

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,
завідувача кафедри системотехніки Харківського національного університету
радіоелектроніки, Гребенніка Ігоря Валерійовича на дисертаційну роботу
ФАЙФУРИ Василя Васильовича на тему: «Математичне та програмне
забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі
атмосфери», поданої до захисту на здобуття ступеня доктора філософії за
спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення галузі знань 12
Інформаційні технології

1. Актуальність теми дисертаційного дослідження.

Забруднення навколишнього середовища мікропластиком визнано однією з найгостріших екологічних проблем глобального масштабу. Особливу актуальність набуває дослідження атмосферного перенесення мікропластику, яке є важливим шляхом його поширення та сприяє виявленню навіть у віддалених регіонах планети. У цьому контексті приземний шар атмосфери є найбільш вразливим до забруднення мікропластиком, оскільки він безпосередньо впливає на життєдіяльність людини та багатьох біологічних видів. Тому, оцінка концентрації та джерел атмосферного мікропластику у цій зоні є критично важливою для всебічного розуміння масштабів проблеми та розробки ефективних стратегій її мінімізації.

Представлену дисертаційну роботу Файфури В.В. присвячено розв'язанню важливої науково-технічної задачі, що полягає у забезпеченні просторового аналізу поширення мікропластику в атмосфері в умовах малих вибірок даних вимірювань. Це досягається шляхом розробки математичного та програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику у приземному шарі атмосфери. Особливий акцент зроблено на оцінку внеску таких значущих джерел забруднення, як об'єкти сфери поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) та дорожня інфраструктура.

Запропоновані в дисертаційній роботі математичне та програмне забезпечення для моделювання поширення мікропластику дозволять не лише кількісно оцінити вплив конкретних антропогенних факторів, а й створити інструменти для прогнозування поширення мікропластику. З огляду на обмеженість існуючих даних вимірювань, розробка інструментарію, що інтегрує математичні моделі, які дозволяють прогнозування полів концентрацій в умовах малих вибірок, є надзвичайно цінною для практичного застосування.

Таким чином, представлене дисертаційне дослідження є актуальним, має суттєву наукову та практичну цінність, сприяючи поглибленому розумінню проблеми забруднення мікропластиком атмосфери та пропонуючи інноваційні підходи до її вирішення.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи Файфури В.В. повністю обґрунтовані, що підтверджуються коректним використанням комплексного підходу, що включає сучасні та визнані у науковому світі методи.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації розроблено на теоретико-методологічній базі, в основу якої покладено методи теорії систем, математичного моделювання, оптимізації та інтервального аналізу. Ці методи є основою для побудови моделей поширення мікропластику в атмосфері. Зокрема, застосування диференціальних рівнянь у частинних похідних, що базуються на рівнянні адвекції-дифузії-реакції, дозволяє адекватно описати складні процеси перенесення, турбулентного розсіювання та осадження мікропластику в приземному шарі атмосфери. Адаптація цих моделей для різних типів джерел забруднення (ТПВ, дорожня інфраструктура) свідчить про гнучкість та прикладну цінність підходу. Використання інтервального аналізу для

налаштування та верифікації моделей уможливилює врахування невизначеності у вихідних даних, що є особливо важливим в умовах малих вибірок.

Наукові положення, висновки сформульовані до усіх розділів дисертації, а також загальні висновки по роботі мають наукове обґрунтування. Представлені результати, рекомендації базуються на теоретичному підґрунті та впливають з логічної послідовності проведених досліджень, експериментальних підтверджень пропонованих методів та підходів.

