

УДК 37.21.31; 37.21.37

## ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМУ ТА ШВИДКОСТІ ВІТРУ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

М. М. Коман

Український гідрометеорологічний інститут,  
пр-т Науки, 37, 03028, Київ, Україна, [mishakoman@gmail.com](mailto:mishakoman@gmail.com)

Метою даної статті є визначення напрямку і швидкості вітру на знімках з геостационарних штучних супутників Землі та нанесення двовимірних векторів вітру, величина та напрямок яких відповідає швидкості та руху хмарних мас, на супутникове зображення для застосування у системі короткострокового прогнозу небезпечних погодних явищ для території України.

Для роботи методики необхідно виділити хмарні області на супутниковому зображенні, використовуючи пороговий метод. Після чого на основі особливості розподілу температури яскравості між двома модулями відстеження (частини зображення, між якими проводиться порівняння двох послідовних супутникових зображень) визначається максимальний коефіцієнт кореляції для інфрачервоної температури яскравості, що відповідає переміщенню хмарних мас і встановлює початок і кінець вектору напрямку вітру.

Для визначення оптимального застосування методики для території України проведено аналіз точності між різними розмірами модулів відстеження. При аналізі було виявлено, що точність визначення напрямку вектору вітру залежить від розміру модуля відстеження - чим більший модуль відстеження, тим точніше визначається напрям вектору, але, враховуючи часовий інтервал між зображеннями у 15 хвилин, оптимальним для застосування на території України є алгоритм з модулем відстеження 5x5 пікселів.

Також, здійснено порівняння роботи методики з даними прогностичних моделей ICON та GFS. Напрямок руху повітряних мас за результатами роботи алгоритму виявився більш надійним, ніж дані прогностичних моделей, оскільки алгоритм аналізує переміщення повітряних мас в реальному часі, а прогностичні моделі розраховують утворення і переміщення повітряних мас завчасно (з інтервалом у часі від декількох до десятків годин). Чисельний прогноз швидкості вітру моделей ICON та GFS є більш точним, оскільки алгоритм визначає швидкість вітру за переміщенням хмарних мас на супутникових зображеннях, а прогностичні моделі при розрахунках беруть до уваги декілька факторів (поля тиску, розвиток і подальшу еволюцію циклонів, антициклонів, географічні характеристики місцевості та ін.), що робить їх більш реалістичними.

**Ключові слова:** супутникові зображення, коефіцієнт кореляції, напрям вітру, швидкість вітру

---

### 1. ВСТУП

Велика роль в сучасних дослідженнях земної атмосфери відводиться метеорологічним штучним супутникам Землі. Можливість здійснення за їх допомогою глобальних спостережень відкриває величезні перспективи отримання різноманітної інформації про стан атмосфери і земної поверхні, необхідної для розв'язання широкого кола наукових і прикладних задач [1].

Поява супутникової інформації поклала початок розвитку нових методів дослідження, оскільки інформація, що надходить, істотно відрізняється від традиційних наземних спостережень. Якщо спостереження з земної поверхні просторово дискретні, то дані космічних апаратів є нерозривними у просторі, що дозволяє наочно

оцінити просторове поле різних метеовеличин в різних спектральних каналах.

Найбільш очевидною є потреба у супутниковій інформації для забезпечення безпеки польотів авіації та судноводіння. Велика просторова й часова протяжність маршрутів, прилеглих часто до районів з розрідженою мережею метеорологічних станцій, робить супутникові дані майже єдиним джерелом інформації про погоду в цих районах. Зрозумілою є величезна увага дослідників, яку приділяють питанням використання супутникової інформації для аналізу і прогнозу погоди.

Особливо зросла роль супутникової інформації після розширення в останні роки мережі наземних пунктів її прийому, що зробило доступною цю інформацію для використання в опера-

тивних прогнозах погоди [2].

Форма і структура хмарних утворень, їх еволюція та переміщення відображають складний комплекс фізичних процесів, що протікають в атмосфері. Від характеру цих процесів залежить картина розподілу хмар на знімках, тому зображення хмарності, разом з радіаційними вимірами, можна використовувати для оцінки синоптичної ситуації та уточнення розподілу та еволюції певних метеорологічних величин, які безпосередньо за допомогою супутників не вимірюються.

Синоптичний аналіз над районами Земної Кулі, мало освітленими метеорологічними даними, надзвичайно ускладнений. Тому кількісна інформація про швидкість і напрямок зміщення окремих хмарних масивів, що характеризується напрямом і швидкістю вітру, представляється надзвичайно важливою, адже може вказувати на розвиток і поширення небезпечних погодних явищ (грози, град, сильний вітер, зливи).

Небезпечні погодні явища зазвичай утворюються за умови наявності сильних висхідних потоків повітря, що виділяються на супутникових знімках у вигляді чітко виділеної холодної області верхньої межі хмарності (зі збільшенням сили висхідного потоку зменшується температура повітря). Досліджуючи розвиток та рух таких зон з низькою температурою верхньої межі хмар, можна прогнозувати напрям та швидкість руху небезпечних погодних явищ за супутниковими даними.

Тому в Українському гідрометеорологічному інституті було адаптовано метод визначення напрямку та швидкості вітру за супутниковими даними та проаналізовано точність цього методу відповідно до розміру модулів відстеження.

*Метою даної статті є опис алгоритму визначення напрямку і швидкості вітру за супутниковими зображеннями та аналіз його ефективності для території України.*

## 2. ОПИС ВИКОРИСТАНИХ ДАНИХ

У цій роботі використовуються дані з Геостаціонарного супутника MSG-3 [3]. Супутник розташовується на постійній висоті 35786 км над рівнем моря (ексцентриситет дорівнює 0). Саме така висота забезпечує супутнику період обертання, рівний сидеричному періоду обертання Землі (23 години 56 хвилин). Тобто, супутник обертається навколо планети з кутовою швидкістю, що дорівнює кутовій швидкості обертання Землі навколо своєї осі й начебто непорушно зависає в небі.

Радіометр SEVIRI (Spinning Enhanced Visible

and Infrared Imager), встановлений на супутниках MSG, має 12 каналів, які дозволяють отримувати зображення поверхні Землі кожні 5 (MSG-1) або 15 хвилин (MSG-2,3). Канал з високою роздільною здатністю (HRV) у видимому діапазоні має роздільну здатність (в підсупутникової точці над низькими широтами) 1 км, решта каналів - 3 км. Важливими для аналізу конвективних систем є в основному канали: 0,6; 1,6; 10,8 і 12,0 мкм а також поєднання різних каналів [4]. Просторова роздільна здатність в підсупутникової точці по Україні становить 6-8 км, а в каналі високого просторового розділу (HRV) - 2-3 км.

Для створення зображень використовуються дані геостаціонарного супутника MSG-3, що надходять зі станції прийому первинних супутникових даних на станцію прийому в Українському гідрометеорологічному інституті [2]. Дані у вигляді Level 1.5 raw data [5] з спектрального каналу 10,8 мікрометрів трансформуються програмним забезпеченням SUMO [6] у проєкцію «Plate Carree» та зберігаються у форматі .JPG для подальшого використання.

Для порівняння отриманих результатів використовуються дані прогностичних моделей ICON [7,8] та GFS [8,9]

## 3. МЕТОД ОТРИМАННЯ ПОЛЯ ВІТРУ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

Існує цілий ряд методик [10,11,12,13,14], які на основі аналізу супутникових знімків дозволяють: відновлювання і прогнозування чисельних значень геопотенціалу, висоти верхньої межі хмарності, напрямку і швидкості вітру у Землі і на висотах; відновлювати і прогнозувати поля тиску у Землі і геопотенціалу на висотах, розрахунок швидкості вітру методом максимального коефіцієнту кореляції. Із перелічених методик для визначення напрямку і швидкості вітру використовується метод максимального коефіцієнту кореляції [14].

