (False Positive) – значення супутника було класифіковано в такий клас, до якого не належить значення метеостанції; FN (False Negative) – значення супутника не було класифіковано в той клас, в якому знаходиться значення станції.

Recall/Sensitivity (R) – чутливість – відображає, як часто супутникове значення, яке не потрапляє в даний діапазон, відповідає значенню станції також поза межами цього ж діапазону

$$R = TP / (TP + FN). \quad (2)$$

Specificity (S) – специфічність класифікації. Дана величина показує як часто супутникова сума опадів знаходиться в тому ж діапазоні, що і значення цієї суми за показанням станції

$$S = TN / (TN + FP). \quad (3)$$

Precision (P) – частка супутникових значень з діапазону, який розглядається, які співпадають із діапазоном значення станції [19]

$$P = TP / (TP + FP). \quad (4)$$

Отже основними супутниковими даними для яких була проведена валідація на базі вище перерахованих метрик були наступні: GPM Early, GPM Late та H-SAF. GPM Early були взяті для аналізу, як найбільш оперативні, GPM Late - як більш точні. Для GPM Final валідація не проводилась, оскільки ці дані мають тривалий час обробки і використовуються у вузьких сферах наукових досліджень.

Коефіцієнт кореляції розраховувався для сум опадів за супутниковими даними та даними метеостанцій. Було розраховано кореляції для кожної станції в середньому за сезон 2021-го та 2020-го років.

Обчислення виконувалися з використанням програмного середовища для статистичних обчислень R.

4 РЕЗУЛЬТАТИ

Порівняльний аналіз показав, що більша кількість станцій (117) має коефіцієнт кореляції 0.5 - 0.8 для даних GPM, а для даних опадів HSAF більша кількість станцій (59) має низький коефіцієнт кореляції (0 - 0.3). GPM Late, як більш точні дані, дійсно мають в результаті більшу кількість метеостанцій з вищим коефіцієнтом кореляції в порівнянні з іншими даними (табл.2) Середній по станціях коефіцієнт

кореляції опадів за даними GPM показано в таблиці 3.

Таблиця 2 – Кількість метеостанцій з відповідним коефіцієнтом кореляції

Table 2 - The number of weather stations with the corresponding correlation coefficient

Коефіцієнт кореляції	Early 2020	Late 2020	Early 2021	Late 2021	H-SAF 2021
0-0.3	2	1	12	8	59
0.3-0.5	26	19	28	30	46
0.5-0.8	117	119	108	106	22
0.8 - 1.0	10	16	7	11	0

Таблиця 3 – Середній коефіцієнт кореляції для двох досліджуваних періодів

Table 3 - The average correlation coefficient for the two studied periods

період (квітень-вересень)	GPM Late	GPM Early	H-SAF
2020	0,66	0,62	-
2021	0,59	0,57	0,33

На рисунках 2-6 показано кольоровим відображенням значення коефіцієнту кореляції на кожній метеостанції (червоний – 0 – 0.3, оранжевий – 0.3-0.5, зелений – 0.5 – 0.8, синій – більше 0.8)

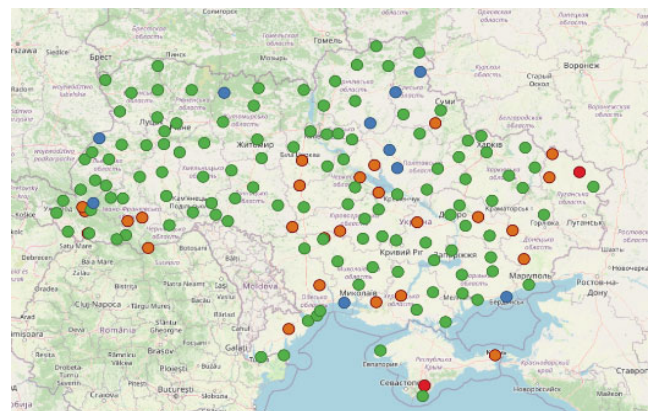


Рис.2 – Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних GPM Early (2020)

