

УДК 004.9:504:519.6

**ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСУ CALPUFF ТА  
МОДЕЛІ ПРОГНОЗУ ПОГОДИ WRF ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ  
НАСЛІДКІВ ДОВГОТРИВАЛОГО АТМОСФЕРНОГО ВИКИДУ ПІД ЧАС  
ПОЖЕЖІ НА НАФТОБАЗІ ПІД ВАСИЛЬКОВИМ У 2015 РОЦІ**

О.В. Халченков, І.В. Ковалець

*Інститут проблем математичних машин та систем НАН України*

e-mail: allejandro@ukr.net

**Вступ.** Пожежа на нафтобазі у Василькові – це приклад масштабної техногенної екологічної катастрофи, що призвів до значного і довготривалого викиду небезпечних речовин в атмосферне повітря. Подібна техногенна екологічна катастрофа являє собою значну небезпеку і вимагає детальної та оперативної оцінки ризиків для населення. Вказана пожежа була спричинена вибухом і подальшим займанням нафтопродуктів на нафтобазі біля села Крячки Васильківського району. Пожежа тривала більше шести діб зі змінною інтенсивністю вигорання. Результатом процесу горіння було утворення хмари хімічних забруднювачів, переважно діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>) та діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>), що розповсюдилися на значні відстані та створили потенційну загрозу для населення. Довготривалий та складний характер викиду призводить до необхідності врахування часової та просторової неоднорідності метеорологічних умов, що у свою чергу вимагає сумісного використання моделі атмосферного перенесення та повноцінної тривимірної моделі прогнозу погоди. Налаштування взаємодії моделі атмосферного перенесення та моделі прогнозу погоди приведене у даній роботі. Виконане моделювання переносу забруднення від атмосферного викиду для вказаної пожежі з використанням прогностичних метеорологічних полів отриманих з моделі прогнозу погоди.

**Загальна структура сумісного використання моделі атмосферного перенесення та моделі прогнозу погоди.** У якості моделі атмосферного перенесення була використана Ейлерово-Лагранжева регіональна модель атмосферного перенесення забруднювачів CALPUFF [1]. Модель CALPUFF неодноразово успішно використовувалась в задачах атмосферного перенесення хімічних та радіоактивних забруднень, у тому числі і внаслідок важких техногенних аварій наприклад [2,3]. Модель CALPUFF здатна описувати вплив нестационарних та неоднорідних метеорологічних умов, може застосовуватися в умовах складної топографії та в масштабах процесів від 0.1-1000 км. Модель дозволяє враховувати сухе та вологе випадіння. У моделі реалізована можливість врахування радіоактивного розпаду та хімічних трансформацій забруднювачів. Для врахування хімічних трансформацій у моделі CALPUFF реалізований ряд механізмів хімічних перетворень (MESOPUFF II, RIVAD, SOA, та ін.).

Взаємодія моделі атмосферного перенесення CALPUFF та моделі прогнозу погоди забезпечується за допомогою діагностичної метеорологічної моделі CALMET. Робота моделі CALMET можлива у тому числі й у режимі роботи виключно на метеорологічних полях отриманих зі сторонньої моделі, наприклад мезомасштабної метеорологічної моделі WRF [4]. На рис. 1 представлена блок-схема, що демонструє основні етапи взаємодії моделі атмосферного перенесення CALPUFF, метеорологічного препроцесора CALMET, допоміжних геофізичних препроцесорів TERREL, CTGPROC, MAKEGEO, та метеорологічної моделі прогнозу погоди WRF.

**Підготовка тривимірних метеорологічних полів для періоду пожежі.** Для моделювання тривимірних метеорологічних полів була використана система метеопрогнозу WRF-Україна. Розрахункова сітка 600x600км з шагом 3км, була побудована таким чином, що центр розрахункової області був розміщений в точці, що приблизно співпадає з епіцентром пожежі. У вертикальному напрямку сітка складалася з

40 ізобаричних рівнів. Для визначення категорій землекористування був використаний глобальний набір Modis з розрішенням 15 секунд. Для визначення топографії використовувався глобальний набір SRTM з розрішенням 3 секунди.

