Міністерство освіти і науки України
Національний університет "Львівська політехніка"

Чарковська Надія Василівна

УДК 004.942:519.876.5

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ У ПРОМИСЛОВОМУ ТА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ СЕКТОРАХ ПОЛЬЩІ

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, ст. наук. співр.
Журавчак Любов Михайлівна,
Карпатське відділення Інституту геофізики
ім. С.І. Субботіна НАН України,
старший науковий співробітник

кандидат технічних наук, доцент, ст. наук. співр.
Юзефович Роман Михайлович,
Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України,
завідувач лабораторії вібродіагностики

Захист відбудеться 29 квітня 2015 р. о 16 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 27 березня 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 із найбільших екологічних глобальних проблем сучасності. Вчені стверджують, що основною причиною глобального потепління є не що інше, як збільшення концентрації парникових газів у атмосфері. Наслідки глобального потепління спостерігаємо вже зараз: підвищення рівня світового океану, почастішання посух та повеней тощо. Саме людська діяльність призвела до підсилення парникового ефекту. Зміни клімату ще можливо відвернути, але для цього необхідно стабілізувати рівень концентрації парникових газів у атмосфері. Тому на сьогодні першочерговим питанням міжнародних переговорів є домовленості зі зменшення рівня емісій парникових газів.

Найбільшими секторами у сенсі емісій після енергетичного сектору є промисловий та сільськогосподарський сектори, особливо процеси виробництва цементу, аміаку, чавуну, а також тваринництво. Тому актуальними є задачі розроблення інструментарію для моделювання таких процесів і отримання на цій основі нових знань для підтримки прийняття зважених рішень.

Відомі підходи до здійснення інвентаризації парникових газів не враховують особливості кожного джерела емісії. Проте при аналізі процесів емісії на малих ділянках території доцільно мати просторові кадастри емісії від кожного джерела. Зокрема, це можна використовувати для зменшення емісій у результаті впровадження новітніх технологій на промислових підприємств, а також шляхом змін у сільськогосподарській практиці.

Значний внесок у розроблення математичних моделей процесів емісії та поглинання парникових газів і їх просторового аналізу зробили українські вчені Бунь Р.А., Бойчук Х.В. та Лесів М.Ю. Серед закордонних фахівців варто відзначити роботи Petr Havlik, Hugo Valin, Michael Obersteiner, Stephane De Cara, Martin Houze, Pierre-Alain Jayet та інших.

У ряді випадків необхідно мати інформацію про обсяги емісій парникових газів від діяльності підприємств на невеликих ділянках території. Тому виникає потреба у розроблені математичних моделей процесів емісії парникових газів на рівні джерел емісії та геоінформаційної технології просторового моделювання емісії цих газів з урахуванням географічної прив’язки відповідних джерел. Результати аналізу емісій у розрізі елементарних об’єктів, що містять географічну прив’язку, мають широке коло застосувань для прийняття зважених та ефективних рішень щодо зменшення рівня емісій у країні загалом.

Відтак розроблення математичних моделей та методів просторового аналізу емісій парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторах, а також при оперуванні з відходами на прикладі Польщі, є актуальним науковим завданням, вирішення якого дає можливість моделювати емісійні процеси на достатньо невеликих ділянках території, і при цьому забезпечити природоохоронні органи якісно новою інформацією про найбільші джерела емісії з метою вироблення ними стратегій щодо скорочення емісій та запобігання кліматичним змінам.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувалися у рамках планових наукових робіт кафедри прикладної

математики Національного університету „Львівська політехніка”, а також ряду міжнародних договорів та проектів, зокрема гранту 7РП ЄС “Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів” (MarieCurieProjectn°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES; 2010-2014 рр.); українсько-австрійського проекту „Регіональний просторовий кадастр емісій парникових газів з врахуванням невизначеностей вхідних даних” (номер державної реєстрації 0112U003944, 2011-2012 рр.); українсько-китайського проекту "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень" (номер державної реєстрації 0113U001997, 2013-2014 рр.); держбюджетної теми “Геоінформаційні технології побудови регіональних кадастрів емісії парникових газів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень” (номер державної реєстрації 0111U001210, 2011-2012 рр.); держбюджетної теми “Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень” (номер державної реєстрації 0113U003181, 2013-2014 рр.).

У рамках виконання цих робіт автор дисертації розробила математичні моделі, методи та програмні засоби просторового аналізу емісії парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторах, що дало можливість сформувати зручні для сприйняття просторові кадастри емісій парникових газів та аналізувати структуру емісій на різних рівнях: на рівні окремих підприємств, регіонів та елементарних ділянок території.

Мета та задачі дослідження. *Метою* дисертаційної роботи є підвищення роздільної здатності просторових кадастрів емісій парникових газів шляхом розроблення математичних моделей та геоінформаційних технологій для просторового аналізу емісій парникових газів від промислової, сільськогосподарської діяльності та оперуванні з відходами на прикладі Польщі.

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

- аналіз відомих підходів та методів оцінювання емісій парникових газів від промислової та сільськогосподарської діяльності, а також оперування з відходами;
- дослідження специфіки емісійних процесів та особливостей джерел емісії у кожному із аналізованих секторів;
- розроблення математичних моделей процесів емісії парникових газів при виробництві промислової продукції (мінеральних, хімічних речовин, металів тощо), від тваринництва та сільськогосподарських ґрунтів, при оперуванні з відходами (захоронення на звалищах, спалювання тощо);
- створення геоінформаційної технології моделювання та просторового аналізу процесів емісії парникових газів, що використовує статистичні дані про промислову та сільськогосподарську діяльності, коефіцієнти емісії та цифрові карти аналізованих об’єктів;
- відповідно до наявної доступної інформації розроблення алгоритмів дезагрегації статистичних даних до рівня точкових/площинних джерел емісії в аналізованих секторах;

- формування бази геопросторових даних з інформацією про джерела емісії парникових газів у кожному аналізованому секторі;
- здійснення обчислювальних експериментів з моделювання процесів емісії парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторі, а також секторі “Відходи”;
- аналіз невизначеностей результатів просторової інвентаризації парникових газів у досліджуваних секторах господарської діяльності у Польщі.

Об’єктом дослідження є процеси емісії парникових газів при виробництві промислової продукції, веденні сільського господарства та оперуванні з відходами.

Предметом дослідження є математичні моделі емісійних процесів у промисловому, сільськогосподарському секторі та секторі “Відходи”, методи моделювання та просторового аналізу процесів емісії парникових газів та методи аналізу невизначеності результатів інвентаризації парникових газів у цих секторах у Польщі.

Методи дослідження. При формуванні бази геопросторових даних використано елементи геокодування для точкових, лінійних та площинних джерел емісії парникових газів, а також теорію баз даних. При розробленні математичних моделей емісійних процесів застосовано елементи теорії множин. Для моделювання процесів емісій парникових газів використано методи теорії ймовірності та математичної статистики, а при аналізі невизначеностей оцінок емісій по категоріях джерел емісії застосовано метод стохастичного моделювання – метод Монте-Карло.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі отримано такі нові наукові результати:

- вперше розроблено геопросторові математичні моделі процесів емісії парникових газів при виробництві промислової продукції у Польщі (виробництво основних мінеральних та хімічних речовин, металів, целюлозно-паперової і харчової галузей), які, на відміну від відомих, використовують геопросторові дані про джерела емісії, базуються на принципі дезагрегації статистичних даних до рівня точкових та площинних джерел емісії і дають можливість враховувати специфіку емісійних процесів на окремих промислових підприємствах;
- вперше розроблено геопросторові математичні моделі емісійних процесів у сільському господарстві (тваринництві та рослинництві) та при оперуванні з відходами (комунальними та промисловими) у Польщі, особливістю яких є використання геопросторових даних землекористування та принципів дезагрегації статистичних даних до рівня площинних джерел емісії (поголів’я сільськогосподарських тварин, ділянок орних земель, пасовищ, промислових зон тощо) і які дають можливість враховувати регіональні особливості аналізованих процесів та специфіку подання статистичних даних;
- вперше розроблено геоінформаційну технологію моделювання та просторового аналізу емісій парникових газів у промисловості та сільському господарстві (у тваринництві та рослинництві) Польщі, яка використовує геопросторові бази даних та дає можливість будувати просторові кадастри емісій у цих секторах;

- дістав подальшого розвитку метод аналізу невизначеності (непевності) результатів просторової інвентаризації парникових газів, який розширено на основні категорії промислового та сільськогосподарського секторів у Польщі і який базується на геопросторових даних про емісії та 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 емісійних процесів та геоінформаційна технологія їх реалізації дають можливість:

- автоматизовано формувати набори геопросторових даних для точкових та площинних джерел емісій парникових газів у досліджуваних секторах;
- враховувати особливості технологічних процесів на промислових підприємствах та їх специфічні коефіцієнти емісії;
- моделювати емісійні процеси у сільському господарстві з врахуванням специфічних параметрів та коефіцієнтів емісії;
- будувати просторові кадастри емісії парникових газів на рівні промислових підприємств, ділянок сільськогосподарських земель, міських територій чи елементарних ділянок встановленого розміру;
- наочно ілюструвати результати моделювання та просторового аналізу емісій парникових газів у вигляді цифрових карт по різних регіонах країни, підприємствах тощо;
- аналізувати невизначеність (непевність) результатів просторової інвентаризації з врахуванням симетричних та несиметричних невизначеностей вхідних даних.