Fig.2 - Distribution of correlation coefficients for GPM Early data (2020)

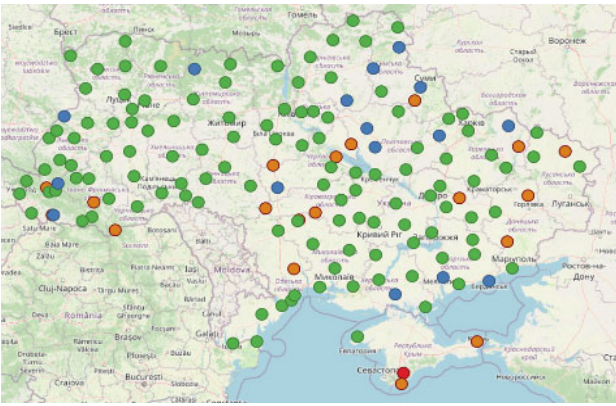


Рис.3 – Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних GPM Late (2020)
Fig.3 - Distribution of correlation coefficients for GPM Late data (2020)

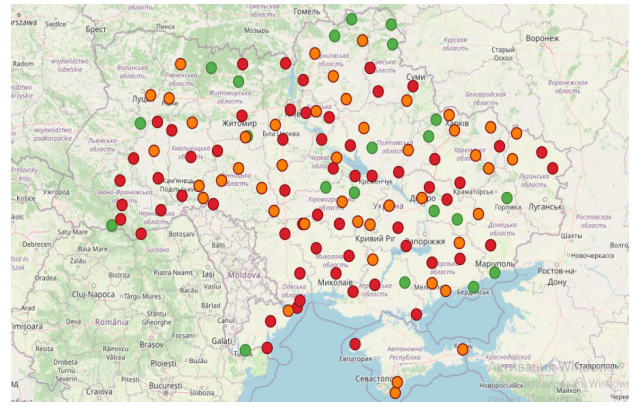


Рис.6 – Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних H-SAF (2021)
Fig.6 - Distribution of correlation coefficients for GPM H-SAF data (2020)

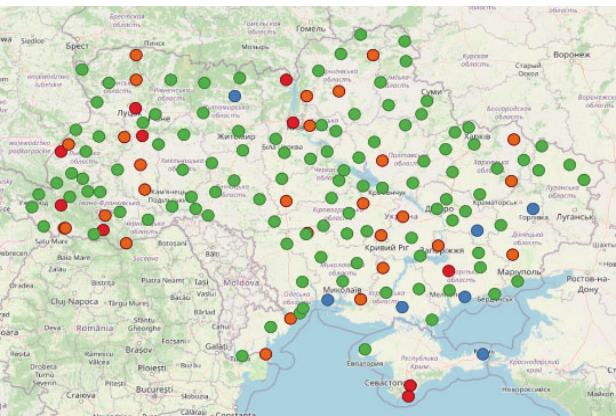


Рис.4 – Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних GPM Early (2021)
Fig.4 - Distribution of correlation coefficients for GPM Early data (2021)

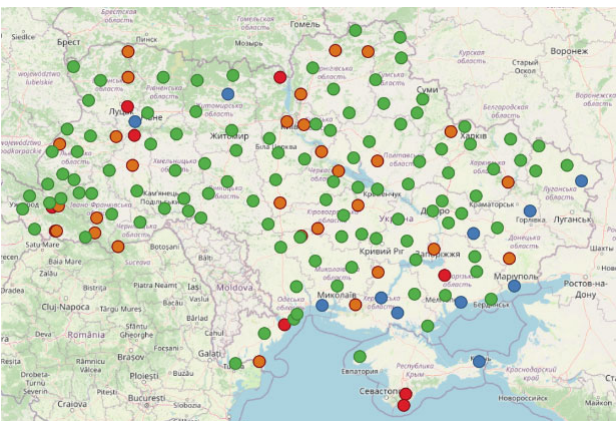


Рис.5 - Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних GPM Late (2021)
Fig.5 - Distribution of correlation coefficients for GPM Late data (2021)

Спостерігається закономірність розподілу низьких коефіцієнтів кореляції у гірських районах досліджуваної території, що можна пояснити особливо активними, нестабільними, з постійною мінливою динамікою процесами середніх шарів атмосфери, які порушують прямий зв'язок процесів на поверхні землі із зонами формування опадів, а саме зародження опадів швидко віддаляється від місця їх випадіння на землю.