3. Наукова новизна результатів дослідження

В дисертаційній роботі Файфури В.В. розв'язано науково-технічну задачу забезпечення просторового аналізу поширення мікропластику в атмосфері в умовах малих вибірок даних вимірювань шляхом розробки математичного та програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери з особливим акцентом на оцінку внеску таких значущих джерел забруднення, як об'єкти сфери поводження з ТПВ та дорожня інфраструктура. При цьому отримано такі наукові результати:

1. Вперше запропоновано та обґрунтовано комбінований метод отримання інтервальних оцінок концентрації мікропластику в точках вимірювань, який, на відміну від існуючих, поєднує польові вимірювання завислих речовин та лабораторні вимірювання мікропластику в умовах малих вибірок даних, що в сукупності забезпечило зменшення кількості вимірювань для налаштування та верифікації моделей.

2. Вперше запропоновано та обґрунтовано метод адаптивного налаштування параметрів математичних моделей поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції, який, на відміну від існуючих, базується на гібридних методах оптимізації та інтервальних оцінках вимірювань концентрації мікропластику в приземному шарі атмосфери, що забезпечило гарантовані прогностичні властивості отриманих моделей в умовах малих вибірок даних вимірювань.

3. Набули подальшого розвитку математичні моделі поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції, які, на відміну від існуючих, комплексно враховують фізичні властивості процесу поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери від різних типів антропогенних джерел, що забезпечило «гарантовану» точність та прогностичні властивості таких моделей.

4. Набули подальшого розвитку архітектурні рішення щодо інтеграції комплексу математичних моделей поширення мікропластику, які, на відміну від існуючих, поєднують елементи тісного зв'язування для швидкої обробки геоданих та візуалізації і сервісно-орієнтований підхід для гнучкого підключення обчислювальних модулів реалізації побудови та налаштування моделей, що забезпечує масштабованість, гнучкість у інтеграції нових моделей або джерел даних та оптимізований робочий процес для підготовки даних.

4. Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Зміст дисертації відповідає поставленим меті та завданням дослідження, характеризується повнотою викладення, структурною логічністю та завершеністю.

У *вступі* автором здійснено обґрунтування актуальності вибору теми дослідження, зазначено зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано мету та завдання дослідження. Дається опис наукової новизни одержаних результатів дослідження та їхнього практичного значення. Наведено особистий внесок здобувача у працях, які опубліковано у співавторстві, а також інформацію про апробацію результатів досліджень. Також дається опис структури та обсягу дисертації.

Перший розділ містить аналітичний огляд проблеми поширення мікропластику, систематизацію інформації про його джерела (первинний та вторинний мікропластик), а також сучасні методології відбору проб та

лабораторного аналізу. Проаналізовано існуючі підходи до моделювання атмосферного поширення мікропластику (Гаусові, Ейлерові, Лагранжеві моделі). Виявлено обмеження існуючих методів, зокрема складність інтеграції програмного забезпечення для динамічного моделювання мікропластику з ГІС. Ці обмеження обумовлюють науковий контекст та актуальність дослідження, що сфокусоване на розробці адаптованих математичних моделей та ефективних архітектурних рішень для інтеграції пропонованого програмного забезпечення та ГІС. Завершується розділ постановкою задачі та деталізацією її завдань.

У *другому розділі* розроблено методи для побудови моделей поширення мікропластику поблизу земної поверхні. Основу становить метод математичного моделювання на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції, що враховує перенесення, турбулентне розсіювання та осадження мікропластику. Для верифікації моделей запропоновано комбінований метод інтервального оцінювання концентрації мікропластику, який поєднує відбір проб повітря з подальшим фізико-хімічним аналізом. Розроблено метод адаптивного налаштування параметрів моделі шляхом оптимізації емпіричних коефіцієнтів, мінімізуючи розбіжності між прогнозованими на основі моделі значеннями та експериментальними даними в інтервальному вигляді. Такий підхід забезпечує гарантовані прогностичні властивості моделей в умовах малих вибірок даних результатів вимірювань. Також представлено алгоритмічне забезпечення та структуру програмних модулів для автоматизації обробки даних, чисельного розв'язання рівняння та налаштування моделей.