Реалізація результатів та впровадження. Результати дисертаційних досліджень використано: в Інституті системного аналізу Польської академії наук, м.Варшава (при виконанні роботи «Результати просторового аналізу у вигляді кадастрів емісії двоокису вуглецю, метану і закису азоту, що спричинені хімічними перетвореннями, а також тваринництвом та рослинництвом»); 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” (геоінформаційну технологію та математичні моделі, методи і алгоритми просторового аналізу емісій парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторах, а також при оперуванні з відходами у Польщі); при виконанні українсько-австрійського проекту (методи оцінювання загальної невизначеності результатів інвентаризації парникових газів у промисловому і сільськогосподарському секторах, а також методи аналізу впливу структурних змін в емісіях цих секторів на загальну невизначеність); при виконанні українсько-китайського проекту (аналіз співвідношення між обсягами емісій парникових газів від сільськогосподарських тварин у домогосподарствах та емісіями від спалювання викопного палива населенням на регіональному рівні); при виконанні двох держбюджетних тем Національного університету „Львівська політехніка” (математичні моделі та алгоритми, а також геоінформаційну технологію просторового аналізу емісій парникових газів у різноманітних категоріях промисловості, а також у тваринництві та рослинництві на регіональному рівні; підходи до оперування в геоінформаційній системі

площинними об'єктами при визначенні змін у землекористуванні, пов'язаних із зміною площ лісів та сільськогосподарських угідь); у Державному заповіднику „Розточчя" (аналіз результатів антропогенного впливу на природне середовище в сусідніх із заповідником територіях, зокрема процесів емісії парникових газів у промисловості та сільському господарстві). Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі в Національному університеті „Львівська політехніка" в лекційних курсах освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр" (спеціальність 8.04030101 „Прикладна математика"; спеціальність 8.04030103 „Математичне та комп'ютерне моделювання").Акти про використання результатів дисертаційних досліджень наведено в додатку.

Особистий внесок здобувача. Усі результати розв'язання поставлених у дисертації задач отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1, 4, 6, 9, 10] – розроблення математичних моделей процесів емісії парникових газів від виробництва основних мінеральних, хімічних речовин, металів, целюлозно-паперової і харчової галузей промислового сектору Польщі; [7, 8, 13, 18] – розроблення математичних моделей просторової інвентаризації парникових газів від внесення різного роду добрив у сільськогосподарські ґрунти Польщі та вигодовування сільськогосподарських тварин; [3, 15] – математичне моделювання емісійних процесів на звалищах твердих побутових відходів та геоінформаційна технологія формування геопросторових даних про емісії від оперування з відходами у Польщі; [2, 16] – використання цифрових карт землекористування для розмежування сільськогосподарських угідь та лісових масивів при просторовому аналізі емісій та поглинань парникових газів у лісовому господарстві Польщі; [14] – аналіз вхідних даних при просторовому оцінюванні емісій парникових газів від використання твердих видів палива у сільській місцевості; [5] – розроблення геоінформаційної технології моделювання та просторового аналізу емісій у межах кожної ділянки орних земель; [11] – візуалізація результатів просторового аналізу емісій парникових газів на прикладі промислового та сільськогосподарського секторів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідались на всеукраїнських та міжнародних конференціях, зокрема на: International Workshop on Geoinformation Technologies, Spatio-Temporal Approaches, and Full Carbon Account for Improving Accuracy of GHG Inventories" (GESAPU) (Warsaw, Poland, 2014); 6th International Conference of Young Scientists "Computer Science and Engineering" (CSE) (Lviv, 2013); XII Konferencja Polskiego Towarzystwa Badań Operacyjnych i Systemowych (Warszawa, Poland, 2012); Міжнар. конф. та школи молодих вчених з вимірювання, моделювання та інформаційних систем для вивчення навколишнього середовища (ENVIROMIS-2014) (Томськ, Росія); 3-й Всеукр. наук.-практ. конф. "Сучасні технології в економіці, менеджменті та освіті" (СІТЕМ) (Львів, 2012); Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів "Екологічна безпека держави" (ЕБД) (Київ, 2013); 2-й Міжнар. наук.-техн. конф. "Обчислювальний інтелект-2013 (результати, проблеми, перспективи)" (ComInt-2013) (Черкаси, 2013); 2-й Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів "Інтелектуальні технології в системному програмуванні" (ІТСП) (Хмельницький, 2013); Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених "Інформаційні технології, економіка та право" (ІТЕП) (Чернівці,

2014); Всеукр. наук.-практ. конф. “Інформатика та системні науки” (Полтава, 2013); 10-й Міжнар. студ. наук. конф. з прикладної математики та інформатики (СНКПМІ) (Львів, 2012); 10-й та 11-й Відкр. наук. конф. Інституту прикладної математики та фундаментальних наук, PSC-IMFS-2012, PSC-IMFS-2013 (Львів, 2012, 2013), а також на наукових семінарах кафедри прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка" (2011-2014).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 20 наукових праць, серед яких 2 статті у закордонному періодичному виданні [1, 2], 5 статей у наукових фахових виданнях України, в тому числі 4 статті у виданнях з технічних наук [3-6], одна стаття у виданні з технічних наук (екологічна безпека) [7], 13 публікацій у матеріалах наукових конференцій [8-20].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 154 найменувань та трьох додатків. Робота викладена на 224 сторінках, містить 147 сторінок основного тексту, 46 рисунків та 27 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** проаналізовано відомі підходи та методи до моделювання процесів емісії парникових газів в трьох основних секторах господарської діяльності – промисловості, сільському господарстві та оперуванні з відходами. Здійснено огляд основних методик інвентаризації парникових газів на загальнодержавному рівні та важливість їх розроблення і застосування в плані виконання міжнародних зобов’язань щодо скорочення емісій парникових газів. Обґрунтовано доцільність розроблення математичних моделей та геоінформаційних технологій для геопросторової інвентаризації цих газів, що дасть змогу будувати просторові кадастри емісій та отримати реальну об’єктивну картину щодо структури цих емісій у досліджуваних секторах. Здійснено огляд наукової літератури, присвяченої глобальній зміні клімату, моделюванню процесів емісій парникових газів у ключових категоріях промисловості та сільського господарства, інвентаризації парникових газів та просторовому аналізу емісій, альтернативним шляхам щодо зниження рівня емісій.

Показано, що підхід до інвентаризації парникових газів «знизу-вверх» є досить ефективним, оскільки дає можливість використовувати специфічні коефіцієнти емісії для окремих регіонів чи навіть для підприємств, що підвищує точність інвентаризації і зменшує невизначеність загальних результатів інвентаризації.

Другий розділ присвячено просторовому моделюванню процесів емісії парникових газів у промисловому секторі Польщі. Проаналізовано специфіку емісійних процесів у кожній категорії (окремо для підприємств цементної, хімічної, металургійної, харчової та целюлозно-паперової галузей) та особливості джерел емісії. Обґрунтовано підходи до просторового моделювання процесів емісії парникових газів при виробництві промислової продукції, який полягає у представленні кожного крупного підприємства, яке характеризується значними емісіями парникових газів та відносною малою площею, точковим джерелом

емісії з відповідною географічною прив'язкою. Визначено найбільші такі промислові підприємства з використанням їх географічних координат, отриманих за допомогою програми Google Earth. При проведенні просторового моделювання важливою є наявність вхідних даних на рівні окремого підприємства про показники діяльності (обсяги випуску промислової продукції і т.д.) та допоміжні параметри для інвентаризації емісій парникових газів, що впливають на коефіцієнти емісій (наприклад, особливості технологічних процесів). Для таких точкових джерел (великих підприємств) індикатором дезагрегації статистичних даних (відомих на рівні країни) вважаємо виробничу потужність підприємств.