Таблиці 4-8 представляють собою матриці похибок, розраховані для чотирьох класів кількості опадів (мм): “0-2”, “2-5”, “5-10”, “>10” як сума за 12 годин. Матриці похибок показують розподіл числа спостережень за класами кількості опадів. У таблиці 9 наведено коефіцієнти точності, розраховані на основі матриць похибок.

Таблиця 4 - Матриця похибок для даних GPM Early періоду квітень-вересень 2021 (точність класифікації, A = 0.82)

Table 4 – Confusion matrix for GPM Early data for April-September 2021(classification accuracy, A = 0.82)

Супутник \ Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	21482	1162	514	306
2-5	919	475	408	346
5-10	304	281	323	355
>10	120	154	217	540

Таблиця 5 - Матриця похибок для даних GPM Late періоду квітень-вересень 2021 (точність класифікації, A = 0.82)
Table 5 – Confusion matrix for GPM Late data for April-September 2021(classification accuracy, A = 0.82)

Супутник \ Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	21552	1082	507	323
2-5	903	482	404	359
5-10	280	280	337	366
>10	109	141	231	550

Таблиця 7 - Матриця похибок для даних GPM Late періоду квітень-вересень 2020 (точність класифікації, A = 0.83)
Table 7 – Confusion matrix for GPM Late data for April-September 2020 (classification accuracy, A = 0.83)

Супутник \ Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	18982	1028	464	220
2-5	603	439	367	320
5-10	231	248	316	360
>10	91	122	173	528

Таблиця 6 -Матриця похибок для даних GPM Early періоду квітень-вересень 2020 (точність класифікації, A = 0.81)
Table 6 – Confusion matrix for GPM Early data for April-September 2020 (classification accuracy, A = 0.81)

Супутник \ Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	18803	1085	540	266
2-5	626	436	353	314
5-10	260	235	281	379
>10	98	113	191	502

Таблиця 8 - Матриця похибок для даних H-SAF періоду квітень-серпень 2021 (точність класифікації, A = 0.79)
Table 8 – Confusion matrix for H-SAF data for April-September 2021(classification accuracy, A = 0.79)

Супутник \ Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	13788	661	384	375
2-5	885	188	143	195
5-10	447	135	89	141
>10	286	90	99	251

Таблиця 9 – Коефіцієнти класифікації матриць похибок (P – precision, R – recall, S – specificity)
Table 9 – Classification coefficients of confusion matrices (P – precision, R – recall, S – specificity)

мм	GPM Early 2020			GPM Early 2021			GPM Late 2020			GPM Late 2021			H-SAF 2021		
	P	R	S	P	R	S	P	R	S	P	R	S	P	R	S
0-2	0.77	0.95	0.59	0.77	0.94	0.60	0.79	0.95	0.62	0.78	0.94	0.62	0.69	0.89	0.48
2-5	0.59	0.23	0.94	0.58	0.23	0.93	0.59	0.24	0.94	0.59	0.24	0.93	0.55	0.17	0.93
5-10	0.58	0.21	0.96	0.59	0.22	0.96	0.60	0.24	0.96	0.59	0.22	0.96	0.54	0.12	0.96
>10	0.66	0.34	0.98	0.66	0.35	0.98	0.68	0.37	0.98	0.66	0.34	0.98	0.62	0.26	0.97

За показником “specificity” найвищий рівень відповідності супутникових даних (H-SAF, GPM-Late, GPM-Early) наземним даним мають опади діапазону >10 мм (таблиця 9). Низьке значення коефіцієнту “specificity” для діапазону

