

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет "Львівська політехніка"

**Любінський Богдан Богданович**

УДК 004.942:519.876.5

**МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ  
ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ**

01.05.03 – математичне та програмне забезпечення  
обчислювальних машин і систем

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

Львів - 2015

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник:

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

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
**Виклюк Ярослав Ігорович**,  
Буковинський університет,  
проректор з наукової роботи та міжнародних відносин

кандидат технічних наук, доцент  
**Мельничин Андрій Володимирович**,  
Львівський національний університет імені Івана Франка,  
доцент кафедри теорії оптимальних процесів

Захист відбудеться 3 липня 2015 р. о 13<sup>00</sup> годині 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      травня 2015 р.

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



Н. Б. Шаховська

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Глобальне потепління – це одна із найактуальніших проблем людства. Основною причиною потепління вчені вважають збільшення в атмосфері концентрації парникових газів (вуглекислого газу, метану, закису азоту та інших). Тому значні зусилля витрачаються на розроблення дієвих механізмів зменшення емісій парникових газів та налагодження ефективних процедур інвентаризації таких газів.

Методи просторового аналізу емісій та поглинань парникових газів дають можливість формувати регіональні кадастри, які відображають питомі емісії парникових газів (емісії, віднесені до одиниці площі) і служать інструментарієм для владних структур у процесі підтримки прийняття зважених управлінських рішень в економіко-екологічній сфері. Проте, методи просторової інвентаризації парникових газів повинні базуватися на геоінформаційних системах. Використання у такій ролі сучасних ліцензійних універсальних геоінформаційних систем є можливим, але потребує розроблення додаткових спеціалізованих модулів. Тому доцільним є створення ефективних вузькоспеціалізованих геоінформаційних систем, призначених виключно для побудови просторових кадастрів емісій парникових газів на регіональному рівні. Основу таких кадастрів складають так звані елементарні об'єкти – невеликі ділянки заданого розміру, отримані з використанням цифрових карт аналізованих територій. Найчастіше такі елементарні об'єкти мають квадратну форму, проте кордони певної адміністративної одиниці (області, району тощо) можуть розділити ці квадратні об'єкти на менші елементарні ділянки неправильної форми.

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

Взяті Україною міжнародні зобов'язання стимулюють пошук ефективних засобів вирішення проблеми зменшення емісій парникових газів в атмосферу. При проведенні інвентаризації парникових газів потрібно не тільки оцінювати величину емісій у межах країни, але й знати розташування основних джерел емісії. Для проведення просторової інвентаризації слід використовувати побудовані моделі для конкретного сектору та інструменти, які візуалізують результат інвентаризації. При побудові архітектури програмного забезпечення слід враховувати, що таке картографічне програмне забезпечення має мати можливість комбінувати і відображати на єдиній мапі дані з різних джерел, які знаходяться в різних форматах і проекціях. Програмне забезпечення має забезпечувати накладання растрових і векторних шарів на одній карті. Перші можуть бути зроблені напівпрозорими, щоб вони служили не лише фоном, але й забезпечували створення просторових об'єктів, вирішували аналітичні і геодезичні задачі, будували картографічні проекції і багато іншого

Виходячи з цього, просторову інвентаризацію емісій парникових газів доцільно проводити з використанням спеціалізованої геоінформаційної

системи та розроблених математичних моделей, які в повній мірі враховують специфіку процедур побудови просторових кадастрів емісій. Саме тому розроблення такої спеціалізованої геоінформаційної системи для просторового аналізу емісій є актуальним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основу дисертаційної роботи складають результати теоретичних та практичних досліджень, виконаних автором у рамках планових робіт кафедри прикладної математики Національного університету «Львівська політехніка» та ряду міжнародних грантів, зокрема: гранту 7РП ЄС «Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів» (2011-2014 рр.; грант 7РП ЄС – Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES); українсько-китайського проекту "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень" (2013 р.; угода № М/12-2013 від 25.04.2013 р.; номер державної реєстрації 0113U001997); держбюджетної теми «Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень» (2013-2014 рр.; номер державної реєстрації 0113U003181).

У рамках цих робіт автор розробив специфікацію вимог до побудови архітектури програмного забезпечення геоінформаційної системи просторової інвентаризації парникових газів, підходи до використання популярних векторних форматів при створенні програмних продуктів, методи представлення і опрацювання у геоінформаційній системі джерел емісії парникових газів як точкових, лінійних та площинних об'єктів; методи формування геопросторових баз даних для стаціонарних та рухомих джерел емісії, методи візуалізації результатів геопросторової інвентаризації парникових газів у вигляді відповідних шарів цифрових карт емісій.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення ефективності використання процедур інвентаризації емісій парникових газів шляхом розроблення математичного та програмного забезпечення спеціалізованої геоінформаційної системи просторового аналізу цих емісій.

У відповідності з метою дисертаційної роботи вирішено такі задачі:

- аналіз відомих архітектурних рішень і математичних моделей та підходів для здійснення просторової інвентаризації парникових газів;
- побудова архітектури програмного забезпечення спеціалізованого комплексу для географічного аналізу та інвентаризації парникових газів, яка враховує специфіку технологічних процесів на регіональному рівні і дає можливість будувати просторові кадастри емісій;
- удосконалення математичних моделей емісії парникових газів для житлового, транспортного та залізничного сектору, які базуються на принципі дезагрегації статистичних даних до рівня площинних і лінійних джерел емісії і дають можливість врахувати специфіку наявних національних даних;
- формування геопросторових баз даних з інформацією про джерела емісії парникових газів;

- здійснення обчислювальних експериментів з моделювання та аналізу процесів емісії парникових газів у житловому, транспортному і залізничному секторах з урахуванням особливостей джерел емісії;
- аналіз невизначеності (непевності) результатів просторової інвентаризації парникових газів.

*Об'єктом дослідження* є процеси емісії парникових газів у різних категоріях господарської діяльності.

*Предметом дослідження* є методи побудови та засоби реалізації архітектури програмного забезпечення спеціалізованої геоінформаційної системи для просторового аналізу та інвентаризації парникових газів.

**Методи дослідження.** При побудові архітектури спеціалізованого програмного забезпечення використано елементи мови UML, методи геоінформатики, методи об'єктно-орієнтованого аналізу та проектування. При розробленні математичних моделей процесів емісії парникових газів з урахуванням географічної прив'язки використано елементи геотегування, теорії ймовірності та математичної статистики. При створенні геопросторових баз даних зі статистичною інформацією про результати господарської діяльності та коефіцієнти емісій використано елементи теорії множин та баз даних. При аналізі невизначеностей результатів інвентаризації з використанням симетричних та несиметричних розподілів застосовано метод Монте-Карло.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розв'язанні наукового завдання – розроблення математичного та програмного забезпечення спеціалізованої геоінформаційної системи просторового аналізу емісій парникових газів. При цьому отримано такі нові наукові результати:

- вперше, розроблено архітектуру спеціалізованої геоінформаційної системи для просторового аналізу процесів емісії парникових газів, яка дає можливість досліджувати точкові, лінійні та площинні джерела емісії на різних рівнях просторової інвентаризації;

- вперше, розроблено архітектуру модуля порізки площинних та лінійних об'єктів, який дезагрегує геопросторові дані до рівня елементарних об'єктів і забезпечує реалізацію процедур просторового аналізу емісій парникових газів, обчислення питомих емісій чи поглинань цих газів та візуалізації результатів;

- отримали подальший розвиток математичні моделі процесів емісії парникових газів у секторах залізничного та дорожнього транспорту, які базуються на принципі дезагрегації статистичних даних про спожите паливо до рівня лінійних джерел емісії з врахуванням категорії і пропускну здатності доріг і які дають можливість врахувати регіональні особливості аналізованих процесів;

- вперше, розроблено архітектуру спеціалізованого модуля аналізу невизначеності (непевності) результатів просторової інвентаризації парникових газів на рівні точкових та площинних джерел емісії з використанням методу Монте-Карло.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені архітектурні рішення, математичні моделі та підходи до програмної реалізації основних модулів уможливили реалізацію спеціалізованої геоінформаційної системи для просторового аналізу процесів емісії парникових газів, яка забезпечує:

- оперування з джерелами емісії точкового, лінійного та площинного типу;
- формування зручних для сприйняття просторових кадастрів емісій та аналіз структури емісій як на рівні невеликих ділянок території, так і на рівні регіонів;
- автоматизацію процесів побудови векторних карт на основі фізичних карт з подальшою прив'язкою атрибутивної інформації;
- автоматизацію формування геопросторових баз даних;
- врахування специфіки подання національної статистичної звітності;
- аналіз невизначеності (непевності) результатів просторової інвентаризації з врахуванням симетричних та несиметричних розподілів вхідних величин.

