

Національний університет "Львівська політехніка"

**Гамаль Христина Володимирівна**

УДК 004.942:519.876.5

**ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ  
ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ У ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ**

05.13.06 – інформаційні технології

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів - 2009

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор  
**Бунь Ростислав Адамович**,  
Національний університет "Львівська політехніка",  
професор кафедри прикладної математики

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, ст. наук. співр.  
**Сікора Любомир Степанович**,  
Національний університет "Львівська політехніка",  
професор кафедри автоматизованих систем управління, м. Львів

кандидат технічних наук, доцент  
**Березький Олег Миколайович**,  
Тернопільський національний економічний університет,  
доцента кафедри інформаційно-обчислювальних систем та  
управління, м. Тернопіль

Захист відбудеться 2 липня 2009 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.14 у Національному університеті "Львівська  
політехніка", за адресою 79013, м.Львів, вул. С.Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного  
університету "Львівська політехніка" за адресою 79013, м.Львів,  
вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий 1 червня 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 35.052.14, к.т.н., доц.

Батюк А.Є.

Підписано до друку 26.05.2009 р. Формат 60x84 /16  
Обсяг 1,0 друк. аркуш. Тираж 140 прим.  
Видавництво Тараса Сороки  
Реєстр. св-во ЛВ № 17 від 12.02.2002

---

79035, м.Львів, вул. Зелена, 111



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Науково обґрунтовано, що кліматичні зміни відбуваються через посилення так званого «парникового ефекту» в результаті накопичення в атмосфері парникових газів (ПГ) – вуглекислого газу  $\text{CO}_2$ , метану  $\text{CH}_4$ , закису азоту  $\text{N}_2\text{O}$  та інших, що пов'язано із господарською діяльністю людини (спалювання викопного палива, вирубування лісів, розвиток промисловості, діяльність транспорту тощо).

З метою стабілізації концентрацій ПГ у атмосфері прийнято Кіотський протокол до Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату, який встановив для багатьох країн обмеження на викиди ПГ та зобов'язав щорічно звітувати про рівень емісій на рівні окремих держав. Хоча такі показники емісій для держави загалом є важливою інформацією, проте опираючись лише на узагальнені показники неможливо проводити локальні заходи щодо зменшення викидів.

Відносно недавно почали з'являтися роботи, присвячені окремим аспектам аналізу просторового та часового розподілів емісій. Значний внесок у розробку та дослідження моделей просторової інвентаризації викидів внесли вчені: Reis St., Kluizenaar Y., Kates R.W., Loibl W., Winiwarter W., Niemier D., Jensen St., Bachman W., Lindley S., Brandmeyer J., Kinnee E., Mensink C., Sivacoumar R., Lilly A., Costa M., Elbir T., Diem J., Mohan M., Parra R. Серед українських вчених, котрі проводили дослідження спрямовані на розробку методів зниження емісій та покращення інвентаризаційної системи, можна виділити: Міхно М.В., Рябич О.М., Колесник С.І., Ночвай В.І., Биковець Н.П., Гайдусь А.Ю., Гордієнко Т.Б. Проте, відсутні ефективні інформаційні технології просторової інвентаризації ПГ на регіональному рівні.

У період з 1990 по 2006 роки понад 80% від сукупних антропогенних викидів ПГ в Україні припадало на енергетичний сектор, тому розроблення методів просторового аналізу емісій ПГ у цьому секторі і створення на їх основі геоінформаційних технологій інвентаризації ПГ на регіональному рівні є актуальною науковою задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основу дисертаційної роботи складають результати теоретичних та практичних досліджень, виконаних автором в рамках планових робіт кафедри прикладної математики Національного університету «Львівська політехніка» та ряду міжнародних грантів, зокрема: українсько-австрійського проекту "Методи просторової інвентаризації емісій парникових газів Кіотського протоколу з врахуванням їх невизначеностей" (номер держ. реєстр. 0109U003461); гранту Міністерства науки Австрії та програми літніх шкіл Міжнародного інституту прикладного системного аналізу в м.Лаксенбург, Австрія. В рамках цих робіт автор розробила математичні моделі та геоінформаційні технології для просторового аналізу емісій ПГ в енергетичному секторі.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення геоінформаційних технологій просторової інвентаризації емісій парникових газів у енергетичному секторі, побудова кадастрів викидів парникових газів для адміністративних областей Західної України.

У відповідності з поставленою метою дисертаційна робота включала розв'язання таких завдань:

- аналіз відомих підходів до інвентаризації ПГ, дослідження особливостей енергетичного сектору в областях Західної України;

- розробка методів просторового аналізу емісій ПГ у секторах дорожнього, залізничного та позашляхового транспортів із врахуванням наявних статистичних даних;
- розробка методів просторового аналізу емісій ПГ стаціонарними джерелами у секторах виробництва тепло- і електроенергії, переробки палива, виробництва промислової продукції, видобутку паливних ресурсів, а також в житловому секторі;
- розробка геоінформаційної системи просторової інвентаризації ПГ в енергетичному секторі;
- здійснення числових експериментів з моделювання та просторового аналізу емісій ПГ для енергетичного сектору областей Західної України, верифікація отриманих результатів;
- оцінка невизначеності результатів просторової інвентаризації.

**Об'єктом дослідження** є процеси емісії парникових газів.

**Предметом дослідження** є методи просторового аналізу процесів емісії парникових газів в енергетичному секторі на регіональному рівні та геоінформаційні технології просторової інвентаризації парникових газів.

**Методи дослідження.** При виконанні досліджень дисертаційної роботи, формуванні математичних моделей та георозподілених баз даних, створенні геоінформаційних технологій використано: теорію множин, теорію баз даних, методи класичної статистики та метод Монте Карло для моделювання та аналізу невизначеності одержаних результатів, методи геоінформатики, елементи структурного та об'єктно-орієнтованого програмування для програмної реалізації розроблених моделей та обробки результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

- вперше розроблено метод просторової інвентаризації ПГ, який базується на використанні точкових, лінійних та площинних джерел емісій, що дає можливість враховувати специфіку емісійних процесів на рівні елементарних об'єктів заданого розміру;
- вперше розроблено математичні моделі та геоінформаційну технологію просторового аналізу процесів емісії ПГ прямої дії від пересувних джерел на рівні елементарних об'єктів, які враховують територіальну специфіку лінійних та площинних джерел емісії і дають можливість отримувати просторові кадастри емісій вуглекислого газу, метану та закису азоту в секторах дорожнього, залізничного та позашляхового транспортів;
- вперше розроблено математичні моделі та геоінформаційну технологію просторового аналізу процесів емісії ПГ від стаціонарних джерел на рівні елементарних об'єктів, які враховують територіальну специфіку точкових та площинних джерел емісії і дають можливість отримувати просторові розподіли емісії ПГ прямої дії у секторах виробництва тепло- і електроенергії, переробки палива, виробництва промислової продукції, видобутку паливних ресурсів, а також у житловому секторі;
- розроблено структуру геоінформаційної системи просторової інвентаризації ПГ, яка базується на використанні георозподілених баз даних та математичних моделей емісійних процесів на рівні елементарних об'єктів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені геоінформаційні технології просторового аналізу емісій ПГ в енергетичному секторі дають можливість проводити георозподілену інвентаризацію викидів на рівні елементарних ділянок для будь-якої території з використанням місцевої статистичної інформації та набору цифрових карт. Побудовані георозподілені кадастри емісій, які відображають величину та структуру викидів, можуть використовуватись у системах підтримки прийняття рішень, зокрема для планування екологічних та природоохоронних програм на локальному та регіональному рівнях; у програмах моделювання процесів переміщення та концентрації забруднюючих речовин у атмосферному повітрі.

Методи дослідження невизначеності результатів просторової інвентаризації викидів ПГ є зручним інструментарієм для вибору та обґрунтування ефективних заходів, спрямованих на зниження невизначеності загального кадастру емісій і забезпечення використання механізмів Кіотського протоколу, зокрема участі у процесах торгівлі квотами на викиди.

Робота є суттєвим внеском у створення національної системи інвентаризації ПГ, дослідження територіального розподілу та структури емісій ПГ в енергетичному секторі, зокрема на прикладі областей Західної України.

*Реалізація результатів та впровадження.* Розроблені математичні моделі та геоінформаційні технології просторової інвентаризації викидів ПГ програмно реалізовано із використанням інтегрованого середовища розробки Delphi, геоінформаційної системи MapInfo та середовища Matlab.