Геостаціонарні метеорологічні супутники дозволяють отримати зображення поверхні Землі, де кожен піксель відповідає температурі підстилаючої поверхні у  $^{\circ}\text{C}$ . За допомогою цих зображень можна визначити напрям та швидкість вітру. Ця методика полягає у порівнянні послідовних супутникових знімків між собою. Напрямок руху хмарних мас відповідає напрямку вітру, а швидкість їх руху – швидкості вітру.

Для відображення напрямку та швидкості вітру в алгоритмі використовуються вектори, для побудови яких необхідні чотири показники: ши-

роти і довготи відправної точки, напрям вектору вітру (одиниця: кут маси за годинниковою стрілкою істинної півночі) та розмір вектору (одиниця: м/с).

Відповідно до аналізу особливостей хмар на зображенні, можна виконати бінаризовану обробку для хмарних зображень за допомогою порогового методу і визначити хмарні пікселі на зображенні. Після чого використовується метод коефіцієнту кореляції для інфрачервоної температури яскравості [14], що дозволяє за максимальним коефіцієнтом кореляції визначити напрям вектору вітру.

### 3.1 Виявлення хмари

Існує багато способів визначення хмарності [15,16], найбільш часто використовується пороговий метод на основі температури верхньої межі хмарності. В даній роботі пороговий метод використовується для виділення хмарності з особливо низькою температурою, що характерна для стихійних погодних явищ (зливи, грози, град, тощо) [17].

Для особливо небезпечної хмарності характерні температури нижче  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$  [18] (виділяючи такі частини зображення можна спостерігати за розвитком стихійних погодних явищ).

Середнє значення температури розраховується як порогове значення, визначене наступним чином

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b(i, j)}{mn} \quad (1),$$

де в сумі значення температури

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b(i, j)$$

загальна кількість значень в зоні  $m$  пікселів по осі  $x$  та  $n$  пікселів по осі  $y$  на першому зображенні.

Для подальшої роботи виділяється хмарна матриця розміром  $5 \times 5$  пікселів на зображенні. Якщо середнє значення температури обраної області більше порогового, вважається, що пікселі є хмарними, і можна визначити вектори напрямку та швидкості вітру. Однак, якщо середнє значення температури обраної області менше, ніж обраний поріг, можна розглядати цю область як безхмарну. Це місце розглядається як нульова область, без векторів напрямку та швидкості вітру. Коли обробка зображення завершена і виділені усі хмарні області, наступний крок полягає

у відповідності хмарних областей на послідовних зображеннях.

### 3.2 Визначення швидкості вітру

Для порівняння хмарних областей на двох послідовних зображеннях використовується, згідно з дослідженням [14], коефіцієнт кореляції між двома модулями відстеження (частини зображення між якими проводиться порівняння  $S_0$  на першому зображенні і  $S_1$  - на другому), що визначається наступним чином

$$OC(I, J, M, N) = \frac{\sum \sum [S_0(i, j) S_1(i, j)]}{\sqrt{\sum \sum S_0(i, j)^2 \sum \sum S_1(i, j)^2}}, \quad (2)$$

де  $OC(I, J, M, N)$  - коефіцієнт кореляції;  $S_0(i, j)$  - значення пікселю з координатами  $(i, j)$  у модулі відстеження  $S_0$  на 1-му зображенні;  $S_1(i, j)$  - значення пікселю з координатами  $(i, j)$  у модулі відстеження  $S_1$  на 2-му зображенні;  $S_0$  - модуль відстеження на 1-му зображенні з центром  $(I, J)$ ;  $S_1$  - модуль відстеження на зображенні, отриманому через 15 хвилин після першого, і центром  $(M, N)$ .

Для розрахунку коефіцієнта кореляції використовується два зображення (рис. 1) з різницею у 15 хвилин. На першому зображенні виділяється модуль відстеження  $S_0$  розміром  $5 \times 5$  пікселів з центром у точці А, що буде початком вектору. Для порівняння на 2-му зображенні вибирається цільовий модуль  $S$  розміром  $50 \times 50$  пікселів з центром в точці А. У цій зоні виділяється модуль відстеження  $S_1$  розміром  $5 \times 5$  пікселів з центром у точці В, для якої розраховується коефіцієнт кореляції (2), по суті виконується порівняння з модулем відстеження  $S_0$  на 1-му зображенні, після чого точка В і весь модуль відстеження  $S_1$  переміщується на 5 пікселів і знову розраховується коефіцієнт кореляції (2). Це повторюється доки модуль відстеження  $S_1$  не досягне кінця цільового модуля пошуку  $S$ , після чого визначається модуль відстеження  $S_1$  з найбільшим коефіцієнтом кореляції, центр якого, точка В, і буде кінцем вектору напрямку руху хмарності. Це означає, що хмарність представлена на 1-му зображенні модулем відстеження  $S_0$  через

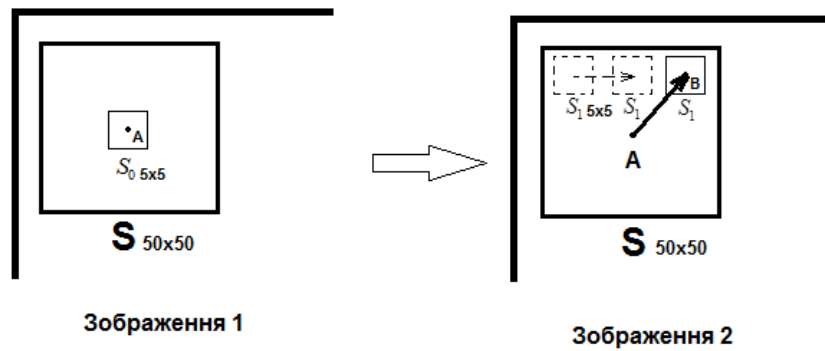


Рис.1 - Схема роботи алгоритму  
Fig.1 - The scheme of the algorithm

15 хвилин буде представлена на 2-му зображенні модулем відстеження  $S_1$ .

Для визначення швидкості вітру потрібно розрахувати

$$WS = \frac{R\theta}{\Delta t},$$

де  $WS$  - швидкість вітру;  $R$  – радіус Землі;  
 $\Delta t$  – час між послідовними зображеннями;

$$\theta = \cos^{-1}[\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1)],$$

де  $\lambda_1, \varphi_1$  - широта та довгота точки А (початку вектору);  $\lambda_2, \varphi_2$  - широта та довгота точки В (кінець вектору).

Розмір вектору залежить від швидкості вітру.

Вподальшому дані операції повторюються для кожного п'ятого пікселя області хмарності 1-го зображення і наприкінці роботи алгоритму отримується зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру, представлено нижче (рис. 2). На рис. 2 виділено 3 прямокутники: 1-й вказує на частину зображення з відсутньою хмарністю, 2-й вказує на частину зображення з хмарністю температурою вищою за  $-33^\circ\text{C}$ , а 3-й прямокутних вказує на частину зображення з хмарністю температурою нижчою за  $-33^\circ\text{C}$ .