Також обґрунтовано підхід до просторового моделювання процесів емісії парникових газів від харчової та целюлозно-паперової промисловості: крупні підприємства, локалізація яких є відомою, вважаємо точковими, натомість сукупність дрібніших підприємств місцевого значення вважаємо площинним джерелом емісії у межах відповідного населеного пункту, причому припускаємо, що інтенсивність функціонування таких підприємств пропорційна густоті міського населення.

Обґрунтовано математичні описи процесів емісії парникових газів від усіх великих промислових підприємств, які враховують територіальне розміщення цих точкових джерел емісії та специфіку подання статистичної звітності. Ці описи охоплюють емісії різних парникових газів, різні статистичні дані (виробництво цементу, аміаку, нітратної кислоти та інші), залежать від коефіцієнтів емісії та коефіцієнтів глобального потепління. Такі математичні моделі процесів емісії парникових газів розроблено для усіх точкових джерел емісії у кожній із аналізованих категорій. Наприклад, річні емісії вуглекислого газу від ζ_n-ого підприємства з виробництва цементу представлено у вигляді

$$E^{\mathrm{CO_2}}_{\mathrm{Cement}}(\zeta_n) = F_{\mathrm{stat}_{\mathrm{clinker}}}(\zeta_n)\cdot K^{\mathrm{CO_2}}_{\mathrm{clinker}}(\zeta_n)\cdot K_{CKD},\ \ \zeta_n \in \Xi_{\mathrm{cement}},\ \ n=\overline{1,N_{\mathrm{cement}}}, \quad (1)$$

де $F_{\mathrm{stat}_{\mathrm{clinker}}}$ – дані про виробництво клінкеру ζ_n-м підприємством, які обчислюємо з використанням алгоритмів дезагрегації та відповідних індикаторів дезагрегації на основі відомих статистичних даних; $K^{\mathrm{CO_2}}_{\mathrm{clinker}}$ – специфічний коефіцієнт емісії вуглекислого газу для клінкеру для ζ_n-ого підприємства; K_{CKD} – коефіцієнт поправки на втрати спричинені цементним пилом; Ξ_{cement} – множина підприємств з виробництва цементу; N_{cement} – кількість таких підприємств.

Розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів при виробництві продуктів харчування, зокрема м'ясопродуктів, та відповідні алгоритми дезагрегації даних про виробництво м'ясопродуктів з рівня воєводств до рівня елементарних ділянок. Нехай $\Delta=\{\delta_n, n=\overline{1,N}\}$ – множина елементарних ділянок, які утворюються у результаті накладання на карту досліджуваної території допоміжної сітки заданого кроку, де N – кількість таких ділянок; $\tilde{R}_1=\{R_{1,n_1}, n_1=\overline{1,N_1}\}$ – множина адміністративних-територіальних одиниць "першого рівня" (воєводств), N_1 – кількість таких одиниць; $\Xi^{R_{1,n_1}}_{\mathrm{meat}}=\left\{\xi^{R_{1,n1}}_{\mathrm{meat},n_p}, n_p=\overline{1,N^{R_{1,n1}}_{\mathrm{meat}}}\right\}$ – множина великих точкових джерел емісії у воєводстві R_{1,n_1} – крупних

підприємств з виробництва м'ясопродуктів, обсяги виробництва яких є відомі, $N_{\text{meat}}^{R_{1,n1}}$ – кількість таких підприємств. Нехай також $\widetilde{S}^{urb,R_{1,n_1}} = \widetilde{S}^{urb} \cap R_{1,n_1}$, $\widetilde{S}^{urb,R_{1,n_1}} = \left\{ S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}, n_{urb,s} = \overline{1, N_{urb}^{R_{1,n1}}} \right\}$ – множина міст та селищ міського типу у воєводстві R_{1,n_1}, тобто $S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}} \subset R_{1,n_1}$. Обсяги виробництва м'ясопродуктів невеликими підприємствами у місті $S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}$ обчислюємо, використовуючи формулу:

$$D_{\text{meat,small}}\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right) = \frac{1}{P\left(R_{1,n_1}\right)} \cdot \left[D_{\text{meat}}\left(R_{1,n_1}\right) - \sum_{n_p=1}^{N_{\text{meat}n_p}^{R_{1,n1}}} D_{\text{meat}}\left(\xi_{\text{meat},n_p}^{R_{1,n1}}\right) \right] \cdot P\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right), \qquad (2)$$

де $D_{\text{meat,small}}\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right)$ – шукані обсяги виробництва м'ясопродуктів малими підприємствами у місті $S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}$; $D_{\text{meat}}\left(R_{1,n_1}\right)$ – обсяги виробництва м'ясопродуктів усіма великими та малими підприємствами у воєводстві R_{1,n_1}; $D_{\text{meat}}\left(\xi_{\text{meat},n_p}^{R_{1,n1}}\right)$ – дані про виробництво м'ясопродуктів $\xi_{\text{meat},n_p}^{R_{1,n1}}$-м великим підприємством цього воєводства; $P\left(R_{1,n_1}\right)$ та $P\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right)$ – кількість населення у воєводстві R_{1,n_1} та місті $S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}$, відповідно.

Для оцінювання емісій від виробництва м'ясопродуктів на рівні елементарних ділянок достатньо малого розміру насамперед необхідно від статистичних даних про обсяги виробництва м'ясопродуктів (відомих на рівні воєводств) відняти відомі обсяги виробництва великих підприємств, як точкових джерел, і отримані таким чином значення $D_{\text{meat,small}}\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right)$ дезагрегувати пропорційно до частки населення міста в елементарній ділянці таким чином:

$$c\left(\delta_n, S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right) == \frac{d\left(\delta_n\right) \cdot area\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}} \cap \delta_n\right)}{P\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right)}, \; n = \overline{1, N}, \qquad (3)$$

де $c\left(\delta_n, S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right)$ – коефіцієнт, який вказує, яка частка δ_n-ї елементарної ділянки належить місту $S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}$ (цей коефіцієнт дорівнює одиниці, якщо елементарна ділянка повністю знаходиться у межах аналізованого міста); $d\left(\delta_n\right)$ – густота населення в *n*-й елементарній ділянці;. $P\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right)$– кількість населення у місті $S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}$, до якого належить *n*-та елементарна ділянка, тобто $\delta_n \subset S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}$ (географічний об'єкт δ_n знаходиться у межах географічного об'єкту $S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}$), $area(x)$ – площа об'єкту x, $\bigcap$ – операція знаходження спільної території двох географічних об'єктів.

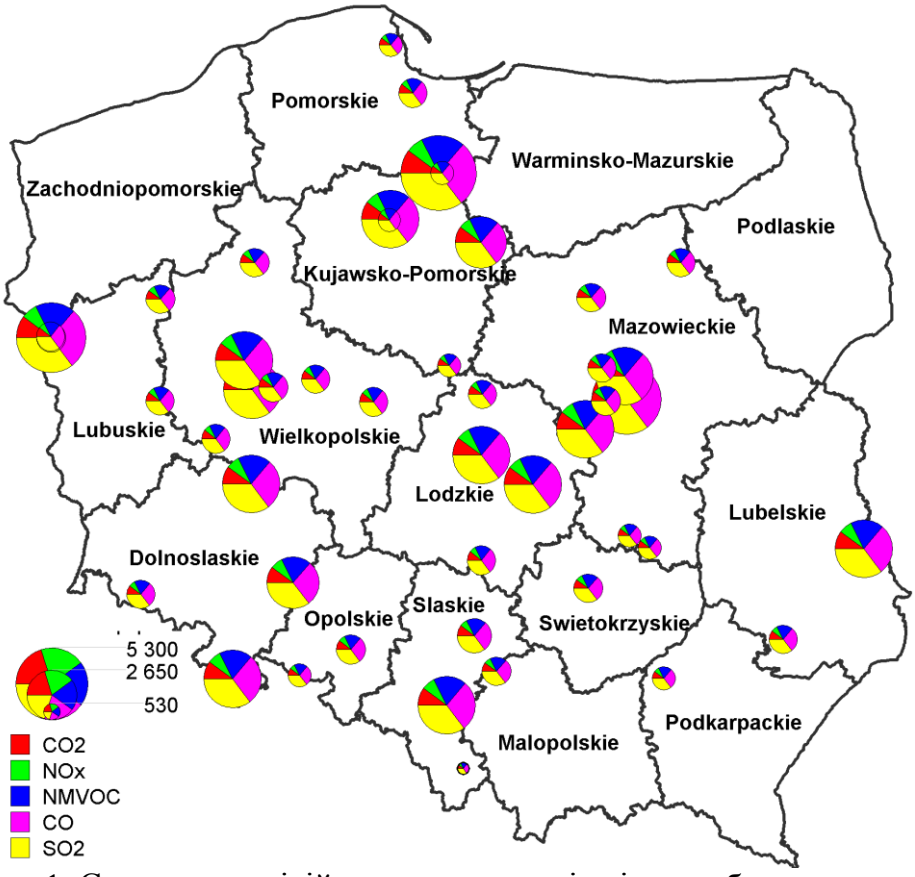

Рис. 1. Структура емісій парникових газів від виробництва паперу по підприємствах Польщі за типом газу (т, 2010 р.)