Результати дисертаційного дослідження використано в Міжнародному інституті прикладного системного аналізу, Австрія (удосконалені методи виявлення змін в емісіях та методи дослідження структурних змін в емісіях країн Європейського Союзу та оцінка їх впливу на стан виконання зобов'язань, встановлених Кіотським протоколом – при виконанні проекту FWF P17569 “Full Carbon Accounting”), Національному університеті "Львівська політехніка" (геоінформаційні технології просторової інвентаризації ПГ – при виконанні українсько-австрійського проекту), Центрі стратегічних досліджень екобіотехнічних систем (створення георозподілених кадастрів емісій та аналізу специфіки ряду точкових джерел емісії регіону). Теоретичні та практичні результати використовуються у навчальному процесі, а також при виконанні курсових і дипломних робіт в Національному університеті "Львівська політехніка" та в Академії інформатики та управління м.Бельско-Бяла, Польща. Відповідні акти про використання результатів дисертаційної роботи наведено в додатку.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. Праці [2, 3, 21] опубліковані одноосібно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – дослідження невизначеності оцінок викидів вуглекислого газу, розробка і застосування методу виявлення систематичних похибок шляхом аналізу щорічних уточнень оцінок емісій; [4, 10, 12, 20] – розробка загального підходу та геоінформаційної системи для просторової інвентаризації парникових газів в енергетичному секторі; [5, 7, 18] – розробка і програмна реалізація геоінформаційної системи просторової інвентаризації викидів, опис способів формування вхідних даних для елементарних ділянок; [6, 13] – аналіз специфіки інвентаризації викидів в енергетичному секторі, застосування методики

просторової інвентаризації та числові експерименти для Львівської області; [8, 9, 15, 16] – застосування методики недобору та часу верифікації до аналізу емісій країн Європейського Союзу, дослідження умов виконання країнами зобов'язань щодо зниження емісій в умовах невизначеності; [11, 14, 17, 19] – розробка моделей просторової інвентаризації викидів парникових газів в енергетичному секторі.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях і школах-семінарах, а саме: The 6th European Conf. on Ecological Modelling (Trieste, Italy, 2007); Second Intern. Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories (Laxenburg, Austria, 2007); Intern. Conf. and Young Scientists School on Computational Information Technologies for Environmental Sciences (Tomsk, Russia, 2007); Third Intern. ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering "ITEE 2007" (Oldenburg, Germany, 2007); Intern. Conf. on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi "ICEM-2006" (Yamaguchi, Japan, 2006); Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems "ENVIROMIS'2006" (Tomsk, Russia, 2006); YSSP Midsummer Workshop, International Institute for Applied Systems Analysis (Laxenburg, Austria, 2007); I Międzynar. Sesja Naukowa "Środowisko i Technologie Informatyczne a Zdrowie Człowieka" (Przemyśl, Poland, 2007); XIII та XV міжнар. конф. з автоматичного управління ("Автоматика-2006", Вінниця; "Автоматика-2008", Одеса); Першій міжнар. конф. молодих науковців "Комп'ютерні науки та інженерія" «CSE-2006» (Львів), а також на наукових семінарах кафедри прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка" (2006-2009 pp.).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 21 наукову працю, серед яких 7 статей у фахових наукових виданнях, 2 публікації у видання Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (Австрія), 12 публікацій – у матеріалах наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, 7 додатків та списку використаних джерел із 202 найменувань. Робота викладена на 246 сторінках, містить 148 стор. основного тексту, 68 рисунків та 24 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, сформульовано мету та основні задачі дослідження, представлено наукову новизну роботи і практичну цінність отриманих результатів.

**Перший розділ** присвячено дослідженню сучасних підходів та методів інвентаризації емісій ПГ на різних рівнях. Проаналізовано методики проведення інвентаризації для основних секторів діяльності, особливу увагу приділено міжнародним методикам МГЕЗК-2006 та CORINAIR, на основі яких, згідно із Кіотським протоколом, Україна повинна налагодити національну систему інвентаризації. Показано, що через свою універсальність вони не пристосовані до повноцінного врахування регіональних особливостей, що веде до зниження ефективності інвентаризації з точки зору окремої країни.

На основі проаналізованих праць виділено чотири рівні інвентаризації викидів ПГ – глобальний, рівень країни, рівень адміністративних областей та



елементарних ділянок. На відміну від широко досліджених методів інвентаризації емісій на високих рівнях, лише відносно нещодавно почали приділяти увагу розробці методів просторової інвентаризації викидів. Така інвентаризація передбачає умовний поділ території на ділянки достатньо малого розміру, далі для кожної такої комірки враховуються усі антропогенні джерела емісії ПГ і проводиться інвентаризація викидів для кожної такої ділянки (так званий метод «знизу-вверх»). Недоліком такої інвентаризації є те, що необхідно мати дані про господарську діяльність на рівні окремої ділянки та відповідні коефіцієнти емісій ПГ.

Дещо простішим є застосування методу «зверху-вниз», який передбачає проведення інвентаризації ПГ для цілого об'єкту дослідження (наприклад, для країни чи однієї області), а далі результати розподіляють за певним алгоритмом по елементарних ділянках визначеного розміру. В роботі показано, що такий підхід дає лише наближені оцінки емісій і не дає можливості використовувати специфічні параметри для конкретних підприємств та регіонів. Детальну інвентаризацію проведено лише для окремих великих міст світу, для яких окремо ведеться збір статистичної інформації. В цих дослідженнях використано специфічні параметри енергетичних балансів, результати дистанційного зондування атмосфери, що унеможливило їх застосування для України. Показано, що немає цілісного дослідження методів та засобів просторової інвентаризації емісії ПГ в енергетичному секторі.

Для України просторова інвентаризація викидів ПГ не проводилась. Проте через суттєву нерівномірність розподілу джерел емісій та поглиначів ПГ по території держави, та й у межах кожного адміністративного району, така інформація є корисною. Виходячи із наявних вхідних даних (статистичних даних, цифрових карт) необхідно розробити методи просторової інвентаризації викидів в енергетичному секторі та відповідні інформаційні технології для підтримки прийняття рішень з охорони навколишнього середовища та впровадження ефективних заходів щодо зменшення антропогенного навантаження на атмосферу.

**У другому розділі** розроблено математичні моделі та інформаційну технологію просторового аналізу емісії ПГ від пересувних джерел емісії в енергетичному секторі на основі даних про економічну діяльність та параметрів, що визначають рівень емісій ПГ прямої дії.

Обґрунтовано загальний підхід до просторової інвентаризації ПГ, який полягає у почерговому проведенні інвентаризації емісій методом «знизу-вверх» для кожної елементарної ділянки, на якій розбито досліджувану територію. У свою чергу емісія ПГ в межах елементарної ділянки для певного роду діяльності є сумою емісій від усіх джерел, що частково чи повністю розташовані в її межах. Для кожного роду антропогенної діяльності питомі емісії ПГ є певною функцією від параметрів, що характеризують інтенсивність цієї діяльності, відповідних коефіцієнтів емісії, географічних координат досліджуваної ділянки та часу:  $e = \varphi(a_{x,y,i}, b_{x,y,i}, \dots, x, y, t)$ , де  $e$  – питомі емісії,  $a$  – дані про діяльність,  $b$  – параметри, що впливають на рівень емісій,  $(x, y)$  – географічні координати об'єкту дослідження,  $i$  – рід діяльності,  $t$  – час. Вигляд функції  $\varphi$  залежить від категорії діяльності і розкривається далі при

формуванні відповідної математичної моделі. Тоді результат традиційної інвентаризації (на рівні країни) виражається наступним чином:  

$$E = \iint \varphi[a(x, y)_i, b(x, y)_i, \dots, x, y, t] dx dy.$$

Енергетичний сектор включає ряд підсекторів, які в свою чергу можна розкласти на окремі класи джерел емісій. Показано, що для проведення просторового аналізу доцільно усі джерела емісій поділяти на три основні типи: лінійні, площинні та великі точкові джерела. Запропоновано та обґрунтовано підходи до моделювання та оцінки емісій ПГ для кожного з цих типів джерел.

Розроблено методи просторового аналізу емісій від пересувних джерел емісій в енергетичному секторі, а саме від дорожнього, залізничного та позашляхового транспорту. При просторовому аналізі емісій від діяльності *дорожнього транспорту* доцільно джерелами емісій вважати дороги та автошляхи, на яких функціонує автотранспорт. Такі джерела є лінійними. Натомість у містах (де висока щільність транспортної мережі) такі джерела емісій запропоновано відносити до площинних об'єктів із виділенням лише основних доріг як лінійних джерел. Тому емісії відносять на автомобільні дороги усіх типів (враховано тип дороги та вид покриття, категорію дороги, віддаленість від населених пунктів, інтенсивність використання) та території населених пунктів усіх типів, що є площинними джерелами емісій від спалювання палива автотранспортом на внутрішній мережі доріг (враховано тип населеного пункту, кількість населення, що в ньому проживає). Для поселень з населенням більше 15 тис. чоловік додатково введено так звані буферні зони трьох рівнів навколо адміністративних меж поселень: 1)  $Z^0(i)$  – власна територія  $i$ -го населеного пункту; 2)  $Z^1(i)$  – зона шириною  $0,5\sqrt{S(i)/\pi}$  навколо адміністративних меж  $i$ -го населеного пункту ( $S(i)$  – площа поселення), 3)  $Z^2(i)$  – зона шириною  $\sqrt{S(i)/\pi}$ , 4)  $Z^3(i)$  – зона шириною  $1,5\sqrt{S(i)/\pi}$ .