0-2 мм пояснюється тим, що супутникові методи здатні фіксувати дуже низькі значення кількості опадів, в той час коли станція показує їх відсутність – 0 мм. Так, згідно зі значеннями матриць похибок, бачимо, що велика частина значень наземних вимірювань опадів діапазону

0-2 мм, показана супутниковим методом як 2-5 мм. Також бачимо, що клас 2-5 мм за супутником має найбільшу сплутаність із класом 0-2 мм за станцією (для H-SAF, GPM-Late, GPM-Early). Але спираючись на високі значення коефіцієнтів “recall” для діапазону 0-2 мм (для H-SAF, GPM-Late, GPM-Early), можемо зробити висновок, що коли станція не показує таку кількість опадів (0-2 мм), то супутник теж показує інший клас значень. Значення коефіцієнтів “precision” показують, що супутникові заміри є дійсно надійними, тобто, наявність чи відсутність опадів буде визначена точно, оскільки найвище значення цього коефіцієнту характерне саме для низьких та значних опадів.

Таким чином, супутник може показувати наявність малої кількості опадів, таку, що опадоміри станції не фіксують, тобто відображають 0 мм. Так само деяка частка значень, які входять у діапазон 2-5 мм супутником фіксуються, а на станції це приймається за нуль. Сильні опади або їх відсутність, що зафіксовано супутником, підтверджуються станціями з високою частотою. Також варто зазначити, що покласовий порівняльний аналіз опадів підтвердив відносно низьку якість супутникових даних H-SAF у порівнянні із даними GPM відповідно до отриманих коефіцієнтів точності матриць похибок.

На основі отриманих результатів можемо стверджувати, що супутникові дані можуть бути використані для моніторингу опадів, оскільки мають високу точність вимірювань і їх варто розглядати як додаткове джерело інформації у разі відсутності наземних даних. Відхилення супутникових значень від наземних пояснюються складностями обробки супутникових вимірювань при обчисленні кількості опадів.

Основна причина невідповідностей наземних та супутникових значень полягає в тому, що визначення опадів на наземних станціях охоплюють дуже маленьку площу вимірювання (є точковим), щодо супутникових даних, то найменша просторова одиниця вимірювання, що була доступна в межах даного дослідження, є піксель розміром 0.1 x 0.1 градус. Також на наявність похибки у валідації впливає те, що для отримання даних опадів супутниковим методом виконується багато проміжних розрахунків на основі вимірювань температури верхнього шару, розміру крапель та ін. Крім того, на наявність похибки впливає відмінність у

просторовому аспекті вимірювань (супутник - 0.1x0.1 градус, станція - точкове вимірювання) [22,23,24].

5 ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було розраховано кількісні характеристики порівняльного аналізу опадів за супутниковими даними та за даними наземних метеостанцій. Було визначено коефіцієнти кореляції (GPM Late 2020 = 0,66; GPM Late 2021 = 0,59; GPM Early 2020 = 0,62 GPM Early 2021 = 0,57; H-SAF 2021 = 0,33). А також було проведено покласовий аналіз за допомогою розрахунку матриць похибок. Точність класифікації (“accuracy”) становила: H-SAF = 0,79, GPM Early 2021 = 0,82, GPM Late 2021 = 0,82, GPM Early 2020 = 0,81, GPM Late 2020 = 0,83. Аналіз отриманих величини коефіцієнтів матриць похибок показав, що наявність чи відсутність опадів визначається точно. Конкретне значення кількості опадів визначається менш точно, але це може бути пов’язано із похибками валідації, які спричинені як складними етапами формування супутникових даних (розрахунок на основі фізичних параметрів хмар), так і різницею між просторовою роздільною здатністю супутникових та наземних методів (площа пікселя та точково). Отже результати роботи показали, що супутникові дані інтенсивностей опадів мають достатню відповідність для використання їх при виконанні практичних задач, наукових дослідженнях та в якості вхідних даних у створених системах моніторингу [25, 26]. Крім того, супутникові дані опадів можна комбінувати з даними системи грозопеленгації України [26, 27] для отримання опадів у більш високій просторово-часовій роздільній здатності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Data | NASA Global Precipitation Measurement Mission. URL: <https://gpm.nasa.gov/data> (Accessed 31.08.2021)
2. EUMETSAT | Monitoring the weather and climate from space | EUMETSAT. URL: <https://www.eumetsat.int/> (Accessed 31.08.2021)
3. Global Precipitation Measurement (GPM). Ground Validation System. Validation Network Data Product User’s Guide. Volume 2, November 16, 2015.
4. Review of validation standards of Earth Observation derived biophysical products / M. Soto-Berelov, S. Jones, E. Farmer, W. Woodgate. 2015.
5. Кривошеїн О. О. Порівняння наземних вимірювань сонячної радіації із супутниковими даними в межах областей України за період 2001–2009 рр. *Часопис картографії*, 2013. 9. С.93-103.