Процесам емісії летких неметанових органічних сполук від виробництва м'ясопродуктів з урахуванням відомої діяльності окремих великих підприємств $\xi^{R_{1,n1}}_{\text{meat},n_p}$, $n_p = \overline{1, N^{\text{R}_{1,n1}}_{\text{meat},p}}$, а також невідомої діяльності малих підприємств поставлено у відповідність математичну модель (у випадку, коли жодне велике підприємство не потрапляє в елементарну ділянку δ_n):

$$^{(1)}E^{\text{NMVOC}}_{\text{meat}}(\delta_n) = D_{\text{meat,small}}\left(S^{urb,R_{1,n1}}_{n_{urb,s}}\right) \times K^{\text{NMVOC}}_{\text{meat}}(\delta_n) \times c\left(\delta_n, S^{urb,R_{1,n1}}_{n_{urb,s}}\right), \ \forall n_p, \xi^{R_{1,n1}}_{\text{meat},n_p} \notin \delta_n, \qquad (4)$$

де $^{(1)}E^{\text{NMVOC}}_{\text{Meat}}(\delta_n)$ – емісії у межах δ_n-ї елементарної ділянки; $K^{\text{NMVOC}}_{\text{meat}}(\delta_n)$ – коефіцієнт емісії летких неметанових органічних сполук у цій ділянці.

Натомість у випадку, коли в межах δ_n-ї елементарної ділянки міститься одне чи декілька великих м'ясопереробних підприємств, математична модель процесів емісії летких неметанових сполук має вигляд:

$$^{(2)}E^{\text{NMVOC}}_{\text{Meat}}(\delta_n) = {}^{(1)}E^{\text{NMVOC}}_{\text{Meat}}(\delta_n) + \sum_{n_p=1,\ \xi^{R_{1,n1}}_{\text{meat},n_p} \subset \delta_n}^{N_{meat,}} \left[D_{\text{meat}}\left(\xi^{R_{1,n1}}_{\text{meat},n_p}\right) \times K^{\text{NMVOC}}_{\text{meat}}\left(\xi^{R_{1,n1}}_{\text{meat},n_p}\right) \right], \qquad (5)$$

де $K^{\text{NMVOC}}_{\text{meat}}\left(\xi^{R_{1,n1}}_{\text{meat},n_p}\right)$ – коефіцієнт емісії на підприємстві $\xi^{R_{1,n1}}_{\text{meat},n_p}$.

З використанням розроблених підходів, математичних моделей та програмних засобів, які їх реалізують, здійснено обчислювальні експерименти та побудовано просторові кадастри емісій парникових газів у аналізованих категоріях, а також досліджено територіальну нерівномірність цих процесів. Як приклад, на рис. 1 проілюстровано результати просторового аналізу емісій парникових газів непрямої дії при виробництві паперу по підприємствах.

Представлена на рис. 2 тематична карта відображає узагальнені результати просторового моделювання емісій парникових газів непрямої дії у промисловому секторі по воєводствах та за типом газу. Лідерами в сенсі емісій парникових газів є території Великопольського та Мазовецького воєводств, де зосереджена найбільша кількість підприємств харчової промисловості.

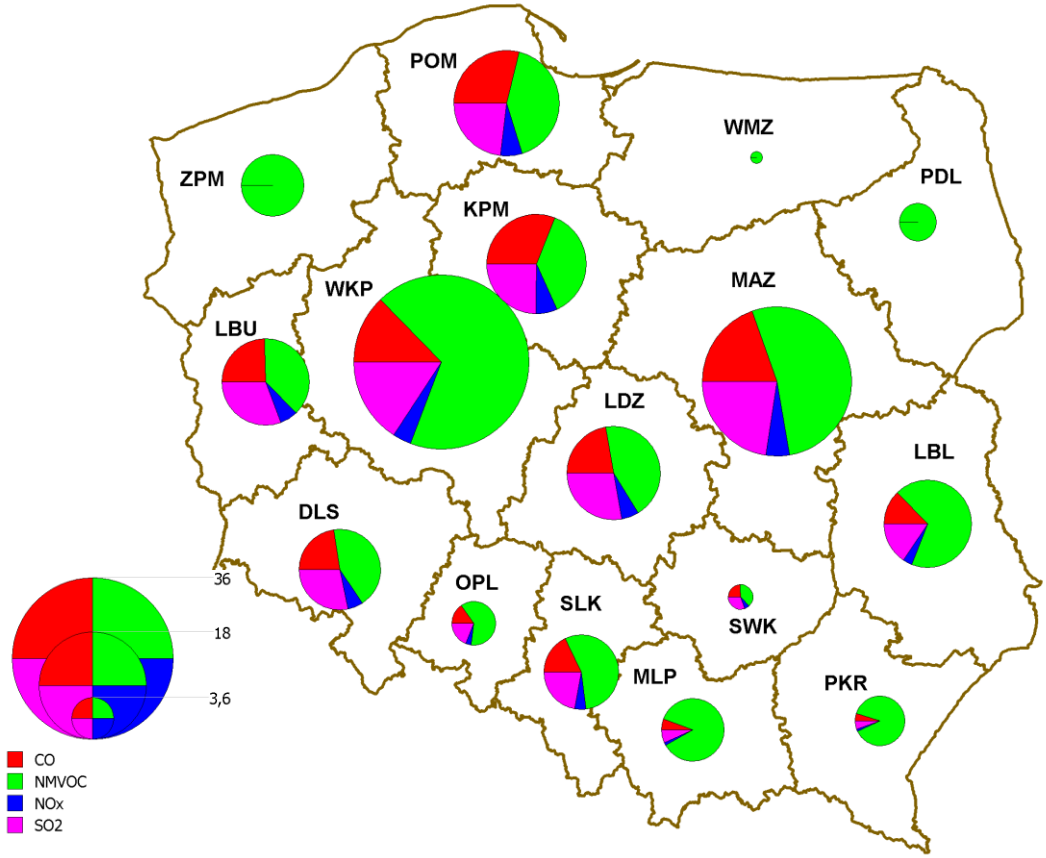

Рис. 2. Територіальний розподіл сумарних емісій парникових газів непрямої дії у промисловому секторі на рівні воєводств Польщі (2010 р., тис. т, CO_2-еквівалент)

Третій розділ присвячено просторовому моделюванню емісійних процесів у сільськогосподарському секторі Польщі. Специфіка подання статистичної інформації така, що дані про поголів'я тварин подають окремо для сільськогосподарських підприємств та індивідуальних господарств (сільського населення). У плані проведення просторового моделювання емісій парникових газів, врахування такого поділу є принциповим, оскільки алгоритми дезагрегації статистичних даних для цих джерел емісії відрізняються.

Розроблено загальний підхід до формування просторового кадастру емісій парникових газів у сільськогосподарському секторі Польщі. Сформовано базу геопросторових вхідних даних для територій населених пунктів, які виступають площинними джерелами емісії (для моделювання у тваринництві), при цьому використано карту густоти населення, а також сформовано базу геопросторових даних для територій орних земель, як джерел площинного типу. Для формування геопросторової бази вхідних даних використано розроблені алгоритми дезагрегації статистичних даних.