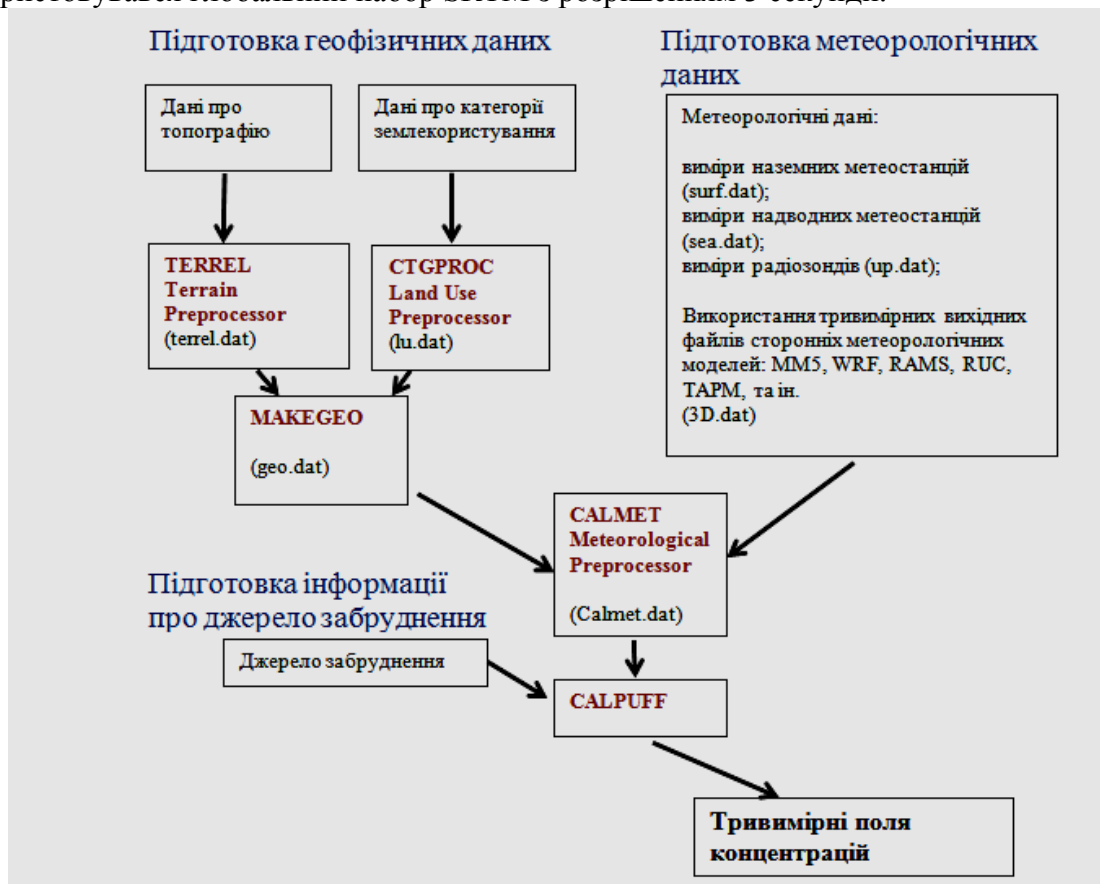


Рис. 1. Основні етапи взаємодії моделі атмосферного перенесення CALPUFF, метеорологічного препроцесора CALMET, допоміжних геофізичних препроцесорів та метеорологічної моделі прогнозу погоди WRF

Приведений у роботі розрахунок WRF проводився для періоду з 2015.06.07\_00:00 по 2015.06.17\_00:00, що повністю включає у себе весь період активної фази пожежі. У якості початкових та граничних умов при розрахунку WRF були використані дані глобальної метеорологічної моделі NCEP FNL Національного центру прогнозування навколишнього середовища США. При розрахунку була використана звичайна конфігурація основних параметризацій (mp\_physics= 8, ra\_lw\_physics=1, ra\_sw\_physics=2, radt= 30, sf\_sfclay\_physics= 2, sf\_surface\_physics = 3, bl\_pbl\_physics = 2), яка неодноразово успішно використовувалася для вирішення інших метеорологічних задач.

На рис. 2 приведені температура, швидкість та напрямок вітру в точці пожежі отримані шляхом моделювання, та виміри найближчої наземної метеостанції (метеостанція UKKK, розміщена в аеропорту Жуляни на відстані 21 км від місця пожежі). На рис. 3 у якості прикладу приведені вибрані вертикальні профілі вітру у точці з координатами нафтосховища, що демонструють зміну характеристик вітру з висотою у широкому діапазоні.

