

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

**Данило Ольга Ярославівна**



УДК 004.942:519.876.5

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОСТОРОВИЙ  
АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ  
У ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті "Львівська політехніка"  
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

**Бунь Ростислав Адамович,**

Національний університет "Львівська політехніка",

професор кафедри прикладної математики

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

**Гера Богдан Васильович,**

Дніпропетровський національний університет

залізничного транспорту ім. В. Лазаряна,

завідувач кафедри транспортних технологій

кандидат технічних наук, доцент, ст. наук. співр.

**Юзефович Роман Михайлович,**

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України,

завідувач лабораторії вібродіагностики

Захист відбудеться 22 жовтня 2015 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано            вересня 2015 р.

Т.в.о. ученого секретаря  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



Н. Б. Шаховська

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Зміна клімату – одна з найгостріших глобальних екологічних проблем людства. Основною причиною таких змін вчені вважають зростання концентрації антропогенних парникових газів в атмосфері. З розвитком людського суспільства потреба в споживанні різних видів енергії зросла, тому найбільші емісії парникових газів виникають в енергетичному секторі внаслідок спалювання викопного палива для забезпечення господарської діяльності (промисловість, транспорт, житловий сектор та інші). Як наслідок, концентрація парникових газів збільшилася на 40%, у порівнянні з доіндустріальним періодом.

З метою скорочення емісій парникових газів до такого рівня, який би зменшив або призупинив небезпечний антропогенний вплив на кліматичну систему, країнами були прийняті обмеження на емісії цих газів в атмосферу. Однак для контролю за виконанням таких зобов'язань та ефективного пошуку шляхів скорочення емісій парникових газів потрібно мати зручний інструментарій, який дав би змогу робити висновки щодо величин емісій у конкретних районах, виділяти регіони, де у структурі емісій переважає певний тип палива, та порівнювати ці регіони між собою.

Одним з джерел емісії парникових газів є процеси спалювання викопного палива населенням, які відносять до житлового сектору. Емісії у цьому секторі становлять близько 10% від сумарних емісій. В основному це емісії, що виникають внаслідок спалювання природного та скрапленого газу, дров для опалення, кам'яного вугілля та інших видів палива.

На сьогодні розроблено ряд методик для інвентаризації емісій парникових газів у житловому секторі, проте вони пристосовані для проведення інвентаризації тільки на рівні країни чи регіону в цілому. Однак джерела емісій розміщені вкрай нерівномірно, через що такі підходи не можуть врахувати територіальне розміщення населення, специфіку палива, що споживається, технологію спалювання та інші важливі параметри. Проте, у деяких випадках важливо мати інформацію про енергетичні потреби та обсяги емісій парникових газів для кожного населеного пункту. Зокрема, такі результати можуть бути використані для визначення енергетичної ефективності та оцінювання потенціалу скорочення емісій парникових газів в окремих регіонах.

В Україні значний внесок у створення математичних моделей для просторового аналізу емісій парникових газів у житловому секторі зробили такі вчені як Бунь Р.А. та Бойчук Х.В., за кордоном можна відзначити таких вчених як Costa M., Winiwarter W., Webber P.H., Gregg J.S., Lindley S.J., Oda T., Olivier J.G.J., Friedrich R., Bachman W., Brandmeyer J.

Житловий сектор, у порівнянні з іншими секторами, має великий потенціал для зменшення емісій парникових газів, особливо в країнах, що розвиваються. Оскільки, характерною рисою цього сектору є те, що він складається з великого числа джерел емісії, отримання статистичної інформації на рівні окремих домогосподарств чи навіть населених пунктів щодо споживання палива є складним і ресурсозатратним завданням для держави. Однак, при плануванні природоохоронних заходів, спрямуванні інвестицій у цей сектор, модернізації та підвищенні енергоефективності житлового фонду, важливо вміти визначити окремі регіони, для яких ці дії будуть найрезультативнішими.

Саме тому, розроблення математичних моделей та зручного інструментарію для проведення просторової інвентаризації парникових газів, є актуальним завданням, а результати роботи нададуть принципово нові можливості щодо аналізу структури емісій на різних адміністративних рівнях та пошуку шляхів їх зменшення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основу дисертаційної роботи складають результати теоретичних та практичних досліджень, виконаних автором у рамках планових робіт кафедри прикладної математики Національного університету «Львівська політехніка» та ряду міжнародних грантів, зокрема:

- гранту 7РП ЄС “Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів” (2011-2014 рр.; грант 7РП ЄС – Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES);
- українсько-австрійського проекту "Регіональний просторовий кадастр емісій парникових газів з врахуванням невизначеностей вхідних даних" (2011-2012 рр., угода М/435-2011 від 12.09.2011 р., номер держреєстрації 0111U008510 та угода М/301-2012 від 25.07.2012 р.; номер державної реєстрації 0112U003944);
- українсько-китайського проекту "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень" (2013 р.; угода № М/12-2013 від 25.04.2013 р.; 2013 р.; номер державної реєстрації 0113U001997);
- держбюджетної теми “Геоінформаційні технології побудови регіональних кадастрів емісії парникових газів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень” (2011-2012 рр.; номер державної реєстрації 0111U001210);
- держбюджетної теми “Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень” (2013-2014 рр.; номер державної реєстрації 0113U003181).

У рамках цих робіт автор розробила підходи, математичні моделі та алгоритми просторового аналізу емісій парникових газів у житловому секторі та здійснила обчислювальні експерименти з оцінювання емісій в Україні та Польщі, а також підхід до аналізу невизначеностей результатів просторового аналізу процесів емісії парникових газів від спалювання палива домогосподарствами із врахуванням особливостей джерел емісії.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення роздільної здатності просторових кадастрів емісій парникових газів шляхом розроблення математичних моделей та геоінформаційних технологій для просторового аналізу емісій парникових газів у житловому секторі на прикладі України та Польщі.

У відповідності з метою дисертаційної роботи вирішено такі *задачі*:

- аналіз відомих математичних моделей та підходів для здійснення просторової інвентаризації парникових газів у житловому секторі;
- розроблення математичних моделей усіх складових процесу емісії у житловому секторі на рівні елементарних об'єктів з врахуванням територіального розміщення населення та енергетичних потреб домогосподарств, які базуються на принципі дезагрегації даних про використане паливо до рівня населених пунктів, та дають можливість модифікувати підходи в залежності від специфіки статистичних даних;
- формування бази геопросторових даних з вхідними параметрами для оцінювання емісій парникових газів, яка дає змогу оцінювати енергетичні потреби домогосподарств у залежності від кліматичних умов, стану житлового фонду та інших параметрів;

- створення геоінформаційної технології просторового аналізу емісій парникових газів від спалювання палива населенням, яка враховує особливості емісійних процесів у різних регіонах і дає можливість будувати бази геопросторових даних про емісії парникових газів;
- реалізація обчислювальних експериментів з просторової інвентаризації емісій парникових газів для житлового сектору Польщі та України, з врахуванням особливостей статистичних даних у цих країнах, порівняння результатів оцінювання;
- аналіз невизначеностей результатів просторової інвентаризації парникових газів у житловому секторі України та Польщі.

*Об'єктом дослідження* є процеси емісії парникових газів при спалюванні палива населенням у житловому секторі.

*Предметом дослідження* є методи просторового моделювання та аналізу процесів емісії парникових газів при спалюванні палива населенням у житловому секторі, методи аналізу невизначеності результатів інвентаризації парникових газів.

**Методи дослідження.** При розробленні математичних моделей процесів емісії парникових газів від спалювання палива населенням у житловому секторі з врахуванням географічної прив'язки використано елементи геотегування, теорії ймовірності та математичної статистики. При створенні баз геопросторових даних зі статистичною інформацією про результати господарської діяльності та коефіцієнти емісій використано елементи теорії множин та баз даних. Моделювання та просторовий аналіз результатів інвентаризації здійснено за допомогою геоінформаційних технологій. При аналізі невизначеностей результатів інвентаризації з використанням симетричних та несиметричних розподілів застосовано метод Монте-Карло.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розв'язанні наукового завдання розроблення математичних моделей та геоінформаційних технологій для просторового аналізу процесів емісії парникових газів у житловому секторі та реалізації обчислювальних експериментів на прикладі України та Польщі. При цьому отримано такі наукові результати:

- вперше, розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів у житловому секторі, які, на відміну від відомих, базуються на принципі дезагрегації статистичних даних до рівня площинних джерел емісії і дають можливість врахувати енергетичні потреби населення, зокрема опалювання житлових приміщень, підігрів води та приготування їжі, а також враховувати регіональні відмінності, кліматичні умови та дані про стан житлового фонду;
- вперше, розроблено геоінформаційну технологію моделювання та просторового аналізу емісії парникових газів у житловому секторі, яка використовує бази геопросторових даних та дає можливість будувати просторові кадастри емісій у цьому секторі;
- удосконалено метод аналізу невизначеностей результатів просторової інвентаризації парникових газів у житловому секторі України та Польщі з використанням методу Монте-Карло та 95% довірчих інтервалів, який, на відміну від відомих, базується на просторових кадастрах емісій і використовує відповідні симетричні та несиметричні розподіли вхідних даних, що дає можливість досліджувати невизначеність на різних рівнях просторової дезагрегації.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені математичні моделі та геоінформаційна технологія аналізу емісій парникових від використання викопного палива у житловому секторі дають можливість:

- автоматизовано формувати бази геопросторових даних емісії парникових газів у житловому секторі як площинних джерел;
- враховувати специфіку використовуваних видів палива, їх теплотворні характеристики та коефіцієнти емісії;
- враховувати специфіку подання національної статистичної звітності;
- формувати зручні для сприйняття просторові кадастри емісій та аналізувати структуру емісій як на рівні окремих підприємств, так і на рівні регіонів;
- аналізувати невизначеність результатів просторової інвентаризації з врахуванням симетричних та несиметричних невизначеностей.