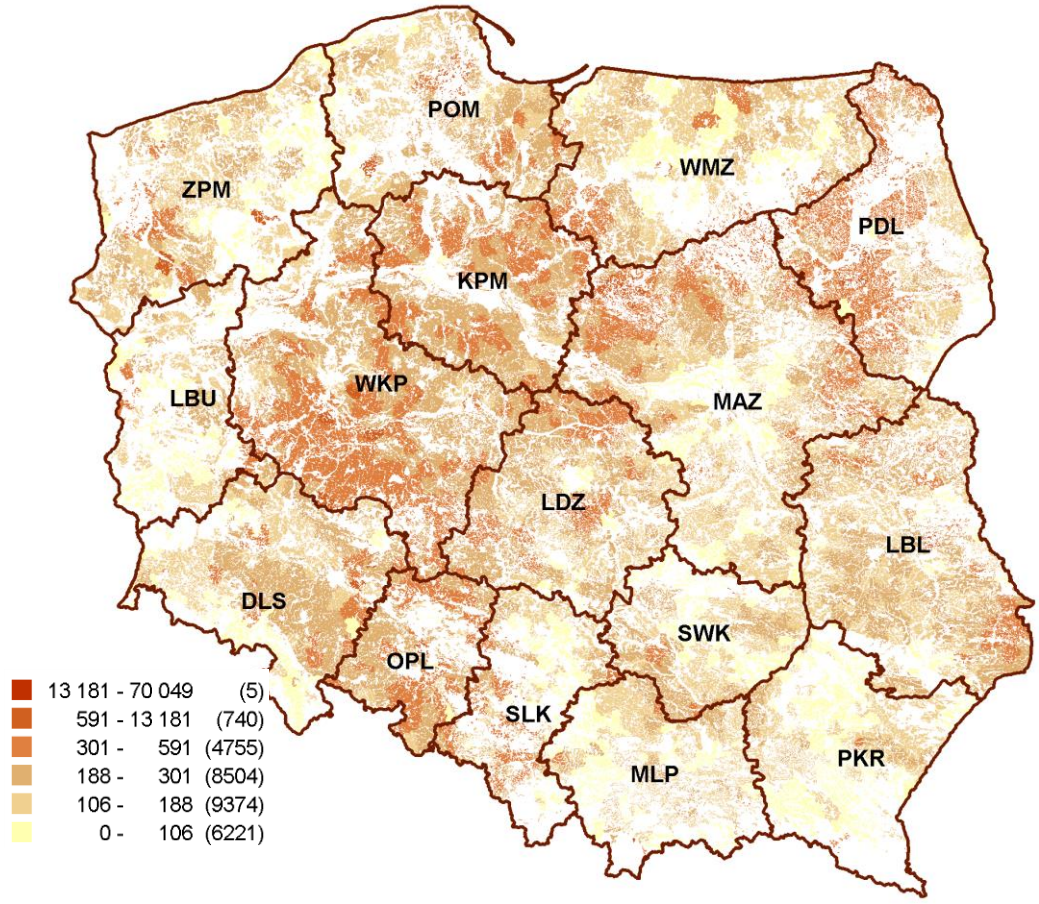

Рис. 3. Річні питомі емісії закису азоту від удобрення орних земель на рівні окремих ділянок земель (2010 рік, кг/км^2, N_2O)

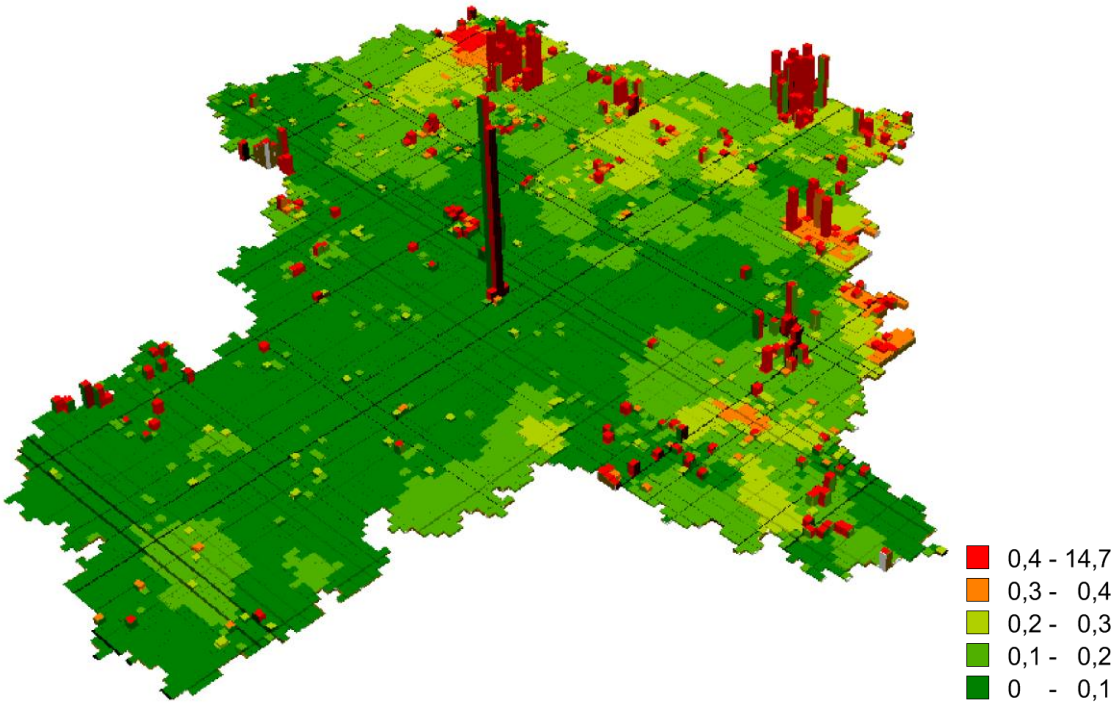

Рис. 4. Карта-призма сумарних питомих емісій від сільськогосподарського сектору на рівні елементарних ділянок 2 км х 2 км для Мазовецького воєводства Польщі (2010 р., тис. тон / км^2, CO_2-еквівалент)

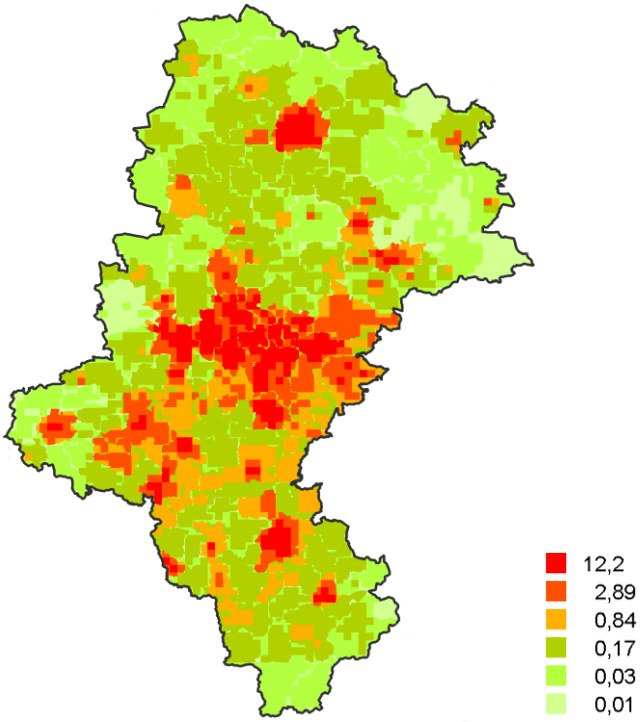

Рис. 5. Результати просторового аналізу емісії парникових газів від сектору “Відходи” на рівні елементарних ділянок 2 км х 2 км для Сілезького воєводства (тис. т, CO_2-еквівалент, 2010 р.)

Ці алгоритми дезагрегації статистичних даних про поголів’я тварин з рівня гмін до рівня елементарних ділянок використовують два різні індикатори дезагрегації: густоту сільського населення для дезагрегації даних про поголів’я тварин у власності населення та площу сільськогосподарських земель для дезагрегації даних про поголів’я тварин у власності фермерських підприємств.

Розроблено математичні моделі процесів емісії метану від кишкової ферментації та розкладання гною тварин у Польщі, які враховують територіальне розміщення цих тварин та специфіку подання статистичної звітності про поголів’я на рівні адміністративно-територіальних одиниць – гмін Польщі.

Також математично описано складні процеси емісії закису азоту при веденні діяльності на сільськогосподарських угіддях (внесення різноманітних добрив тощо). Наприклад, процесам емісії метану від кишкової ферментації тварин, що перебувають у власності як населення, так і сільськогосподарських підприємств поставлено у відповідність математичну модель:

$$E^{\mathrm{CH_4}}_{EntFerm}(\delta_n) = \sum_{t=1}^{T}\left[A_t^{ind}\left(R_{3,n_3}\right)\cdot V(\delta) + A_t^{agr}\left(R_{3,n_3}\right)\cdot S(\delta_n)\right]\cdot K_t^{\mathrm{CH_4}}(\delta_n), \quad n=\overline{1,N}, \tag{6}$$

де $E^{\mathrm{CH_4}}_{EntFerm}(\delta_n)$ – річні сумарні емісії метану в n-й елементарній ділянці δ_n; $A_t^{ind}\left(R_{3,n_3}\right)$ та $A_t^{agr}\left(R_{3,n_3}\right)$ – статистичні дані про поголів’я t-го виду тварин у власності населення (*ind*) та сільськогосподарських підприємств (*agr*) за відповідний рік у гміні R_{3,n_3}, до якої відноситься елементарна ділянка δ_n; $K_t^{\mathrm{CH_4}}(\delta_n)$ – коефіцієнт емісії метану від внутрішньої ферментації для t-го виду тварин в n-й елементарній ділянці (в принципі, цей коефіцієнт залежить від кліматичної зони, в якій розміщена аналізована ділянка); індекс *EntFerm* вказує, що це є емісії від кишкової ферментації.