Для роботи метеорологічного препроцесору CALMET, була створена розрахункова сітка 560x560км з шагом 2 км, з центром розрахункової області співпадаючим з місцем пожежі. У вертикальному напрямку сітка складалася з 10 рівнів: 0, 20, 40, 80, 160, 300, 600, 1000, 1500, 2200, 3000 метрів над поверхнею ґрунту. У якості вхідного набору метеорологічних даних були використані тривимірні метеорологічні поля отримані в

мезомасштабній моделі WRF, перетворені у вхідний формат моделі CALMET за допомогою програми CALWRF. В результаті роботи метеорологічного препроцесора CALMET були сформовані тривимірні поля вітру, що дозволяють виконати моделювання атмосферного забруднення з врахуванням просторової та часової неоднорідності метеорологічних умов.

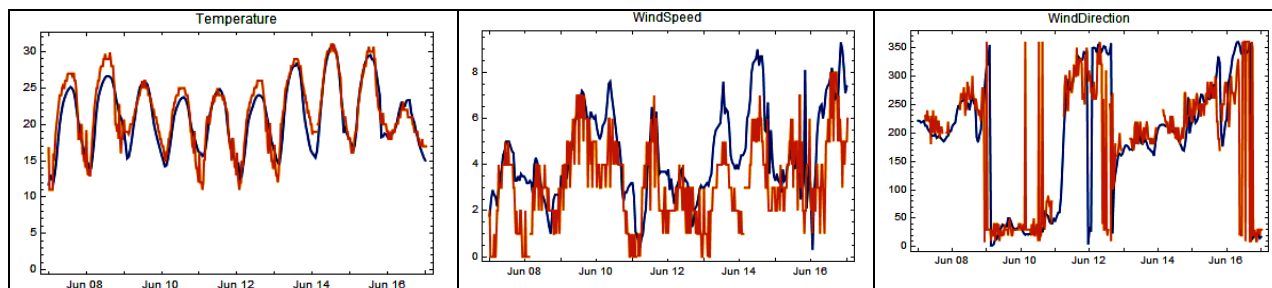


Рис. 2. Розраховані у моделі WRF (голубим) метеорологічні характеристики (температура, швидкість вітру, напрямок вітру) для точки пожежі та результати вимірів найближчої метеорологічної станції (UKKK – аеропорт Жуляни, оранжевим)