*Реалізація результатів та впровадження.* Розроблені архітектурні рішення, методи та алгоритми геопросторового аналізу емісій парникових газів програмно реалізовано у вигляді спеціалізованої геоінформаційної системи просторової інвентаризації емісій. Результати дисертаційних досліджень використано: в Інституті системного аналізу Польської академії наук, м.Варшава (методи представлення і опрацювання в геоінформаційній системі джерел емісії парникових газів як точкових, лінійних та площинних об'єктів; методи формування геопросторових баз даних для стаціонарних джерел емісії в енергетичному та промисловому секторах, а також рухомих джерел емісії); 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" (методи візуалізації результатів геопросторової інвентаризації парникових газів у вигляді відповідних шарів цифрових карт емісій двоокису вуглецю, метану та закису азоту), українсько-китайському проєкті (специфікація вимог до побудови архітектури програмного забезпечення геоінформаційної системи просторової інвентаризації парникових газів, вимоги до побудови програмного забезпечення для просторової інвентаризації та аналізу невизначеності); держбюджетній темі (методи представлення в геоінформаційній системі джерел емісії та поглиначів парникових газів від площинних об'єктів; специфікація вимог до формування геопросторових баз даних у секторі лісового господарства та змін у землекористуванні; методи візуалізації результатів геопросторової інвентаризації); у Природному заповіднику „Розточчя” (спеціалізована геоінформаційна система просторового аналізу емісій та підходи до формування геопросторових наборів вхідних даних для інвентаризації емісій). Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі в Національному університеті „Львівська політехніка” у лекційних курсах освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр": „Математичні

засади просторового моделювання” та „Математичні моделі екологічних процесів” (спеціальність "математичне та комп'ютерне моделювання"); „Математичне моделювання соціально-екологічних процесів” (спеціальність "прикладна математика"). Акти про використання результатів дисертаційних досліджень наведено в додатку.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, отримані при вирішенні поставлених у дисертаційній роботі задач, отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: архітектура спеціалізованих програмних модулів геоінформаційної системи просторової інвентаризації парникових газів [2-4]; опис програмних засобів геопросторового аналізу емісій [6, 9, 13, 17], методи оперування з площинними об'єктами в геоінформаційній системі [1, 10, 12, 16, 18], спеціалізовані модулі математичного моделювання процесів емісії парникових газів у житловому [5] і транспортному [7] секторах.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародних та всеукраїнських конференціях, зокрема на: Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів: “Інформаційні технології, економіка та право” (ІТЕП-2014) (Чернівці, 2014); Всеукр. наук.-техн. конф. “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА'2013) (Суми, 2013); 3-й Всеукр. наук.-практ. конф. “Сучасні технології в економіці, менеджменті та освіті” (СІТЕМ-2012) (Львів, 2012); Всеукр. наук.-практ. конф. за міжнародною участю “Інформатика та системні науки” (ІСН-2014) (Полтава, 2014); 5-й та 6-й Міжнар. наук. конф. молодих вчених “Комп'ютерні науки та інженерія” (CSE-2011, CSE-2013) (Львів, 2011, 2013); Дев'ятій відкритій наук. конф. професорсько-викладацького складу Інституту прикладної математики та фундаментальних наук (Львів, 2010), 10-й та 11-й Відкритих наук. конф. Інституту прикладної математики та фундаментальних наук ”PSC-IMFS-10” та ”PSC-IMFS-11” (Львів, 2012, 2013).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 18 наукових праць, серед яких 1 стаття у закордонному періодичному виданні [1], 6 статей у наукових фахових виданнях України [2-7], 11 публікацій у матеріалах наукових конференцій [8-18].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 160 найменувань та додатку. Робота викладена на 215 сторінках, містить 149 сторінок основного тексту, 86 рисунків та 16 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

**Перший розділ** присвячено аналізу причини виникнення парникового ефекту та його антропогенної складової, ролі міжнародних угод, покликаних сприяти зменшенню емісії парникових газів. Вказано, що для перевірки виконання таких угод необхідно здійснювати інвентаризацію емісій парникових газів, яка полягає у використанні математичних моделей

емісійних процесів та оцінюванні величини емісії парникових газів на основі цих моделей. Геопросторовий аналіз емісійних процесів дає можливість отримати об'єктивну інформацію про реальне територіальне розміщення джерел емісії та поглинання парникових газів.

Обґрунтовано необхідність та доцільність здійснення просторової інвентаризації парникових газів з використанням сучасних геоінформаційних технологій, в основі яких лежать геоінформаційні системи. Здійснено огляд сучасного програмного забезпечення, яке може в тій чи іншій мірі бути використане для геопросторової інвентаризації парникових газів, показано, що його можна умовно поділити на два типи: сучасні багатофункціональні ГІС з широкими можливостями, які безпосередньо не адаптовані до просторової інвентаризації парникових газів, та вузькоспеціалізоване програмне забезпечення, яке призначене саме для інвентаризації шкідливих атмосферних викидів чи емісій парникових газів, проте не завжди забезпечує просторовий аналіз.

Проаналізовано сучасні багатофункціональні ГІС, а саме програмне забезпечення MapInfo та ArcGIS, та спеціалізовані ГІС – TEISS, EMIT2, Sorpert, тощо. Показано, що сучасні ГІС і спеціалізовані програмні засоби у більшості випадків є платними і вони не адаптовані до задач просторової інвентаризації парникових газів або охоплюють тільки окремі сектори інвентаризації (наприклад, ADMS-Airport, SELMA).

Показано, що для створення ефективного механізму, який би давав змогу оцінити рівні емісії з відповідних територій, слід проводити просторову інвентаризацію парникових газів з використанням спеціалізованих геоінформаційних систем. Тому актуальним науковим завданням є створення спеціалізованих програмних засобів просторового аналізу емісій парникових газів, які б базувалися виключно на безкоштовних компонентах та давали можливість здійснювати геопросторовий аналіз емісій на регіональному рівні у основних секторах господарської діяльності, зокрема енергетиці, промисловості, транспорті, сільському господарстві тощо.

**У другому розділі** сформовано вимоги до спеціалізованого програмного комплексу для географічного аналізу та просторової інвентаризації парникових газів. Створюване програмне забезпечення повинне задовольняти ряд вимог щодо вхідних даних та результатів обчислень (див. рис. 1). Як вхідні дані повинні використовуватися:

- цифрові карти аналізованої місцевості (адміністративні карти регіонів, карти лісів, карти землекористування, карти автомобільних чи залізничних доріг тощо); ці карти повинні містити дані, які використовують при побудові кадастрів емісій (населені пункти та їх типи, кількість населення, що в них проживає, типи лісів за породами, пропускані здатності доріг тощо);

- геопросторові бази статистичних даних про результати господарської діяльності, яка спричиняє емісії чи поглинання парникових газів на певній території; зазвичай ці дані відносяться до адміністративного району чи області в цілому і включають: дані про використання викопного палива (вугілля, природного газу, нафти та ін.) у різноманітних категоріях енергетичного сектору – при виробництві електро- та теплоенергії,



у житловому секторі, в промисловості і будівництві, при видобуванні та переробці палива, в транспортному секторі; обсяги виробництва продукції у промисловості (цементу, вапна, м'ясних виробів, хлібобулочних та алкогольних виробів тощо); поголів'я свійських тварин (молочної та немолочної рогатої худоби, свиней, коней, овець та птиці) та обсяги внесених мінеральних добрив у сільському господарстві; обсяги лісових насаджень та обсяги промислової заготівлі деревини в лісовому господарстві;

- різноманітні коефіцієнти – теплотворні значення палива чи коефіцієнти емісії, які є результатами інших наукових досліджень і зазвичай наведені у відповідних таблицях методик, розроблених Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату чи інших документах (можуть також використовуватися уточнені „національні” чи „регіональні” коефіцієнти);

- основні параметри емісійних процесів (теплотворні значення використаного палива, коефіцієнти емісії тощо); як правило, ці параметри є специфічними для кожного аналізованого регіону;

- додаткові параметри налаштувань множини елементарних об'єктів для формування просторового кадастру емісій, які отримують на основі сітки дезагрегації.