6. Ground Validation | NASA Global Precipitation Measurement Mission. URL: <https://gpm.nasa.gov/science/ground-validation> (Accessed 31.08.2021)
7. Mathew R., Schwaller K., Robert Morris. A Ground Validation Network For The Global Precipitation Measurement Mission. *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*. March 2011. Vol.28.
8. Validation of rainfall data estimated by GPM satellite on Southern Amazon region / Luiz Octavio Fabriciodos Santos, Carlos Alexandre Santos Querino, Juliane Kayse Albuquerque Silva Querino, etc. *Revista Ambiente&Água*. 2019. Vol. 14(1).
9. Ground Validation of GPM IMERG Precipitation Products over Iran / Fatemeh Fadia Maghsood, Hossein Hashemi, Seyyed Hasan Hosseini, Ronny Berndtsson. *Remote Sens*. 2020. Vol.12(1).
10. Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface / Justice C., Belward A., Morisette J., Lewis P., Privette J., Baret F. *Remote sensing*. 2000. Vol. 21(17).
11. Validation of Satellite and Merged Rainfall Data over Ghana, West Africa / Winifred Ayinpogbilla Atiah, Leonard Kofitse Amekudzi, Jeffrey Ni iArmah Aryee, Kwasi Preko, Sylvester Kojo Danuor. *Atmosphere*. 2020. #11
12. Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia / Getachew Tesfaye, Tsegaye Tadesse, Berhan Gessesse, Tufa Dinku. *Atmos. Meas. Tech. Discuss*. November 2017
13. Haral Feidas. Validation of the H-SAF precipitation products over Greece using rain gauge data / Associate Scientist Activity hsaf. Final Report. Aristotle University of The Saloniki. July 2015.
14. Measuring precipitation in Eastern Himalaya: Ground validation of eleven satellite, model and gauge interpolated gridded products / Manish Kumar, Oivind Hodnebroe, Anne Sophie Daloz, Sumit Sen, Shrinivas Badiger, Jagdish Krishnasamy. *Journal of Hydrology August*. 2021. #599.
15. Validation of TRMM and FEWS Satellite Rainfall Estimates with Rain Gauge Measurement over Ashanti Region, Ghana / Leonard K. Amekudzi, Marian A. Osei, Winifred A. Atiah, Jeffrey N. A. Aryee, Maureen A. Ahiataku, Emmanuel Quansah, KwasiPreko, Sylvester K. Danuor, Andreas H. Fink. *Atmospheric and Climate Sciences*. 2016. Vol.6(4).
16. Global Precipitation Measurement (GPM) Ground Validation (GV) Prototype in the Korean Peninsula / Ji-Hye Kim, Mi-Lim Ou, Jun-Dong Park, Kenneth R. Morris, Mathew R. Schwaller, David B. Wolf. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 2014. Vol.31.
17. Commission for synoptic meteorology. Abridged final report. World meteorological organization. Geneva, 1970 .
18. Chris Cohoon, Owen Kelley. Accessing the PPS Near Real Time Data using HTTPS and the jsimpson https Server. 11 June 2020
19. Rodrigues Fernandes J. L. Analysis of Classification Algorithms for Crop Detection using LANDSAT 8 images / Universidade Nova. 2015
20. Кривошеїн О. О., Кривобок О. А., Адаменко Т. І. Система визначення площ посівів основних сільськогосподарських культур України за супутниковими даними. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. №26. С. 78-90. <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.07>
21. Kyvobok O., Kryvoshein O., Adamenko T. Peculiarities of technological adaptation of the CGMS system for agricultural crops monitoring in Ukraine. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 64-79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.07>
22. GPM Satellite Simulator over Ground Validation Sites / Toshihisa Matsui, Takamichi Iguchi, Xiaowen Li, Mei Han, Wei-Kuo Tao, Walter Petersen, Tristan L'Ecuyer, Robert Meneghini, William Olson, Christian D. Kummerow, Arthur Y. Hou , Mathew R. Schwaller, Erich F. Stocker, John Kwiatkowski. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013. Vol. 94(11). Pp. 1653–1660
23. HSAF Precipitation products / Davide Melfi, Marco Galli, Valentina Rosati, Stefano Dietrich. *Conference: Satellite inspired hydrology in an uncertain future: an H SAF and HEPEX work shop*. At: Reading (UK). November 2019.
24. Preparations for Global Precipitation Measurement (GPM) ground validation / S.W. Bidwell; J.F. Durning; D.F. Everett; M.R. Schwaller; E.A. Smith; D.B. Wolff. *IGARSS 2004. International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2004
25. Перспективи використання супутникової інформації для моніторингу досягнення цілей сталого розвитку України. Аналітична доповідь / Інститут космічних досліджень НАН України і ДКА України. Київ, 2020.
26. Український сегмент системи грозопеленгації ENTLN / Кривобок О. А., Кривошеїн О. О., Коман М. М. Крупа Є. О. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. №21. С. 5-20. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.01>
27. Заболотна О. С., Кривошеїн О.О., Кривобок О. А. Моніторинг кількості опадів за супутниковими даними та даними грозопеленгації для території України. *Тези доповідей Другого Всеукраїнського гідрометеорологічного з'їзду*. 2021. С. 164-165