Підхід до просторового моделювання емісій ПГ вимагає можливості оперувати адміністративними одиницями, окремими джерелами емісій тощо як з географічними об'єктами із набором як власних властивостей, так і географічних характеристик для кожного із них. Визначено множини таких географічних об'єктів:  $\tilde{O} = \{O_1, \dots, O_n\}$  – множина адміністративних областей;  $\tilde{N} = \{N_1, N_2, \dots\}$  – множина міст обласного підпорядкування;  $\tilde{R} = \{R_1, R_2, \dots\}$  – множина районів;  $\tilde{S} = \{S_1, S_2, \dots\} = \{\tilde{S}^{Urb}, \tilde{S}^{Rur}\}$  – множина населених пунктів усіх типів,  $\tilde{S}^{Urb} = \{S_1^{Urb}, S_2^{Urb}, \dots\}$  – множина міст та селищ міського типу,  $\tilde{S}^{Rur} = \{S_1^{Rur}, S_2^{Rur}, \dots\}$  – множина сіл,  $\tilde{D} = \{D_1, D_2, \dots\}$  – множина автомобільних доріг,  $\Delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots\}$  – множина елементарних ділянок, на які розбито територію;  $\tilde{Z} = \{Z^1(i), i \in \tilde{S}^Z\} \cup \{Z^2(i), i \in \tilde{S}^Z\} \cup \{Z^3(i), i \in \tilde{S}^Z\}$  – множина побудованих навколо міст буферних зон, причому  $Z^n(i)$  – множина зон  $n$ -го рівня для  $i$ -го населеного пункту, а  $\tilde{S}^Z \subset \tilde{S}$  – множина населених пунктів, для яких побудовано буферні зони.

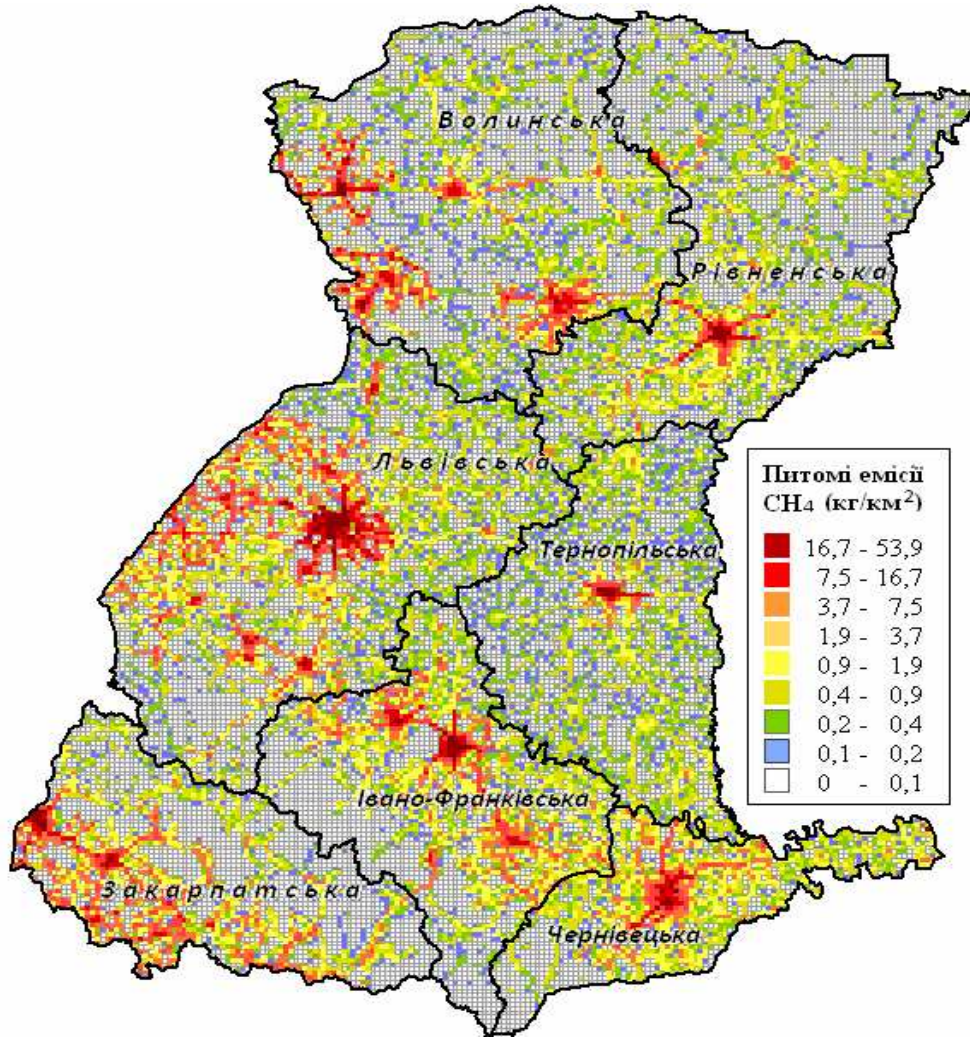


Рис. 1. Питомі емісії  $\text{CH}_4$  від спалювання дизпалива транспортом у власності населення (кг/км<sup>2</sup>, 2006 р.). Ділянки 2 км x 2 км забарвлені у колір, що відповідає певному діапазону значень емісій.

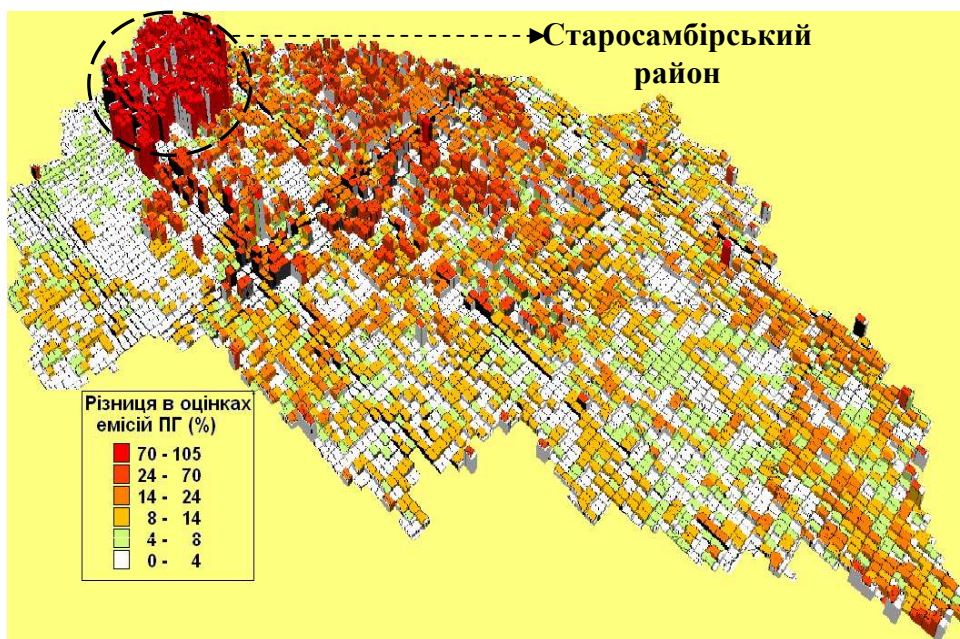


Рис. 2. Відносна різниця між оцінками питомих емісій ПГ в  $\text{CO}_2$ -еквіваленті у секторі дорожнього транспорту у 2006 році (%), Львівська обл., 5490 елементарних ділянок 2 км x 2 км)