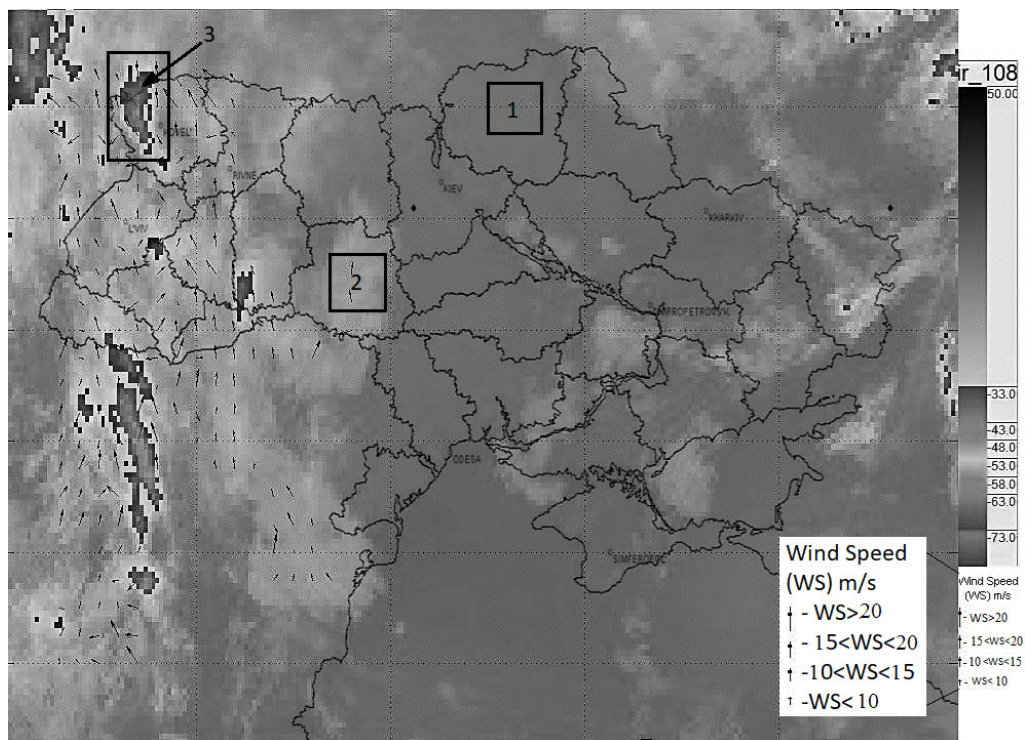


Рис.2 - Супутникове зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру  
Fig.2 - Satellite image with applied vectors of wind direction and speed

#### 4. АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ АЛГОРИТМУ ПРИ РІЗНИХ РОЗМІРАХ МОДУЛЕЙ ВІДСТЕЖЕННЯ

Для найкращої роботи алгоритму на території України, було проведено порівняння роботи моделі при різних розмірах модулів відстеження  $S_0, S_1$  і цільового модуля  $S$  (табл.1). Розмір супутникового зображення 925x730 пікселів. Розмір одного пікселя приблизно (залежно від широти) - 6 км. Для точності порівняння різних модулів відстеження аналізувалися супутникові зображення з інтервалом в 1 годину, оскільки модуль відстеження 16x16 пікселів при порівнянні зображень з інтервалом 15 хвилин працює неточно через незначну відстань переміщення повітряних мас по відношенню до розміру цільового модуля.

Таблиця 1 - Модулі, що порівнювалися  
Table 1 - Modules being compared

Модуль відстеження	Крок	Цільовий модуль
4x4	4	40x40
5x5	5	50x50
8x8	8	64x64
16x16	16	128x128

Результати аналізу роботи алгоритму показали, що найточніше виявляються вектори над

великими повітряними масами з чітко визначеним напрямом руху (напрямок вітру не змінюється), та пороговим значенням (середнє значення температури) нижчим за  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При пороговому значенні вище  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  повітряні маси знаходяться на низькій висоті, не мають чітко вираженої форми (швидко її змінюють або просто зникають на наступному зображенні), що робить коректне визначення вектору над ними неточним.

При аналізі було виявлено, що точність визначення напрямку вектору вітру залежить від розміру модуля відстеження, чим більший модуль відстеження, тим точніше визначається напрям вектору, це пов'язане з тим що при більшому розмірі модуля відстеження ( $S_0$ ), на послідовному зображенні менше модулів відстеження ( $S_1$ ) будуть мати схоже середнє значення температури до модуля відстеження ( $S_0$ ) на першому зображенні, що дозволяє точніше визначити коефіцієнт кореляції.

Алгоритм з модулем відстеження 16x16 пікселів визначає вектори вітру найточніше, але не є доцільним для застосування на території України, оскільки розрахований на великі території або набагато більший період часу між зображеннями (3 години). Приклад наведений для 12.03.2017р. 10.00 – перше зображення і 11.00 – друге зображення (рис. 3).

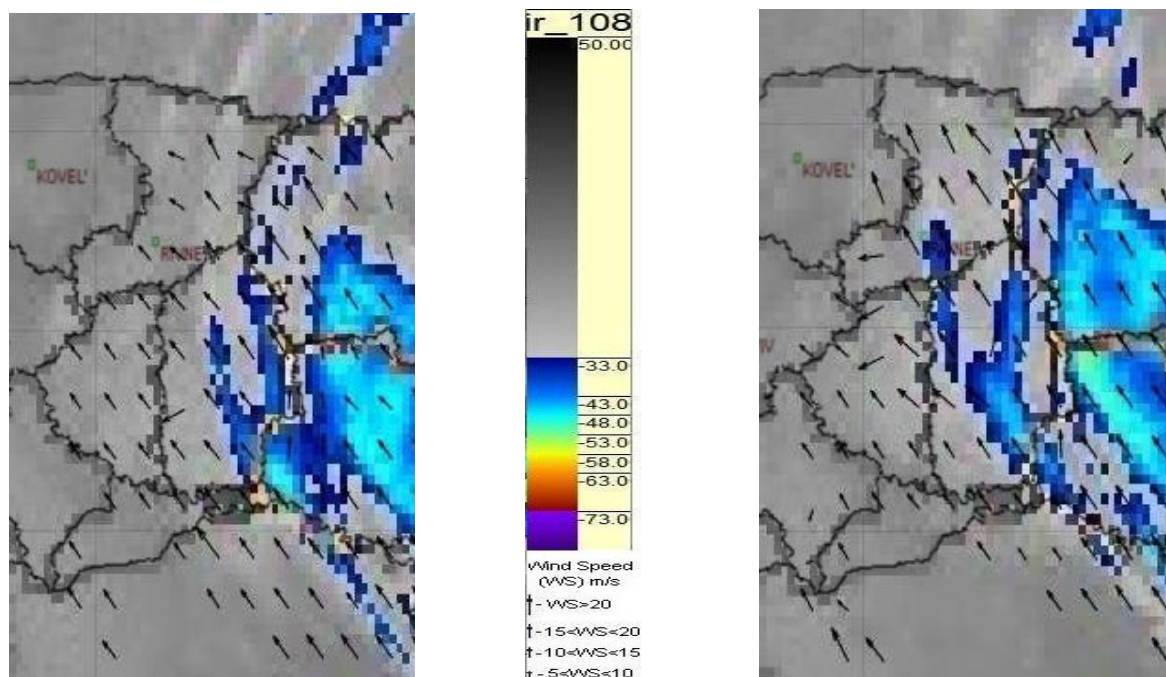


Рис. 3 - Супутникові зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру з модулем відстеження 16x16 пікселів та інтервалом у часі в 1 годину

Fig. 3 - Satellite images with applied vectors of wind direction and speed with a tracking module of 16x16 pixels and a time interval of 1 hour

Алгоритм з модулем відстеження 8x8 пікселів визначає вектори вітру достовірно відносно реального переміщення хмарних мас, придатний для території України, якщо проводити аналіз супутникових зображень з інтервалом

в 1 годину(рис. 4).