Третій розділ присвячений розробці математичних моделей поширення мікропластику від різних типів антропогенних джерел. Розглянуто методи формування вихідних даних для моделювання з використанням ГІС. Розроблено модель поширення мікропластику від точкових джерел (сміттєпереробні заводи), модель для сміттєзвалищ (враховує поверхневі джерела, вивітрювання) та модель для придорожніх екосистем (знос шин, дорожній рух). Ці моделі базуються на рівнянні адвекції-дифузії-реакції, враховують ключові фізичні процеси та

дозволяють прогнозувати просторово-часовий розподіл концентрації мікропластику залежно від характеристик джерела, метеоумов, властивостей середовища та частинок.

У четвертому розділі описано особливості побудови програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику. Деталізовано архітектуру програмного забезпечення (ПЗ), вимоги до нього та проектування основних компонентів. Представлено загальну архітектуру, що підкреслює інтеграцію математичного, програмного та апаратного забезпечення в єдину систему, доступну для користувача. Розглянуто компоненти підсистеми математичного моделювання та засоби візуалізації. Описано технологію створення портативної вимірювальної станції (апаратний блок та спеціалізоване ПЗ). Наведено діаграми та схеми програмної реалізації, а також проектування підсистем збереження просторових даних.

Висновки сформульовані у роботі повною мірою представляють отримані у дисертаційному дослідженні результати, мають належний науковий рівень та відповідають вимогам, які висуваються до результатів докторської дисертації.

Дисертаційна робота має завершену структурну форму представлення, повною мірою розкриває мету та завдання дослідження.

5. Практичне значення результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи мають практичне значення, оскільки на їх основі реалізовано комп'ютерну систему для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери від джерел антропогенного походження.

Результати дисертаційної роботи впроваджено: у ТОВ «ЕКО БАЛАНС ТЕР» (сміттесортувальний завод) для проведення щоквартального моніторингу викидів мікропластичних мас в атмосферу та оцінки стану довкілля прилеглих територій; у ПП «Катруб» (сміттєперероблювальний завод) для проведення щоквартального моніторингу викидів мікропластику в атмосферне повітря та оцінки потенційного стану ґрунтів на прилеглий території; в НДЧ ЗУНУ при

виконанні молодіжного науково-дослідного дослідження на тему «Математичне та програмне забезпечення прототипу біогазової установки з підвищеною ефективністю функціонування» (державний реєстраційний номер 0124U000076); в ІТ компанії «Forte Group», при розробці програмно-технічних комплексів, які інтегрують апаратні та програмні компоненти реалізовані в різнорідних середовищах; в освітньому процесі Західноукраїнського національного університету на кафедрі комп'ютерних наук при викладанні дисципліни «Архітектура та проектування програмного забезпечення. Усі отримані результати та їх впровадження підтверджено актами використання результатів дисертаційного дослідження, що наведено в додатках.

6. Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях.

За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 10 наукових праць загальним обсягом 88 сторінок, зокрема, 3 статті у фахових наукових виданнях, 1 з яких входить до міжнародної наукометричної бази Scopus та відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank віднесено до квартилю Q3, 5 публікацій у матеріалах конференцій, 4 з яких – міжнародні, матеріали яких індексуються наукометричною базою Scopus та 2 статті у наукових журналах України. Результати роботи доповідались в основному на високо-рейтингових міжнародних наукових конференціях закордоном, а також на наукових семінарах кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету.

Результати аналізу публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи вказують на повноту викладу основних наукових положень та дотримання здобувачем принципів академічної доброчесності у процесі підготовки докторської дисертації. Загальна кількість публікації та їх зміст достатньою мірою висвітлюють результати дисертаційної роботи.