*Реалізація результатів та впровадження.* Розроблені математичні моделі та алгоритми просторової інвентаризації емісій парникових газів у житловому секторі в Україні та Польщі програмно реалізовано із використанням геоінформаційної системи та баз геопросторових даних. Результати дисертаційних досліджень використано: в Інституті системного аналізу Польської академії наук, м.Варшава (математичні моделі та алгоритми просторової інвентаризації парникових газів у житловому секторі Польщі); в Національному університеті "Львівська політехніка" при виконанні гранту 7РП ЄС "Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів" (геоінформаційна технологія та математичні моделі процесів емісії парникових газів у житловому секторі), українсько-австрійських та українсько-китайського проекту (підходи до аналізу невизначеностей результатів просторової інвентаризації парникових газів у житловому секторі); двох держбюджетних тем (математичні моделі та алгоритми, а також геоінформаційну технологію аналізу емісій парникових газів від використання викопного палива домогосподарствами у житловому секторі України, а також технології побудови цифрових карт джерел емісії у житловому секторі); у Державному заповіднику „Розточчя” (аналіз емісій парникових газів у населених пунктах, сусідніх із заповідником регіонів).

Розроблені цифрові карти локальних кліматичних зон м.Києва та м.Львова включено у світову базу даних урбанізованих територій (World Urban Database – <http://www.wudapt.org/cities/europe/>).

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі в Національному університеті „Львівська політехніка” в лекційних курсах освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр": "Математичні моделі екологічних процесів" та „Математичні засади просторового моделювання” (спеціальність "математичне та комп'ютерне моделювання"); "Математичне моделювання соціально-екологічних процесів" (спеціальність "прикладна математика"). Акти про використання результатів дисертаційних досліджень наведено в додатку.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, отримані при вирішенні поставлених у дисертаційній роботі задач, отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: математичні моделі процесів емісії парникових газів у житловому секторі Польщі [2, 3, 8] та України [1, 5, 11, 19]; побудова кадастру емісій парникових газів у житловому секторі України та Польщі [16]; імплементація елементів побудови елементарних об'єктів з врахуванням особливостей житлового сектору у геоінформаційну технологію для просторового аналізу емісій [4, 13, 17, 20]; побудова цифрової карти населених пунктів України [14]; формування просторового кадастру емісій, алгоритми [19] та програмні засоби [7, 12, 18] аналізу невизначеності результатів інвентаризації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародних та всеукраїнських конференціях, зокрема на: ПАСА 40<sup>th</sup> Anniversary Conf. “World with Reach: from Science to Policy” (Відень, Австрія, 2012); YSSP Late Summer Workshop (Лаксенбург, Австрія, 2012); 8th Intern. Scientific and Technical Conf. on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT’2013) (Львів, 2013); 6th Intern. Conf. of Young Scientists on Computer Science & Engineering (CSE-2013) (Львів, 2013); Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених „Інформаційні технології, економіка та право” (ІТЕП-2012; ІТЕП-2014) (Чернівці, 2012, 2014); V міжнар. наук. конфер. студентів і аспірантів „Регіональні екологічні проблеми” (Одеса, 2012); 3-й міжнар. наук.-практ. конф. „Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія” (Вінниця, 2012); 10-й та 11-й Відкритих наук. конф. Інституту прикл. матем. та фундаментальних наук “PSC-IMFS-10” та “PSC-IMFS-11” (Львів, 2012, 2013); 5-й Всеукр. наук.-практ. конф. „Інформатика і системні науки” (ІСН-2014) (Полтава, 2014); Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів „Інформаційні технології, економіка та право: стан та перспективи розвитку (ІТСП-2014)” (Чернівці, 2014).

Робота доповідалася також у Вроцлавському природничому ун-ті (м.Вроцлав, Польща, 2015), Китайському ун-ті гірництва та технологій (м.Пекін, Китай, 2013, 2014) та в Міжнародному ін.-ті прикладного системного аналізу (м.Лаксенбург, Австрія, 2015).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 23 наукові праці, серед яких 2 статті у закордонному періодичному виданні [3, 4], 5 статей у наукових фахових виданнях України [1, 2, 5-7], 16 публікацій у матеріалах наукових конференцій [8-23].

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 159 найменувань та двох додатків. Робота викладена на 187 сторінках, містить 144 сторінки основного тексту, 54 рисунки та 19 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Перший розділ** присвячено аналізу сучасних підходів та методів оцінювання енергетичних потреб населення та моделювання відповідних емісій парникових газів. Проаналізовано особливості житлового сектору у різних країнах, встановлено, що енергетичні потреби домогосподарств залежать від кліматичних умов та індивідуальних особливостей членів домогосподарства. Встановлено, що значна частина енергії у житловому секторі використовується на опалення або кондиціонування житла, а також на підігрів води. Енергія, що використовується на приготування їжі становить незначну частину сумарних енергетичних витрат. Основним енергетичним джерелом в багатьох країнах є біомаса.

Наведено класифікацію підходів до моделювання енергетичних потреб домогосподарств та систематизовано розроблені моделі відповідно до їхніх характеристик. Проаналізовано переваги та недоліки окремих підходів. Зроблено висновок, що рівень деталізації моделі повинен залежати від основної мети досліджень та враховувати доступність необхідних для моделювання даних.

Встановлено, що житловий сектор має значний потенціал для скорочення емісій парникових газів, особливо в країнах, що розвиваються. Виявлено, що скорочення емісій у житловому секторі можливе при впровадженні енергозберігаючих технологій, розвитку відновлювальної енергетики та створенні сприятливих умов для переходу населення на альтернативні джерела енергії. Обґрунтовано, що для ефективного планування державної політики щодо зменшення емісії парникових газів у житловому секторі, важливо вміти виділяти ті регіони, в яких

впровадження нових технологій та модернізація житлового фонду принесуть найбільше результатів. Встановлено, що розроблення підходів для просторової інвентаризації парникових газів у житловому секторі на рівні елементарних ділянок відкриває нові можливості пошуку шляхів для скорочення емісій.

У **другому розділі** здійснено аналіз джерел емісії парникових газів у житловому секторі; запропоновано підхід до просторового оцінювання емісійних процесів парникових газів при спалюванні палива населенням для забезпечення своїх енергетичних потреб, на основі якого розроблено математичні моделі для здійснення інвентаризації парникових газів у житловому секторі на рівні елементарних об'єктів. Проаналізовано стан житлового фонду в Україні та доступні джерела енергії для забезпечення потреб населення. Показано доцільність розроблення математичних моделей для просторового аналізу емісій парникових газів у житловому секторі. Встановлено, що в Україні цей сектор, у порівнянні з іншими секторами, має великий потенціал для зменшення емісій парникових газів, шляхом модернізації та підвищення енергоефективності житлового фонду.

Обґрунтовано загальний підхід до просторового оцінювання емісій парникових газів у житловому секторі, який полягає у формуванні бази геопросторових даних джерел емісій, визначення обсягів спожитого палива та оцінювання емісій у межах кожного елементарного об'єкта. Оскільки технологія спалювання викопних видів палива у житловому секторі суттєво не відрізняється у залежності від домогосподарства, показано, що просторову інвентаризацію парникових газів доцільно здійснювати на рівні населених пунктів, які при цьому представлено у вигляді площинних джерел емісії з відповідною географічною прив'язкою. Дані про спожите населенням паливо для більшості країн доступні тільки на рівні країни чи окремих регіонів, тому для просторового оцінювання емісій парникових газів обсяги палива необхідно дезагрегувати до рівня елементарних об'єктів. Розроблений у цій роботі підхід передбачає розподіл палива пропорційно до величини енергетичних потреб населення з урахуванням доступу до централізованих джерел енергії.

Оцінювання обсягу парникових газів, які емітуються у житловому секторі, здійснено у декілька етапів. На першому етапі оцінено енергетичні потреби населення як суму енергії, що необхідна для опалення житлової площі, підігріву води та приготування їжі як для самих мешканців, так і для свійських тварин, яких утримують у домогосподарствах. Для кожного населеного пункту кількість необхідної енергії оцінено за формулою:

$$Q = Q_c + Q_w + Q_h,$$

де  $Q_c$ ,  $Q_w$ ,  $Q_h$  - енергія, необхідна для приготування їжі, підігріву води та опалення житла, відповідно.