Алгоритм з модулем відстеження 5x5 пікселів визначає вектори вітру достовірно, оптимальний для застосування на території України з інтервалом між зображеннями у 15 хвилин (рис. 5).

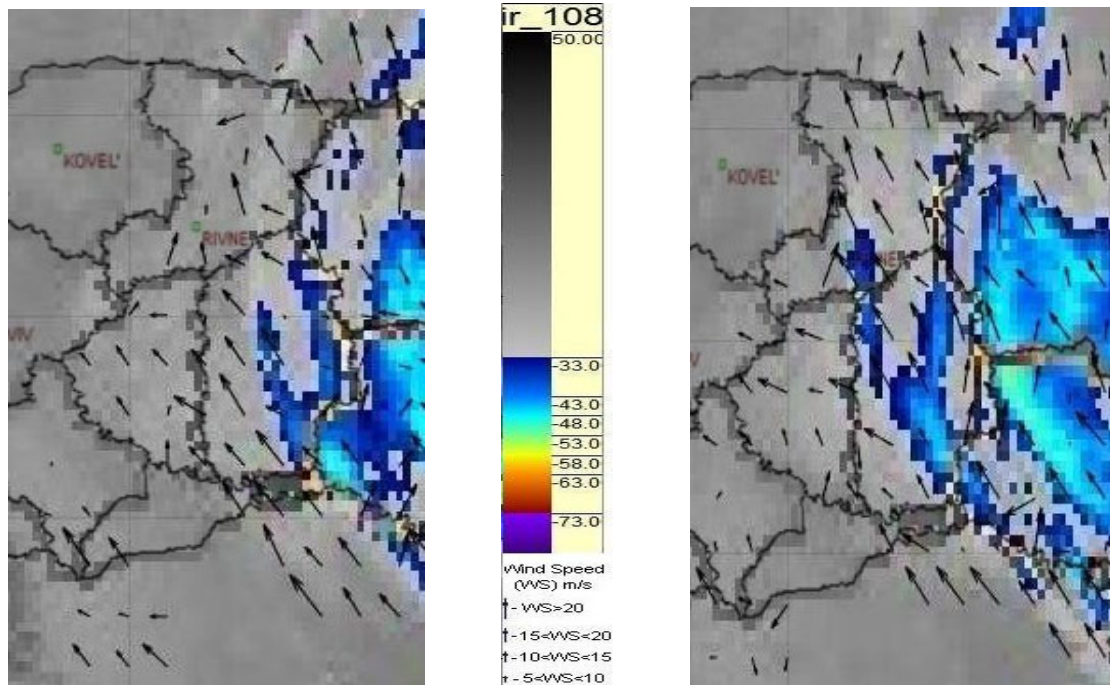


Рис. 4 - Супутникові зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру з модулем відстеження 8x8 пікселів та інтервалом у часі в 1 годину

Fig. 4 - Satellite images with applied vectors of wind direction and speed with a tracking module of 8x8 pixels and a time interval of 1 hour

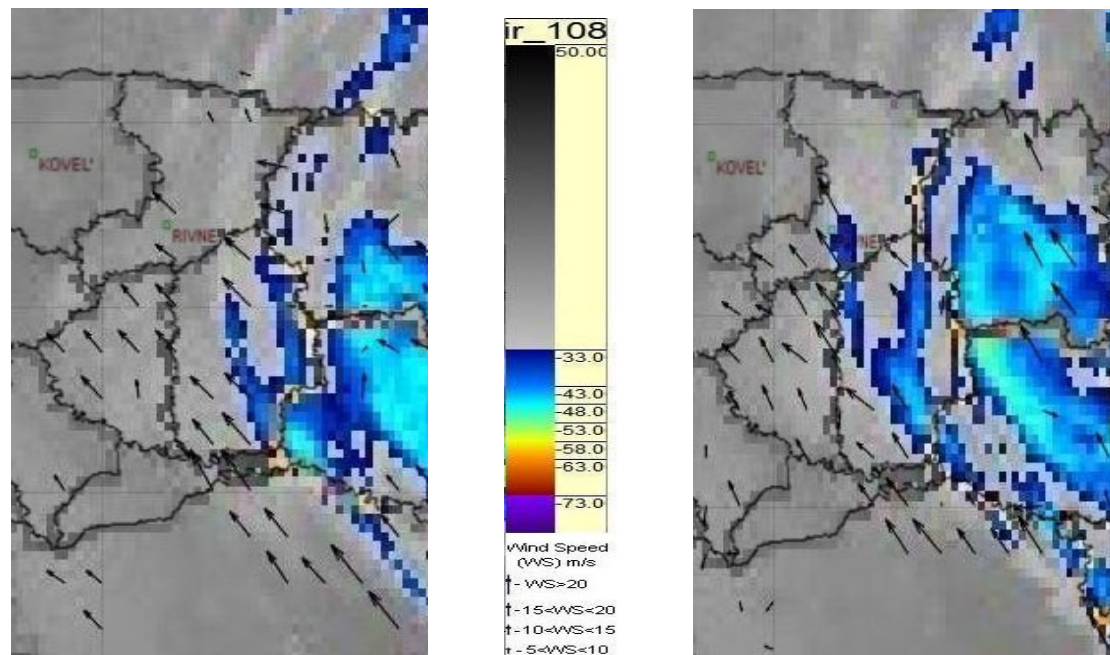
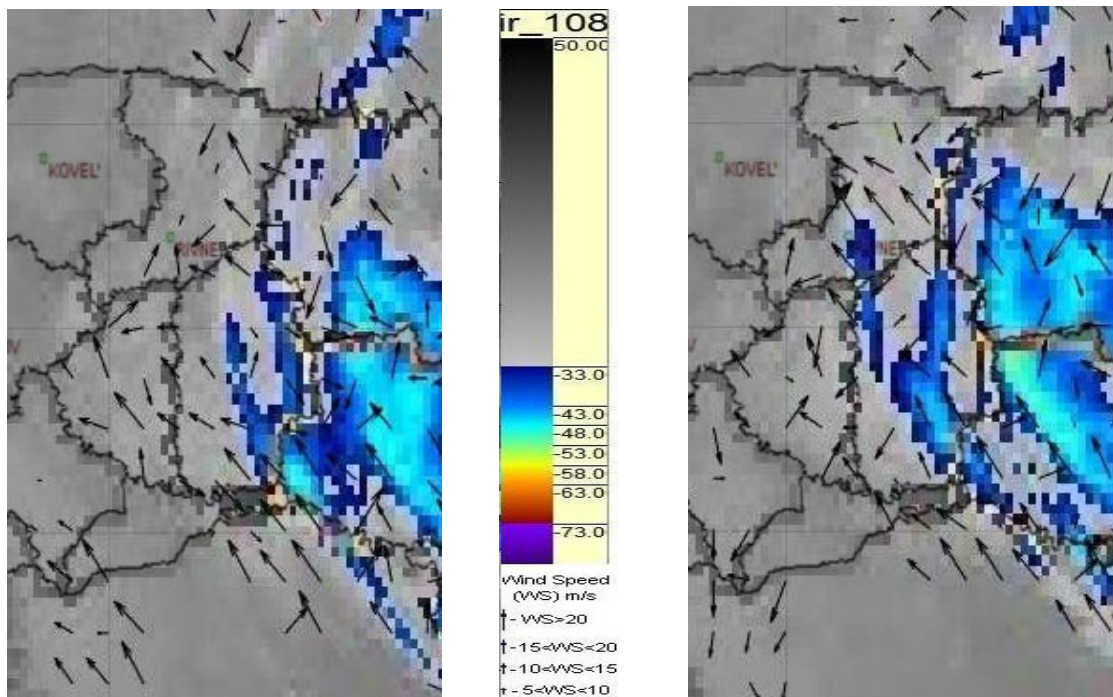