Коефіцієнт $V(\delta_n)$ позначає відношення кількості населення в аналізованій елементарній ділянці до кількості населення у гміні і його можна обчислити як:

$$V(\delta_n) = \frac{p(\delta_n)\cdot area\left(R_{3,n_3}\cap\delta_n\right)}{P\left(R_{3,n_3}\right)}, \quad n=\overline{1,N}, \tag{7}$$

де $V(\delta_n)$ – шукана частка населення в n-й елементарній ділянці δ_n; N – загальна кількість таких ділянок на території Польщі; $p(\delta_n)$ – густота населення в n-й елементарній ділянці; $P\left(R_{3,n_3}\right)$ – кількість населення у гміні R_{3,n_3} – адміністративній

одиниці третього рівня, до якої належить *n*-та елементарна ділянка, тобто $\delta_n \subset R_{3,n_3}$ (географічний об'єкт δ_n знаходиться в межах географічного об'єкту R_{3,n_3}), причому $n_3 \in \overline{[1,N_3]}$; N_3 – кількість гмін.

У випадку, коли інформація про розташування великих сільськогосподарських підприємств відсутня, то все поголів'я тварин, що є у власності таких підприємств, дезагрегуємо пропорційно до площі сільськогосподарських земель таким чином:

$$S(\delta_n) = \frac{\sum_{f_i \in F} area(f_i \cap \delta_n)}{\sum_{f_j \in F} area\left(f_j \cap R_{3,n_3}\right)}, \quad \forall f_i \cap \delta_n \neq 0,\ f_j \cap R_{3,n_3} \neq 0, \quad n = \overline{1,N}, \tag{8}$$

де $S(\delta_n)$ – відношення суми площ сільськогосподарських угідь $f_i \in F$, що знаходяться у межах елементарної ділянки δ_n, до суми площ таких угідь у гміні R_{3,n_3}, до якої відноситься ця ділянка, тобто $\delta_n \subset R_{3,n_3}$, F – множина елементів цифрової карти землекористування країни загалом, які відповідають сільськогосподарським угіддям.

Залежності (7) та (8) використано у математичній моделі процесу емісії від кишкової ферментації тварин (6). Розроблена модель дає можливість формувати геопросторові кадастри емісій парникових газів у тваринництві Польщі. Всі використовувані величини характеризуються певною невизначеністю, що досліджено у розд. 5. Здійснено обчислювальні експерименти та побудовано просторові кадастри емісій парникових газів від сільськогосподарської діяльності у кожній аналізованій категорії. Як приклад, на рис. 3 представлено результати математичного моделювання питомих емісій закису азоту від внесення різних добрив у сільськогосподарські ґрунти по ділянках орних земель у межах гмін Польщі, а на рис. 4 – питомі емісії в еквіваленті вуглекислого газу (CO_2) у сільськогосподарському секторі загалом у вигляді карти-призми для Мазовецького воєводства – лідера в сенсі емісії (4 999,5 тис. т CO_2-еквіваленту або 15,6% сумарних емісій по країні). Отримані кадастри емісій засвідчили, що при веденні сільськогосподарської діяльності мали місце значні емісії парникових газів.

Четвертий розділ присвячено просторовому моделюванню емісійних процесів від оперування з відходами у Польщі. Специфіка подання статистичної інформації така, що дані про обсяги утворених відходів подають окремо для побутових (міських) та промислових. Аналогічна ситуація характерна для очищення побутових і промислових стічних вод на очисних спорудах. У плані проведення просторової інвентаризації емісій парникових газів, врахування такого поділу є принциповим, оскільки алгоритми дезагрегації статистичних даних для них відрізняються.

Обґрунтовано підхід до формування просторового кадастру емісій парникових газів при оперуванні з відходами у Польщі. Сформовано базу геопросторових вхідних даних для територій міських населених пунктів, як площинних джерел емісії, при цьому використано розроблені алгоритми дезагрегації статистичних даних.

Математична модель для оцінювання емісії метану CH_4 від обробки господарсько-побутових стічних вод на рівні елементарних ділянок має такий вигляд:

$$E_{DWW}^{CH_4}(\delta_n) = \left[P\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right) \cdot c\left(\delta_n, S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right) \cdot K_B \cdot D_{SS}(\delta_n)\right] \cdot K_{\max} \cdot K_m(\delta_n) \cdot R^{CH_4}(\delta_n), \tag{9}$$

де $E_{DWW}^{CH_4}(\delta_n)$ – річні емісії метану від очищення господарсько-побутових стічних вод у елементарній ділянці δ_n; $P\left(S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right)$ – кількість населення у місті $S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}$; $c\left(\delta_n, S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}\right)$ – отриманий на основі формули (3) коефіцієнт дезагрегації даних про кількість населення у місті $S_{n_{urb,s}}^{urb,R_{1,n1}}$ до рівня елементарної ділянки δ_n; K_B – показник біохімічної потреби в кисні (БПК) на одного мешканця; $D_{SS}(\delta_n)$ – кількість осаду, видаленого зі стічних вод; $K_{\max}$ – максимальна здатність утворення метану (зазвичай подається у кг CH_4 / кг БПК); $K_m(\delta_n)$ – коефіцієнт перетворення метану для різних систем очистки і скидання стічних вод; $R^{CH_4}(\delta_n)$ – кількість відведеного метану.

На рис. 5, як приклад, представлено результати моделювання сумарних емісій в CO_2-еквіваленті по елементарних ділянках 2 х 2 км для Сілезького воєводства Польщі. Сумарні емісії в CO_2-еквіваленті від оперування з відходами у країні загалом у 2010 році за результатами просторової інвентаризації становили 14 832,6 тис. тон.

П'ятий розділ присвячено опису розробленої геоінформаційної технології моделювання та просторового аналізу емісійних процесів у промисловості, сільському господарстві та при оперуванні з відходами у Польщі, а також аналізу невизначеності (непевності) результатів просторового моделювання емісій у досліджуваних секторах і категоріях господарської діяльності.

Структуру геоінформаційної технології представлено на рис. 6. У ній використано різноманітні методи, математичні моделі та програмні засоби геопросторового аналізу емісій та їх невизначеностей.

Показано, що оцінки невизначеностей результатів просторової інвентаризації є важливою складовою повного кадастру емісій парникових газів. Визначено основні фактори, що пливають на величину невизначеності при проведенні інвентаризації. Створено відповідне програмне забезпечення, яке дає можливість досліджувати невизначеності результатів інвентаризації парникових газів на будь-якому рівні деталізації (підприємство-регіон-країна) та по основних категоріях промисловості, сільського господарства та оперування з відходами.

З використанням методу Монте-Карло, а також параметрів, що відображають специфіку емісійних процесів аналізованих джерел, та меж їх 95% довірчих інтервалів при описі величин симетричними та несиметричними розподілами, здійснено обчислювальні експерименти з аналізу невизначеностей результатів моделювання емісій парникових газів у промисловому секторі Польщі, які мали місце при виробництві цементу, вапна, аміаку, нітратної кислоти, агломератів та чавуну на окремих підприємствах. Також проведено дослідження з аналізу невизначеностей емісій у сільськогосподарському секторі на рівні воєводств, зокрема від кишкової ферментації сільськогосподарських тварин (корів, немолочної великої рогатої худоби, овець, кіз, коней та свиней), а також від внесення мінеральних азотних добрив у ґрунти сільськогосподарського призначення.