Теплову енергію, що витрачається на приготування їжі, визначено як суму енергії, необхідної для приготування їжі в сім'ях, та енергії, необхідної для приготування кормів для худоби, а також підігріву води для санітарних потреб. При цьому використано усереднені показники про потребу в тепловій енергії, цифрові карти населених пунктів з даними про кількість населення та статистичні дані про кількість свійських тварин.

Енергію, яка необхідна для підігріву води, обчислено як суму енергії для підігріву води протягом теплого і холодного (опалювального) періодів року. Протягом холодного періоду кількість енергії, необхідної для підігріву води, є більшою, оскільки середні показники температури водопровідної води є меншими, ніж протягом теплого періоду року. Кількість енергії необхідної для підігріву води,



оцінено ґрунтуючись на усередненій температурі водопровідної води та показниках споживання гарячої води в розрахунку на людину. Загальна кількість енергії, необхідної для опалення одного квадратного метра житлової площі, залежить від характеристик житла, таких як: кількість поверхів у будинку, рік зведення, кліматичні особливості регіону, інтенсивність використання приміщення та втрати теплової енергії внаслідок ряду чинників. При опаленні житлової площі в будинках теплова енергія витрачається на компенсацію тепловтрат через стіни та будівельні елементи, підігрів повітря, тепло якого втрачається через нещільність будівельних з'єднань, вікна і двері, що періодично відчиняються. При розрахунках планової річної норми витрати теплової енергії на опалення, що постачається централізовано, також обчислюють кількість тепла, яке в силу технічних особливостей системи опалення втрачається у режимі перегріву будівель, а також втрати теплової енергії у внутрішніх будинкових системах. При індивідуальному опаленні домогосподарство, внаслідок ощадливого користування енергією для мінімізації своїх витрат на купівлю палива, зводить ці втрати до мінімуму.

У загальному випадку, сумарна теплова енергія, що необхідна для опалення житлової площі в елементарному об'єкті (невеликій ділянці території, у межах якої здійснюємо аналіз і якою може бути, наприклад, територія населеного пункту), визначається як сума теплової енергії для всіх житлових будинків, що знаходяться у населеному пункті, з використанням усереднених показників про кількість енергії для опалення  $1 \text{ м}^2$  житлової площі в цьому населеному пункті.

На другому етапі здійснення інвентаризації парникових газів статистичні дані про спожите паливо деагреговано з рівня областей до рівня населених пунктів з врахуванням енергетичних потреб населення, доступності джерел енергії та рівня забезпеченості житлового фонду централізованим постачанням тепла та гарячої води. Зокрема, кількість спожитого палива  $i$ -го типу в  $n$ -му населеному пункті обчислюємо за формулою:

$$M_i(\delta_n) = M_i(R) \cdot F_i^{type}(\delta_n), \quad n = \overline{1, N}, \quad \delta_n \in R,$$

де  $M_i$  – кількість спожитого палива  $i$ -го типу,  $\delta_n$  –  $n$ -й елементарний об'єкт – населений пункт (географічний об'єкт),  $N$  – кількість елементарних об'єктів у  $R$ -й адміністративній області,  $R \in \tilde{R}$ .  $\tilde{R} = \{R_1, R_2, \dots\}$  – множина адміністративних одиниць (областей), для яких здійснюємо обчислювальні експерименти,  $\delta_n \in R$  – запис, який означає, що географічний об'єкт  $\delta_n$  повністю розміщений у межах об'єкту  $R$ ,  $type \in \{Urb, Rur\}$  – індекс, який характеризує приналежність населеного пункту до міської ( $Urb$ ) чи сільської ( $Rur$ ) місцевості,  $F_i^{type}(\delta_n)$  – коефіцієнт дезагрегації. Цей коефіцієнт обчислюємо за формулою:

$$F_i^{type}(\delta_n) = \frac{k_{n,i}^{type} \cdot (a_d^{type} Q_{c,n} + b_d^{type} Q_{w,n} + c_d^{type} Q_{h,n})}{\sum_{ter \in \{Urb, Rur\}} \sum_{j=\overline{1, N}; \delta_j \in \{\tilde{S}^{ter} \cap R\}} [k_{i,j}^{ter} \cdot \sum_{D \in \{\tilde{D} \cap R\}} (a_D^{ter} Q_{c,j} + b_D^{ter} Q_{w,j} + c_D^{ter} Q_{h,j})]}$$

де  $\delta_n \in d$ ,  $d \in R$ ,  $\tilde{S}^{Urb}$  та  $\tilde{S}^{Rur}$  – множини елементарних об'єктів у міській та сільській місцевостях, відповідно;  $a_d^{type}$ ,  $b_d^{type}$ ,  $c_d^{type}$  – відсотки теплової енергії для приготування їжі, підігріву води та опалення житла, відповідно, що не забезпечується з централізованих джерел енергії в  $d$ -му районі, що належить  $R$ -й адміністративній області;  $\tilde{D}$  – множина адміністративних одиниць (районів);  $D \in \{\tilde{D} \cap R\}$  – географічний об'єкт, з множини районів, які знаходяться у межах області  $R$ ,  $k_{i,n}^{type}$  – коефіцієнт, що характеризує доступність  $i$ -го енергетичного

джерела ( $i$ -го типу палива) в  $n$ -му елементарному об'єкті;  $Q_{c,n}$ ,  $Q_{w,n}$ ,  $Q_{h,n}$  – теплові енергії, необхідні для приготування їжі, підігріву води та опалення житла, відповідно, в  $n$ -му елементарному об'єкті, операція  $A \cap B$  визначає множину географічних об'єктів, територія яких є спільною для множин  $A$  і  $B$  (перетин множин). Коефіцієнти дезагрегації задовольняють рівність:

$$\sum_{type \in \{Urb, Rur\}} \sum_{n=1, N; \delta_n \in \{\tilde{\delta}^{type} \cap R\}} F_i^{type}(\delta_n) = 1, \quad \forall R \in \tilde{R}.$$

На останньому етапі, використовуючи коефіцієнти емісії та теплотворні значення палив, для кожного населеного пункту визначено обсяг вуглекислого газу, метану та закису азоту, що емітуються в атмосферу при спалюванні викопних видів палива населенням, та отримано сумарні емісії парникових газів у  $CO_2$ -еквіваленті на рівні елементарних об'єктів.

Розроблено алгоритм формування бази геопросторових даних та побудовано цифрову карту населених пунктів України, яка включає дані про густоту населення, адміністративну приналежність об'єктів, характеристику приналежності населеного пункту до міської чи сільської місцевості, а також цифрову карту опалювальних градусо-днів. Розроблені карти є максимально адаптовані для проведення просторової інвентаризації парникових газів у ряді секторів, зокрема у житловому секторі.

Таким чином розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів при використанні різних видів викопного палива у житловому секторі України, які відображають енергозатрати на опалювання житлових приміщень, підігрів води та приготування їжі, враховують територіальне розміщення джерел емісій, енергетичні потреби населення, доступність джерел енергії та регіональну специфіку використовуваного палива і дають можливість будувати просторові кадастри емісій у досліджуваному секторі.

Розроблено геоінформаційну технологію просторового моделювання емісії парникових газів у житловому секторі, структура якої включає модулі підготовки вхідних даних, оцінювання енергетичних потреб населення, дезагрегації даних про використане паливо з рівня областей до рівня населених пунктів та оцінювання емісій парникових газів на основі математичної моделі досліджуваного процесу для кожного елементарного об'єкта.

Використовуючи розроблені математичні моделі, програмні засоби та доступні статистичні дані, здійснено обчислювальні експерименти та побудовано просторові кадастри з даними про емісії парникових газів у житловому секторі України, що виникають при спалюванні викопних видів палива та дров. Проаналізовано територіальну специфіку (рис.1 та рис. 2) та структуру емісій основних парникових газів (двоокису вуглецю, метану та закису азоту) за видами використовуваного палива (кам'яне вугілля, природний газ, скраплений газ, торф'яні брикети, дрова). На основі отриманих результатів встановлено, що найбільшими емісіями характеризуються населені пункти з високою густиною населення, особливо в районах, де в структурі використаного палива присутнє кам'яне вугілля. При аналізі величини емісій встановлено, що в міських поселеннях емісії у розрахунку на одну людину є нижчими, у порівнянні з відповідними емісіями у сільських населених пунктах.

Використовуючи дані про реалізацію населенню дров на рівні районів, отримані від трьох обласних статистичних управлінь (Волинської, Івано-Франківської та Рівненської областей), здійснено верифікацію розробленої моделі для дезагрегації даних про використання дров у житловому секторі. Встановлено,

що статистичні дані відображають територіальну специфіку щодо реалізації цього виду палива, а не щодо його реального використання населенням. Показано, що кількість дров, реалізованих населенню, значно перевищує дезагреговані дані у тих районах, де розвинене лісове господарство (рис. 3).