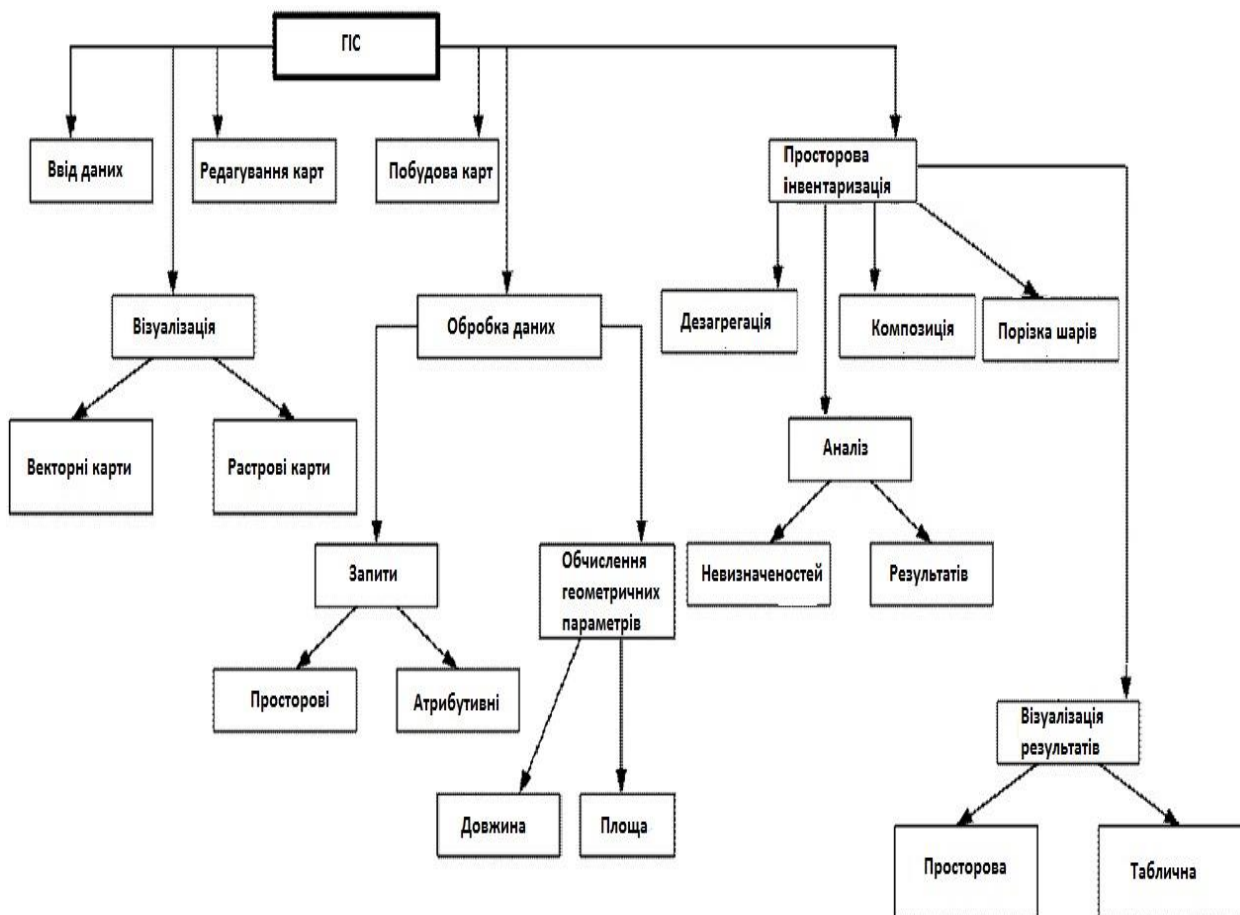


Рис. 1. Специфікація вимог

Спеціалізований програмний комплекс для географічного аналізу та інвентаризації парникових газів повинен забезпечувати виконання таких функцій:

- створення власних цифрових карт регіону/місцевості;

- формування множини елементарних об'єктів для просторового аналізу емісійних процесів (на основі сітки встановленого розміру); обґрунтованим є, наприклад, крок сітки 2 км чи 5 км при інвентаризації парникових газів в адміністративній області та крок сітки 100 м чи 200 м при аналізі емісійних процесів на рівні окремо взятого міста; обчислення площі елементарних об'єктів (для площинних об'єктів) та довжини елементарних об'єктів (для лінійних об'єктів);

- реалізація процедур дезагрегації відомих статистичних даних про використане паливо чи будь-які інші результати господарської діяльності до рівня елементарних об'єктів;

- обчислення емісії парникових газів в основних секторах інвентаризації (енергетика, промисловість, сільське господарство, зміни в землекористуванні та лісове господарство, відходи) та для всіх категорій господарської діяльності (виробництво електро- та теплоенергії, житловий сектор, транспорт тощо);

- обчислення емісій чи поглинань вуглекислого газу, метану, закису азоту, неметанових вуглецевих сполук тощо інших парникових газів у кожному елементарному об'єкті з використанням відповідних математичних моделей;

- відображення результатів просторового аналізу емісій на рівні елементарних об'єктів (побудова цифрових карт питомих емісій чи поглинань – емісій, віднесених до одиниці площі);

- узагальнення отриманих результатів просторового аналізу до рівня адміністративних одиниць (найчастіше – адміністративних районів) і їх візуалізація, наприклад, у вигляді діаграм;

- оцінювання параметрів поверхневих джерел емісії при просторовій інвентаризації парникових газів (обчислення площ і довжин графічних примітивів карти);

- збереження результатів просторової інвентаризації:
  - множин елементарних об'єктів для просторового аналізу (на основі сітки встановленого розміру);
  - узагальнених результатів інвентаризації емісій парникових газів;
  - дезагредованих даних про результати господарської діяльності в межах елементарних об'єктів;

- створених нових карт, які утворені, як перетин двох чи більше шарів;

- власних цифрових карт регіону/місцевості;

- аналіз невизначеностей результатів інвентаризації парникових газів.

Виконання перерахованих вище функцій уможливить повноцінну реалізацію спеціалізованою ГІС процедур просторового аналізу емісій парникових газів у всіх категоріях господарської діяльності, охоплених методиками МГЕЗК.

Обґрунтовано використання при побудові спеціалізованої геоінформаційної системи популярних векторних форматів, які використовуються при просторовій інвентаризації парникових газів.

Обґрунтовано та побудовано архітектуру спеціалізованого програмного забезпечення (рис. 2), в якій використано вільну бібліотеку для роботи з векторними і растровими форматами GDAL/OGR. Детально спроектовано модулі, які забезпечують читання векторних і растрових форматів даних і відображення табличної і графічної інформації. Обґрунтовано доцільність реалізації такої архітектури і побудовано модель програмного забезпечення з використанням мови моделювання UML.

Відображення даних цифрових карт реалізовано в модулі *Geomap.Controls*, який містить основний функціонал для побудови користувацького графічного інтерфейсу. Модуль *Geomap.Converters* реалізує конвертацію бінарних і текстових даних у відповідні геометричні фігури. Модуль забезпечує читання даних з потоку і створює відповідні геометричні примітиви, для подальшого відображення їх на карті. Для забезпечення роботи з даними та стилями відповідних форматів розроблено модуль *Geomap.Data*. Простір імен *Geomap.Topology* містить класи та інтерфейси, що забезпечують роботу з географічними примітивами та складними географічними об'єктами. Модуль *Geomap.Symbolology* спроектовано для роботи з набором стилів для відображення карт з використанням GDI++ технології.