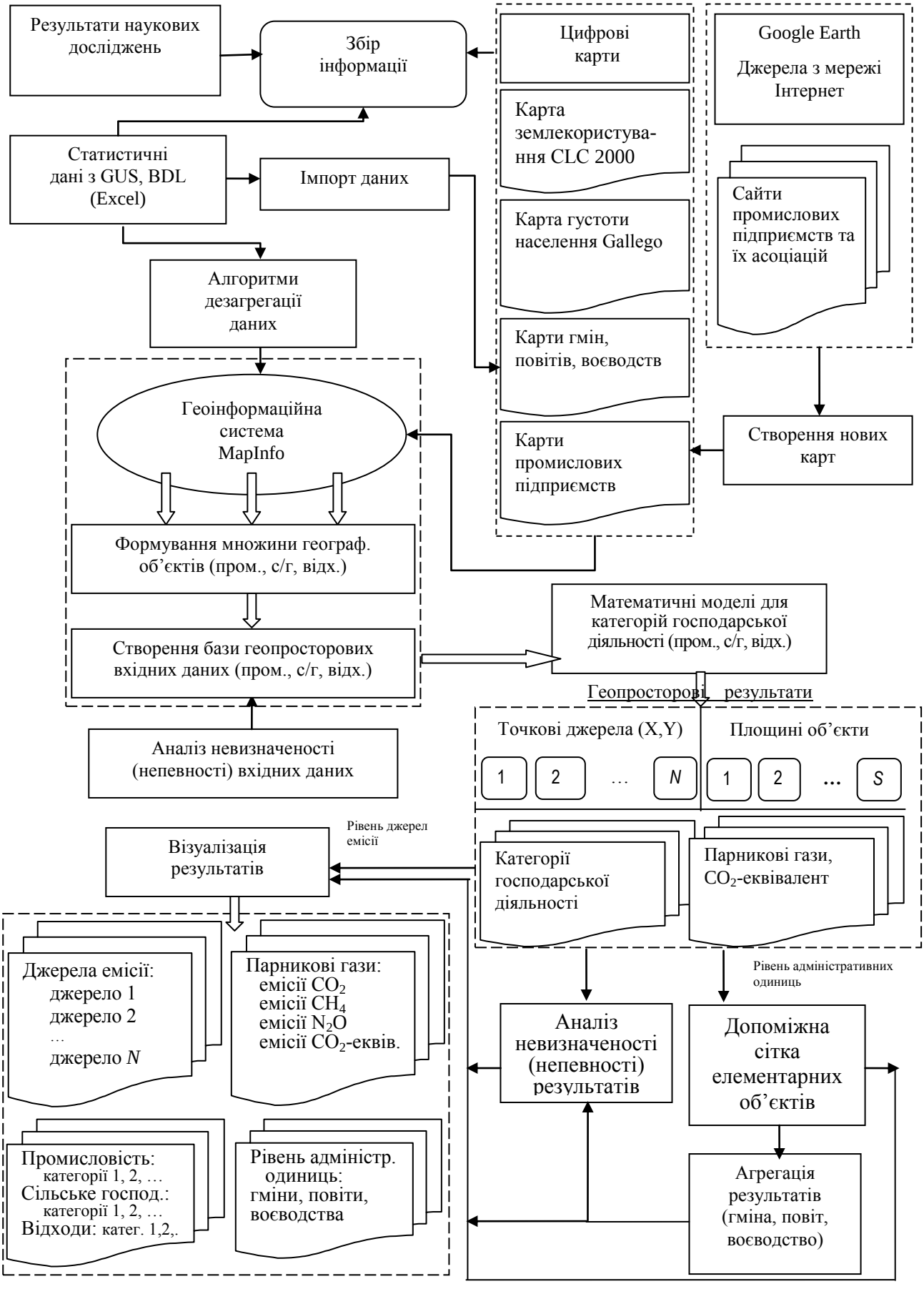

Рис. 6. Структура геоінформаційної технології

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв’язано важливе наукове завдання – розроблення математичних моделей та методів просторового аналізу процесів емісії парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторах, а також при оперуванні з відходами у Польщі, які дають можливість здійснювати геопросторове моделювання емісійних процесів і забезпечити природоохоронні органи інформацією, необхідною для вироблення стратегій щодо зменшення емісії та запобігання кліматичним змінам. При цьому отримано такі наукові та практичні результати:

- обґрунтовано актуальність та необхідність розроблення математичних моделей для геопросторового моделювання процесів емісії парникових газів при виробництві основних промислових речовин (у промисловому секторі), від сільськогосподарських тварин та ґрунтів (у сільськогосподарському секторі) та при оперуванні з відходами;
- при просторовому моделюванні емісійних процесів у промисловому секторі всі крупні заводи представляємо як джерела точкового типу, а скупчення великої кількості дрібніших підприємств у межах одного населеного пункту, як площинні; при моделюванні емісійних процесів у сільськогосподарському секторі поголів’я сільськогосподарських тварин та сільськогосподарські угіддя, які обробляються, вважаємо площинними джерелами емісії;
- розроблені математичні моделі процесів емісії парникових газів враховують розміщення точкових і площинних джерел емісії та специфіку подання статистичної звітності про результати діяльності в досліджуваних секторах по відповідних адміністративно-територіальних одиницях, базуються на територіальному розподілі цих даних по джерелах емісії з використанням різних індикаторів дезагрегації і дають можливість формувати набори геопросторових даних про емісії парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторах, а також при оперуванні з відходами у Польщі;
- сформовано геопросторові бази даних з параметрами емісійних процесів у досліджуваних секторах, які враховують територіальне розміщення точкових та площинних джерел емісії і встановлюють відповідну географічну прив’язку кожного джерела;
- з використанням засобів геоінформаційної системи здійснено просторовий аналіз емісійних процесів та побудовано набори геопросторових даних про емісії парникових газів у розрізі окремих точкових та площинних джерел емісії; у результаті обчислювальних експериментів отримано оцінки емісій на рівні елементарних ділянок території, які відображають внесок кожної такої ділянки у сумарні емісії;
- досліджено територіальну нерівномірність емісійних процесів у найбільш впливових категоріях джерел емісії промислового (виробництво цементу, вапна, аміаку, нітратної кислоти) та сільськогосподарського (кишкова ферментація, розкладання гною, зберігання гною у різних системах, вирощування сільськогосподарських культур та інші) секторів;

- загальний підхід до аналізу невизначеності (непевності) результатів просторового моделювання емісії парникових газів розширено на процеси виробництва основних мінеральних, хімічних речовин та металів у Польщі, а також кишкової ферментації домашніх сільськогосподарських тварин; підхід базується на використанні методу Монте-Карло та полягає у здійснені аналізу невизначеності обчислених емісій для кожного джерела з використанням параметрів, що відображають специфіку емісійних процесів цих джерел, та меж їх 95% довірчих інтервалів при описі величин нормальними та логнормальними розподілами; здійснено верифікацію отриманих результатів та перевірку коректності реалізованого математичного та програмного інструментарію з використанням польського національного звіту з інвентаризації парникових газів за 1990-2010 роки;
- розроблені математичні моделі та геоінформаційна технологія просторового аналізу емісійних процесів у аналізованих секторах є ефективним інструментарієм для підтримки прийняття дієвих рішень із зменшення емісій та впровадження новітніх технологій, отримані результати просторової інвентаризації мають високу наукову та практичну цінність у плані сприяння реалізації механізмів зменшення емісії парникових газів відповідно до міжнародних домовленостей.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Charkovska N. Mathematical modeling and spatial analysis of emission processes in Polish industry sector: cement, lime and glass production / N. Charkovska, R. Bun, Z. Nahorski, J. Horabik // Econtechmod, Poland. – 2012. – V. 1, N. 4. – P. 17-22.
2. Striamets O. Geodistributed analysis of forest phytomass: Subcarpathian voivodeship as a case study / O. Striamets, B. Lyubinsky, N. Charkovska, S. Stryamets, R. Bun // Econtechmod, Poland. – 2014. – V. 3. – N. 1. – P. 95-104.
3. Чарковська Н. В. Просторовий аналіз емісійних процесів: оперування відходами у Польщі / Н. В. Чарковська, Р. А. Бунь // Моделювання та інформаційні технології. – 2014. – Вип. 72. – С. 44-51.
4. Чарковська Н. В. Моделювання та просторовий аналіз емісійних процесів від целюлозно-паперової та харчової промисловостей Польщі / Н. В. Чарковська, О. С. Стрямець, Р. А. Бунь // Вісник Національного університету „Львівська політехніка”: № 783: Інформаційні системи та мережі. – Львів, 2014. – С. 478-486.
5. Чарковська Н. В. Геоінформаційна технологія моделювання та просторового аналізу прямих емісій закису азоту від сільськогосподарських ґрунтів / Н. В. Чарковська, Р. А. Бунь // Штучний інтелект. – Донецьк, 2013. – № 4. – С. 235-243.
6. Чарковська Н. В. Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів від хімічної промисловості Польщі / Н. В. Чарковська, Р. А. Бунь // Моделювання та інформаційні технології. – 2013. – Вип. 69. – С. 118-125.
7. Чарковська Н. В. Моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів: тваринництво Польщі / Чарковська Н. В., Бунь Р. А., Нагурський З., Сорочич М. П., Хорабік І. // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2013. – № 8. – С. 190-197.
8. Charkovska N. V. Mathematical modeling and spatial analysis of GHG emissions processes from Agriculture sector of Poland / Charkovska N.V., Bun R.A. / International Conference and Early Cariere Scientists School on Environmental Observations, Modeling

and Information Systems (ENVIROMIS-2014): June 28 – July 05, 2014. – Tomsk, Russia Federation: SCERT, 2014. – P. 76-80.