Рис. 5 - Супутникові зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру з модулем відстеження 5x5 пікселів та інтервалом у часі в 1 годину

Fig. 5 - Satellite images with applied vectors of wind direction and speed with a tracking module of 5x5 pixels and a time interval of 1 hour

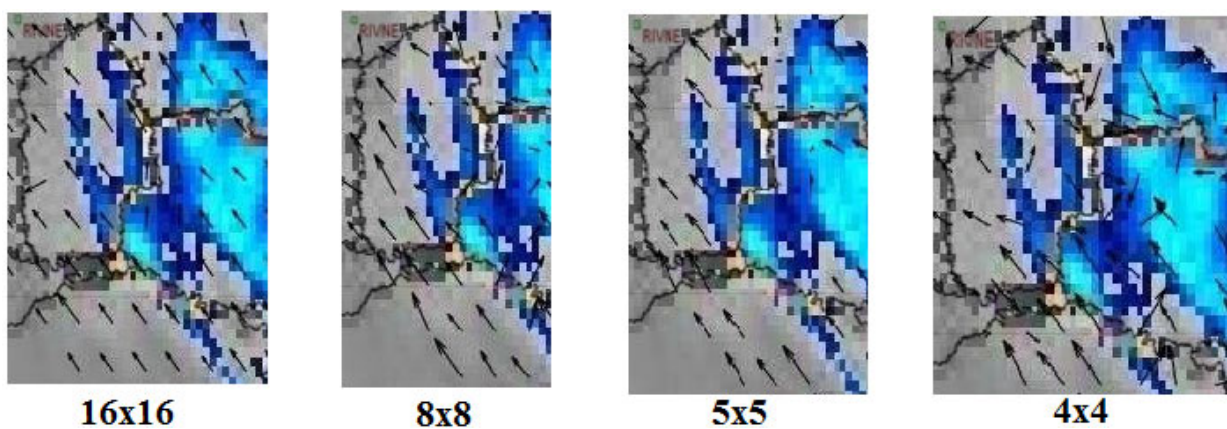
Алгоритм з модулем відстеження 4x4 пікселя визначає вектори вітру хаотично, і не є оптимальним для території України, оскільки має менший модуль відстеження, що призводить до більшої кількості варіантів модулів відстеження на другому зображенні з середнім значенням температури наближаючимися до середнього значення температури модуля відстеження першого зображення, з яким і проводиться аналіз. Це призводить до некоректного визначення на

пряму вектору, також після нанесення векторів з кроком 4 пікселі зображення стає менш розбірливим. На рис. 6 добре видно хаотичність напрямків векторів вітру. Алгоритм з модулем відстеження 4x4 пікселя рекомендується застосовувати для значно меншої території. На рис. 7 наведено приклад роботи алгоритму з температурою верхньої межі хмарності нижчою за порогове значення, тобто зображення з чітко виділеною хмарністю. При аналізі було



**Рис. 6** - Супутникові зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру з модулем відстеження 4x4 пікселів та інтервалом у часі в 1 годину

**Fig.6** - Satellite images with applied vectors of wind direction and speed with 4x4 pixel tracking module and time interval of 1 hour



**Рис. 7** - Порівняння алгоритмів для частини зображення  
**Fig. 7** - Comparison of algorithms for part of the image

визначено, що розмір матриці відстеження впливає, як на визначення хмарної зони, так і на визначення напрямку і швидкості руху хмарності.

При аналізі визначення напрямку руху хмарності виявлено, що при температурі верхньої межі хмарності близької до порогового значення ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) алгоритм з модулем відстеження  $4 \times 4$  пікселя є незадовільним. Алгоритм з модулем відстеження  $5 \times 5$  пікселів визначає напрям вітру достовірно відносно реального переміщення хмарних мас, є проблема з визначенням хмарності близько до порогового значення. Алгоритм з модулем відстеження  $8 \times 8$  пікселів визначає напрям вітру достовірно, але є більш придатним для використання на більшій території або з більшим інтервалом між зображеннями (1 год). Алгоритм з модулем відстеження  $16 \times 16$  пікселів визначає напрям вітру достовірно, але має значну проблему з визначенням хмарності близько до порогового значення, а також спостерігається незначне зменшення швидкості руху хмарності у порівнянні з іншими модулями відстеження.

Приймаючи до уваги все вищесказане можна прийти до висновку, що для території України найбільш оптимальним є алгоритм з модулем відстеження  $5 \times 5$  пікселів та цільовим модулем  $50 \times 50$  пікселів при аналізі зображень з інтервалом у часі 15 хвилин. Алгоритми з розміром модуля відстеження  $8 \times 8$  і  $16 \times 16$  пікселів актуальні для більшої території, для зображень з кращою роздільною здатністю, або більшим інтервалом часу між супутниковими зображеннями. Алгоритм з модулем відстеження  $4 \times 4$  пікселя більш придатний для роботи з невеликими, точно вираженими хмарними масами або меншою територією.

## 5. ПОРІВНЯННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ З ДАНИМИ ПРОГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Було проведено порівняння результатів роботи алгоритму з модулем відстеження  $5 \times 5$  пікселів з даними прогностичних моделей ICON та GFS [7,8]. Для прикладу на рис. 8а) наведено результати алгоритму за 12.07.2017 12.00, на рис. 8 б,в) наведено дані хмарного покриття у відсотках моделей ICON та GFS, на рис. 8 г,д) – дані напрямку та швидкості вітру за прогностичними моделями ICON та GFS (візуалізація даних моделей взята з сайту <https://www.ventusky.com>).

Порівняння результатів роботи алгоритму не виконувалося з даними радіозондування, оскільки радіозондування проводиться 1-2 рази на до-

бу на 5 станціях по всій території України [19], що є недостатнім для отримання переконливих висновків.

Окремо проводився аналіз прогностичної моделі ICON для території України. Для порівняння використовувалися дані 155 метеорологічних та 12 станцій грозопеленгації по всій території України. Аналіз швидкості вітру 10 м над поверхнею Землі показав середню абсолютну похибку за добу  $< 1$  м/с ( $\approx 0,7$  м/с). Аналіз полів хмарності (для хмар з грозовою активністю) виявив недостатню географічну (сотні кілометрів) або часову (декілька годин) точність прогнозу моделі ICON.