7. Зауваження та дискусійні питання

Не заперечуючи важливість наукових положень та висновків, необхідно зазначити ряд дискусійних питань:

1. В роботі визначено переваги запропонованих методів «в умовах малих вибірок даних вимірювань», що забезпечують «гарантовані прогностичні властивості» моделей в таких умовах. Однак, недостатньо розкривається, що саме розуміється під «малими вибірками» (кількісні критерії), і як саме методи адаптивного налаштування та інтервального аналізу забезпечують цю «гарантовану точність» за умова такої обмеженої розмірності даних. Незрозуміло, які конкретні критерії підтверджують, що запропоновані моделі мають гарантовані прогностичні властивості при роботі з обмеженими даними. Не ясно, чи проводились порівняння з іншими методами, що працюють з малими вибірками, для демонстрації переваг.

2. Хоча рівняння адвекції-дифузії-реакції є фундаментальним, важливо чітко обґрунтувати, наскільки адекватно воно моделює саме мікропластик, враховуючи специфічні аспекти його поведінки (різноманітність форм, розмірів, щільності, електростатичні взаємодії тощо), які можуть відрізнятися від звичайних газоподібних чи рідких забруднювачів. З роботи не зрозуміло, які фізичні властивості мікропластику були враховані у параметрах рівняння адвекції-дифузії-реакції (наприклад, коефіцієнти дифузії, швидкості осідання) і чи враховувалась гетерогенність мікропластику (різні розміри, форми, щільності частинок) у моделі та як це впливає на її точність.

3. В роботі запропоновано комбінований метод інтервального оцінювання концентрації мікропластику для верифікації моделей, але недостатньо детально описано, яким чином відбувалась саме верифікація розроблених моделей на реальних даних. Відповідно, не ясно, чи були проведені незалежні експериментальні дослідження або використані існуючі дані для повної валідації моделей і які метрики ефективності були використані для оцінки точності та

надійності прогнозів, особливо, в контексті «гарантованих прогностичних властивостей».

4. В роботі використовуються гібридні методи оптимізації, але не розкрито суть даних методів. Відповідно, виникають питання: які конкретно гібридні методи оптимізації були використані для налаштування параметрів моделі? Чому саме ці методи були обрані, і які переваги вони мають перед іншими (наприклад, стандартними генетичними алгоритмами чи алгоритмами рою частинок)?

5. З роботи не зрозуміло, які конкретні проблеми інтеграції між моделюванням мікропластику та ГІС були вирішені завдяки запропонованій архітектурі. В роботі не наведено кількісних показників, які б демонстрували переваги запропонованого архітектурного рішення (наприклад, швидкість обробки даних, гнучкість розширення функціоналу).

Зроблені зауваження не зменшують загальної позитивної оцінки дисертаційного дослідження, а лише вказують на складність досліджуваної проблематики та можуть слугувати орієнтиром щодо подальшої наукової роботи.

8. Відсутність порушення академічної доброчесності.

У дисертації Файфури В.В. відсутні порушення академічної доброчесності. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів містять посилання на відповідні джерела.

Висновок про відповідність роботи встановленим вимогам МОН України

Дисертаційна робота Файфури Василя Васильовича на тему: «Математичне та програмне забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери» є завершеним науковим дослідженням, яке виконано самостійно, вирішує актуальну науково-технічну задачу, має вагоме теоретичне та практичне значення. Отримані теоретичні результати мають належне наукове обґрунтування, є новими та раніше не захищалися. Дисертаційна робота за своїм змістом, темою, об'єктом та предметом

дослідження, висновками, рекомендаціями відповідає спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення.

Зважаючи на актуальність дисертаційного дослідження, новизну теоретичних положень, практичну цінність результатів, рівень висвітлення результатів дослідження в публікаціях наукових видань можемо зробити висновок, що дисертація відповідає «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 року, а її автор, Файфура Василь Васильович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення галузі знань 12 Інформаційні технології.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри системотехніки
Харківського національного
університету радіоелектроніки



Ігор ГРЕБЕННИК

Підпис І.В. Гребенніка засвідчую.

Проректор з наукової роботи
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доктор технічних наук, професор,



Юрій РОМАНЕНКОВ