REFERENCES

1. Data | NASA Global Precipitation Measurement Mission. Available at: <https://gpm.nasa.gov/data> (Accessed 31.08.2021)
2. EUMETSAT | Monitoring the weather and climate from space | EUMETSAT. Available at: <https://www.eumetsat.int/> (Accessed 31.08.2021)
3. *Global Precipitation Mission (GPM). Ground Validation System. Validation Network Data Product User's Guide. Volume 2, November 16, 2015.*
4. Soto-Berelev, M, Jones, S., Farmer, E., & Woodgate, W. (2015). *Review of validation standards of Earth Observation derived biophysical products.*
5. Kryvoshein, O.O. (2013). Porivniannia nazemnykh vymiriv soniachnoi radiasii z suputnykovymy danymy v mezhakh oblastei Ukrainy za period 2001-2009rr. [Comparison of terrestrial measurements of solar radiation with satellite data within the regions of Ukraine for the period 2001–2009]. *Journal of Cartography*, 9, pp.93-103. (in Ukr)
6. Ground Validation | NASA Global Precipitation Measurement Mission. Available at: <https://gpm.nasa.gov/science/ground-validation> (Accessed 31.08.2021)
7. Mathew R., Schwaller & Robert Morris, K. (2011). A Ground Validation Network For The Global Precipitation Measurement Mission. *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*, 28 (March).
8. Luiz Octavio Fabriciodos Santos, Carlos Alexandre Santos Querino, Juliane Kayse Albuquerque Silva Querino, Altemar Lopes Pedreira Junior, Aryanne Resenede Melo Moura, Nadja Gomes Machado & Marcelo Sacardi Biudes.