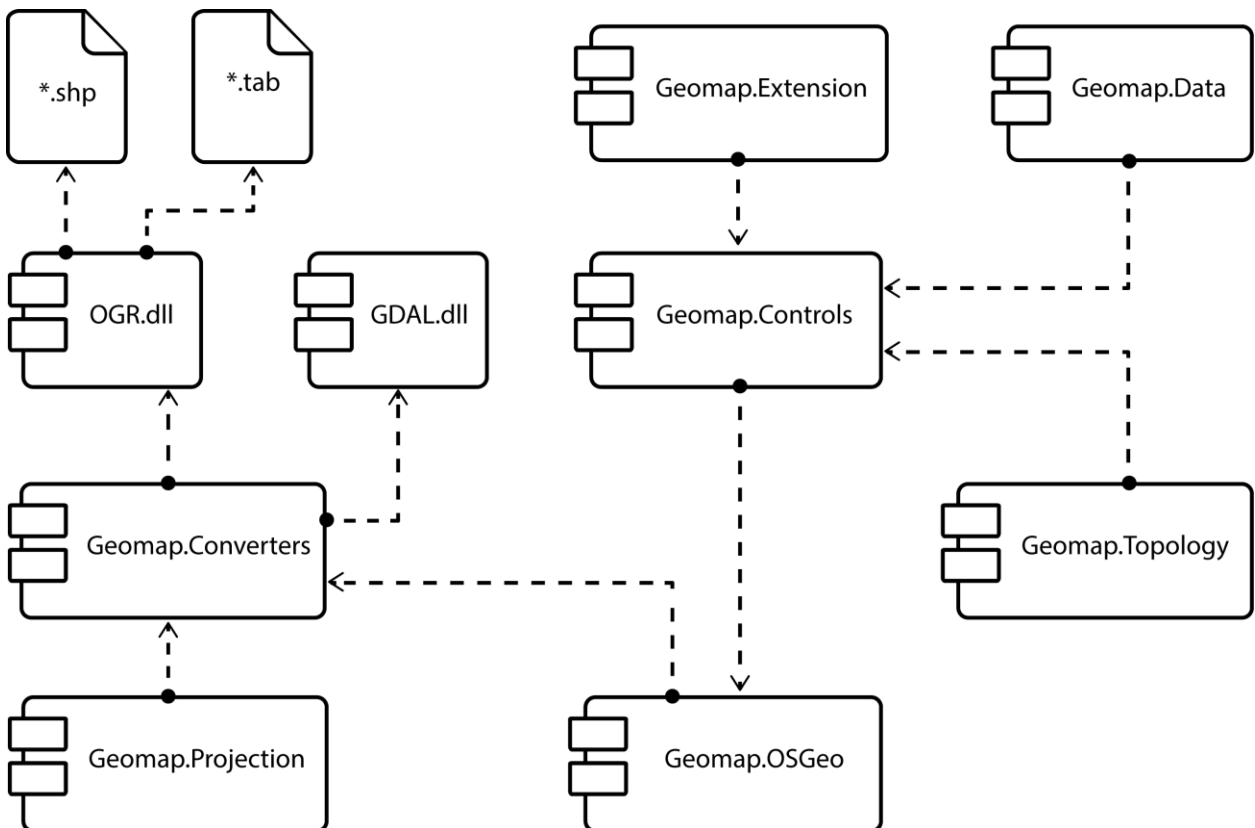


Рис. 2. Діаграма компонентів спеціалізованого програмного забезпечення

У **третьому розділі** обґрунтовано вимоги до всіх спеціалізованих модулів програмного комплексу для географічного аналізу та просторової інвентаризації емісій парникових газів, які призначені для реалізації

основних процедур такого просторового аналізу і забезпечують виконання операцій дезагрегації даних про використання палива, моделювання емісійного процесу і оцінювання усіх його параметрів, збереження і візуалізації результатів просторової інвентаризації.

З використанням мови моделювання UML розроблено архітектуру спеціалізованих модулів геоінформаційної системи просторового аналізу емісій та побудовано відповідні програмні модулі, які забезпечують виконання операцій композиції та дезагрегування як на рівні елементарних об'єктів, так і на рівні віднесених до них даних, реалізацію запитів до даних і обчислень відповідних елементів (полів геопросторової бази даних).

Розроблено архітектуру та програмно реалізовано модуль порізки площинних та лінійних об'єктів, який дезагрегує табличну і графічну інформацію до рівня елементарних об'єктів і використовується у процедурах просторового аналізу емісій парникових газів та візуалізації результатів (рис. 3).

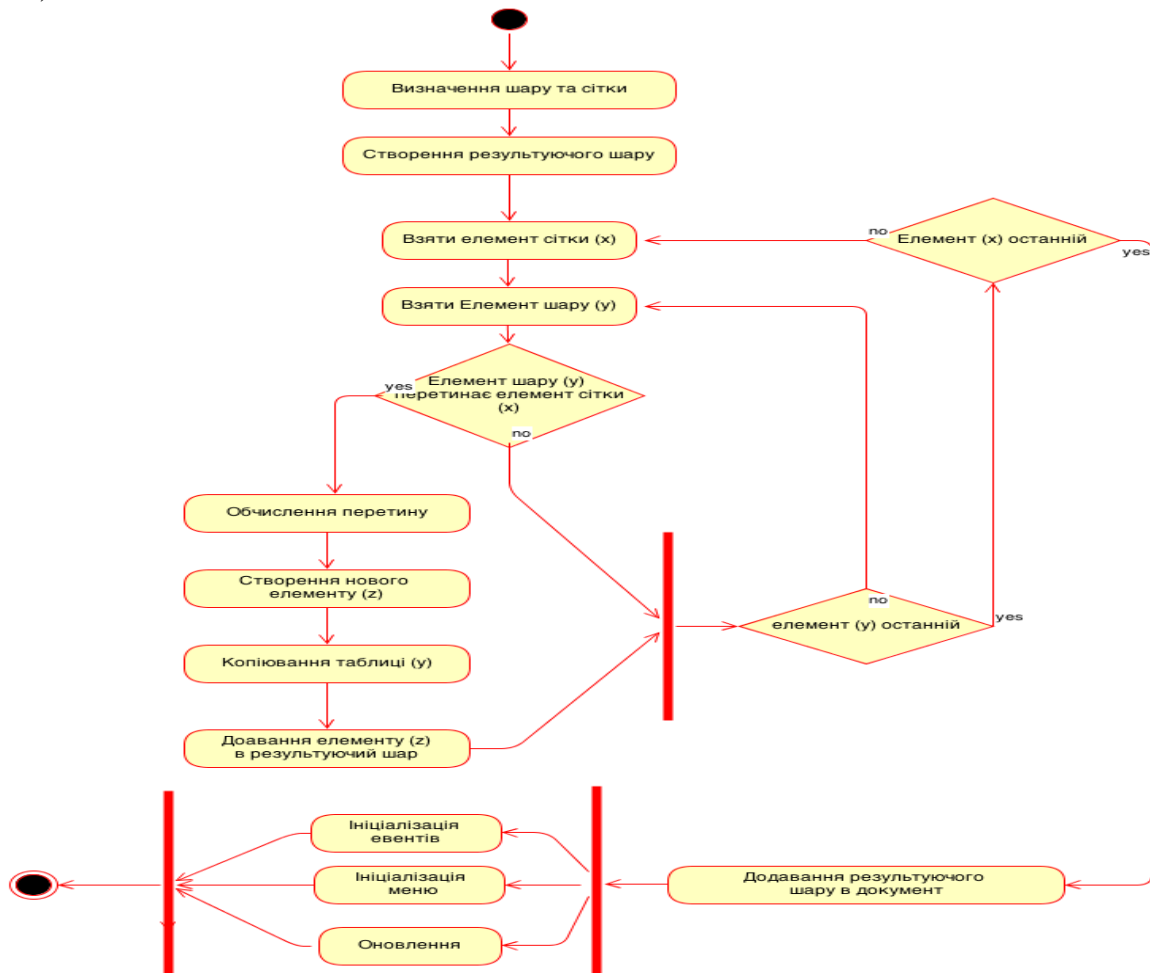


Рис. 3. Діаграма активностей модуля порізки

Розроблено архітектуру та реалізовано модуль такої візуалізації (рис. 4), який забезпечує побудову цифрових карт питомих емісій чи поглинань (емісій, віднесених до одиниці площі), що є невід'ємною складовою процесу аналізу емісій на рівні елементарних об'єктів.