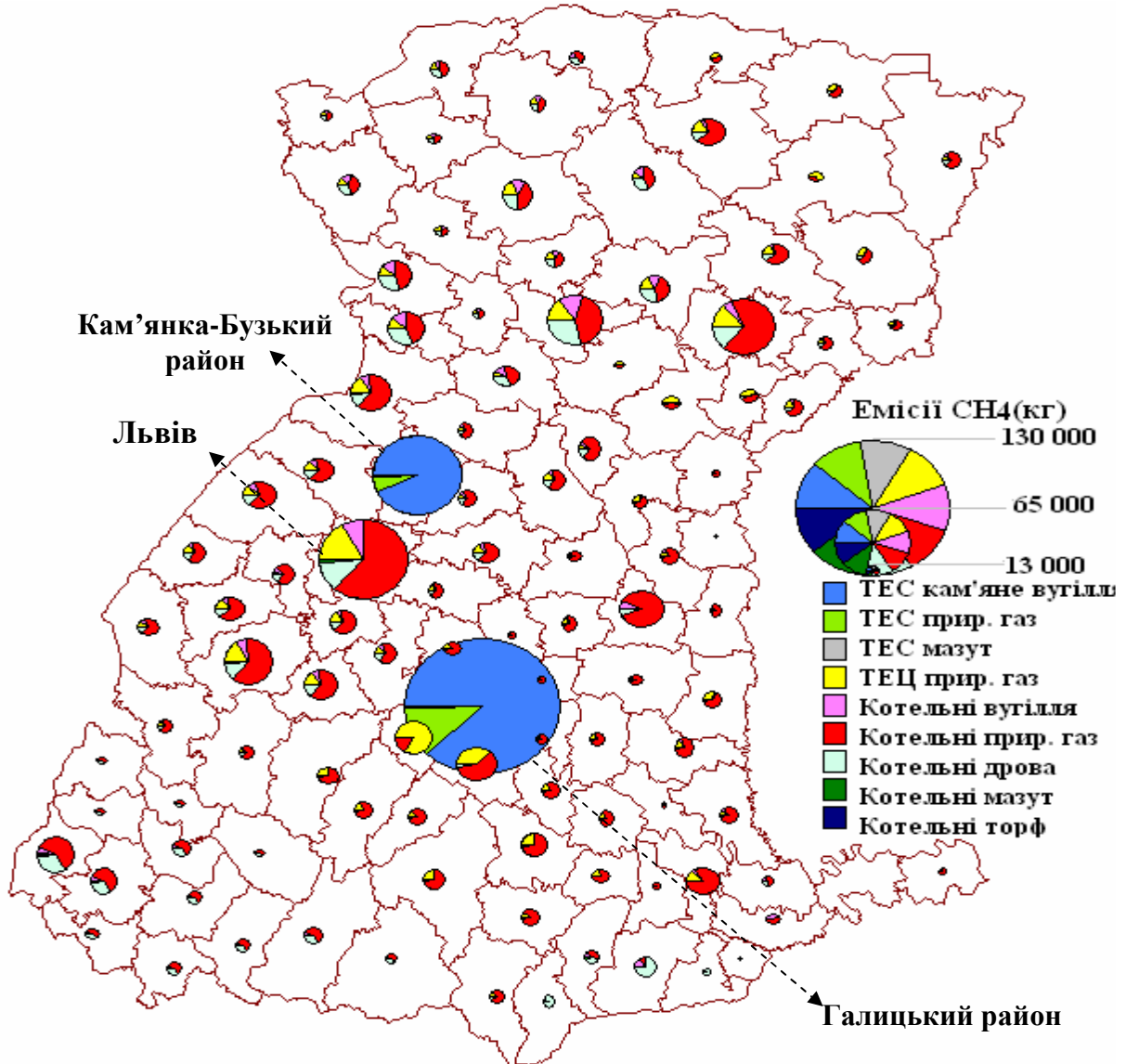


Рис. 3. Структура викидів метану (у шкалі степеня 0.4) по видах палива і типах джерел у секторі виробництва електро- та теплоенергії по районах (кг)

Для географічних об'єктів додатково введено ряд відношень, які використовуються не у теоретико-множинному розумінні, а для визначення територіальної приналежності та взаємного розміщення географічних об'єктів. Для географічних об'єктів визначено наступні операції: 1) географічної приналежності ( $\in$ ); 2) географічного перетину ( $\hat{\cap}$ ); 3) географічного об'єднання ( $\cup$ ); 4) географічної різниці чи "вирізання" ( $\hat{-}$ );

Емісії  $\text{CO}_2$  обчислюють на основі даних про обсяг спаленого палива та вміст вуглецю в конкретному типі палива. Натомість емісії таких газів як  $\text{CH}_4$  та  $\text{N}_2\text{O}$  залежать також від умов та технології спалювання. Тому загальні емісії  $G$ -го ПГ обчислюють як сумарні емісії, що виникли на різних етапах роботи автомобілів: в режимі стабільної роботи двигуна та в режимі запуску двигуна, а також враховано ряд додаткових параметрів – тип автомобілів, наявність технологій контролю за викидами, середню швидкість на різних ділянках доріг, віковий розподіл автомобілів тощо.

Сформовано математичну модель емісії ПГ за рік в населеному пункті  $S$  (чи в одній з побудованих навколо нього зон для  $S \in \tilde{Z}$ ), що належить адміністративному району  $R$ :

$$E_{Tr}^G[Z^n(S)] = \frac{M^R(f,t,b)}{\sum_w a_b^O(t,w)} \cdot \frac{Q(S) \cdot C_n}{\sum_{S \in \tilde{S}^R} Q(S)} \times \sum_{b=1}^B \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_w EF_{Hot}^G[f,t,V(H_S),w] \cdot a_b^O(t,w) \left\{ 1 + K_S(\beta) \left[ \frac{EF^{G;Cold}}{EF^{G;Hot}}(t_a,w) \Big|_j - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

$$n = \overline{0,3}; \quad O = \{O \in \tilde{O} \wedge S \in O\}; \quad R = \{R \in \tilde{R} \wedge S \in R\}; \quad \tilde{S}^R = \tilde{S} \cap R,$$

де  $E_{Tr}^G[Z^n(S)]$  – емісії  $G$ -го ПГ в населеному пункті  $S$  ( $n = 0$ ) або в одній з умовно побудованих буферних зон навколо  $S$  ( $n=1,2,3$ );  $K_S(\beta)$  – частка загального пробігу, виконаного на нерозігрітому двигуні для населеного пункту  $S$  (залежить від типу населеного пункту та частки загального пробігу на нерозігрітому двигуні  $\beta$ );  $M^R(f,t,b)$  – пробіг автомобілів типу  $t$ , що перебувають у власності  $b$  на паливі типу  $f$  в адміністративному районі  $R$ ;  $Q(S)$  – кількість населення, що проживає у населеному пункті  $S$ ;  $w$  – вікова група автомобілів;  $EF_{Hot}^G$  – коефіцієнт емісії  $G$ -го ПГ при роботі автомобіля визначеного віку, типу та конструкції при робочій температурі двигуна;  $\frac{EF^{G;Cold}}{EF^{G;Hot}}(t_a,w)$  – відношення величини викидів  $G$ -го ПГ при холодному та гарячому двигуні на одиницю пробігу;  $H_S$  – тип населеного пункту  $S$  (місто, село, селище міського типу);  $a_b^O(t,w)$  – кількість автомобілів в області  $O$ , що попадають у вікову групу  $w$ ;  $t_a$  – середня температура атмосферного повітря;  $l_{tr}$  – середня довжина однієї поїздки;  $V$  – середня швидкість транспортного засобу;  $C_n$  – коефіцієнт буферної зони навколо населеного пункту.

Розроблено математичну модель процесів емісії ПГ від транспорту на ділянках доріг, що повністю чи частково входять в аналізовані елементарні ділянки. Цю модель сформовано за аналогічним до моделі (1) принципом, вона враховує параметри ділянки дороги (розташування, категорія, довжина, ширина та інші характеристики), коефіцієнти емісії ПГ при роботі автомобіля визначеного віку, типу та конструкції, кількість автомобілів в області, що попадають у відповідну вікову групу тощо

Модель просторового аналізу «знизу-вверх» передбачає проведення інвентаризації емісій ПГ для окремих ділянок доріг. Шляхом географічного співставлення розташування мережі доріг та населених пунктів визначеного типу, дороги додатково поділяють на міські ( $\tilde{D}^{Urb} = \tilde{D} \cap \tilde{S}^{Urb}$ ), сільські ( $\tilde{D}^{Rur} = \tilde{D} - (\tilde{D}^{Urb} \cup \tilde{D}^{Hway}) = \{D_1^{Rur}, D_2^{Rur}, \dots\}$ ) та дороги призначені для швидкісного руху (за картографічними кодами  $\tilde{D}^{Hway} = \{D_1^{Hway}, D_2^{Hway}, \dots\}$ ).

На рівні елементарної ділянки  $\delta$  джерелами емісій є частини доріг та частини територій населених пунктів, що географічно розташовані в межах елементарної ділянки, – це множина площинних та лінійних об'єктів  $D^\delta = \{D \cap \delta, D \in \tilde{D}\}$  та  $S^\delta = \{S \cap \delta, S \in \tilde{S}\}$ . Емісії знаходять наступним чином:

$$E_{Tr}^G(\delta) = \frac{1}{2} \left[ \sum_{s \in \tilde{S}} \frac{E_{Tr}^G(s) \cdot area(s \cap \delta)}{area(s)} + \sum_{d \in \tilde{D}} \frac{E_{Tr}^G(d) \cdot len(d \cap \delta)}{len(d)} \right],$$

де  $area(x)$  – площа географічного об'єкту  $x$ ;  $len(x)$  – довжина лінійного об'єкту  $x$ ;  $\delta$  – елементарна ділянка території.

