

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРОГРАМНОМУ МОДУЛІ «HYSPLIT»

*Кружилко О. Є., д.т.н., с.н.с., проф. (каф. БПОД ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»);*

*Чеберячко Ю. І., д.т.н., проф. (каф. ОПЦБ НТУ «ДП» України); (каф. БПОД ТОВ
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»);*

Шапошникова Е. С., студ. (гр. ЦБ-25-1 ІІІ, каф. ОПЦБ НТУ «ДП» України)

Анотація. Проаналізовано її можливості для прогнозування переміщення повітряних мас, врахування хімічних перетворень, турбулентної дифузії та сухого й вологого осадження, з акцентом на аналіз аварій, поширення вулканічного попелу та ідентифікацію джерел забруднення. Визначено ключові аспекти використання метеорологічних даних (GFS, ECMWF, WRF) та алгоритмів моделі, включаючи вибір типів траєкторій і коригування параметрів. Наведено результати моделювання зворотних траєкторій та оцінку впливу рельєфу й метеоумов.

Ключові слова: HYSPLIT, атмосферне моделювання, радіоактивне забруднення, зворотні траєкторії, метеорологічні дані.

Abstract. The article examines the capabilities of the HYSPLIT model, developed in 1998 by NOAA and the Australian Bureau of Meteorology, for predicting the movement of air masses, accounting for chemical transformations, turbulent diffusion, and both dry and wet deposition, with a focus on analyzing accident scenarios, the spread of volcanic ash, and the identification of pollution sources. Key aspects of utilizing meteorological data (GFS, ECMWF, WRF) and the model's algorithms, including the selection of trajectory types and parameter adjustments, are outlined. The results of modeling backward trajectories and assessing the impact of terrain and meteorological conditions are presented.

Keywords: HYSPLIT, atmospheric modeling, radioactive contamination, backward trajectories, meteorological data.

Вступ. Гібридна модель HYSPLIT [1], розроблена в 1998 році NOAA та Австралійським бюро метеорології, є потужним інструментом для моделювання траєкторій руху та розсіювання забруднювачів, радіоактивних речовин і аерозолів в атмосфері. Вона поєднує Лагранжевий і Ейлерів підходи, що дозволяє прогнозувати переміщення повітряних мас, враховувати хімічні перетворення, турбулентну дифузію, а також сухе й вологе осадження. Модель широко застосовується для аналізу аварій, прогнозування поширення вулканічного попелу та визначення джерел забруднення.

Аналіз стану питання. HYSPLIT використовує метеорологічні дані (GFS, ECMWF, WRF) для точного моделювання атмосферних процесів. Алгоритм передбачає вибір типу траєкторії (нормальна, ансамблева, матрична), врахування метеоданих і коригування параметрів моделі [1,2]. Ансамблевий підхід дозволяє оцінити варіабельність траєкторій, а частотний аналіз виявляє аномалії, що є

критичним для прогнозування ризиків і реагування на надзвичайні ситуації. Розсіювання залежить від обраного профілю дифузії, зсуву вітру і деформації вітрового поля. Концентрації рахуються або як точкові, або середні в клітинках для частинок. Є три режими: матриця траєкторій, ансамбль траєкторій і частота траєкторій. Для розрахунків використовують метеодані на сітці, як GFS чи ECMWF, і модель може переходити з дрібної сітки на грубу.

Мета дослідження. Метою є аналіз можливостей моделі розсіювання «HYSPLIT» для визначення алгоритму для моделювання руху траєкторій повітряних мас, з урахуванням джерел забруднення, рельєфу й метеоумов.

Методики, матеріали і результати досліджень.

Модель дозволяє обчислювати траєкторії руху забруднювачів, радіоактивних речовин чи аерозолів, прогнозувати їх переміщення та розсіювання, а також моделювати хімічні перетворення, сухе й вологе осадження та турбулентну дифузію. Для цього потрібно скористатися наступним алгоритмом.

Алгоритм розрахунку

1. Обираємо тип траєкторії(Normal Matrix, Ensemble, Frequency)
2. Врахування метеоданих та врахування «ансамблю» траєкторій (рис.1).