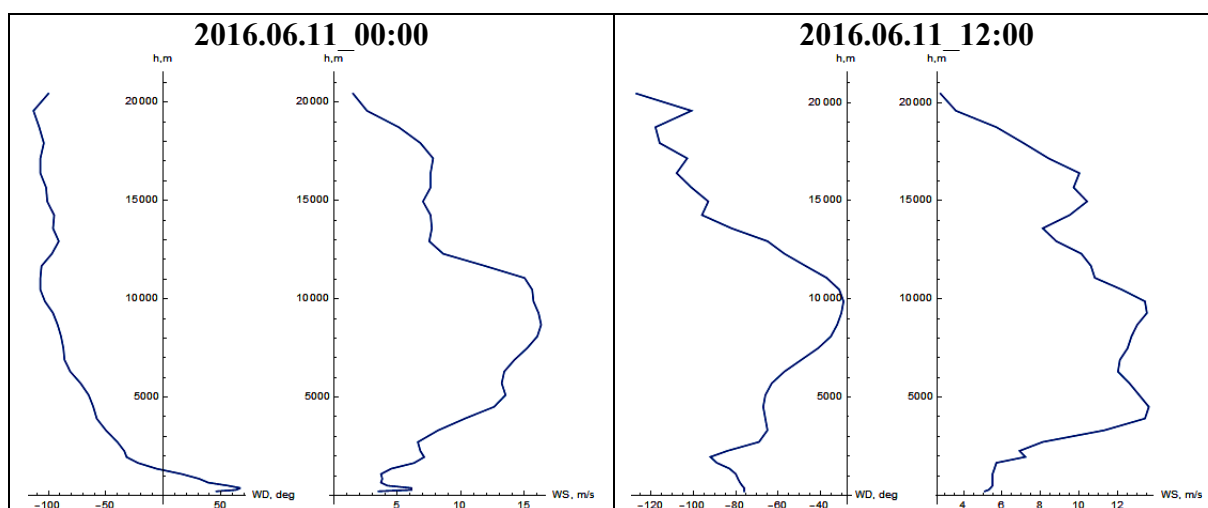


Рис. 3. Розраховані у моделі WRF вертикальні профілі вітру

**Налаштування моделі атмосферного переносу.** Основна складність і неоднозначність при налаштуванні моделі атмосферного переносу CALPUFF виникає при визначенні джерела викиду. Вважаючи, що тривалість пожежі була повних 6 діб, та згоріло близько 14 тисяч тон нафтопродуктів, грубо припускаючи, що інтенсивність горіння була рівномірною, отримуємо швидкість вигорання палива близько 27кг нафтопродуктів за секунду. Оскільки достовірна інформація про нафтопродукти, які горіли, є відсутня, для консервативної оцінки було прийняте значення фактору емісії для двох основних забруднювачів (NO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub>) рівне 0.03 кг/кг, що приблизно відповідає і оцінює зверху максимально можливе значення питомої емісії NO<sub>2</sub> при горінні дизельного палива 0.0261 кг/кг, та максимально можливе значення питомої емісії SO<sub>2</sub> при горінні сирової нафти 0.0278 кг/кг [5]. У такому випадку, для обох забруднювачів отримаємо середню емісію 0.03 кг/кг\*27кг/сек=0.81 кг/сек.

Оскільки доступна інформація про пожежу обмежена, загальне джерело забруднення моделювалося у вигляді 100 точкових джерел однакової потужності, розміщених в точці з координатами пожежі по горизонталі, та у шарі від 0 до 1000 метрів з шагом 10 метрів по вертикалі (тобто кожне окреме точкове джерело, кожної секунди генерує по 8.1 г забруднювача NO<sub>2</sub> та забруднювача SO<sub>2</sub>). Моделювання викиду

забруднення проводилися для періоду з 2015.06.08\_14:00 по 2015.06.14\_14:00. При моделюванні був задіяний механізм хімічних перетворень RIVAD/ARM3, моделювання виконувалося для шести забруднювачів: SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> (забруднювачі SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> утворювалися у результаті хімічних перетворень за SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>). Моделювання проводилося з врахуванням сухого та вологого випадіння. Коефіцієнти дисперсії визначалися у відповідності до категорії стійкості за модифікованою схемою Паскуїла Гіфорда для земель сільськогосподарського призначення, та за схемою McElroy-Pooler для земель з міською забудовою.

**Результати моделювання** Модель CALPUF дозволяє отримати середньочасові, середньодобові, середні концентрації забруднювачів для будь якого періоду та у будь якій точці розрахункової сітки. У якості демонстрації результатів моделювання на рис. 6 приведені максимальні середньодобові концентрації SO<sub>2</sub> для усього періоду пожежі. Наведені ізолінії вибрані таким чином, що ізолінія 50 мкг/м<sup>3</sup> відповідає прийнятій в Україні ГДК для середньодобової концентрації сірчистого ангідриду [6], ізолінія 20 мкг/м<sup>3</sup> відповідає значенню ГДК рекомендованому ВОЗ, ізолінія 5 мкг/м<sup>3</sup> – близька до гранично допустимого значення середньорічної концентрації.

При оцінці ризиків для населення максимальний інтерес представляє аналіз екологічної ситуації у містах та поселеннях, що межують з джерелом забруднення. Для детального аналізу були вибрані 6 рецепторів, розташованих у місцях посиленого інтересу: місто Васильків, селище міського типу Глеваха, село Путрівка, місто Фастів, місто Обухів та межа Міста Києва. В таблиці 1 представлені статистичні дані забруднення SO<sub>2</sub> в околі вибраних рецепторів (місцях підвищеного інтересу). Як видно з таблиці, найвищі концентрації спостерігаються у Путрівці, що знаходиться найближче до місця пожежі. В той же час у більш віддалених Глевах та Василькові частота перевищення порогового значення була вище ніж у Путрівці. Міста Фастів та Обухів розташовані на приблизно однаковій відстані від пожежі, в той же час концентрація SO<sub>2</sub> в Фастові у 3.5% випадків була вище ніж 20 мкг/м<sup>3</sup>, в той час як в Обухові концентрація оксиду сірки жодного разу не перевищила порогове значення.