Для практичної реалізації розроблених підходів обґрунтовано доцільність використання геоінформаційних технологій та цифрових карт. Показано спосіб формування елементарних ділянок розміром  $n$  км x  $n$  км, але обмежених границями адміністративних районів на цифровій карті. Побудовано ряд допоміжних цифрових карт для проведення просторової інвентаризації – карти розташування населених пунктів усіх типів із зазначенням кількості населення та мережі автомобільних доріг із вказанням завантаженості та інших параметрів на основі карт із просторової бази даних України масштабу 1:500 000 та реальних даних.

За реальними даними отримано характеристики емісій ПГ CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> та N<sub>2</sub>O від діяльності дорожнього транспорту у 2006 році для території Західної України в розрізі окремих сортів палива та типів автомобілів для ділянок 2 км x 2 км. Для візуального представлення результатів моделювання побудовано шари цифрових карт емісій (приклад однієї з отриманих карт наведено на рис. 1). Такі карти дають можливість візуально оцінити ситуацію із розміщення джерел емісій для цього сектору економіки, виділити найбільш забруднені райони, досліджувати просторову кореляцію між величинами тощо.

Показано, що оцінки емісій ПГ, зроблені на основі показників споживання палива та на основі показників пробігу автомобілів, дещо відрізняються. Цю різницю можна пояснити як відмінністю у методах статистичного збору інформації для відповідних показників, так і врахуванням додаткових параметрів у випадку оцінки емісій на основі пробігу автомобілів. Для порівняння результатів моделювання побудовано діаграму розсіювання питомих емісій ПГ на рівні елементарних ділянок, враховано оцінки емісій отриманих двома способами: спосіб 1 – на основі показників обсягів споживання палива; спосіб 2 – на основі показників пробігу автомобілів. На основі результатів аналізу сформовано різницеву карту, де значення у кожній комірці обчислюють як відносну різницю між оцінками емісій, обчислених за двома способами. Такі карти є корисними для верифікації результатів просторового моделювання емісій, виявлення та локалізації помилок статистичної звітності (на рис. 2 наведено приклад аналізу 5490 елементарних ділянок Львівської обл.).

Запропоновано та обґрунтовано методи просторового аналізу емісій ПГ від *позашляхового транспорту*, а саме – від діяльності транспортних засобів та механізмів для виробництва сільськогосподарської продукції та від діяльності рухомого устаткування при виконанні будівельних робіт.

Сільську місцевість в районі  $R$ , де ведуться сільськогосподарські роботи,  $T^{Rur;R}$  визначимо наступним чином:

$$T^{Rur;R} = \left\{ R = \left( N^R \cup S^{Urb,R} \cup D^R \cup H^R \cup W^R \cup G^{R,-} \right) \right\},$$

де  $N^R$ ,  $S^{Urb,R}$ ,  $D^R$ ,  $H^R$ ,  $W^R$  – географічні об'єкти розташовані в межах району  $R$ : міста обласного підпорядкування, міські поселення, дороги усіх типів, залізничні колії, ліси, відповідно;  $G^{R,-}$  – непридатні для ведення сільського господарства ділянки (заболочені території; водні об'єкти тощо).

Розроблено модель процесів емісії ПГ від позашляхового транспорту в елементарній ділянці, яка враховує обсяг використаного палива, кількість сільськогосподарської техніки та інші параметри. Аналогічну модель розроблено також для емісій від рухомої техніки при виконанні будівельних робіт.

Розроблено метод просторового аналізу емісій ПГ від роботи локомотивів на залізничних коліях. Враховано територіальне розташування колій, їх поточний стан та наявність залізничних станцій, обгінних пунктів, вокзалів, обсяги спожитого дизпалива на діяльність залізничного транспорту.

З використанням створеної інформаційної технології, розроблених математичних моделей емісій та статистичних показників діяльності позашляхового транспорту у сільському господарстві та будівництві обчислено кадастри емісій CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O по елементарних ділянках, на які розбито територію Західної України, та проаналізовано структуру емісій. Досліджено структуру та територіальне розміщення джерел емісії ПГ в залізничному транспорті на основі обсягів використаного палива на теплотягу локомотивів у регіоні.

**Третій розділ присвячено** розробленню математичних моделей та інформаційних технологій просторового аналізу емісій від стаціонарних джерел в енергетичному секторі економіки, а саме – емісій від спалювання палива при виробництві тепло- та електроенергії, переробці нафти, опаленні житлових будівель, виробництві промислової продукції та будівництві, а також супутніх емісій метану при видобуванні кам'яного вугілля та в нафтогазових системах.

Джерела емісій в підсекторі «Виробництво електро- та теплоенергії» доцільно поділити на два види – великі точкові джерела та дрібні точкові джерела. Для кожного виділеного великого точкового джерела необхідно зібрати інформацію про обсяги споживання палива, технологію його спалювання, встановлені очисні пристрої тощо. На основі цієї інформації визначають рівень емісії ПГ та геокодуєть до конкретної елементарної ділянки за координатами підприємства. Загальні обсяги спаленого палива на дрібних електроцентралях розподіляють по містах, де розташовані електростанції, пропорційно до наявності споживачів.

Емісії  $G$ -го ПГ у категорії «виробництво електроенергії та теплоенергії» на рівні  $\delta$ -ї елементарної ділянки  $E_{En}^G(\delta)$  визначають наступним чином:

$$E_{En}^G(\delta) = \sum_{i=1}^{I_\delta} \sum_{f=1}^F [M_{i,f} \cdot EF_{i,tech}^G(f)] + \sum_{s \in \{\tilde{S}^E \cap \delta\}} \frac{\sum_{f=1}^F (M_{R,f}^{En} - \sum_{i=1}^{I_\delta} M_{i,f}) \cdot Q(s) \cdot EF_{En}^G(f)}{\sum_{k \in \{\tilde{S}^E \cap R\}} Q(k)} \quad R = \{R \in \tilde{R} \wedge \delta \in R\}, \quad (2)$$

де  $I_\delta$  – кількість точкових джерел емісії в цій елементарній ділянці, які відносять до категорії «виробництво електро- та теплоенергії»,  $F$  – кількість видів палива,  $M_{i,f}$  та  $M_{R,f}^{En}$  – обсяги споживання  $f$ -го типу палива, відповідно,  $i$ -м точковим джерелом та в районі в цілому,  $\tilde{S}^E \in \tilde{S}^{Urb}$  – множина міських поселень, де розташовані теплоелектростанції загального користування,  $Q(x)$  – кількість населення, що проживає в об'єкті  $x$ ,  $EF_{i,tech}^G(f)$  та  $EF_{En}^G(f)$  – коефіцієнти емісії  $G$ -го ПГ від спалювання палива  $f$ -го типу на  $i$ -й електростанції, відповідно, із врахуванням специфіки технологічного процесу

та усереднений коефіцієнт для дрібних теплоелектроцентралей, індекс  $E_p$  відображає відношення показника до сектору виробництва електро- та теплоенергії на ТЕЦ та ТЕС.

*Котельні* відносять до дрібних джерел емісії, які розміщені в межах населених пунктів, а їх кількість та потужність залежать від кількості споживачів. Для цієї категорії джерел емісії розроблено подібну до (2) математичну модель, яка описує емісії на рівні елементарної ділянки, як суму емісій від джерел (джерелами емісій є території населених пунктів), що частково чи повністю розташовані в межах елементарної ділянки.

Розроблені моделі та інформаційну технологію використано для просторового аналізу емісій у категорії виробництва електро- та теплоенергії для областей Західної України. Як приклад, на рис. 3 наведено структуру викидів метану в розрізі адміністративних районів (емісії в містах обласного підпорядкування додано до емісій відповідних районів, де вони територіально розміщені).

Сформовано математичну модель емісії ПГ у *нафтопереробній промисловості*, причому всі джерела емісій віднесено до великих точкових джерел і для кожного заводу враховано: обсяги переробки сирової нафти за рік, специфічні коефіцієнти емісії ПГ, які враховують умови та технологію спалювання палива, глибину переробки палива, вік устаткування, наявність очисних установок, хімічні особливості палива, що спалюється.

Розроблено математичну модель емісії ПГ на рівні елементарних ділянок від спалювання палива у *житловому секторі*. При цьому враховано основні види палива (природний та скраплений газ, кам'яне вугілля, дрова та торф'яні брикети), обсяги спожитого палива в у сільській та міській місцевостях, кількість газифікованих квартир, середньорічні витрати палива на одне помешкання в сільській та міській місцевостях та коефіцієнт емісії. Обчислено кадастри емісій ПГ в житловому секторі для областей Західної України, проаналізовано структуру емісій.

Для сектору *«спалювання палива у переробній промисловості»* розроблено два підходи до просторового аналізу емісій ПГ: на основі загальнодоступних даних зі статистичних збірників та із використанням щорічних статистичних звітностей підприємств. Побудовано моделі для просторового аналізу відповідних емісій, які дають можливість врахувати специфічні параметри емісійного процесу для великих точкових джерел та узагальнені показники для решти дрібних джерел. Здійснено просторову інвентаризацію емісій для стаціонарних джерел емісій у промисловості на території Західної України.