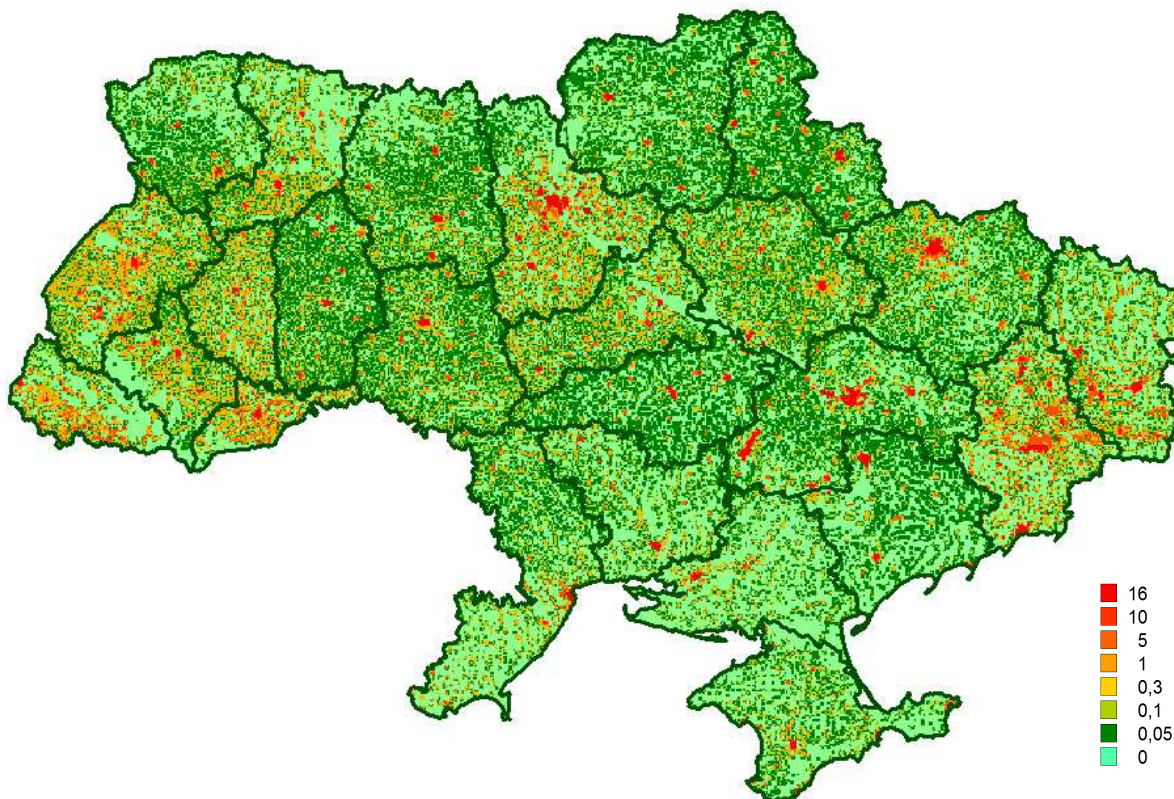


Рис. 1. Питомі сумарні емісії парникових газів у житловому секторі України (тис. т/км<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub>-еквівалент, сітка 2 км x 2 км, 2010 рік)

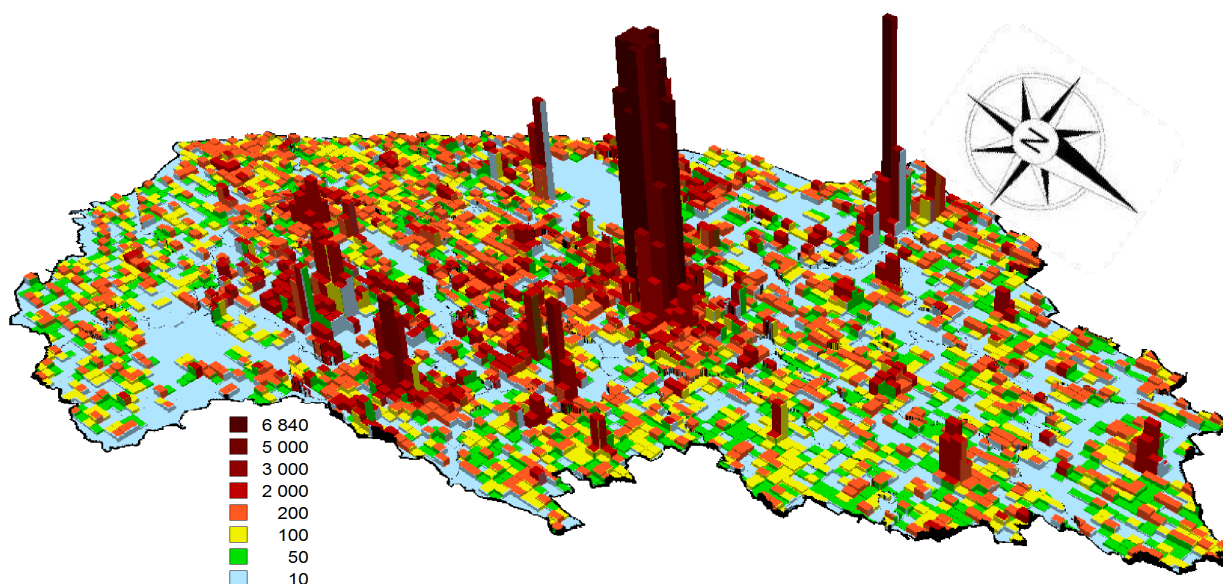


Рис 2. Карта призма питомих емісій парникових газів у житловому секторі Львівської області (т/км<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub>-еквівалент, сітка 2 км x 2 км, 2010 рік)

У **третьому розділі** розроблені підходи до математичного моделювання процесів емісії парникових газів у житловому секторі модифіковано для здійснення обчислювальних експериментів для Польщі, з врахуванням регіональної специфіки сектору, а також доступних статистичних даних. Проаналізовано наявний житловий фонд Польщі за роком зведення будівель та ступенем обладнання житлової площі

доступом до централізованих джерел енергії. Проаналізовано норми питомих витрат теплової енергії на опалення будівель за роком зведення та відповідні стандарти, що регулюють споживання тепла. Встановлено, що 66% енергії, що використовується у житловому секторі для забезпечення побутових потреб населення, отримується внаслідок спалювання кам'яного вугілля, природного газу, дров та інших видів палива.

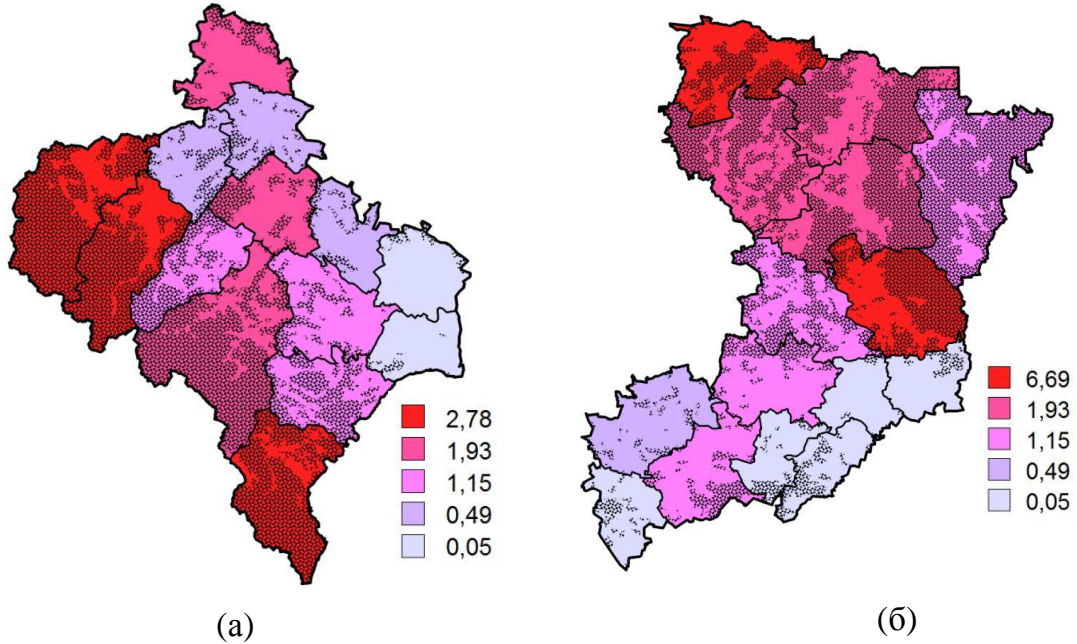


Рис. 3. Відношення статистичних даних про споживання дров до результатів моделювання: а) Івано-Франківська та б) Рівненська області (2010 рік, чорними точками позначено лісовий покрив)