- (2019). Validation of rainfall data estimated by GPM satellite on Southern Amazon regio. *Revista Ambiente&Água*, vol. 14(1).
9. Fatemeh Fadia Maghsood, Hossein Hashemi, Seyyed Hasan Hosseini & Ronny Berndtsson.(2020). Ground Validation of GPM IMERG Precipitation Products over Iran. *Remote Sens.*, 12(1).
 10. Justice, C., Belward, A., Morisette, J., Lewis, P., Privette, J. & Baret, F. (2000). Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface. *Remote sensing*, vol. 21(17).
 11. Winifred Ayinpogbilla Atiah, Leonard Kofitse Amekudzi, Jeffrey Ni iArmah Aryee, Kwasi Preko & Sylvester Kojo Danuor. (2020). Validation of Satellite and Merged Rainfall Data over Ghana. *West Africa. Atmosphere*, 11.
 12. Getachew Tesfaye, Tsegaye Tadesse, Berhan Gessesse & Tufa Dinku. (2017). Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin. *Ethiopia. Atmos. Meas. Tech. Discuss.* November 2017
 13. Haral Feidas *Validation of the H-SAF precipitation products over Greece using rain gauge data. Associate Scientist Activity hsaf*. Final Report. Aristotle University of The Saloniki. July 2015.
 14. Manish Kumar, Oivind Hodnebroe, Anne Sophie Daloz, Sumit Sen & Jagdish Krishnasamy. (2021). Measuring precipitation in Eastern Himalaya: Ground validation of eleven satellite, model and gauge interpolated gridded products. *Journal of Hydrology August*, 599.
 15. Leonard K. Amekudzi, Marian A. Osei, Winifred A. Atiah, etc. (2016). Validation of TRMM and FEWS Satellite Rainfall Estimates with Rain Gauge Measurement over Ashanti Region, Ghana. *Atmospheric and Climate Sciences*, vol.6(4).
 16. Ji-Hye Kim, Mi-Lim Ou, Jun-Dong Park etc. (2014). Global Precipitation Measurement (GPM) Ground Validation (GV) Prototype in the Korean Peninsula. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, Vol. 31.
 17. *Commission for synoptic meteorology. Abridged final report*. World meteorological organization. Geneva, 1970
 18. Chris Cohoon & Owen Kelley. (2020). *Accessing the PPS Near Real Time Data using HTTPS and the jsimpson https Server*, 11 June 2020
 19. Rodrigues Fernandes, J. L. (2015). *Analysis of Classification Algorithms for Crop Detection using LANDSAT 8 images*. Universidade Nova.
 20. Kryvoshein, O.O., Kryvobok, O.A., Adamenko, T.I. (2020). Systema vyznachenia ploshch posiviv osnovnykh silskohospodarskykh kultur Ukrainy za suputnykovymi danymi [Satellite-based system of area estimation for main agricultural crops of Ukraine]. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 26, pp. 78-90. (in Ukr). <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.07>
 21. Kryvobok, O.A., Kryvoshein, O.O.; Adamenko, T.I. (2018). Peculiarities of technological adaptation of the CGMS system for agricultural crop monitoring in Ukraine. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 22, pp. 64-79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.07>
 22. Toshihisa Matsui, Takamichi Iguchi, Xiaowen Li, Mei Han etc. (2013). GPM Satellite Simulator over Ground Validation Sites. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol.94(11), pp. 1653–1660
 23. Davide Melfi, Marco Galli, Valentina Rosati & Stefano Dietrich. (2019). HSAF Precipitation products. *Conference: Satellite inspired hydrology in an uncertain future: an H SAF and HEPEX work shop*. At: Reading (UK) November 2019.
 24. Bidwell, S.W., Durning, J.F. Everett, D.F. etc. (2004). Preparations for Global Precipitation Measurement (GPM) ground validation. IGARSS 2004. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004
 25. *Perspektyvy vykorystannia suputnykovoї informatsii dlia monitorynhu dosiahnennia tsilei staloho rosvytku Ukrainy [Prospects for the use of satellite information for monitoring the achievement of Ukraine's sustainable development goals]*. Analytical report. Institute of space research of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine. Kyiv, 2020 (in Ukr)
 26. Kryvobok, O.A., Kryvoshein, O.O., Koman, M.M. & Krupa, E.O. (2018). Ukrainskii sehment systemy hrozopelenhatsii ENTLN (LIGHTNING FINDING SYSTEM) [Ukrainian segment of the ENTLN (LIGHTNING FINDING SYSTEM)]. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 21, pp.5-20. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.01> (in Ukr)
 27. Zabolotna, O.S., Kryvoshein, O.O. & Kryvobok, O.A. (2021). Monitorynh kilkosti opadiv za suputnykovymi danymi ta danymi hrozopelenhatsii dlia terytorii Ukrainy [Monitoring of the amount of precipitation according to the satellite data and sunderstorm forecasting data for the territory of Ukraine]. *Abstracts of reports of the second Ukarinian Hydrometeorological Congress*, pp.164-165. (in Ukr)