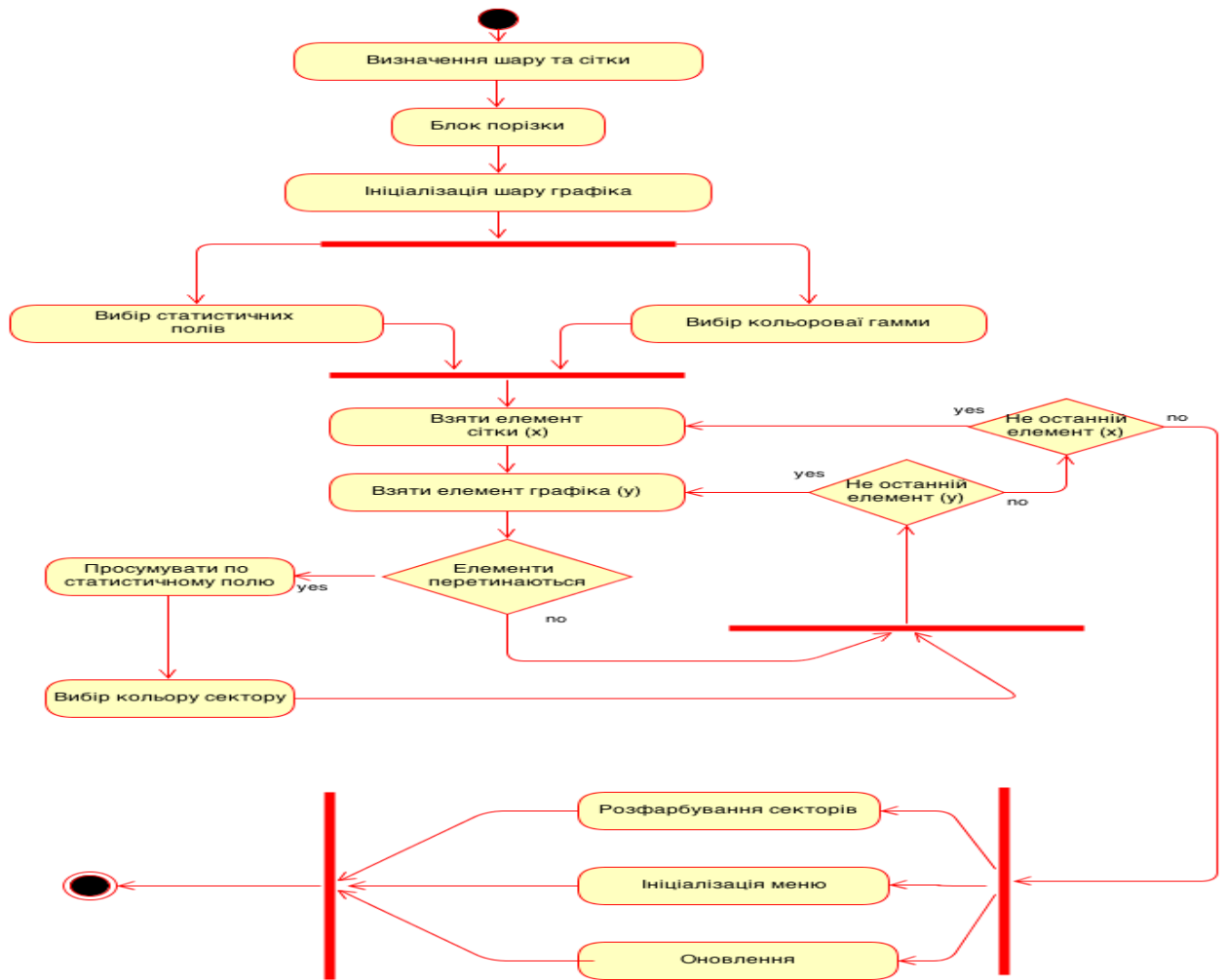
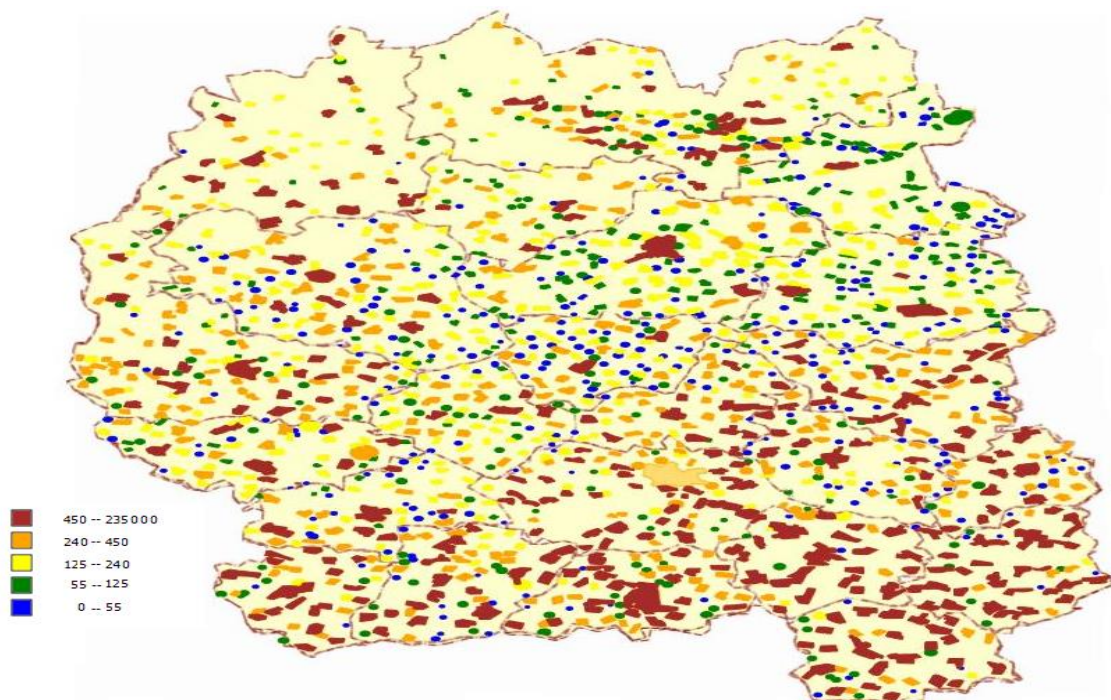


Рис. 4. Діаграма активностей модуля візуалізації

Рис. 5. Сумарні питомі емісії парникових газів від використання палива у житловому секторі Житомирської обл. (в CO<sub>2</sub>-еквіваленті, т/км<sup>2</sup>, 2011 р.)

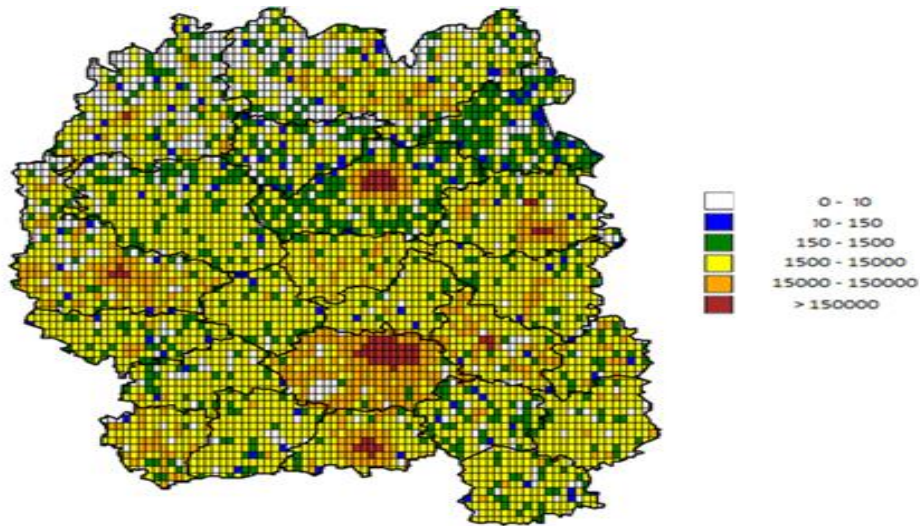


Рис. 6. Сумарні питомі емісії парникових газів у дорожньому транспорті Житомирської області (в  $\text{CO}_2$ -еквіваленті,  $\text{кг}/\text{км}^2$ , 2011 р.)

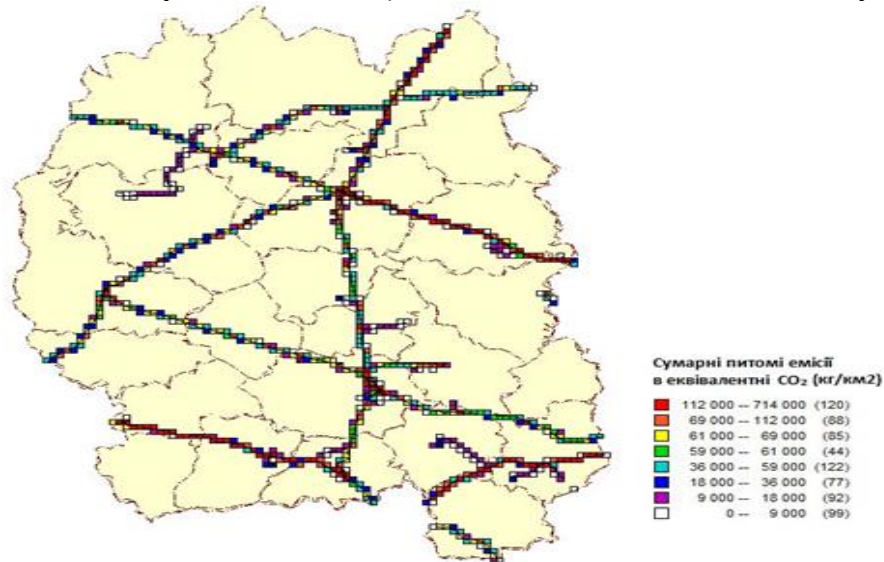


Рис.7. Сумарні питомі емісії у еквіваленті  $\text{CO}_2$  від спалювання усіх видів палива залізничними транспортними засобами у Житомирській області (2 км x 2 км, 2011 р.)