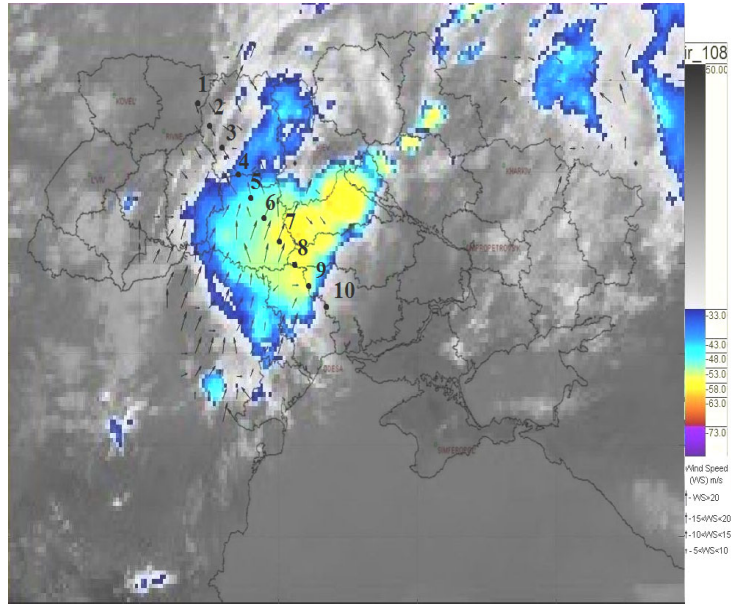
У табл. 2 наведено результати порівняння роботи алгоритму з даними прогностичних моделей ICON та GFS для 10 точок вказаних на рис. 8. Вектори швидкості та напрямку вітру можуть бути нанесені на безхмарну область зображення (точки 1-3) або хмарна область може не мати нанесених векторів швидкості та напрямку вітру (точки 8-10). Це обумовлено тим що для роботи алгоритму використовувалися зображення з різницею у часі в 1 годину і швидкість та напрям руху хмарності розраховується для першого зображення і накладається на друге зображення для прогнозу руху останніх доступних хмарних мас. Для покращення точності прогнозу та карти руху повітряних мас слід використовувати супутникові зображення з меншою різницею у часі (15 хвилин).

Враховуючи вищесказане, а також аналізуючи порівняння результатів роботи алгоритму з даними прогностичних моделей ICON та GFS можна зробити декілька висновків:

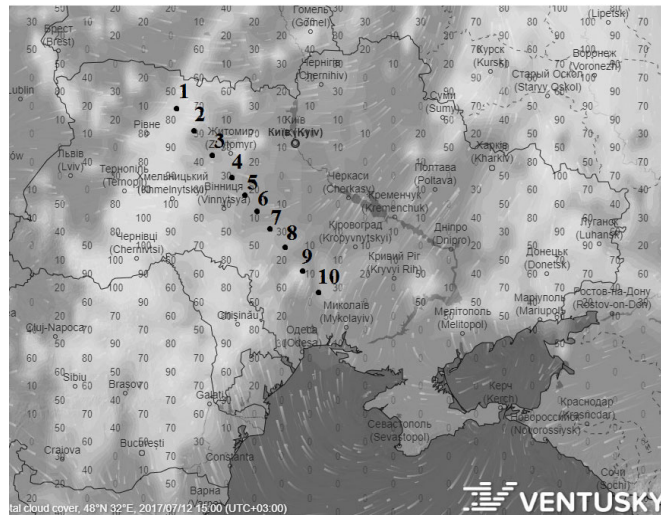
Чисельний прогноз швидкості вітру, для території України, моделей ICON та GFS більш фізично обґрунтований за швидкість вітру отриману у результаті роботи алгоритму, оскільки алгоритм визначає швидкість вітру за переміщенням хмарних мас на послідовних супутникових зображеннях, а прогностичні моделі при розрахунках приймають до уваги декілька факторів (поля тиску, розвиток і подальшу еволюцію циклонів, антициклонів, географічні характеристики місцевості та ін.), що робить їх більш реалістичними;

Напрямок руху повітряних мас (напрямок вітру) за результатами роботи алгоритму виявився більш надійним ніж дані прогностичних моделей. Це пов'язано з тим що алгоритм для роботи використовує послідовні супутникові зображення і аналізує переміщення повітряних мас в реальному часі, в той час як прогностичні моделі

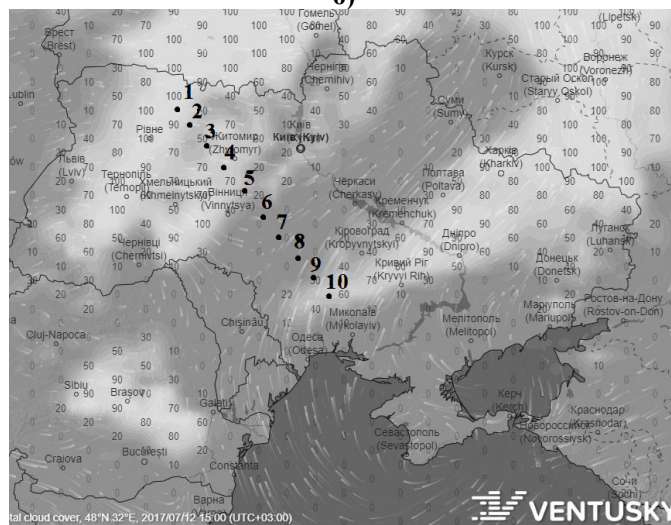




а)

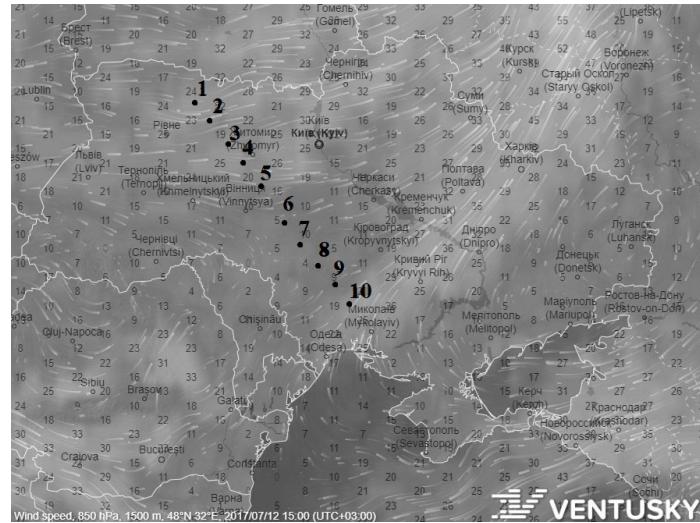


б)

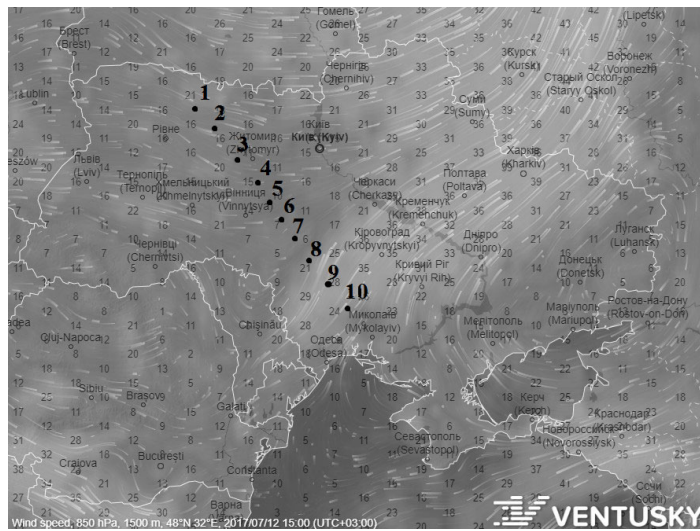


в)

Рис. 8 - Порівняння роботи алгоритму (а) з даними прогнозаційних моделей ICON (б,г) та GFS (в,д) за 12.07.2017 12.00  
 Fig. 8 - Comparison of the algorithm (a) with the data of forecast models ICON (b, d) and GFS (c, d) for 07/12/2017 12.00



г)



д)

Рис. 8 – Продовження  
Fig. 8 – Continued

Таблиця 2 - Результати порівняння роботи алгоритму з даними прогностичних моделей  
Table 2 - The results of comparing the algorithm with the data of forecast models