Розроблено підходи до просторового аналізу процесів емісії метану при *видобуванні кам'яного вугілля* та емісій ПГ у *нафтогазових системах*. Побудовано цифрові карти розміщення та характеристик вугільних шахт і нафтогазових родовищ на території Західної України та з використанням розробленої інформаційної технології та статистичних даних отримано кадастри емісій ПГ при видобуванні вугілля та у нафтогазових системах.

**В четвертому розділі** представлено створену геоінформаційну систему GeoInventory, призначену для просторового аналізу емісій ПГ в енергетичному секторі, узагальнено результати числових експериментів з просторової інвентаризації емісій ПГ для території Західної України та здійснено аналіз невизначеності результатів інвентаризації ПГ для окремих категорій діяльності, окремих областей та ПГ.



В геоінформаційній системі GeoInventory, структуру якої показано на рис. 4, реалізовано розроблені математичні моделі просторової інвентаризації емісій ПГ та процедури побудови цифрових карт з результатами аналізу. Для кожного підсектору енергетичного сектору створено набір підпрограм на мові MapBasic, що реалізують просторову інвентаризацію ПГ для вказаних параметрів, наприклад, території дослідження, розмірів елементарних об'єктів, підкатегорій діяльності, рівня інвентаризації тощо.



Рис. 4. Структура геоінформаційної системи GeoInventory

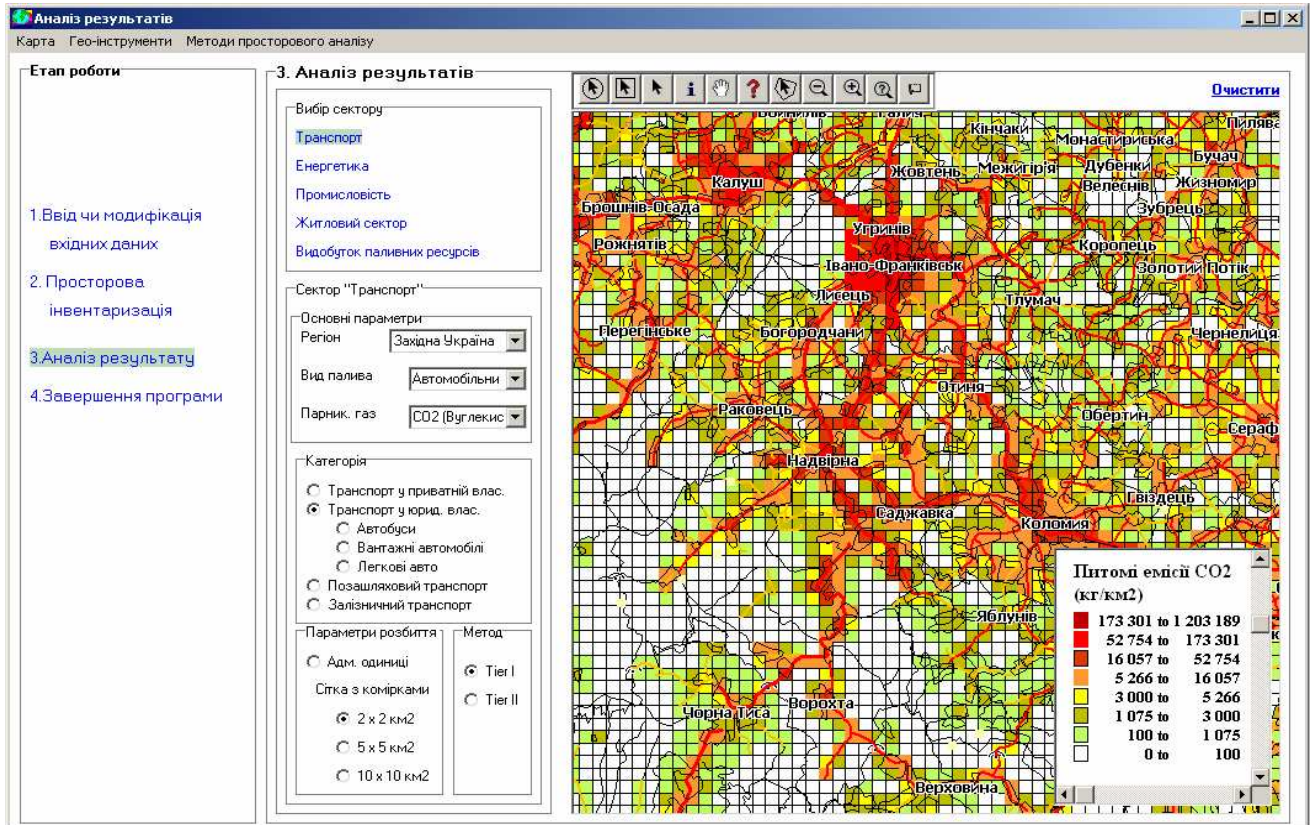


Рис. 5. Вигляд робочого вікна програми GeoInventory на етапі аналізу результатів

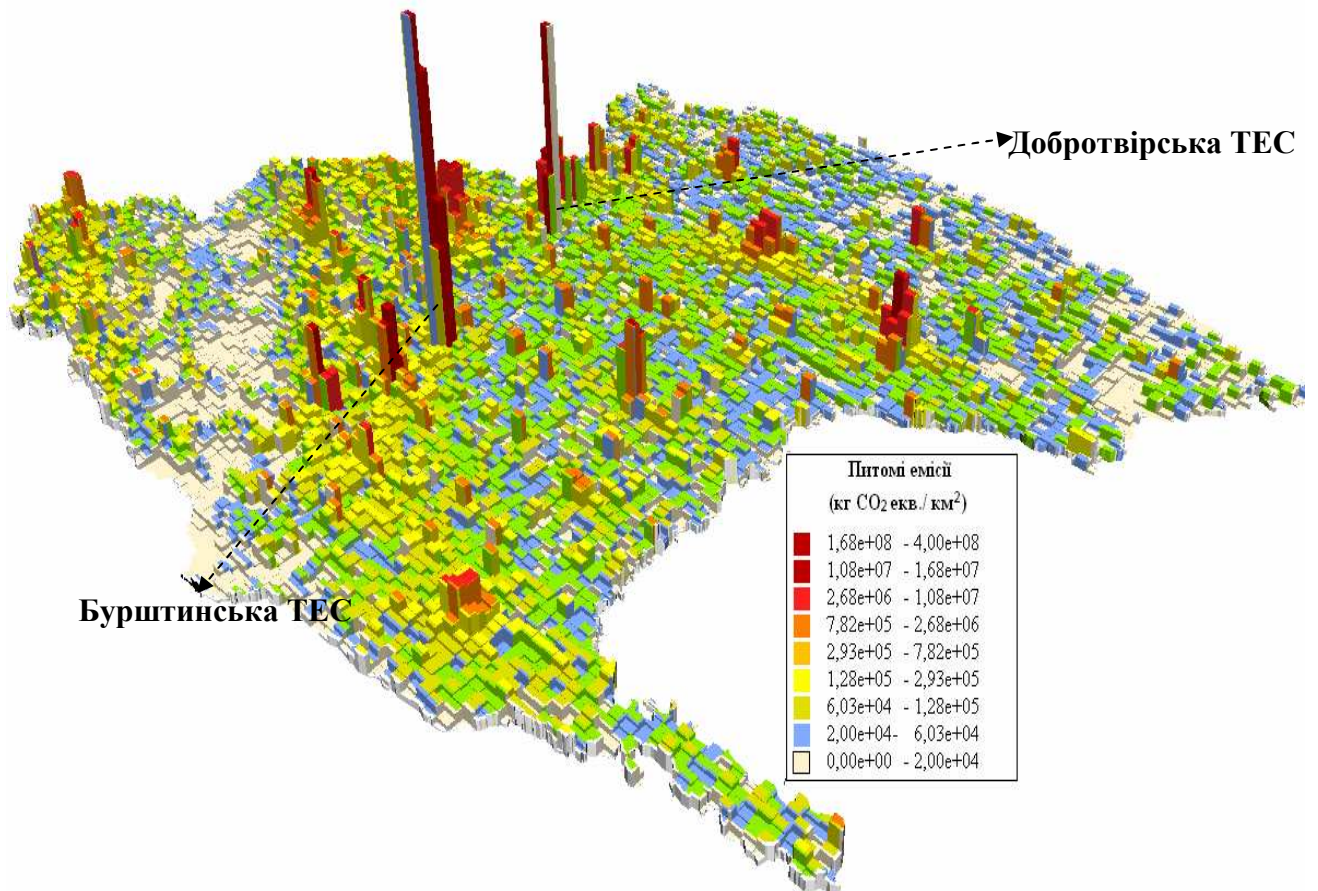


Рис. 6. Карта-призма питомих емісій ПГ прямої дії, узагальнених для усіх підкатегорій джерел енергетичного сектору (адміністративні області Західної України, елементарні ділянки 4 км x 4 км, 2006 р., CO<sub>2</sub>-еквівалент, кг/км<sup>2</sup>, шкала степеня 0,4)

Результатом виконання підпрограм є сформовані цифрові карти та георозподілені бази даних, в яких кожній елементарній ділянці відповідає запис, що містить інформацію про географічне розташування об'єкту, наявні джерела емісій, структуру та кількісні оцінки емісій в розрізі окремих ПГ та сортів палива (рис. 5).