Обґрунтовано доцільність побудови архітектури модуля оцінювання параметрів поверхневих джерел емісії при просторовій інвентаризації парникових газів на основі геодезичної бібліотеки Geographiclib. Розроблено архітектуру модуля, який зберігає: просторові дані векторних форматів, віднесені до них табличні дані, результати перетину двох чи більше карт, результати геопросторової інвентаризації парникових газів.

Обґрунтовано основні вимоги та розроблено архітектуру спеціалізованого модуля конвертування растрових карт у векторний формат, який адаптовано до потреб просторової інвентаризації парникових газів. Спроектвано архітектуру модуля побудови карт векторного формату спеціалізованої геоінформаційної системи для просторового аналізу та інвентаризації парникових газів. Побудовано архітектуру елементів графічного інтерфейсу спеціалізованої геоінформаційної системи.

У четвертому розділі з метою аналізу ефективності програмного забезпечення розробленої геоінформаційної системи просторової інвентаризації парникових газів на регіональному рівні сформовано математичні моделі та здійснено обчислювальні експерименти з геопросторового аналізу емісій у ряді ключових категорій господарської діяльності на прикладі Житомирської області, зокрема, у житловому секторі (площинні джерела емісії), секторах дорожнього та залізничного транспорту (лінійні джерела емісії).

Сформовано математичні моделі процесів емісії парникових газів у житловому секторі, які базуються на методах дезагрегації загальних обсягів реалізації палива населенню до рівня елементарних ділянок у розрізі окремих видів палива. Використовуючи розроблені підходи і побудоване програмне забезпечення, одержано геопросторові дані про емісії парникових газів у житловому секторі для Житомирської області та проаналізовано структуру емісій. Емісію двоокису вуглецю  $\text{CO}_2$  при стаціонарному спалюванні палива в житловому секторі можна описати моделлю  $E = \sum_{g \in G} \sum_{\delta \in \Delta} \sum_{i \in I} M_{i,\delta} * A_{i,\delta}^g$ , де

$I = \{i_1, i_2, \dots\}$  – множина використовуваних у житловому секторі видів палива (вугілля, природний газ, скраплений газ, дрова);  $\Delta = \{\delta_1, \dots, \delta_n\}$  – множина елементарних об'єктів для просторового аналізу (населені пункти, тощо);  $G = \{g_1, \dots, g_n\}$  – множина аналізованих парникових газів (двоокис вуглецю, метан, закис азоту);  $M_{i,\delta}$  – кількість спожитого палива  $i$ -го виду на  $\delta$ -ї елементарній ділянці;  $A_{i,\delta}^g$  – коефіцієнт емісії і теплотворні значення  $g$ -го парникового газу. Для таких видів палива як кам'яне вугілля та дрова кількість спожитого палива в межах  $\delta$ -ї елементарної ділянки обчислюємо за формулою:  $M_{i,\delta} = (M_i * F_{i,\delta}^R + M_i * F_{i,\delta}^U) * \frac{P_\delta}{P_w}$ , де  $i$  – перерахункова змінна, яка

означає такі види палива як кам'яне вугілля та дрова;  $M_i$  – статистичні дані про обсяги використаного палива  $i$ -го виду на рівні адміністративної одиниці;  $P_\delta$  – кількість населення у населеному пункті ( $\delta$ -му елементарному об'єкті);  $P_w$  – кількість населення у територіальній одиниці (районі);  $F_{i,\delta}^R, F_{i,\delta}^U$  – показники, які використовують для виділення із загальних обсягів палива відповідної частки палива, спожитого у міських і сільських поселеннях для  $i$ -го виду палива. Для таких видів палива як природний та скраплений газ кількість спожитого палива у межах  $\delta$ -ї елементарної ділянки обчислюємо за формулою:  $M_{i,\delta} = (Q_{i,\delta}^R * F_{i,\delta}^R + Q_{i,\delta}^U * F_{i,\delta}^U) * \frac{P_\delta}{P_w}$ , де  $i$  – перерахункова змінна, яка

означає такі види палива як природний та скраплений газ;  $Q_{i,\delta}^R, Q_{i,\delta}^U$  – кількість газифікованих квартир, відповідно, у сільській та міській місцевостях у межах аналізованої адміністративної одиниці (району);  $F_{i,\delta}^R, F_{i,\delta}^U$  – показники, які використовують для виділення із загальних обсягів використаного палива відповідної частки палива, спожитого у міських і сільських поселеннях для  $i$ -го виду палива, причому  $F_{i,\delta}^U = M^i_{\text{Region}} / Q_{\text{urb}}^{\text{region}}$ ,  $F_{i,\delta}^R = M^i_{\text{Region}} / Q_{\text{Rur}}^{\text{region}}$ , де  $Q_{\text{Rur}}^{\text{region}}$  – кількість газифікованих сільських квартир в області;  $Q_{\text{urb}}^{\text{region}}$  – кількість

газифікованих міських квартир в області;  $M^i_{Region}$  – кількість спожитого палива  $i$ -го виду (природний чи скраплений газ) в області. Як приклад, на рис. 5 представлено результати математичного моделювання процесів емісії парникових газів у житловому секторі Житомирської області.

На прикладі Житомирської області сформовано математичні моделі та розроблено алгоритми дослідження процесів емісії парникових газів від дорожнього транспорту, які базуються на територіальному розподілі даних про використане паливо, враховують територіальне розміщення населених пунктів і автомобільних доріг, категорії цих доріг та інтенсивність їх використання, віддаленість автомобільних шляхів від населених пунктів тощо і дають можливість формувати геопросторові бази даних емісій парникових газів від дорожнього транспорту з використанням створеного спеціалізованого програмного забезпечення. Якщо  $\tilde{N} = \{N_1, N_2, \dots\}$  – множина міст обласного підпорядкування;  $\tilde{R} = \{R_1, R_2, \dots\}$  – множина адміністративних районів;  $\tilde{C} = \{C_1, C_2, \dots\}$  – множина міст та селищ міського типу;  $\Delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots\}$  – множина елементарних ділянок;  $\tilde{D} = \{D_1, D_2, \dots\}$  – множина лінійних географічних об'єктів – автомобільних доріг;  $\tilde{V} = \{V_1, V_2, \dots\}$  – множина сіл;  $\tilde{S} = \{S_1, S_2, \dots\} = \{\tilde{C}, \tilde{V}\}$  – множина населених пунктів;  $\tilde{Z} = \{Z^1(l), l \in \tilde{S}^Z\} \cup \{Z^2(l), l \in \tilde{S}^Z\} \cup \{Z^3(l), l \in \tilde{S}^Z\}$  – множина буферних зон навколо міських населених пунктів;  $\tilde{S}^Z \subset \tilde{S}$  – множина населених пунктів, для яких побудовано буферні зони, то емісії парникового газу в  $S$ -му населеному пункті можна записати як

$$E^X(S) = \frac{Q(S)}{\sum_{s \in \tilde{S}^r} Q(s)} \times \sum_{b=1}^B \sum_{f=1}^F [P^r(f, b) EF^X(f)],$$

де  $P^r(f, b)$  – обсяг використаного палива  $f$ -го типу на діяльність транспорту, що перебуває у  $b$ -й власності в межах  $r$ -го району,  $b = \overline{1, B}$ ,  $f = \overline{1, F}$ ,  $r = \overline{1, R}$ ;  $EF^X(f)$  – коефіцієнт емісії парникового газу;  $Q(s)$  – кількість населення, що проживає у  $s$ -му населеному пункті. Емісії для деякої зони  $Z^n$  міста обласного підпорядкування

$$E^X[Z^n(N)] = C_n \times \sum_{b=1}^B \sum_{f=1}^F [P^N(f, b) EF^X(f)],$$

де  $P^N(f, b)$  – маса палива  $f$ -го типу, використаного в  $N$ -му місті обласного підпорядкування на діяльність автотранспорту, що знаходиться у  $b$ -й власності. Емісії парникового газу на ділянці  $D$ -ї дороги

$$E^X(D) = \frac{C_{total}(D)}{\sum_{d \in \tilde{D}^r} C_{total}(d)} \times \sum_{b=1}^B \sum_{f=1}^F [P^r(f, b) EF^X(f)],$$

де  $C_n$  – коефіцієнт використання палива у  $n$ -й зоні населеного пункту;  $C_{total}(d) = len(d) \times C[k(d), wid(d)] \times Cond(d)$  – стан та параметри ділянки  $d$ ;  $len(d)$  – довжина  $d$ -ї дороги;  $C[k(d), wid(d)]$  – коефіцієнт пропускної здатності дороги, який залежить від її ширини і типу;  $Cond(d)$  – поточний стан дороги. Сумарні емісії парникового газу в елементарній ділянці:



$$E^x(\delta) = \sum_{s \in S} \frac{E^x(s) \times \text{area}(s \hat{\cap} \delta)}{\text{area}(s)} + \sum_{d \in \mathbb{D}} \frac{E^x(d) \times \text{len}(d \hat{\cap} \delta)}{\text{len}(d)}.$$

На рис. 6 представлено результати математичного моделювання процесів емісії парникових газів у дорожньому транспорті Житомирської області.