9. Charkovska N. Modeling of non-methane volatile organic compound emissions in Polish industry sector: sugar production / Nadiya Charkovska // Computer Science & Engineering: Proceedings of the 6th International Conference of Young Scientists (CSE-2013). – Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – P. 116-117.
10. Чарковська Н. В. Просторовий аналіз процесів емісії вуглекислого газу від виробництва хімічних речовин у Польщі / Чарковська Н. В. / Тези доп. Всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів „Екологічна безпека держави" : Київ, 16-18 квітня 2013 р. – Київ : НАУ, 2013. – С. 85-86.
11. Любінський Б. Б. Програмні засоби візуалізації результатів просторової інвентаризації парникових газів / Б. Б. Любінський, О. С. Стрямець, Н. В. Чарковська / Інформатика та системні науки (ІСН-2014) : Матеріали V Всеукр. наук.-практ. конф., (м. Полтава, 13–15 березня 2014 року). – Полтава : ПУЕТ, 2014. – С. 198-200.
12. Чарковська Н. В. Математичне моделювання процесів емісії парникових газів при вирощуванні азот-фіксуючих культур / Чарковська Н. В. // Матеріали ІІ-ї Міжнар. наук.-техн. конф. "Обчислювальний інтелект": Черкаси, 14-18 травня 2013 р. – Черкаси : Маклаут, 2013. – С. 443-444.
13. Чарковська Н.В. Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії закису азоту від внесення рослинних залишків в орні землі Польщі / Чарковська Н. В., Бунь Р. А. // Матеріали ІІ-ї Всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих учених та студентів "Інтелектуальні технології в системному програмуванні": Хмельницький, 18-19 квітня 2013 р. – Хмельницький : Тріада-М, 2013. – С. 259-262.
14. Данило О. Я. Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів від використання населенням твердих видів палива / О. Я. Данило, Н. В. Чарковська / Інформатика та системні науки (ІСН-2014) : Матеріали V Всеукр. наук.-практ. конф., (м. Полтава, 13–15 березня 2014 року). – Полтава : ПУЕТ, 2014. – С. 79-81.
15. 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 (ІТЕП-2014) : Матер. 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.
16. Стрямець О. С. Використання цифрових карт землекористування Польщі для просторового аналізу емісій та поглинань парникових газів у лісовому господарстві / Стрямець О. С., Бунь Р. А., Чарковська Н. В. / Одинадцята Відкрита наук. конф. Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Збірник матеріалів : 13 червня 2013, Львів. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – С. 155.
17. Чарковська Н. В. Моделювання та просторовий аналіз емісійних процесів від внесення гною у сільськогосподарські ґрунти / Н. В. Чарковська // Матеріали ІІІ-ї Всеукр. наук.-практ. конф. "Сучасні технології в економіці, менеджменті та освіті" (СІТЕМ-2012). – Львів : Львівська філія ПВНЗ "Європейський університет", 2012. – С. 84-89.
18. Чарковська Н. В. Моделювання процесів емісії закису азоту від випасання сільськогосподарських тварин у Польщі / Чарковська Н. В., Стрямець О. С. / Одинадцята Відкрита наук. конф. Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Збірник матеріалів : 13 червня 2013, Львів. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – С. 159-160.

19. Чарковська Н. В. Моделювання емісій парникових газів від скляної промисловості Польщі з використанням геоінформаційних технологій / Н. В. Чарковська // 10-та Відкрита наук. конф. Інституту прикладної математики та фундаментальних наук „PSC-IMFS-10” : Збірник матеріалів. – Львів : НУ”ЛП”, 2012. – С. J4-J5.
20. Чарковська Н. В. Моделювання емісій парникових газів для цементної промисловості Польщі / Н. В. Чарковська // Матеріали 15-ї Всеукраїнської (10-ї Міжнародної) студентської наук. конф. з прикладної математики та інформатики „СНКПМІ-2012”, 5-6 квітня 2012 р. – Львів : ЛНУ ім.Франка, 2012. – С.193-194.

АНОТАЦІЇ

Чарковська Н.В. Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторах Польщі. – 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» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертація присвячена розробленню математичних моделей для здійснення просторового аналізу процесів емісії парникових газів при виробництві промислової продукції та веденні сільського господарства, а також при оперуванні з відходами у Польщі, які дають можливість враховувати особливості кожного джерела емісії та його географічне розміщення. Розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів у промисловому секторі, які базуються на представленні крупних підприємств точковими джерелами, а населених пунктів з великою кількістю дрібних підприємств харчової галузі – площинними джерелами емісії. Розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів у сільськогосподарському секторі, які базуються на представленні поголів’я домашніх сільськогосподарських тварин і сільськогосподарських угідь площинними джерелами емісії. Здійснено просторовий аналіз емісій парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторах Польщі з використанням геоінформаційних технологій, а також аналіз невизначеності результатів просторової інвентаризації парникових газів у цих секторах з врахуванням особливостей кожного джерела емісії.

Ключові слова: математичне моделювання, процес емісії парникових газів, промисловий сектор, сільськогосподарський сектор, оперування з відходами, невизначеність результатів моделювання.

Чарковская Н.В. Математическое моделирование и пространственный анализ процессов эмиссии парниковых газов в промышленном и сельскохозяйственном секторах Польши. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертация посвящена разработке математических моделей для осуществления пространственного анализа процессов эмиссии парниковых газов при производстве промышленной продукции и ведении сельского хозяйства, а также при оперировании с отходами в Польше, которые дают возможность учитывать особенности каждого источника эмиссии и его географическое положение. Разработаны математические модели процессов эмиссии парниковых газов в промышленном секторе, которые

базируются на представлении крупных предприятий точечными источниками эмиссии, а населенных пунктов с большим количеством мелких предприятий пищевой отрасли – плоскостными источниками эмиссии. Разработаны математические модели процессов эмиссии парниковых газов в сельскохозяйственном секторе, которые базируются на представлении поголовья домашних сельскохозяйственных животных и сельскохозяйственных угодий плоскостными источниками эмиссии. Осуществлен пространственный анализ эмиссий парниковых газов в промышленном и сельскохозяйственном секторах Польши с использованием геоинформационных технологий, а также анализ неопределенности результатов пространственной инвентаризации парниковых газов в этих секторах с учетом особенностей каждого источника эмиссии.

Ключевые слова: математическое моделирование, процесс эмиссии парниковых газов, промышленный сектор, сельскохозяйственный сектор, оперирования с отходами, неопределенность результатов моделирования.

Charkovska N.V. Mathematical modeling and spatial analysis of greenhouse gas emission processes in the industrial and agricultural sectors of Poland. – Manuscript.

Thesis for Ph.D degree on 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) emission processes in the production of industrial goods, the agricultural activity, as well as the waste handling in Poland, which make it possible to take into account the features of each emission source and its geographical location.

In the *first chapter*, known approaches and methods for modeling of greenhouse gas emission processes in Industrial, Agricultural and Waste sectors have been analyzed. The overview of main methodologies of GHG inventory has been done. The expediency of the development of GHG spatially distributed inventory, which gives the possibility to build the spatial emission cadastres and get the new knowledge on real emission structure in studied sectors, has been justify. In the *second chapter*, the mathematical models of greenhouse gas emission processes in the industrial sector, based on presenting of large industrial enterprises as point-type emission sources, and the settlements with a large number of small enterprises of food industry as area-type emission sources, have been developed. In the *third chapter*, the mathematical models of the greenhouse gas emission processes in the agricultural sector, based on presenting of domestic livestock and agricultural lands as area-type sources of emissions, have been developed. The *fourth chapter* deal with modeling of greenhouse gas emission processes in waste handling. The mathematical models for GHG spatial inventory at elementary objects' level were developed.

The algorithms of disaggregation of statistical data have been created. On the base of these algorithms the geospatial database of industrial production plants, agricultural lands, and territories of urban settlements as emission sources has been formed. The numerical experiments on mathematical modeling of GHG emission processes were performed. The spatial analysis of greenhouse gas emissions in the industrial and agricultural sectors, and handling of waste in Poland, using geoinformation technologies, has been implemented. In the *fifth chapter*, the uncertainty analysis of the inventory results of greenhouse gas emissions in studied sectors, taking into account the characteristics of each emission source, has been carried out. The Monte Carlo approach and 95% confidence intervals were used for uncertainty estimation.

Keywords: mathematical modeling, process of greenhouse gas emission, Industrial sector, Agricultural sector, Waste sector, uncertainty of modeling results.

Підписано до друку 20.03.2015
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий
Умов. друк. арк. 0,9. Фіз. друк. арк. 1,25
Тираж 140 пр.

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