Розроблено уніфіковані шаблони Excel-таблиць для кожного підсектору енергетичного сектору, в які користувач вводить статистичну інформацію на рівні областей, районів та окремих населених пунктів. Реалізовано можливість завантаження готових баз даних, які формують в обласних органах статистики на основі щорічних звітів підприємств за статистичною формою 4-мп, реалізовано також можливість автоматичного геокодування цієї інформації за місцем розташування (адресою) підприємств. Інтеграція панелей інструментів для роботи з картографічними елементами та об'єктів MapInfo дає можливість користувачу опрацьовувати та аналізувати геоінформацію у програмі GeoInventory з використанням більшості засобів та можливостей ГІС MapInfo, а також безпосередньо керувати виконанням MapBasic-підпрограм. З використанням розробленого математичного апарату та створеної інформаційної системи отримано узагальнені результати інвентаризації емісій CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> та N<sub>2</sub>O по основних підкатегоріях енергетичного сектору.

Як приклад, сумарні емісії (для узагальнених результатів по усіх категоріях джерел, сортах палива та ПГ) представлено на рис. 6 за допомогою карти-призми, на якій кожній елементарній ділянці відповідає призма, висота якої залежить від числового значення узагальнених емісій.

Аналіз розподілу емісій можна здійснювати і на вищих рівнях – по адміністративних районах чи областях в цілому. Такого типу тематичні карти дають можливість виявити найбільш забруднені та відносно “чисті” території в розрізі окремих ПГ, видів палива чи секторів господарської діяльності; оцінити рівномірність чи нерівномірність територіального розподілу емісій для заданого роду діяльності тощо. Проаналізовано структуру емісій ПГ в розрізі окремих родів діяльності, ПГ та сортів палива.

Досліджено невизначеність одержаних результатів моделювання на рівні адміністративних областей Західної України. Для усіх вхідних параметрів (коефіцієнтів емісії, статистичних даних тощо) встановлено діапазони 95% інтервалу довіри та за допомогою методу Монте-Карло їх "об'єднано" і знайдено невизначеність загальних результатів в розрізі окремих родів діяльності на рівні областей. Досліджено також чутливість невизначеностей сумарних оцінок емісій до зміни невизначеностей вхідних параметрів – статистичних даних про господарську діяльність, теплотворних значень палива та коефіцієнтів емісії. Встановлено, що навіть попри дуже високі невизначеності коефіцієнтів емісії для CH<sub>4</sub> та N<sub>2</sub>O покращення їх точності не має суттєвого впливу на зниження невизначеностей оцінок сумарних емісій ПГ в CO<sub>2</sub>-еквіваленті. Натомість найбільш ефективним є покращення знань про статистичні показники щодо обсягів спаленого, переробленого та видобутого палива та уточнення теплотворних значень палива. Зменшення невизначеності статистичних даних удвічі веде до зниження загальної невизначеності результатів сукупних викидів ПГ в енергетичному секторі із врахуванням коефіцієнтів глобального потепління із 5.84% до 4.87%, а таке ж зниження невизначеностей теплотворних значень веде до зниження невизначеностей результатів до 4.75%.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу розроблення методів просторового аналізу емісій парникових газів у енергетичному секторі і створення на їх основі геоінформаційних технологій інвентаризації парникових газів на регіональному рівні. При цьому отримано такі основні результати:

1. Обґрунтовано актуальність та необхідність розв'язання наукової задачі розроблення методів просторового аналізу складних процесів емісії ПГ в енергетичному секторі України, а також необхідність створення вискоелективної геоінформаційної системи для побудови просторових кадастрів викидів основних ПГ в атмосферу, яка дасть можливість отримати інформацію про реальний територіальний розподіл джерел емісій.

2. Розроблено метод просторового аналізу процесів емісії парникових газів, який полягає у почерговому обчисленні емісій методом «знизу-вверх» для елементарних ділянок визначеного розміру, на які розбито досліджувану територію, і який дає можливість врахувати нерівномірність зосередження джерел емісії на цій території. Обґрунтовано класифікацію усіх джерел на точкові, лінійні та площинні; показано особливості проведення інвентаризації та просторового аналізу емісії для кожного із них.

3. Розроблено методи просторового аналізу процесів емісії парникових газів від пересувних джерел (дорожнього, позашляхового та залізничного транспорту), які дають можливість враховувати основні фактори, що впливають на рівень емісій, та територіальне розташування відповідних джерел. Реалізація цих підходів дає можливість будувати територіально розподілені кадастри емісій парникових газів на рівні окремих підкатегорій джерел, сортів палива та парникових газів, а також аналізувати величину та структуру відповідних емісій на рівні окремих елементарних ділянок території.

4. Розроблено методи просторової інвентаризації емісії парникових газів прямої дії від спалювання палива на виробництво електро- та теплоенергії електростанціями та котельними установками, а також у процесі переробки нафти, які дають можливість територіально локалізувати великі точкові джерела емісії та врахувати специфічні для них параметри емісійного процесу.

5. Запропоновано та обґрунтовано підходи та алгоритми просторової інвентаризації емісій парникових газів в житловому секторі, які базуються на методах дезагрегації загальних обсягів реалізації палива населенню в розрізі окремих видів палива та дають можливість досліджувати просторовий розподіл емісій та аналізувати структуру емісій у цьому секторі.

6. Для сектору «спалювання палива у переробній промисловості» обґрунтовано два методи просторового аналізу емісій парникових газів – на основі загальнодоступних даних зі статистичних збірників та із використанням щорічних статистичних звітностей підприємств. Розроблено алгоритми для просторового аналізу процесів емісій метану при видобуванні кам'яного вугілля та емісій парникових газів у нафтогазових системах.

7. Розроблені методи та алгоритми програмно реалізовано у середовищі MapBasic для всіх підсекторів господарської діяльності енергетичного сектору. Обґрунтовано структуру та розроблено геоінформаційну систему GeoInventory для автоматизації процесу вводу вхідної інформації для просторової

інвентаризації емісій парникових газів та виклику відповідних MapBasic підпрограм за обраними параметрами, реалізовано широкий набір можливостей геоаналізу та візуального представлення результатів просторового моделювання емісій.

8. Використовуючи розроблені програмні засоби сформовано георозподілену базу даних та здійснено числові експерименти з просторової інвентаризації та аналізу емісій парникових газів в енергетичному секторі для адміністративних областей Західної України. Отримано територіальні розподіли емісій вуглекислого газу, метану та закису азоту, а також значення сумарних емісій по підсекторах господарської діяльності, здійснено верифікацію оцінок емісій для транспортного сектору.

9. Проаналізовано основні джерела невизначеності результатів просторової інвентаризації емісій парникових газів. З використанням методу Монте-Карло оцінено невизначеність результатів інвентаризації парникових газів на рівні окремих областей та території Західної України загалом. Досліджено чутливість загальної невизначеності результатів інвентаризації до зміни невизначеностей усіх вхідних даних та параметрів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Marland G. How uncertain are estimates of CO<sub>2</sub> emissions? / G. Marland, Kh. Hamal, M. Jonas // *Journal of Industrial Ecology*. – Yale University, USA, 2009. – Vol. 13. – № 1. – P. 4-7.
2. Hamal Kh. Carbon dioxide emissions inventory with GIS / Kh. Hamal // *Artificial Intelligence*. – Donetsk, 2008. – № 3. – P. 55-62.
3. Гамаль Х. В. Математичне та програмне забезпечення для просторової інвентаризації парникових газів у транспортному секторі / Х. В. Гамаль // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" : Інформаційні системи та мережі*. – № 621. – Львів, 2008. – С. 97-108.
4. Гамаль Х. В. Математичні моделі та програмні засоби для просторового аналізу емісій парникових газів в енергетичному секторі Івано-Франківської області / Х. В. Гамаль, Н. І. Лапій // *Моделювання та інформаційні технології*. – Київ, 2008. – Вип. 45. – С. 190–197.
5. Бунь Р. А. Геоінформаційна технологія просторової інвентаризації парникових газів в енергетичній галузі на регіональному рівні / Р. А. Бунь, Х. В. Гамаль // *Вісник Східноукраїнського національного університету*. – Луганськ, 2008. – №. 1. – С. 25–31.
6. Бунь Р. А. Математичні моделі для просторової інвентаризації парникових газів в енергетичній галузі Львівщини / Р. А. Бунь, Х. В. Гамаль // *Моделювання та інформаційні технології*. – Київ, 2007. – Вип. 40. – С. 167–175.
7. Bun R. Information technology for spatial inventory of greenhouse gases on regional level / R. Bun, Kh. Hamal, M. Gusti, O. Savchyn // *Internet in the Information Society: Application of the Information Technologies*. – Dąbrowa Górnicza, Poland : WSB, 2007. – P. 154-163.
8. Hamal Kh. Preparatory Signal Detection for the EU-27 Member States Under EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2005) / Kh. Hamal, M. Jonas. – International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2008. – 51 p. – (IR-08-037, IIASA).