№	Хмарність			Напрямок вітру			Швидкість вітру		
	Алгоритм	ICON	GFS	Алгоритм	ICON	GFS	Алгоритм	ICON	GFS
1	-	>-33 °C	-40 °C	Пн.-Зх.	Зх.	Зх.	9 м/с	9 м/с	8 м/с
2	>-33 °C	>-33 °C	>-33 °C	Пн.-Зх.	Зх.	Зх.	11 м/с	12 м/с	8 м/с
3	>-33 °C	-	>-33 °C	Пн.-Зх.	Зх.	Зх.	10 м/с	10 м/с	11 м/с
4	-40 °C	-	>-33 °C	Пд.-Сх.	Зх.	Зх.	9 м/с	11 м/с	12 м/с
5	-44 °C	-	>-33 °C	Пд.	Зх.	Пд.-Зх.	13 м/с	14 м/с	15 м/с
6	-55 °C	-	-	Пд.-Зх.	Зх.	Пд.-Зх.	16 м/с	17 м/с	19 м/с
7	-53 °C	-	-	Пд.-Зх.	Зх.	Пд.-Зх.	18 м/с	15 м/с	17 м/с
8	-50 °C	-	-	-	Зх.	Пд.-Зх.	-	15 м/с	18 м/с
9	-40 °C	>-33 °C	>-33 °C	-	Зх.	Пд.-Зх.	-	14 м/с	16 м/с
10	>-33 °C	>-33 °C	>-33 °C	-	Зх.	Пд.-Зх.	-	14 м/с	15 м/с

розраховують утворення і переміщення повітряних мас завчасно (з інтервалом у часі від декількох годин до десятків годин). Це добре видно на рис. 8б та рис. 8в де моделі ICON та GFS спрогнозували хмарність з похибкою у північному (ICON) та західному (GFS) напрямках відносно хмарності на супутниковому зображенні (рис. 8а).

Для визначення і прогнозу напрямку руху хмарних мас над територією України доцільніше використовувати алгоритм визначення напрямку та швидкості вітру за супутниковими зображеннями. Хмарні маси визначаються найточніше за супутниковими зображеннями, що є особливо важливим для виявлення і прогнозу небезпечних стихійних погодних явищ.

## 6. ВИСНОВКИ

Стаття описала весь процес обчислення векторів руху вітру. Метод є простим, швидким і легким у реалізації і сприйнятті. Використовуючи супутникові дані було створено інтуїтивно зрозумілу мапу руху повітряних мас над територією України інтервалом 15 хвилин. Було проведено порівняння різних розмірів модуля відстеження та цільового модуля для території України і визначені оптимальні варіанти для різних умов. Виявлені переваги та недоліки алгоритму відносно прогнозних моделей ICON та GFS.

Робота була проведена у програмному середовищі MATLAB з використанням даних геостационарного супутника MSG-3, отриманих системою прийому метеорологічної інформації, що встановлено в УкрГМІ. Алгоритм працює надійно, результатом його роботи є карта руху повітряних мас, що відображає напрям і швидкість вітру над територією України. Вона може використовуватися для короткострокового прогнозу погоди та виявлення і прогнозування подальшого розвитку небезпечних стихійних погодних явищ. У подальшому планується інтеграція з системою грозопеленгації для точнішого прогнозування розвитку особливо небезпечних погодних явищ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Thies B., Bendix J. Satellite based remote sensing of weather and climate: recent achievements and future perspectives. Department of Geography, Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Philipps-University. Marburg, 2011.
- Кривобок А. А. Новые возможности приема цифровой спутниковой информации через систему EUMETCast. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2008. №3. С. 25–32. с.
- Meteosat second generation becomes operational. directorate of Earth observation / Schumann W., Oremus R., Rota S., Kerkmann J. *Esa bulletin*. EUMETSAT. Darmstadt, 2004. Vol. 119. Pp 14-21
- Kryvobok O., Kulbida M., Savchenko L. Monitoring severe weather in Ukraine with satellite data, use of satellite and in-situ data to improve sustainability. *Springer Science+Business Media B.V.* 2010. Pp. 42-48.
- Just D. SEVIRI instrument Level 1.5 data. *First MSG RAO Workshop*, held 17-19 May, at CNR, Bologna, Italy / Edited by R.A. Harris. European Space Agency ESASP-452, 2000. P. 29.
- Jan Kaňák. New possibilities for access and utilisation of EUMETSAT data and products through DAWBEE programme. *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 5-9 September. Oslo, Norway, 2011.
- The ICON (ICOSahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core / Zangl G, Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2016. Vol. 141(687). Pp. 563-579.
- Teague K. A., Gallicchio N. The rise of modern computer models, the evolution of meteorology: a look into the past, present and future of weather forecasting. Ch. 8, 2017.
- McClung T. Technical Implementation Notice 16-11 Amended. *Nation Weather Service*. Archived from the original on 5 June 2016.
- Izawa T., Fujita T. Relationship between winds and cloud velocities determined from pictures obtained by the ESSA 3, ESSA 5 and AST-I Satellites. *North-Holland Publishing Co., Space Research IX*, Amsterdam, 1969. Pp. 571-579.
- Hubert L. F., Whitney L. F. Wind estimation from geostationary-satellite picture. *Monthly Weather Review*. 1971. Vol. 99(9). Pp. 665-672.
- Use of a pattern recognition technique for determining cloud motions from sequences of satellite photographs / Endlich R. M., Wolf D. E., Hall D. J., Brain A. E. *Journal of Applied Meteorology*. 1971. Vol. 10(1). Pp. 105-117.
- Wolf D. E., Hall D. J., Endlich R. M. Experiments in automatic cloud tracking using SMS-GOES data. *Journal of Applied Meteorology*. 1977. Vol. 16(11). Pp. 1219-1230.
- Lou T., Lin L., Zhan N. Discussion measurement models and algorithms of the wind vector field based on satellite images. Published online. 2013. #4. Pp. 122-126.
- Smith E. A. The McIDAS system. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*. 1975. Vol. 13(3). Pp. 123- 136.
- Zhang Q. S. Method of static meteorological satellite cloud image Landmark navigation China Academic Journal Electronic Publishing House, Beijing, 1984.
- Bedka K. Objective satellite-based overshooting top and enhanced-v signature detection, science systems and applications, Inc. (SSAI) at the NASA Langley Research Center.
- Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalysis, and observations: Decadal changes, / Santer B. D., Sausen R, Wigley T. M. L. et al. *Journal of Geophysical Research*. January 2003. Vol. 108(D1).
- Стан мережі спостереження за атмосферним повітрям в Україні та її відповідність вимогам директиви / Дмитрієва О. О., Варламов Є. М., Квасов В. А., Палагута О. А. 2008/50/EC