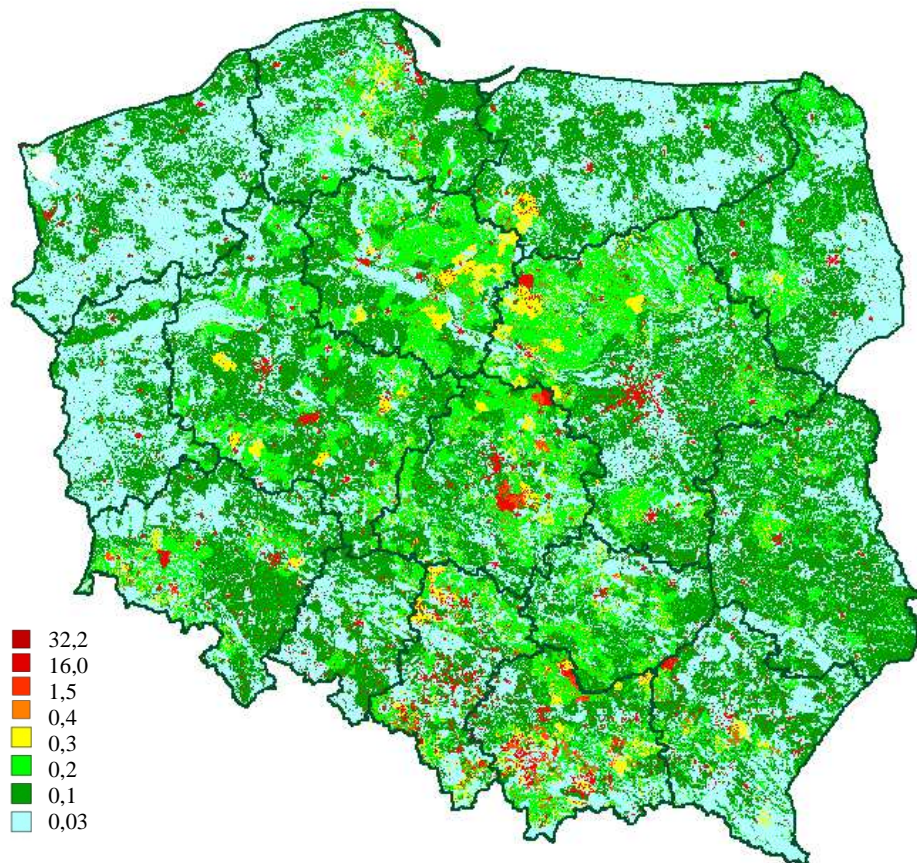


Рис. 4. Питомі емісії парникових газів у житловому секторі Польщі (тис. т/км<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub>-екв., 2010 рік)

Обґрунтовано загальний підхід та алгоритм просторового моделювання емісій парникових газів у житловому секторі, який полягає у визначенні енергетичних потреб населення у межах елементарних об'єктів, дезагрегації даних про спожите паливо та оцінюванні емісій для кожного об'єкта бази даних. Оскільки кліматичні особливості є важливим фактором, що визначає кількість енергії, яка необхідна населенню для опалювання житлової площі, використовуючи дані про середні значення щоденних температурних спостережень, оцінено кількість опалювальних градусо-днів (ОГД) для року дослідження, а також довготермінове середнє значення. Встановлено, що має місце загальна тенденція щодо поступового зменшення кількості ОГД, проте 2006 та 2010 роки характеризувалися низькими температурами у порівнянні з довготерміновими середніми значеннями, внаслідок чого споживання енергії у цих роках було дещо вищим.

Враховуючи те, що технологія спалювання палива в межах окремих домогосподарств суттєво не відрізняється, показано, що просторове моделювання емісії парникових газів доцільно здійснювати на рівні площинних географічних об'єктів у межах муніципалітетів (гмін). На основі карти густоти населення Галлего та карти адміністративних одиниць (гмін), сформовано базу даних площинних географічних об'єктів, для яких здійснено просторову інвентаризацію емісій парникових газів з використанням розробленої математичної моделі, яка враховує рівень обладнання житлової площі доступом до централізованих джерел енергії, густоту населення та кліматичні особливості окремих елементарних об'єктів:

$$E_{Res}^G(\delta) = \sum_{type} \sum_{s \in \mathcal{S}^{type}} \left( \sum_{i \in I} (M_{i,R} \cdot F_{i,type}^R \cdot EF_{Re\ s,i}^G) + M_{ng, gm} \cdot EF_{Re\ s,ng}^G \right) \times P(s) \cdot area(s \cap \delta),$$

де  $M_{i,R}$  – кількість палива  $i$ -го типу спожитого в  $R$ -му регіоні;  $F_{type,i}^n$  – коефіцієнт дезагрегації;  $n$  – номер елементарного об'єкту;  $N$  – кількість елементарних об'єктів;  $type \in \{Urb, Rur\}$  – характеристика елементарного об'єкту, яка вказує на його приналежність до міської чи сільської місцевості,  $ng$  – індекс для природного газу,  $gm$  – рівень гміни,  $P(s)$  – густина населення в  $s$ -му об'єкті карти густоти населення.

З використанням можливостей програмного забезпечення ГІС, розроблених підходів та математичних моделей побудовано набори геопросторових даних розподілу емісій парникових газів для території Польщі (рис. 4 та рис. 5). Здійснено аналіз просторового розподілу емісій парникових газів та їхньої структури за видами палива (кам'яне вугілля, природний газ, дрова та інші). Отримано цифрову карту та відповідні набори геопросторових даних, які містять інформацію про джерела та кількісні оцінки емісій двоокису вуглецю, метану та закису азоту. На основі отриманих результатів встановлено, що найбільшими емісіями характеризуються Сілезьке воєводство, Варшава та центри воєводств.

З використанням регулярної Grid-моделі (сітки з кроком 2 км) за результатами обчислювального експерименту здійснено порівняльний аналіз величини та структури емісій парникових газів у житловому секторі Південно-Східної Польщі та Західної України (рис. 6). Встановлено, що основним джерелом енергії для забезпечення побутових потреб населення у Польщі є кам'яне вугілля, а в Україні – природний газ. Встановлено, що емісії у розрахунку на людину у житловому секторі Західної України становили 0,98 т в  $CO_2$ -еквіваленті у 2010 році, а для Південно-Східної Польщі – 1,39 т. Таку суттєву відмінність пояснено тим, що коефіцієнти емісій двоокису вуглецю, метану та закису азоту для вугілля є значно вищими від відповідних коефіцієнтів для природного газу.

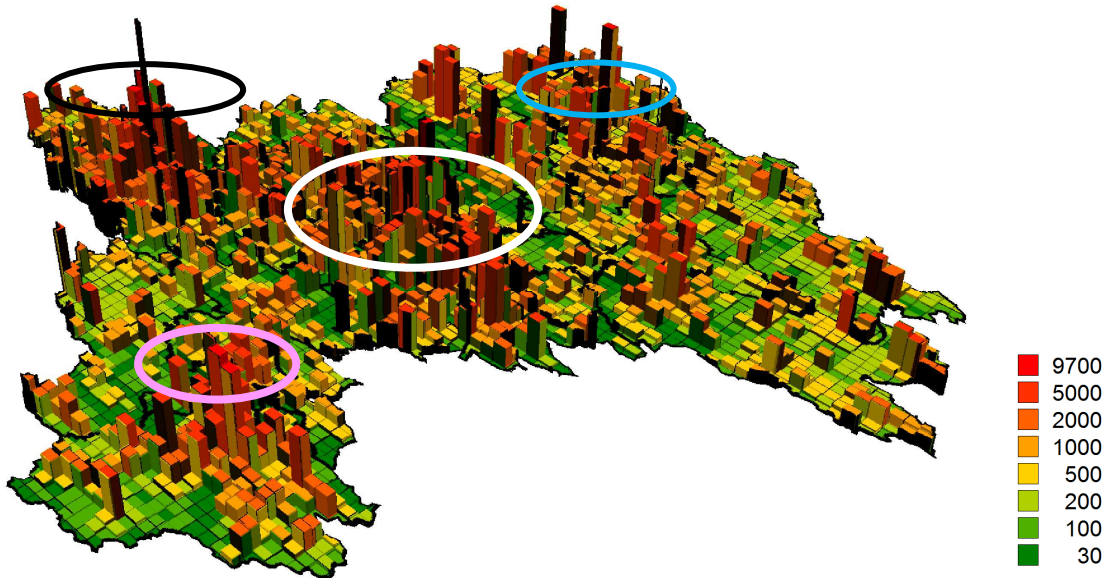


Рис. 5. Карта призма питомих емісій парникових газів у житловому секторі Сілезького воєводства на рівні елементарних об'єктів (території урбанізованих зон західної частини воєводства – чорний колір, м.Катовіце – білий, м.Бельско-Бяла – рожевий та м.Ченстохова – блакитний; т/км<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub>-екв., 2010 рік)