9. Hamal Kh. Preparatory Signal Detection for the EU-25 Member States Under EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2004) / Kh. Hamal, M. Jonas. – International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2008. – 47 p. – (IR-08-036, IIASA).
10. Hamal Kh. GIS based models for greenhouse gas spatial inventory on regional scale : An energy sector / Kh. Hamal, R. Bun // The 6th European Conference on Ecological Modelling. – Trieste, Italy, 2007. – P. 206–207.
11. Hamal Kh. Spatial modeling of greenhouse gas emissions in energy sector on regional level / Kh. Hamal, R. Bun // Intern. Conf. and Young Scientists School on Computational Information Technologies for Environmental Sciences. – Tomsk, Russia, 2007. – P. 32–33.
12. Bun R. Spatial GHG inventory on regional level: Accounting for uncertainty / R. Bun, Kh. Hamal, M. Gusti, A. Bun // Proc. of the 2nd Intern. Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories.– Laxenburg, Austria, 2007.– P. 27–32.
13. Bun R. Spatial inventory of greenhouse gases on regional level / R. Bun, Kh. Hamal, M. Gusti, A. Bun, O. Savchyn // Information Technologies in Environmental Engineering “ITEE 2007”: Third Intern. ICSC Symposium. – Oldenburg, Germany : Springer, 2007. – P. 271-280.
14. Bun R. Multilevel model for greenhouse gas inventory and uncertainty analysis concerning the Kyoto Protocol implementation / R. Bun, M. Gusti, A. Bun, Kh. Hamal // Proc. of the Intern. Conf. on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006). – Yamaguchi, Japan, 2006. – P. 118–119.
15. Bun R. Geoinformation technology and greenhouse gas spatial inventory: An analysis of structural changes in energy sector / R. Bun, Kh. Hamal, M. Gusti, A. Bun // Zeszyty Naukowe : Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Przemysłu. – Nr 1 : Materiały I Międzynar. Sesji Naukowej "Środowisko i Technologie Informatyczne a Zdrowie Człowieka". – Przemysł, Poland, 2008. – S. 14–34.
16. Bun A. Verification of compliance with GHG emission targets: Annex 1 countries / A. Bun, Kh. Hamal, M. Jonas // Proc. of the 2nd Intern. Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories. – Laxenburg, Austria, 2007. – P. 21–26.
17. Bun A. Analysis and minimization of uncertainty of results of multilevel greenhouse gases inventory / A. Bun, M. Gusti, Kh. Hamal, R. Bun // Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems “ENVIROMIS’2006”. – Tomsk, Russia, 2006. – P. 45.
18. Бунь Р. А. Геоінформаційний підхід до інвентаризації парникових газів на Прикарпатті / Р. А. Бунь, Х. В. Гамаль, Н. І. Лапій, В. В. Смейко // Автоматика - 2008 : Доп. XV міжнар. конф. з автоматичного управління. – Ч. 2. – Одеса, 2008. – С. 707–710.
19. Гамаль Х. Геоінформаційний підхід до інвентаризації парникових газів на Львівщині / Х. Гамаль, Н. Терлецька // Комп’ютерні науки та інженерія : Матеріали 1-ї Міжнар. конф. молодих науковців (CSE-2006). – Львів : НУ «ЛП», 2006. – С. 88–90.
20. Бунь Р. А. Інформаційна технологія інвентаризації парникових газів на Львівщині: енергетичний сектор та лісове господарство / Р. А. Бунь, Х. В. Гамаль, Н. Р. Терлецька // XIII Міжнар. конф. з автоматичного управління “Автоматика-2006” : Тези доп. – Вінниця, 2006. – С. 317.
21. Гамаль Х. В. Просторовий підхід до моделювання емісій парникових газів у транспортному секторі / Х. В. Гамаль // Сьома відкрита наук. конф. професорсько-викладацького складу Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : тези доп. – Львів : НУ «ЛП», 2008. – С. 37.

## АНОТАЦІЇ

**Гамаль Х. В. Геоінформаційні технології просторового аналізу емісії парникових газів у енергетичному секторі. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – «Інформаційні технології». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2009.

Дисертація присвячена розробленню методів просторового аналізу емісій парникових газів у енергетичному секторі і створенню на їх основі геоінформаційних технологій інвентаризації парникових газів на регіональному рівні.

Розроблено математичні моделі та геоінформаційну технологію просторового аналізу процесів емісії парникових газів від пересувних джерел на рівні елементарних об'єктів, які враховують територіальну специфіку лінійних та площинних джерел емісії в секторах дорожнього, залізничного та позашляхового транспортів. Розроблено математичні моделі та геоінформаційну технологію просторового аналізу процесів емісії парникових газів від стаціонарних джерел у секторах виробництва тепло- та електроенергії, переробки палива, виробництва промислової продукції, видобутку паливних ресурсів, а також у житловому секторі. Розроблені моделі реалізовано в створеній геоінформаційній системі. Проведено числові експерименти з просторової інвентаризації викидів вуглекислого газу, метану та закису азоту в енергетичному секторі областей Західної України. Досліджено загальну невизначеність одержаних результатів та запропоновано методи її зниження.

*Ключові слова:* геоінформаційна технологія, емісія парникових газів, енергетичний сектор, просторова інвентаризація, невизначеність.

**Гамаль Х. В. Геоинформационные технологии пространственного анализа эмиссии парниковых газов в энергетическом секторе. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – «Информационные технологии». – Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2009.

Диссертация посвящена разработке методов пространственного анализа эмиссий парниковых газов в энергетическом секторе и созданию на их основе геоинформационных технологий инвентаризации парниковых газов на региональном уровне.

Предложен метод пространственной инвентаризации парниковых газов, базирующийся на использовании точечных, линейных и плоскостных источников эмиссии, что дает возможность учитывать специфику эмиссионных процессов на уровне элементарных объектов заданного размера.

Все источники эмиссии в энергетическом секторе разбито на ряд категорий и для каждой из них разработан общий подход к проведению пространственной инвентаризации выбросов парниковых газов. Предложены математические модели и созданы геоинформационные технологии пространственной инвентаризации выбросов парниковых газов для стационарных и мобильных источников эмиссии в энергетическом секторе.

Модели охватывают процессы эмиссии парниковых газов прямого действия от дорожного, внедорожного и железнодорожного транспорта, эмиссии от сжигания топлива при производстве тепло- и электроэнергии, перегонке нефти, отоплении жилых помещений, производстве промышленной продукции и строительстве, а также летучие выбросы при добыче угля и в нефтегазовых системах.

Разработанные математические модели реализованы в созданной геоинформационной системе. С использованием цифровых карт и реальных статистических данных осуществлены числовые эксперименты по пространственной инвентаризации выбросов углекислого газа, метана и закиси азота в энергетическом секторе административных областей Западной Украины. Проанализировано территориальное распределение выбросов парниковых газов и их структуру.

Исследовано общую неопределенность полученных результатов и предложены эффективные методы ее снижения.

*Ключевые слова:* геоинформационная технология, эмиссия парниковых газов, энергетический сектор, пространственная инвентаризация, неопределенность.

**Hamal Kh. Geoinformation technology for spatial analysis of greenhouse gas emissions in Energy sector. – Manuscript.**

Thesis for a candidate's degree on the speciality 05.13.06 – “Information technologies”. – Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2009.

This thesis is dedicated to creation of methods of spatial greenhouse gas analysis in Energy sector as well as to the development of geoinformation technologies for greenhouse gas inventory for the regional level on the basis of created methods.

Mathematical models and geoinformation technology of spatial analysis of processes of greenhouse gas emissions from mobile sources on the level of elementary plots are developed; these models take into account territorial specificity of line and area sources in road, railway and off-road transport sectors. Mathematical models and geoinformation technology of spatial analysis of processes of greenhouse gas emissions from stationary sources are developed; they include greenhouse gas emission sources in heat and electricity generation processes, in oil refinery processes, in residential sector, in industry as well as in coal, gas and oil systems. Developed models are realized in the designed geoinformation system. Numerical experiments dedicated to spatial inventory of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in Energy sector are carried out for administrative regions of Western Ukraine. General uncertainty of obtained results is analyzed and effective methods for reducing uncertainty are proposed.

*Key words:* geoinformation technology, greenhouse gas emissions, Energy sector, spatial inventory, uncertainty.