VALIDATION OF PRECIPITATION OBTAINED FROM GPM AND H-SAF SATELLITE DATA WITH RELATION TO UKRAINIAN GROUND WEATHER STATIONS' DATA

O. S. Zabolotna, O. O. Kryvoshein, O. A. Kryvobok

*Ukrainian Hydrometeorological Institute,
37 Nauki av., 03028, Kyiv, Ukraine, zabolotnaolena@ukr.net*

The main objective of this study is to validate H-SAF and GPM satellite precipitation data for the territory of Ukraine. Validation was carried out by comparing satellite data with data from ground weather stations of Ukrainian Hydrometeorological Center and included the following stages: data collection and processing, bringing the data to the same spatial and temporal resolution, calculation of correlation coefficients and construction of confusion matrices. Correlation coefficients were calculated for each of the stations for two studied periods (the first period - April-September 2020, the second period - April-September 2021). In addition, to ensure

a more detailed analysis, confusion matrices were constructed based on division of precipitation into classes of different intensity. The comparative analysis showed that a larger number of stations (117) has a correlation coefficient of 0.5 - 0.8 with relation to GPM data, and, as for HSAF precipitation data, a larger number of stations (59) has a low correlation coefficient (0 - 0.3). Confusion matrices were calculated for the following four classes of rainfalls (mm): "0-2", "2-5", "5-10", ">10". The confusion matrices coefficients showed that low-intensity precipitation or "no precipitation", as well as high-intensity precipitation, can be determined by a satellite with high accuracy as opposed to the ground-based weather station measurements. Thus, according to the "specificity" indicator, a precipitation class >10 mm has the highest level of correspondence of satellite data (H-SAF, GPM Late, GPM Early) to ground data. The low value of the "specificity" for the range of 0-2 mm is explained by the fact that satellite methods are able to detect very low values of precipitation intensity, while the station shows their absence – 0 mm. Thus, according to the values of the confusion matrices, we see that a large part of the values of ground measurements of precipitation in the range of 0-2 mm are shown by the satellite method as "2-5 mm" class. We can also see that the "2-5 mm" class by satellite has the most confusion with the 0-2 mm class by station (for H-SAF, GPM Late, GPM Early). But based on the high values of the "recall" for the range of 0-2 mm (for H-SAF, GPM Late, GPM Early), we can conclude that when the station does not show this amount of precipitation (0-2 mm), then the satellite also shows another class of values. The values of "precision" coefficient show that the satellite measurements are actually reliable. This means that presence or absence of precipitation may be determined precisely, since the highest value of the "precision" coefficient is typical for low and high amounts of precipitation (on average 0.76 and 0.66, respectively). Detected by satellites, heavy precipitation or no precipitation are also confirmed in most cases by ground stations. Based on the results of the validation, GPM and H-SAF satellite precipitation data products can be used for rainfall monitoring and considered as an additional source of meteorological information.

Key words: precipitation, satellite data, ground data, comparison

Подання до редакції : 01. 07. 2023
Надходження остаточної версії : 07. 12. 2023
Публікація статті : 21. 12. 2023