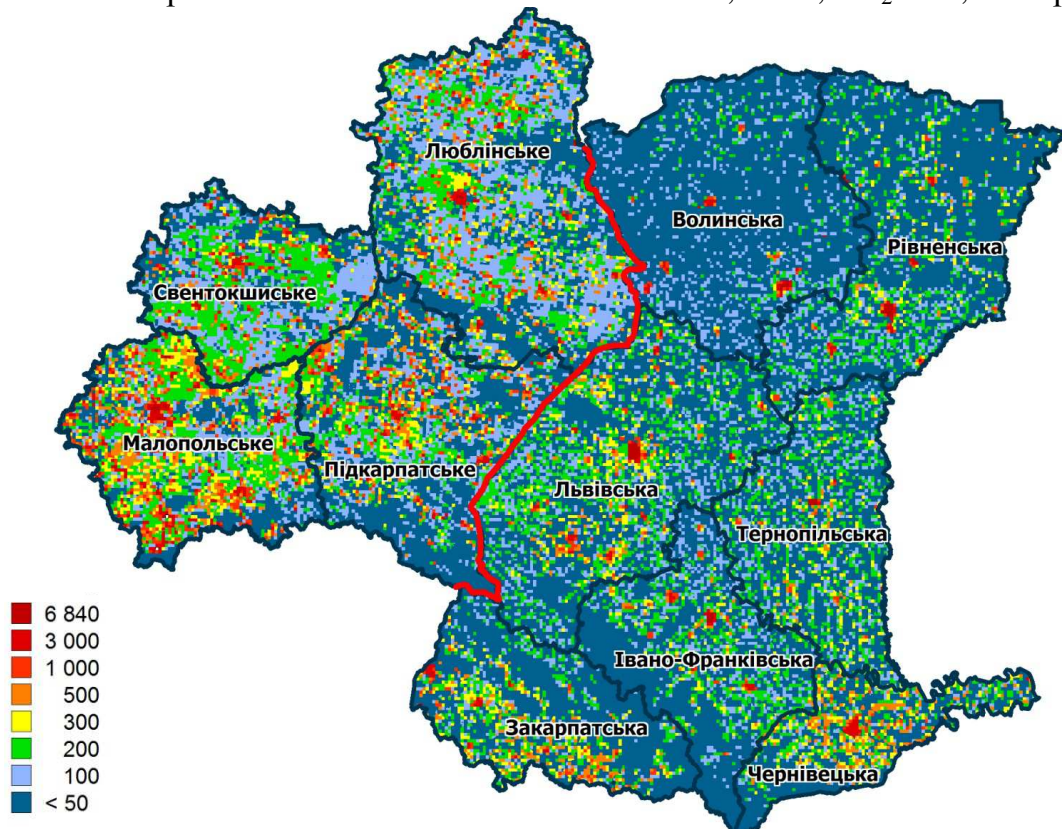


Рис. 6. Сумарні питомі емісії парникових газів у житловому секторі Західної України та Південно-Східної Польщі (т/км<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub>-еквівалент, 2 x 2 км, 2010 рік)

Результати просторового моделювання емісій парникових газів дають можливість краще розуміти чинники, що визначають величину емісій парникових газів у житловому секторі, оцінювати потенціал окремих регіонів для скорочення емісій та приймати зважені рішення щодо впровадження норм, що регулюють споживання теплової енергії, а також визначати адміністративні райони, для яких спрямування інвестицій з метою впровадження низько-вуглецевих технологій буде найбільш ефективним.

У четвертому розділі представлено методику оцінювання невизначеності результатів просторового моделювання емісій парникових газів у житловому секторі України та Польщі, яка полягає у використанні наперед визначених розподілів для кожного вхідного параметру математичної моделі та генеруванні випадкових значень з цих розподілів (метод Монте-Карло). Використовуючи ці значення, здійснюється оцінювання емісій парникових газів для заданого площинного об'єкта. При достатній реалізації вибірки, визначаються математичне сподівання та довірчий інтервал для результатів моделювання.

Розроблено програмний інструментарій, у якому враховано особливості житлового сектору, реалізовано можливість швидко і ефективно аналізувати невизначеності результатів моделювання. Програмний засіб є гнучким до вхідних даних та дає змогу вдосконалювати підходи до оцінювання невизначеності у разі отримання нових знань про досліджуваний процес. Реалізовано функціональну можливість моделювати випадкові значення з симетричних та несиметричних розподілів та змінювати параметри розподілів. Результати обчислювальних експериментів автоматично експортуються у вихідних файл та можуть бути використані в інших програмних засобах.

Отримано значення невизначеності емісій парникових газів для 95% довірчого інтервалу. Проаналізовано невизначеності результатів просторового моделювання емісій парникових газів у житловому секторі в Україні та Польщі. Внаслідок того, що вхідні параметри описуються симетричними та несиметричними розподілами, межі довірчого інтервалу результату є несиметричними відносно математичного сподівання.

Створено програмний засіб, який з використанням статистичних даних про спожите паливо, теплотворних значень та коефіцієнтів емісій, в інтерактивному режимі будує гістограми розподілу результатів аналізу. Використовуючи елементи графічного інтерфейсу, є можливість змінювати розмір вибірки, а також вибирати окремі адміністративні одиниці Польщі та України для візуалізації результатів моделювання невизначеності (рис. 7). Серед функціональних компонент імплементовано можливість досліджувати вплив невизначеності окремих вхідних параметрів на загальну невизначеність для територіального об'єкту дослідження. Програмний засіб є веб-аплікацією та може виконуватися як на локальному комп'ютері, так і з доступом через мережу Інтернет.

Здійснено аналіз отриманих результатів моделювання величин емісії парникових газів та меж їхніх довірчих інтервалів. Верифікацію результатів здійснено у порівнянні з даними з річних національних звітів про емісії парникових газів. Встановлено, що відмінності у результатах виникають внаслідок невизначеності вхідних параметрів моделі. Значення емісій парникових газів оцінені в національних звітах, відмінні від результатів, отриманих з використанням методів Монте-Карло, проте знаходяться у межах довірчих інтервалів. Аналіз невизначеності емісій парникових газів у відповідності з наведеною методологією та з використання розроблених програмних засобів дає можливість моделювати емісійні процеси та визначати межі довірчих інтервалів, а також визначати вплив зміни невизначеності окремих компонент на загальні невизначеності результатів.

В Україні невизначеність результатів оцінювання емісій парникових газів у житловому секторі суттєво не відрізняється, та становить в межах від 10,9% для нижньої межі до 11,7% - для верхньої. Загалом для країни невизначеність емісії

парникових газів у житловому секторі за 2010 рік становить (%): для вуглекислого газу (-10,8: +10,9), метану (-30,1: +37,9) та закису азоту (-55,3: +92,8), невизначеність сумарних результатів у CO<sub>2</sub>-еквіваленті, отриманих у процесі просторового моделювання, складає (-10,7: +10,8). Відмінності у величинах невизначеностей для різних регіонів можна пояснити різною структурою палив, що використовується населенням.

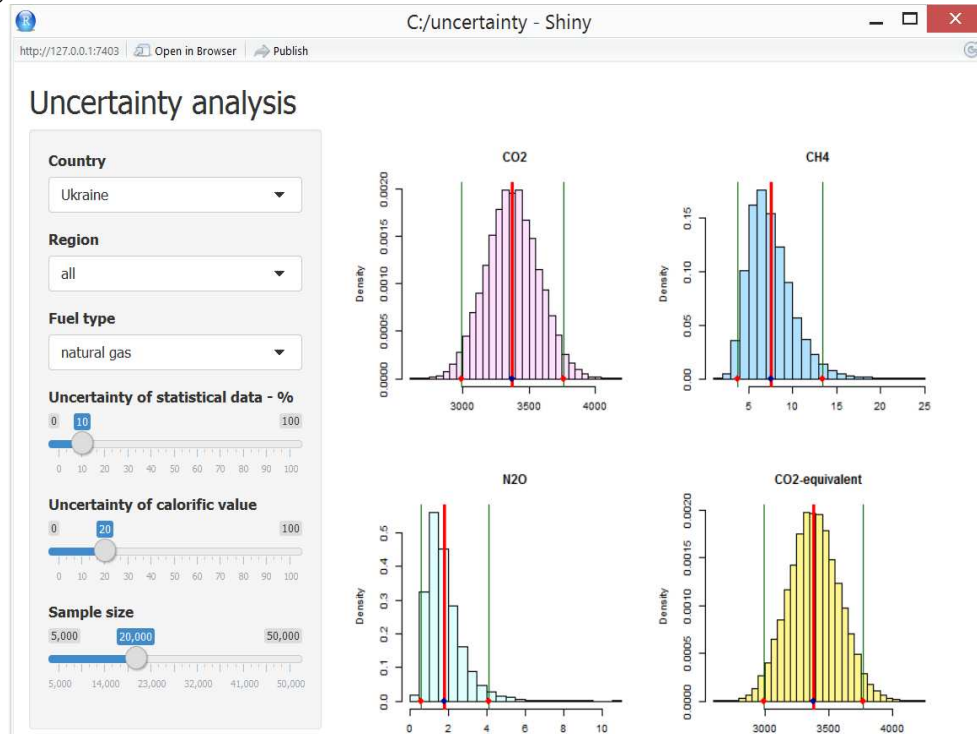


Рис. 7. Користувачський інтерфейс програмного засобу для аналізу невизначеностей при моделюванні емісій парникових газів у житловому секторі (програмне середовище – R, пакет функцій - „Shiny”)

Невизначеності результатів інвентаризації у Польщі становлять від 12,4% до 15,7% для нижньої межі сумарних емісій парникових газів на рівні регіонів (CO<sub>2</sub>-еквівалент), для верхньої межі, відповідно, в межах від 11,6% до 18,0%. Найнижчими у всіх воєводствах є невизначеності емісій двоокису вуглецю, найвищими – закису азоту. В основному, це пояснюється відмінністю у невизначеностях коефіцієнтів емісії.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв’язано важливе наукове завдання розроблення підходів, математичних моделей та геоінформаційної технології для просторового аналізу емісії парникових газів у житловому секторі. При цьому отримано такі наукові та практичні результати.