Обґрунтовано математичні моделі та підходи до геопросторового аналізу процесів емісії парникових газів від залізничного транспорту, які дають можливість знаходити розподіл емісії від локомотивів на залізничних коліях, враховуючи такі параметри для окремих ділянок, як наявність обгінних пунктів, кількість колій та їх завантаженість. Досліджено структуру та територіальне розміщення лінійних джерел емісії парникових газів у залізничному транспорті на основі обсягів використаного палива на теплотягу локомотивів у Житомирській області з використанням розробленого програмного забезпечення. Якщо прийняти позначення:  $\tilde{O} = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$  – множина адміністративних областей;  $\Delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$  – множина географічних об'єктів (елементарних ділянок), на які розбито територію;  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_k\}$  – множина залізничних колій, які входять в задану область;  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$  – види палива (дизельне паливо, тощо);  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_l\}$  – види парникових газів (вуглекислий газ, метан, закис азоту), то математичну модель, яка відображає емісії  $G$ -го парникового газу, що виникли на основних коліях на елементарній ділянці  $\delta$ , можна представити у вигляді:

$$E_w^G(\delta) = \sum_f \left( M_w^O(f) \times \sum_j \sum_{w^O} \left[ \frac{L(\delta, j, w) \times \text{Type}(j, w)}{\sum_j \sum_{w^O} (L(j, w) \times \text{Type}(j, w))} \right] \times EF_w^G(f) \times T_f \right)$$

де  $M_w^O(f)$  – обсяг споживання палива  $f$ -го виду на діяльність залізничних транспортних засобів у області  $O$ ;  $\text{Type}(j, w)$  – коефіцієнт споживання палива, який залежить від типу колії;  $L(\delta, j, w)$  – довжина одного відрізка колії на елементарній ділянці;  $L(j, w)$  – довжина одного відрізка колії  $j$ -го типу;  $EF_w^G(f)$  – коефіцієнт емісії  $G$ -го парникового газу від спалювання палива  $f$ -го виду для забезпечення руху залізничних локомотивів;  $T_f$  – теплотворне значення палива. Як приклад, на рис. 7 представлено результати математичного моделювання процесів емісії парникових газів залізничними транспортними засобами у Житомирській області.

Розроблено і програмно реалізовано модуль спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу та моделювання невизначеності результатів просторової інвентаризації емісій парникових газів на основі невизначеностей використовуваних вхідних даних. Підхід базується на використанні методу Монте-Карло і допускає аналіз емісій як випадкових величин з симетричними і несиметричними розподілами. Здійснено обчислювальні експерименти з аналізу невизначеностей результатів просторової інвентаризації емісій парникових газів у залізничному транспорті Житомирської області.

Здійснено також верифікацію отриманих з використанням розробленої геоінформаційної системи результатів з результатами досліджень інших науковців для адміністративних областей України з подібними характеристиками та умовами господарювання. Порівняння результатів як на рівні питомих емісій для елементарних об'єктів, так і на рівні структури емісій адміністративних районів засвідчило їх співмірність.

## **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання – розроблено математичне та програмне забезпечення спеціалізованої геоінформаційної системи просторового аналізу емісій парникових газів. При цьому отримано такі нові наукові та практичні результати.

1. Обґрунтовано актуальність та необхідність створення спеціалізованих програмних засобів просторового аналізу емісій парникових газів, які б базувалися виключно на безкоштовних компонентах та давали б можливість здійснювати геопросторовий аналіз емісій на регіональному рівні у основних секторах господарської діяльності .

2. Сформовано вимоги та розроблено архітектуру спеціалізованої геоінформаційної системи для аналізу та просторової інвентаризації емісій парникових газів. Розроблено архітектуру модулів оперування географічними об'єктами, які забезпечують читання і опрацювання даних векторних і растрових форматів, відображення табличної і графічної інформації про джерела емісії точкового, лінійного та площинного типу.

3. Сформовано вимоги і побудовано архітектуру спеціалізованих модулів програмного комплексу для географічного аналізу та просторової інвентаризації емісій парникових газів, які призначені для реалізації основних процедур такого просторового аналізу і забезпечують виконання операцій дезагрегації даних про використання палива, моделювання емісійного процесу і оцінювання усіх його параметрів, збереження і візуалізації результатів просторової інвентаризації.

4. Обґрунтовано архітектуру та програмно реалізовано модулі, які забезпечують виконання операцій композиції та дезагрегування як на рівні елементарних об'єктів, так і на рівні віднесених до них даних, реалізацію запитів до даних і обчислень відповідних елементів (полів геопросторової бази даних). Спроектовано модуль порізки площинних та лінійних об'єктів, який дезагрегує табличну і графічну інформацію до рівня елементарних об'єктів і використовується у процедурах просторового аналізу емісій парникових газів та візуалізації результатів. Розроблено модулі перетворення растрових карт у векторний формат, оцінювання параметрів лінійних та площинних джерел емісії, побудови цифрових карт питомих емісій чи поглинань (емісій, віднесених до одиниці площі), елементи графічного інтерфейсу спеціалізованої геоінформаційної системи.

5. Розроблено і програмно реалізовано модуль спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу та моделювання невизначеності

(непевності) результатів просторової інвентаризації емісій парникових газів на основі невизначеностей використовуваних вхідних даних. Підхід базується на використанні методу Монте-Карло і допускає аналіз емісій як випадкових величин з симетричними і несиметричними розподілами.

6. З метою аналізу ефективності програмного забезпечення розробленої геоінформаційної системи просторової інвентаризації парникових газів на регіональному рівні сформовано математичні моделі та здійснено обчислювальні експерименти з геопросторового аналізу емісій у ряді ключових категорій господарської діяльності на прикладі Житомирської області, зокрема, у житловому секторі (площинні джерела емісії), секторах дорожнього та залізничного транспорту (лінійні джерела емісії).

7. Здійснено верифікацію отриманих з використанням розробленої геоінформаційної системи результатів з результатами досліджень інших науковців для адміністративних областей України з подібними характеристиками та умовами господарювання. Порівняння результатів як на рівні питомих емісій для елементарних об'єктів, так і на рівні структури емісій адміністративних районів засвідчило їх співмірність.

Розроблена спеціалізована геоінформаційна система просторового аналізу емісій парникових газів є ефективним інструментарієм для підтримки прийняття дієвих рішень, спрямованих на зменшення емісій та впровадження новітніх енергозберігаючих технологій.

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

1. Striamets O. Geodistributed analysis of forest phytomass: Subcarpathian voivodeship as a case study / O. Striamets, B. Lyubinsky, N. Charcovska, S. Stryamets, R. Bun // *Econtechmod.* – 2014. – Vol.3, N. 1. – P. 95-105.
2. Любінський Б. Б. Архітектура спеціалізованих програмних модулів для географічного аналізу об'єктів при інвентаризації парникових газів / Б. Б. Любінський, Р. А. Бунь // *Штучний інтелект.* – Донецьк, 2011. – №4. – С. 303-309.
3. Любінський Б. Б. Побудова геоінформаційної системи інвентаризації парникових газів з використанням бібліотек GDAL/OGR / Б. Б. Любінський, Р. А. Бунь // *Геодезія, картографія і аерофотознімання: Міжвідомчий науково-технічний збірник.* – Львів : НУ „ЛП”, 2013. – №78. – С. 24-30.
4. Любінський Б. Б. Архітектура спеціалізованого програмного модуля ГІС: побудова карт векторного формату / Б. Б. Любінський, І. О. Пеняк // *Вісник Національного університету „Львівська Політехніка”:* Інформаційні системи та мережі. – 2014. – №783. – С. 154-161.
5. Любінський Б. Б. Програмні засоби моделювання процесів емісії парникових газів у житловому секторі: просторовий аналіз для Житомирської області / Б. Б. Любінський, Р. А. Бунь // *Штучний інтелект.* – Донецьк, 2013. – №4. – С. 377-385.
6. Любінський Б. Б. Спеціалізоване програмне забезпечення для географічного аналізу та інвентаризації парникових газів / Б. Б. Любінський, Р. А. Бунь // *Моделювання та інформаційні технології.* – Київ, 2011. – № 59. – С. 129-135.