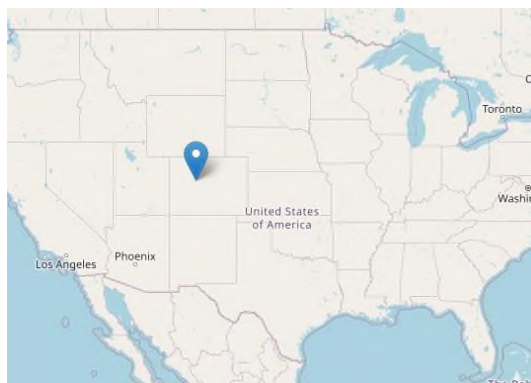


Рис. 1. Визначення координат для дослідження

3. Коригування вхідних параметрів моделі

The screenshot displays the HYSPLIT model interface, divided into two main sections: 'Параметри моделі' (Model Parameters) on the left and 'Параметри відображення' (Display Parameters) on the right.

Параметри моделі (Model Parameters):

- Напрямок траєкторій:** Вперед (Forward), Назад (Змінити час початку за замовчуванням) (Back (Change start time by default)).
- Вертикальний рух:** Модель вертикальної швидкості (Vertical velocity model), Ізобарична (Isobaric), Гентріоні (Gentrión).
- Час початку (UTC):** Рік (25), Місяць (10), День (27), Година (22). Поточний час: 07:19.
- Загальний час роботи (години):** 64.
- Починайте нову траєкторію кожні:** 0 год. Максимальна кількість траєкторій: 24.
- Початкова широта 1 (градуси):** 39.368279.
- Початкова довгота 1 (градуси):** -106.699219.
- Початкова широта 2 (градуси):** [empty]
- Початкова довгота 2 (градуси):** [empty]
- Початкова широта 3 (градуси):** [empty]
- Початкова довгота 3 (градуси):** [empty]
- Автоматично висота середнього граничного шару? Перезавантажити налаштування нижче.** Так, Ні.
- Висота 1 рівня:** 250 метрів AGL, метрів над рівнем моря.
- Висота 2-го рівня:** 500.
- Висота 3-го рівня:** 750.

Параметри відображення (Display Parameters):

- Вигід контурів у ГІС?** Жадан, Google Планета Земля (клас), Шейп-файл ГІС.
- Наведені нижче параметри застосовуються лише до результатів у форматах GIF, PDF та PS (не до Google Планета Земля).**
- Роздільна здатність графіків (dpi):** 96.
- Коефіцієнт масштабування:** 70.
- Проекція схемат:** За замовчуванням, Поларний, Ганберт, Меркатор.
- Одиниці висоти вертикальної ділянки:** Тисок, Лямбдическі AGL, Тета.
- Інтервал між:** 1 година, 6 годин, 12 годин, 24 години.
- Побудувати кольорові траєкторії?** Так, Ні.
- Використовувати однакові кольори для кожного джерела?** Так, Ні.
- Символ розташування джерела графіка?** Так, Ні.
- Накладання кола відстані:** Жадан, Ні, Авто.
- Кордони округів США?** Так, Ні.
- Файл постскриптума?** Так, Ні.
- PDF-файл?** Так, Ні.
- Побудувати метеорологічне поле вздовж траєкторії?** Так, Ні.
- Вивантаження метеорологічних даних вздовж траєкторії:** Висота місцевості (м), Потенціальна температура (K), Температура навколишнього середовища (K), Кількість опадів (мм на годину), Глибина зливу (мм), Відносна вологість (%), Потік сонячного випромінювання, спрямований вітер (Br/n**2).

Рис. 2. Приклади введення граничних параметрів моделі

Інтеграція просторово-часової мінливості вітру в моделях значно підвищує точність прогнозів, особливо в нестаціонарних атмосферних умовах, де вертикальні градієнти швидкості та напрямку вітру впливають на траєкторії частинок. У HYSPLIT це реалізовано через інтерполяцію метеоданих, дозволяючи враховувати турбулентність і деформацію поля. Для систем екологічного моніторингу та аварійного реагування на радіаційні забруднення. Наприклад, без такого врахування прогнози недооцінюють ризики, як у випадках тестів ядерної зброї чи аваріях, де нестабільність атмосфери призводить до помилок у оцінці доз опромінення [2].