Обґрунтовано доцільність розроблення математичних моделей для просторового аналізу емісій парникових газів у житловому секторі. Встановлено, що житловий сектор має великий потенціал для зменшення емісій парникових газів у порівнянні з іншими секторами, зокрема шляхом модернізації та підвищення енергоефективності житлового фонду.

Розроблено загальний підхід до моделювання та просторового аналізу емісій парникових газів у житловому секторі, який полягає у формуванні бази геопросторових даних джерел емісій, визначення обсягів спожитого палива та оцінювання емісій у межах кожного елементарного об’єкта. Враховуючи, що технологія спалю-



вання викопних видів палива у житловому секторі суттєво не відрізняється у залежності від домогосподарства, показано, що просторову інвентаризацію парникових газів доцільно здійснювати на рівні населених пунктів, які при цьому представлено у вигляді площинних джерел емісії з відповідною географічною прив'язкою.

Розроблено підхід та математичні моделі для оцінювання енергетичних потреб населення, зокрема опалювання житлових приміщень, підігрів води та приготування їжі, з врахуванням регіональних відмінностей, кліматичних умов та даних про стан житлового фонду. Такий підхід дає можливість аналізувати фактичне споживання енергії у житловому секторі та порівнювати регіони між собою.

Розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів від спалювання населенням викопних видів палива, які враховують територіальне розміщення населення, структуру енергетичних потреб населення, регіональну специфіку доступності джерел енергії і дають можливість здійснювати просторову інвентаризацію емісій парникових газів на рівні населених пунктів та аналізувати отримані результати.

Розроблено геоінформаційну технологію формування кадастру емісій парникових газів у житловому секторі, структура якої включає модулі підготовки вхідних даних, оцінювання енергетичних потреб населення, дезагрегації даних про використане паливо з вищих адміністративних рівнів до рівня елементарних об'єктів та оцінювання емісій парникових газів з використанням математичної моделі досліджуваного процесу. Обґрунтовано доцільність здійснення обчислювальних експериментів з використанням доступних статистичних даних для України та Польщі.

Розроблено цифрові карти, які необхідні для здійснення просторового моделювання емісій парникових газів. Зокрема, побудовано цифрову карту населених пунктів України, яка включає дані про густоту населення, адміністративну приналежність об'єктів, характеристику приналежності населеного пункту до міської чи сільської місцевості. Крім цього модифіковано карту густоти населення Польщі з врахуванням потреб просторового моделювання, а також розроблено цифрову карту опалювальних градусо-днів для обох країн з використанням даних про температурні спостереження на території дослідження протягом тривалого періоду. Розроблені карти є максимально адаптовані для проведення просторової інвентаризації парникових газів у ряді секторів, зокрема у житловому секторі.

Розроблено підхід до формування цифрової карти локальних кліматичних зон урбанізованих територій, який базується на використанні космічних знімків з супутника Landsat 8 та методу „випадкового лісового класифікатора”. Побудовано цифрові карти локальних кліматичних зон для м.Києва та м.Львова, які включено у світову базу даних урбанізованих територій. Такі карти можна використовувати для збільшення просторової деталізації кадастрів емісії, зокрема для розподілу емісій для урбанізованих територій за різними категоріями господарської діяльності, а також у кліматичних моделях.

З використанням розроблених математичних моделей, програмних засобів та доступних статистичних даних, здійснено обчислювальні експерименти та побудовано просторові кадастри емісій парникових газів при спалюванні викопних видів палива у житловому секторі Польщі та України. Враховано енергетичні потреби населення, кліматичні умови та територіальну специфіку використання палива. Проаналізовано відмінності у структурі емісії парникових газів (двоокису вуглецю, метану та закису азоту) за видами використовуваного палива (кам'яне вугілля, природний газ, скраплений газ, торф'яні брикети, дрова) у залежності від

регіону. При аналізі величини емісій встановлено, що в міських поселеннях емісії у розрахунку на одну людину є нижчими, в порівнянні з відповідними емісіями у сільській місцевості.

З використанням регулярної сітки з кроком 2 км за результатами обчислювального експерименту здійснено порівняльний аналіз величини та структури емісій парникових газів у житловому секторі Південно-Східної Польщі та Західної України. Встановлено, що основним джерелом енергії для забезпечення побутових потреб населення у Польщі є кам'яне вугілля, а в Україні – природний газ. Встановлено, що емісії у розрахунку на людину у житловому секторі Західної України є значно нижчими, ніж емісії у Південно-Східній Польщі, та становили у 2010 році відповідно 0,96 т та 1,39 т у CO<sub>2</sub>-еквіваленті. Таку суттєву відмінність пояснено тим, що коефіцієнти емісій парникових газів, зокрема двоокису вуглецю, метану та закису азоту, для вугілля є значно більшими за відповідні коефіцієнти для природного газу.

Здійснено верифікацію розробленої моделі для дезагрегації даних про використання дров у житловому секторі, з використанням даних про реалізацію цього виду палива населенню на рівні районів. Встановлено, що статистичні дані відображають територіальну специфіку щодо реалізації цього виду палива, а не щодо його реального використання населенням. Показано, що дезагредовані дані про кількість реалізованих населенням дров адекватно відображають фактичне споживання цього енергетичного ресурсу.

Розроблено загальний підхід до аналізу невизначеності результатів просторового моделювання емісій парникових газів у житловому секторі, який полягає в отриманні числових результатів математичної моделі з використанням генерованих випадкових значень її параметрів з заданих розподілів, з метою оцінювання найбільш ймовірного значення величини емісії, а також інтервалу невизначеності.

Розроблено програмний засіб для моделювання невизначеності емісії двоокису вуглецю, метану та закису азоту у житловому секторі на основі даних про невизначеності вхідних параметрів моделі оцінювання емісії парникових газів. Здійснено обчислювальні експерименти з оцінювання невизначеності результатів моделювання емісії парникових газів внаслідок спалювання палива населенням в Україні та Польщі. Здійснено валідацію розроблених моделей та програмного засобу, а також проведено верифікацію отриманих результатів обчислювальних експериментів, з використанням статистичних даних та національних інвентаризаційних звітів Польщі та України.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Данило О. Я. Моделювання емісії парникових газів у житловому секторі Західної України з використанням геоінформаційних технологій / Данило О. Я., Ксу Ксіангянг, Бунь Р. А., Лесів М. Ю. // Вісник Львівського державного ун-ту безпеки життєдіяльності. – 2014. – № 9. – С. 41-50.
2. Данило О. Геоінформаційна технологія просторової інвентаризації парникових газів в житловому секторі Східної Польщі / О. Данило, М. Лесів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК. – Львів, 2012. – № 23. – С. 216-219.

3. Lesiv M. Spatial analysis of GHG emissions in eastern polish regions: energy production and residential sector / Lesiv M., Bun R., Shpak N., Danylo O., Topylko P. // *Econtechmod, Poland.* – 2012. – Vol. 1, N. 2. – P. 17-23.
4. Lyubinsky B. Software of geoinformation system for spatial inventory of greenhouse gas emissions / B. Lyubinsky, O. Danylo, R. Bun // *Econtechmod, Poland.* – 2015. – Vol. 4, N. 1. – P. 69-78.
5. Данило О. Я. Моделювання емісій від спалювання природного та скрапленого газу в житловому секторі Рівненської області / Данило О. Я., Бунь Р. А., Сорочич М. П. // *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.* – 2011. – № 5. – С. 30-36.
6. Данило О. Я. Цифрова карта опалювальних градусо-днів як інструмент для оцінювання енергетичних потреб у житловому секторі України / О. Я. Данило // *Моделювання та інформаційні технології : Зб. наук. праць.* – Вип. 73. – Київ, 2014. – С. 126-133.
7. Данило О. Просторовий аналіз емісій парникових газів у житловому секторі Івано-Франківської області з врахуванням невизначеності вхідних даних / О. Данило, Р. Бунь // *Комп'ютерні технології друкарства : зб. наук. праць.* – № 33. – 2015. – С. 141-151.
8. Danylo O. Modeling and spatial analysis of GHG emissions in the residential sector: case-study for the Silesian Voivodeship in Poland / Olha Danylo, Rostyslav Bun, Oleksander Striamets, Petro Topylko / *Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2013).* – Lviv, 2013. – P. 43-44.
9. Danylo O. Spatial inventory of greenhouse gas emissions in the residential sector: a case-study for Poland and Ukraine / Olha Danylo / *World with Reach: from Science to Policy: IIASA 40<sup>th</sup> Anniversary Conference, 24-26 October 2012.* – Vienna, Austria : IIASA, 2012. – Available online at: [http://conference2012.iiasa.ac.at/poster\\_session.html](http://conference2012.iiasa.ac.at/poster_session.html)
10. Danylo O. Spatial inventory of greenhouse gas emissions in the residential sector / Olha Danylo / *Proceedings of the YSSP Late Summer Workshop 2012.* – Laxenburg, Austria : IIASA, 2012. – P. 23. – Available online at: [http://www.iiasa.ac.at/web/home/education/yssp/Previous\\_SummerYSSP/Proceedings\\_YSSP\\_Late\\_Summer\\_Workshop\\_2012.pdf](http://www.iiasa.ac.at/web/home/education/yssp/Previous_SummerYSSP/Proceedings_YSSP_Late_Summer_Workshop_2012.pdf)
11. Danylo O. Spatial modeling of greenhouse gas emissions from burning biomass in the residential sector in Volyn region / Olha Danylo, Bogdan Lyubinsky / *Computer Science & Engineering: Proceedings of the 6th International Conference of Young Scientists (CSE-2013).* – Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – P. 112-113.
12. Topylko P. Uncertainty of greenhouse gases spatial inventory: power and heat production / Petro Topylko, Rostyslav Bun, Oleksander Striamets, Olha Danylo / *Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2013), November 11-16, 2013.* – Lviv, 2013. – P. 15-16.
13. Lyubinsky B. B. Software tools to handle the layers in a specialized GIS analyzing greenhouse gas emissions / B. B. Lyubinsky, V. Yu. Khmelovskyi,