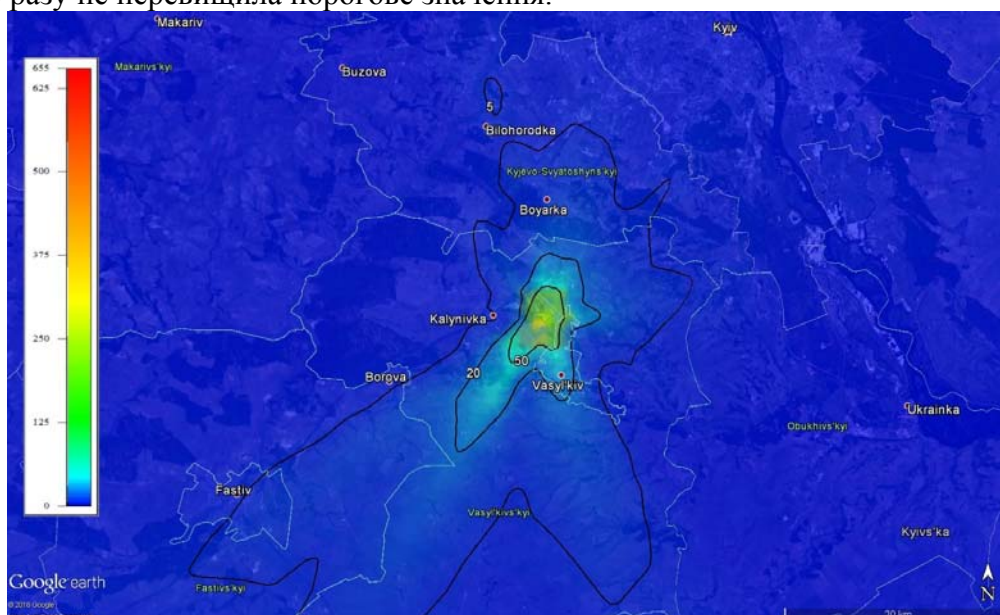


Рис. 6. Максимальні середньодобові концентрації SO<sub>2</sub> за весь період пожежі (контури 5, 20 та 50 мкг/м<sup>3</sup>)

Таблиця 1. Статистичний аналіз забруднення сірчистим ангідридом (SO<sub>2</sub>) в вибраних населених пунктах

Рецептор	Середнє за весь період пожежі, мкг/м <sup>3</sup>	Максимальне погодинне значення мкг/м <sup>3</sup>	Максимальне середньодобове значення, мкг/м <sup>3</sup>	Частота перевищення порогового значення 20 мкг /м <sup>3</sup>	Частота перевищення порогового значення 50 мкг /м <sup>3</sup>
Путрівка	14	675	72	6.9%	5.6%
Глеваха	11	211	36	11.8%	7.6%
Васильків	7.9	144	30	13.2%	4.9%
Київ	1.0	26	2.2	0.7%	0.0%
Фастів	1.6	38	7.3	3.5%	0.0%
Обухів	0.3	7.5	0.8	0.0%	0.0%

**Висновки.** У роботі було налаштовано модель атмосферного перенесення забруднень CALMET/CALPUFF для сумісної роботи з моделлю прогнозування погоди, що дозволяє виконувати детальну оцінку наслідків атмосферного забруднення від довготривалих техногенних екологічних катастроф. Проведене моделювання розповсюдження забруднень внаслідок аварії на нафтобазі у Василькові показало, що для вказаної аварії миттєві та середньодобові концентрації забруднювачів досягали значень 5 мкг/м<sup>3</sup> на відстанях до 40 км від пожежі. В той же час, проведене моделювання показало, що поля забруднення характеризуються суттєвою просторовою неоднорідністю і при певних метеорологічних умовах хмара забруднення може подолати більш значні відстані. Це означає, що при моделюванні довготривалих викидів, використання якісних тривимірних метеорологічних полів, отриманих з мезомасштабної моделі прогнозу погоди WRF, може значно покращити якість оперативного моделювання переносу атмосферних забруднень а отже і оцінку ризиків для населення.

#### Список літератури

1. Scire J.S. Strimaitis D.G., Yamartino R.J. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5), 1998, Earth Tech. Inc., Concord,, MA. - Режим доступу: <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>
2. Ковалец І.В., Железняк М.Й., Мадерич В.С. Моделирование атмосферного переноса продуктов горения желтого фосфора в результате железнодорожной аварии 16 июля 2007 г. возле с. оживов львовской области // Зб. доп. V-ї дист. наук.-практ. конф. з міжнар. участю "Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. СППР'2009", (Київ, 8 червня 2009). – С. 133–137.
3. I. Kovalets, C. Asker, A. Khalchenkov, C. Persson, T. Lavrova Atmospheric dispersion of radon around the uranium mill tailings of the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine, 2017, Journal of Environmental Radioactivity, t172, pp. 173-190, doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.03.025.
4. (WRF, 2014) WRF Version 3.6 Modeling System User's Guide, National Center for Atmospheric Research, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, 2014. – Режим доступу: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3.6/contents.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.6/contents.html)
5. Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при свободном горении нефти и нефтепродуктов, 1996, Самара, Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ.
6. ДСП 201-97, Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами), 1997, Міністерство охорони здоров'я.