4. Оцінка результатів розрахунку (рис. 3)

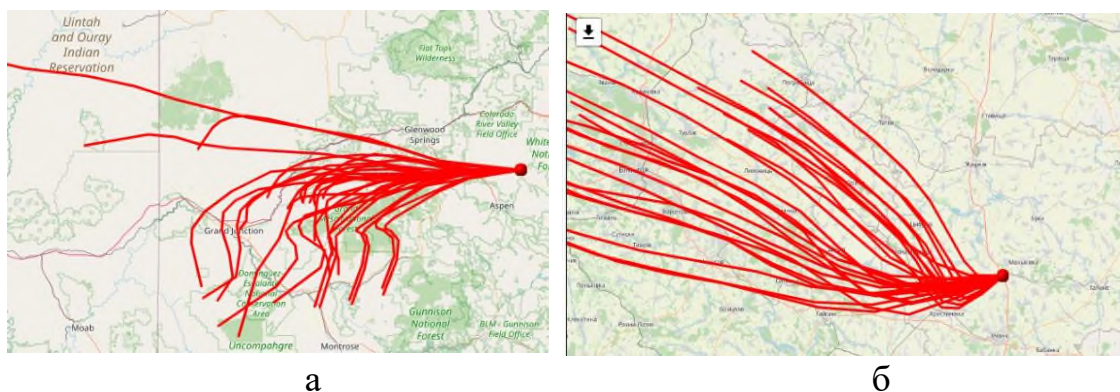


Рис. 3. Приклади отриманих результатів розрахунку моделі HYSPLIT

Обговорення. Результати ілюструють моделювання зворотних траєкторій за моделлю HYSPLIT, які показують можливі джерела повітряних мас. На рис 3 а зосереджений на регіоні Колорадо (США),: численні траєкторії розходяться на захід і північний захід, охоплюючи гірські райони, з петлеподібними шляхами, що вказують на локальну рециркуляцію повітря через складний рельєф та можливе накопичення забруднювачів від місцевих джерел, таких як лісові пожежі чи пил. На рис 3 б наведено траєкторії переважно прямолінійні, сходяться з північного заходу через Україну та Польщу, демонструючи траєкторії розсіювання повітряних мас без значної локальної циркуляції, що типове для рівнинної місцевості та може вказувати на перенесення забруднень від віддалених джерел, включаючи промислові викиди. Результати підкреслюють вплив рельєфу на характер траєкторій: гірські райони сприяють рециркуляції, тоді як рівнини – прямолінійному руху. HYSPLIT ефективно ідентифікує джерела забруднення, враховуючи метеоумови та локальні особливості. Обмеження моделі можуть бути пов'язані з точністю вхідних метеоданих і складністю прогнозування в умовах турбулентності. Результати показують значну залежність прогнозованого накопиченого осадження від вхідних метеоданих та параметризації джерела. Симуляція добре відтворила просторову структуру забруднення України з надійними статистичними оцінками, хоча не всі локальні максимуми були чітко захоплені.

Висновки. HYSPLIT є універсальним інструментом для моделювання атмосферних процесів, що дозволяє точно прогнозувати траєкторії та джерела забруднення. Результати підтверджують її ефективність у різних географічних умовах, що робить модель незамінною для екологічного моніторингу та реагування на надзвичайні ситуації. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення врахування турбулентної дифузії та інтеграцію нових метеоданих.

Література

1. Stein, AF, Draxler, RR, Rolph, GD, Stunder, BJB, Cohen, MD, та Ngan, F., (2015). Система моделювання атмосферного переносу та розсіювання HYSPLIT NOAA, Bull. Amer. Meteor. Soc., 96 , 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1> 
2. Rolph, G., Stein, A., та Stunder, B., (2017). Застосування та система відображення даних про навколишнє середовище в режимі реального часу: READY. Environmental Modelling & Software, 95 , 210-228, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>  .
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815217302360>) 