7. Любінський Б. Б. Програмні засоби моделювання процесів емісії парникових газів дорожнім транспортом: просторовий аналіз для Житомирської області / Б. Б. Любінський, Р. А. Бунь, О. С. Стрямець // Моделювання та інформаційні технології. – Київ, 2014. – №71. – С. 50-58.
8. Lyubinsky V. Architecture of specialized software modules for composition and disaggregation of objects in inventory of greenhouse gas emissions / V. Lyubinsky / Computer Science & Engineering: Proc. of the 5-th Intern. Conf. of Young Scientists (CSE-2011). – Lviv, 2011. – P. 54-57.
9. Lyubinsky V. B. Software tools to handle the layers in a specialized GIS analyzing greenhouse gas emissions / V. B. Lyubinsky, V. Yu. Khmelovskiy, O. Ya. Danylo / Computer Science & Engineering: Proc. of the 6-th Intern. Conf. of Young Scientists (CSE-2013). – Lviv, 2013. – P. 166-168.
10. Danylo O. Spatial modeling of greenhouse gas emissions from burning biomass in the residential sector in Volyn region / O. Danylo, V. Lyubinsky / Computer Science & Engineering: Proc. of the 6-th Intern. Conf. of Young Scientists (CSE-2013). – Lviv, 2013. – P. 112-114.
11. Любінський Б. Б. Огляд сучасного програмного забезпечення просторової інвентаризації парникових газів / Б. Б. Любінський / Інформатика, математика, автоматика (ІМА'2013): Матер. та прогр. наук.-техн. конф. – Суми, 2013. – С. 89.
12. Чарковська Н. В. Математичне моделювання процесів емісії метану від звалищ твердих побутових відходів у Польщі / Н. В. Чарковська, О. Я. Данило, Б. Б. Любінський / Інформаційні технології, економіка та право (ІТЕП-2014): Матер. міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів. – Чернівці, 2014. – С. 15-16.
13. 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): Матер. V-ої Всеукр. наук.-практ. конф. за міжнародною участю. – Полтава, 2014. – С. 198-201.
14. Любінський Б. Б. Архітектура спеціалізованого програмного модуля ГІС: обробка даних інвентаризації парникових газів / Б. Б. Любінський / Матер. III-ої Всеукр. наук.-практ. конф. „Сучасні технології в економіці, менеджменті та освіті” (СІТЕМ-2012). – Львів : Львівська філія ПВНЗ „Європейський університет”, 2012. – С. 259-263.
15. Любінський Б. Б. Архітектура спеціалізованого програмного модуля збереження даних геоінформаційної системи / Б. Б. Любінський / Десята Відкрита наук. конф. Інституту прикладної математики та фундаментальних наук: Зб. матер. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – С. J1-J2.
16. Любінський Б. Б. Оцінювання параметрів поверхневих джерел емісії при просторовій інвентаризації парникових газів / Б. Б. Любінський, О. Я. Данило / Одинадцята Відкрита наук. конф. Інституту прикладної математики та фундаментальних наук: Зб. матер. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 147.
17. Бунь Р. А. Спеціалізоване програмне забезпечення для географічного аналізу та інвентаризації парникових газів / Р. А. Бунь, Б. Б. Любінський

кий / Дев'ята Відкрита наук. конф. професорсько-викладацького складу Інституту прикладної математики та фундаментальних наук: Зб. матер. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 35.

18. Данило О. Я. Математичне моделювання процесів емісії парникових газів у житловому секторі: імплементація для Житомирської області / О. Я. Данило, Б. Б. Любінський / Одинадцята Відкрита наук. конф. Інституту прикладної математики та фундаментальних наук: Зб. матер. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 161-162.

## АНОТАЦІЇ

**Любінський Б. Б. Математичне та програмне забезпечення геоінформаційної системи аналізу процесів емісії парникових газів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – "Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем". – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертація присвячена побудові архітектури програмного забезпечення спеціалізованого комплексу для географічного аналізу та інвентаризації парникових газів, яка враховує специфіку технологічних процесів на регіональному рівні і дає можливість будувати просторові кадастри емісій. Сформовано вимоги та розроблено архітектуру спеціалізованої геоінформаційної системи для аналізу та просторової інвентаризації емісій парникових газів. Удосконалено математичні моделі емісії парникових газів для житлового, транспортного та залізничного сектору, які базуються на принципі дезагрегації статистичних даних до рівня лінійних та площинних джерел емісії і дають можливість врахувати специфіку наявних національних даних. Здійснено аналіз невизначеності результатів просторової інвентаризації парникових газів у залізничному транспорті Житомирської області.

*Ключові слова:* геоінформаційна система, емісія парникових газів, архітектура програмного забезпечення, математичне моделювання, невизначеність результатів моделювання.

**Любинский Б. Б. Математическое и программное обеспечение геоинформационной системы анализа процессов эмиссии парниковых газов.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.03 – „Математическое и программное обеспечение вычислительных машин и систем”. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертация посвящена построению архитектуры программного обеспечения специализированного комплекса для географического анализа и инвентаризации парниковых газов, которая учитывает специфику технологических процессов на региональном уровне и дает возможность строить пространственные кадастры эмиссий. Сформированы требования и разработана архитектура специализированной геоинформационной системы

для анализа и пространственной инвентаризации эмиссий парниковых газов. Усовершенствованы математические модели эмиссии парниковых газов для жилищного, транспортного и железнодорожного секторов, которые основаны на принципе дезагрегации статистических данных до уровня линейных и плоскостных источников эмиссии и дают возможность учесть специфику имеющихся национальных данных. Осуществлен анализ неопределенности результатов пространственной инвентаризации парниковых газов в железнодорожном транспорте Житомирской области.

*Ключевые слова:* геоинформационная система, эмиссия парниковых газов, архитектура программного обеспечения, математическое моделирование, неопределенность результатов моделирования.

**Lybinsky B. B. Mathematical support and software for the geoinformation system of analysis of greenhouse gas emission processes. – Manuscript.**

Thesis for PhD degree on technical sciences in specialty 01.05.03 – "Mathematical and software support of computer machines and systems" – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

The thesis is devoted to the specialized complex software architecture constructing for the purposes of geographic analysis and greenhouse gases inventory, which takes into account the specific processes at the regional level and makes it possible to build spatial emission inventories.

The necessity and feasibility of the implementation of spatial inventory of greenhouse gases were substantiated using modern information technologies, which are based on the Geographic Information System (GIS). It is shown that an effective mechanism that would give an opportunity to assess the level of emission within the target territories should be a spatial inventory of greenhouse gases, using specialized GIS.

The relevant requirements were formed; an architecture of the specialized geographic information system for the spatial inventory of greenhouse gases was developed using free library for the vector and raster formats GDAL/OGR processing. Detailed modules that provide the reading and displaying for the vector and raster data formats of the tabular and graphical information were designed. An appropriate programming architecture was built as well as the relevant requirements were substantiated for all specialized modules of the software system for the geographical analysis and the spatial inventory of greenhouse gases. Such modules are designed to implement basic procedures of the targeted spatial analysis and provide operations for the fuel consumption data disaggregation, emission process modeling as well as the evaluation of all of its parameters, storing and visualization of spatial inventory results.

Improved mathematical models of greenhouse gas emissions for residential, road transport, and railway sectors, which are based on the principle of disaggregation of statistical data to the level of line- and area-type emission sources, and make it possible to take into account existing national data specifics. The analysis of the uncertainty of the results of spatial inventory of greenhouse gas emissions was performed on the example of railway sector of Zhytomyr region.

*Keywords:* geographic information system, greenhouse gas emission, software architecture, mathematical modelling, uncertainty of modelling results.