- O. Danylo / Computer Science & Engineering: Proceedings of the 6th International Conference of Young Scientists (CSE-2013). – Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – P. 166-167.
14. Данило О. Я. Цифрова карта населення України адаптована для проведення просторової інвентаризації парникових газів / О. Я. Данило, Р. А. Бунь / Тези доп. Третьої Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». – Вінниця : ВНТУ, 2012. – С. 87-88.
  15. Данило О. Математичне моделювання емісій парникових газів від спалювання населенням твердих видів палива у Рівненській області / О. Данило / Регіональні екологічні проблеми : Матеріали V міжнар. наук. конфер. студентів, магістрів і аспірантів. – Одеса : ОДЕКУ, 2012. – С. 86-88.
  16. Данило О. Я. Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів від використання населенням твердих видів палива / Данило О. Я., Чарковська Н. В. / Інформатика і системні науки (ІСН-2014): матеріали V Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Полтава, 13-15 березня 2014 року). – Полтава : ПУЕТ, 2014. – С. 79-81.
  17. Чарковська Н. В. Математичне моделювання процесів емісії метану від звалищ твердих побутових відходів у Польщі / Чарковська Н. В., Данило О. Я., Любінський Б. Б. / Інформаційні технології, економіка та право: стан та перспективи розвитку (ІТСП-2014) : Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів, 3-4 квітня 2014 року / Міністерство освіти і науки України, ПВНЗ “Буковинський університет”. – Чернівці : Книги – ХХІ, 2014. – С.15-16.
  18. Топилко П. І. Алгоритми та програмні засоби врахування невизначеностей вхідних даних при інвентаризації парникових газів для Європейського Союзу / Топилко П. І., Данило О. Я., Йонас М., Лесів М. Ю., Бунь Р. А. / Інформаційні технології, економіка та право: стан та перспективи розвитку (ІТЕП-2012) / Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів. – Ч. 1, Вип. 9. – Чернівці : Буковинський університет, 2012. – 101-102.
  19. Данило О. Я. Математичне моделювання процесів емісії парникових газів у житловому секторі: імплементація для Житомирської області / Данило О. Я., Любінський Б. Б. / Одинадцята Відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Збірник матеріалів : 13 червня 2013, Львів. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – С. 161-162.
  20. Любінський Б. Б. Оцінювання параметрів поверхневих джерел емісії при просторовій інвентаризації парникових газів / Любінський Б. Б., Данило О. Я. / Одинадцята Відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Зб. матеріалів : 13 червня 2013, Львів. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – С. 147.
  21. Данило О. Я. Особливості побудови цифрової карти населених пунктів України адаптованої для формування просторових кадастрів емісій парникових газів / О. Я. Данило / 10-та Відкрита наукова конференція ІМФН „PSC-IMFS-10” : Збірник матеріалів. – Львів : НУ”ЛП”, 2012. – С. 19.
  22. Данило О. Геоінформаційне моделювання емісії парникових газів у житловому секторі України та Польщі / Данило О. / 70-та студентська

науково-технічна конференція : Секція „Прикладна математика та фундаментальні науки” : Тези доп. – Львів : НУ «ЛП», 2012. – С. 15-16.

23. Данило О. Моделювання емісії парникових газів від спалювання вугілля в Східній Польщі / О. Данило / 69-та Наукова студентська конференція. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2011. – С. 37-38.

### АНОТАЦІЇ

**Данило О. Я. Математичне моделювання та просторовий аналіз емісії парникових газів у житловому секторі.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – ”Математичне моделювання та обчислювальні методи”. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертація присвячена розробленню математичних моделей для здійснення просторового аналізу емісій парникових газів у житловому секторі, які дають можливість враховувати енергетичні потреби населення, зокрема на опалювання житлових приміщень, підігрів води та приготування їжі, а також враховувати регіональні відмінності, кліматичні умови та дані про стан житлового фонду. Розроблено геоінформаційну технологію моделювання та просторового аналізу емісії парникових газів у житловому секторі, яка використовує бази геопросторових даних та дає можливість будувати просторові кадастри емісій у цьому секторі. Здійснено обчислювальні експерименти, отримано цифрові карти та відповідні набори геопросторових даних, які містять інформацію про джерела та кількісні оцінки емісій двоокису вуглецю, метану та закису азоту у житловому секторі України та Польщі. Оцінено невизначеність результатів інвентаризації парникових газів у житловому секторі з врахуванням невизначеностей статистичних даних, нетто теплотворних значень палив та коефіцієнтів емісії парникових газів.

*Ключові слова:* математичне моделювання, процес емісії парникових газів, житловий сектор, геоінформаційна технологія, невизначеність результатів моделювання.

**Даныло О.Я. Математическое моделирование и пространственный анализ эмиссии парниковых газов в жилищном секторе.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – "Математическое моделирование и вычислительные методы". – Национальный университет «Львовська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертация посвящена разработке математических моделей для осуществления пространственного анализа эмиссий парниковых газов в жилищном секторе, которые дают возможность учитывать энергетические потребности населения, в частности потребности на отопление жилых помещений, подогрев воды и приготовления пищи, а также учитывать региональные различия, климатические условия и данные о состоянии жилищного фонда. Разработана геоинформационная технология моделирования и пространственного анализа эмиссии парниковых газов в жилищном секторе,

которая использует базы геопространственных данных и дает возможность строить пространственные кадастры эмиссий парниковых газов в этом секторе. Осуществлены вычислительные эксперименты, получены цифровые карты и соответствующие наборы геопространственных данных, которые содержат информацию об источниках и количественных оценках эмиссий двуокиси углерода, метана и закиси азота в жилищном секторе Украины и Польши. Оценено неопределенность результатов инвентаризации парниковых газов в жилищном секторе с учетом неопределенностей статистических данных, нетто теплотворных значений топлива и коэффициентов эмиссии парниковых газов.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, процесс эмиссии парниковых газов, жилищный сектор, геоинформационная технология, неопределенность результатов моделирования.

**Danylo O. Mathematical modeling and spatial analysis of greenhouse gas emissions in the residential sector.** – Manuscript.

Thesis for Ph.D degree in Technical Sciences in specialty 01.05.02 – “Mathematical modeling and computational methods”. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

This thesis addresses the development of mathematical models for spatial analysis of greenhouse gas (GHG) emissions in the residential sector, which make it possible to take into account energy demand of the households for cooking, water and space heating as well as regional differences in usage of fossil fuels, climate and living conditions of the households.

The developed approach, mathematical models and GIS technology for analysis of greenhouse gas emissions in the residential sector take into account amount of heating degree-days, the specifics of statistical data and amount of fossil fuels that are consumed by the households, its net calorific values, and emission coefficients, and enable to develop the spatial cadasters of emissions.

The geospatial datasets of greenhouse gas emission distribution are constructed for Ukraine and Poland using the tools of GIS software, developed approaches and created mathematical models. The total results are obtained in the form of regular Grid-model with the resolution of 2 km. Based on constructed geospatial datasets of emission distribution in the residential sector, and comparison of the results obtained for Poland and Ukraine, it was identified that the main energy source to meet the household needs in Poland is coal, and in Ukraine – natural gas. Based on elaborated mathematical model of emission processes in the residential sector, and conducted numerical experiments the digital maps and geospatial datasets with data about emission sources and greenhouse gas emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide are obtained. Taking into account types of the fossil fuels used and its characteristics, the analysis of uncertainty of the results of spatial inventory of greenhouse gas emissions in the residential sector in Ukraine and Poland has been done, using Monte-Carlo methods.

*Key words:* mathematical modeling, process of greenhouse gases emission, residential sector, geoinformation technology, uncertainty of modeling results.

Підписано до друку 15.09.2015  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий  
Умов. друк. арк. 0,9. Фіз. друк. арк. 1,25  
Тираж 130 пр.

Надруковано:  
ТзОВ “Графік Стар”.  
79026, м. Львів, вул. Володимира Великого, 2  
soroka@soroka.lviv.ua