## REFERENCES

1. Thies, B. & Bendix, J. (2011). *Satellite based remote sensing of weather and climate: recent achievements and future perspectives*. Department of Geography, Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Philipps-University. Marburg.
2. Krivobok, A.A. (2008). *Novye vozmozhnosti priema tsifrovoy sputnikovoy informatsii cherez sistemu EUMETCast*. [New possibilities for receiving digital satellite information through the EUMETCast system.] *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 3, pp. 25–32. (in Russ)
3. Schumann, W., Oremus, R., Rota, S. & Kerkmann, J. (2004). *Meteosat Second Generation Becomes Operational*. Directorate of Earth Observation. Esa bulletin, vol. 119, EUMETSAT. Darmstadt.
4. Kryvobok, O., Kulbida, M. & Savchenko, L. (2010). Monitoring Severe Weather in UKRAINE with Satellite Data, Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability. *Springer Science+Business Media B.V.*, pp. 42-48.
5. Just, D. (2000). SEVIRI instrument Level 1.5 data. In: Harris R.A. (ed.) *First MSG RAO Workshop*, held 17-19 May, 2000, at CNR, Bologna, Italy. European Space Agency ESASP-452, p.29
6. Jan, Kaňák (2011). New possibilities for access and utilisation of EUMETSAT data and products through DAWBEE programme. *Conference: EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Oslo, Norway
7. Zangl, G., Reinert, D., Ripodas, P. & Baldauf M. (2016). The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(687), pp. 563-579.
8. Teague, K.A. & Gallicchio, N. (2017). *The Rise of Modern Computer Models, The Evolution of Meteorology: A Look into the Past, Present and Future of Weather forecasting*. Ch. .
9. McClung, T. (2016). *Technical Implementation Notice 16-11 Amended*. Nation Weather Service.
10. Izawa, T. & Fujita, T. (1969). Relationship between Winds and Cloud Velocities Determined from Pictures Obtained by the ESSA 3, ESSA 5 and AST-I Satellites. *North-Holland Publishing Co., Space Research IX*, Amsterdam, pp. 571-579.
11. Hubert, L.F. & Whitney, L.F. (1971). Wind Estimation from Geostationary-Satellite Picture. *Monthly Weather Review*, 99(9), pp. 665-672.
12. Endlich, R.M., Wolf, D.E., Hall, D.J. & Brain, A.E. (1971). Use of a Pattern Recognition Technique for Determining Cloud Motions from Sequences of Satellite Photographs. *Journal of Applied Meteorology*, 10(1), pp. 105-117.
13. Wolf, D.E., Hall, D.J. & Endlich, R.M. (1977). Experiments in Automatic Cloud Tracking Using SMS-GOES Data. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, No. 11, pp. 1219-1230
14. Lou, T., Lin, L. & Zhan, N. (2013). *Discussion Measurement Models and Algorithms of the Wind Vector Field Based on Satellite Images*. Published Online, 4, pp. 122-126.
15. Smith, E.A. (1975). The McIDAS System. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 13(3), pp. 123-136.
16. Zhang, Q.S. (1984). *Method of Static Meteorological Satellite Cloud Image Landmark Navigation*. China Academic Journal Electronic Publishing House, Beijing.
17. Bedka, K. *Objective Satellite-Based Overshooting Top and Enhanced-V Signature Detection*, Science Systems and Applications, Inc. (SSAI) at the NASA Langley Research Center
18. Santer, B.D., Sausen R, Wigley, T.M.L et al. (2003). Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalysis, and observations: Decadal changes. *Journal of Geophysical Research*, 108(D1).
19. Dmytriieva, O.O., Varlamov, Ye.M., Kvasov, V.A. & Palahuta, O.A. (2008). *Stan merezhi sposterezhenia za atmosferynym povitriam v ukraini ta yii vidpovidnist vymoham dyrektyvy 2008/50/IeS [Condition of the air monitoring network in Ukraine and its compliance with the requirements of Directive 2008/50 / EC]*

## IDENTIFICATION OF WIND DIRECTION AND SPEED USING THE SATELLITE IMAGES FOR THE TERRITORY OF UKRAINE

M. M. Koman

Ukrainian Hydrometeorological Institute,  
37, Nauki St., 03028 Kyiv, Ukraine, [mishakoman@gmail.com](mailto:mishakoman@gmail.com)

The purpose of this article is to identify the wind direction and speed using the images from geostationary satellites and through application of two-dimensional wind vectors, the magnitude and direction of which corresponds to the speed and direction of cloud masses, on a satellite image. The results may be used for making a short-term forecast of dangerous weather events within the territory of Ukraine.

To make the technique work, it is necessary to select cloud areas on a satellite image using the threshold method. Then, based on the brightness temperature distribution between two tracking modules (parts of an image based on which two consecutive satellite images are compared), the maximum correlation coefficient for infrared brightness temperature is to be determined. The coefficient corresponds to the movement of cloud masses and sets the beginning and end of the wind direction vector.

To determine the optimum application of the technique for the territory of Ukraine, the analysis of accuracy of tracking modules of different sizes was also performed. The analysis

revealed that the accuracy of determining the wind vector direction depends on the tracking module size: the larger it is, the more accurate is the direction vector found, but given that the time interval between images is 15 minutes, the optimum algorithm to be used in Ukraine is the one with 5x5 pixel tracking module.

The technique performance was also compared with the data of ICON and GFS forecast models. The results of the applied algorithm showed that the direction of air masses was more reliable than the data retrieved from the above-mentioned forecast models, because the algorithm analyzes the real-time movement of air masses while the forecast models assess the formation and movement of air masses in advance (with an interval of several hours up to dozens of hours). Numerical wind speed forecast of ICON and GFS models is more accurate, because the algorithm determines the wind speed based on the movement of cloud masses on satellite images whereas the forecast models consider several factors (pressure fields, development and subsequent evolution of cyclones, anticyclones, geographical characteristics etc.) which makes them more realistic.

**Keywords:** satellite images, correlation coefficient, wind direction, wind speed

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ ВЕТРА ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

М. М. Коман

Украинский гидрометеорологический институт,  
пр-т Науки, 37, 03028, Киев, Украина, [mishakoman@gmail.com](mailto:mishakoman@gmail.com)

Целью данной статьи является определение направления и скорости ветра на снимках с геостационарных спутников и нанесение двумерных ветровых векторов, величина и направление которых соответствует скорости и направлению движения облачных масс, на спутниковое изображение для применения в системе краткосрочного прогноза опасных погодных явлений для территории Украины.

Для работы методики необходимо выделить облачные области на спутниковом изображении, используя пороговый метод. После чего на основе особенности распределения температуры яркости между двумя модулями отслеживания (части изображения между которыми проводится сравнение двух последовательных спутниковых изображений) определяется максимальный коэффициент корреляции для инфракрасной температуры яркости, что соответствует перемещению облачных масс и устанавливает начало и конец вектора направления ветра.

Для определения оптимального применения методики для территории Украины проведен анализ точности между различными размерами модулей отслеживания. При анализе было выявлено, что точность определения направления вектора ветра зависит от размера модуля отслеживания, чем больше модуль отслеживания, тем точнее определяется направление вектора, но учитывая временной интервал между изображениями в 15 минут оптимальным для применения на территории Украины является алгоритм с модулем отслеживания 5x5 пикселей

Также проведено сравнение работы методики с данным прогностических моделей ICON и GFS. Направление движения воздушных масс по результатам работы алгоритма оказалось более надежным чем данные прогностических моделей, поскольку алгоритм анализирует перемещение воздушных масс в реальном времени, в то время как прогностические модели рассчитывают образования и перемещения воздушных масс заблаговременно (с интервалом во времени от нескольких часов до десятков часов). Численный прогноз скорости ветра моделей ICON и GFS является более точным, поскольку алгоритм определяет скорость ветра по перемещению облачных масс на спутниковых изображениях, а прогностические модели при расчетах принимают во внимание несколько факторов (поля давления, развитие и дальнейшую эволюцию циклонов, антициклонов, географические характеристики местности и др.), что делает их более реалистичными.

**Ключевые слова:** спутниковые изображения, коэффициент корреляции, направление ветра, скорость ветра.

Подання до редакції : 28. 08. 2020  
Надходження остаточної версії : 01. 12. 2020  
Публікація статті : 17. 12. 2020