

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

Галушак Марія Омелянівна

УДК 004.942:519.876.5

**Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії
парникових газів від використання палива у промисловості
України і Польщі**

Спеціальність: 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні
методи

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Бунь Ростислав Адамович
доктор технічних наук,
професор

Львів – 2017

З М І С Т

Вступ	8
Розділ 1. Аналіз відомих підходів та методів моделювання емісій парникових газів, які виникають внаслідок видобування і переробки різних видів палива та при спалюванні палива у промисловості	17
1.1. Глобальна зміна клімату. Причини, наслідки та шляхи подолання .	17
1.2. Огляд відомих методів здійснення інвентаризації парникових газів на різних рівнях дезагрегації	23
1.2.1. Багаторівневі підходи до оцінювання емісій парникових газів	26
1.2.2. Використання даних дистанційного зондування Землі для просторової інвентаризації парникових газів	29
1.2.3. Аналіз досліджень спрямованих на вивчення емісійних процесів у енергетичному секторі	30
1.3. Класифікація категорій господарської діяльності та специфіка моделювання емісійних процесів у аналізованих секторах	32
1.3.1. Аналіз класифікації економічної активності згідно з методиками МГЕЗК	33
1.3.2. Поняття джерел емісії парникових газів та їх класифікація ..	35
1.3.3. Специфіка моделювання емісій парникових газів, які виникають при видобуванні і переробці різних видів палива	36
1.3.3.1. Аналіз процесів емісії у вугільній промисловості	36
1.3.3.2. Аналіз процесів емісії у нафтогазовій промисловості	41
1.3.4. Особливості інвентаризації емісій парникових газів у промисловому секторі	42
1.4. Поняття просторової інвентаризації парникових газів та аналіз просторових підходів до моделювання емісійних процесів	43
1.5. Висновки до розділу 1	45
Розділ 2. Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів, які виникають при видобуванні та переробці різних видів палива в Польщі та в Україні	47
2.1. Особливості джерел емісії парникових газів у категорії «Видобування та переробка різних видів палива»: специфіка об'єкту моделювання	47

2.2. Підходи до геопросторового моделювання процесів емісії парникових газів у аналізованому секторі	55
2.2.1. Суть геопросторового аналізу	55
2.2.2. Цифрові карти як основа формування геопросторової бази вхідних даних для моделювання процесів емісії парникових газів	58
2.3. Математичні моделі, які описують процеси емісії парникових газів від видобування різних видів палива	60
2.3.1. Моделі емісійних процесів при видобуванні кам'яного та бурого вугілля	60
2.3.2. Моделі емісійних процесів при видобуванні нафти	61
2.3.3. Моделі емісійних процесів при видобуванні природного газу	62
2.4. Математичні моделі емісії парникових газів при спалюванні палива під час переробки різних видів викопного палива	63
2.4.1. Математичні описи емісійних процесів у нафтогазовій промисловості	63
2.4.2. Математичні описи емісійних процесів у вугільній промисловості	63
2.4.3. Адаптація математичних моделей відносно доступних статистичних даних певної країни	65
2.5. Результати просторового моделювання процесів емісії парникових газів при видобуванні і переробці різних видів палива	66
2.6. Сумарний просторовий кадастр емісій та верифікація результатів моделювання	74
2.7. Висновки до розділу 2	75

Розділ 3. Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів, які виникають при спалюванні палива у переробній промисловості	78
3.1. Особливості емісії парникових газів від використання викопного палива у промисловому секторі	78
3.2. Базова математична модель для просторового аналізу емісійних процесів у промисловому секторі	80
3.3. Адаптація математичних моделей відносно доступних статистичних даних певної країни	82

	4
3.4. Моделювання емісії у харчовій промисловості	83
3.5. Математичне моделювання емісії парникових газів від використання викопного палива у металургійній промисловості ..	84
3.5.1. Специфіка металургійної промисловості	84
3.5.2. Математична модель на рівні джерел емісії	85
3.5.3. Результати математичного моделювання	89
3.6. Просторове моделювання емісії парникових газів від спалювання викопного палива у хімічній промисловості	92
3.7. Моделювання емісії парникових газів від інших категорій джерел у промисловості	97
3.8. Результати просторового моделювання емісії парникових газів у промисловості	98
3.9. Висновки до розділу 3	100
Розділ 4. Геоінформаційна технологія просторового моделювання процесів емісії парникових газів та аналізу невизначеності результатів. Дослідження часового покращення знань про емісійні процеси	104
4.1. Геоінформаційна технологія просторового моделювання емісії парникових газів при оперуванні з паливом у видобувній та переробній промисловості	104
4.2. Дослідження часового покращення знань про емісійні процеси ...	109
4.2.1. Збір та аналіз доступної інформації про кадастри емісії парникових газів	110
4.2.2. Ретроспективний аналіз інвентаризаційних звітів	115
4.2.3. Оцінка точності здійсненої інвентаризації на основі переглядів кадастрів емісії парникових газів з часом	123
4.3. Загальні принципи аналізу невизначеностей при просторовому моделюванні емісій парникових газів	130
4.3.1. Поняття невизначеності результатів просторового моделювання	131
4.3.2. Невизначеність статистичних даних про використання та видобування палива	131
4.3.3. Невизначеність емісійних коефіцієнтів	135
4.4. Загальні підходи до об'єднання невизначеностей	139

4.5. Результати аналізу невизначеностей при просторовому моделюванні емісій парникових газів	141
4.5.1. Видобування і переробка палива	142
4.5.2. Промисловий сектор	146
4.6. Висновки до розділу 4	150
Висновки	152
Список використаної літератури	155
Додаток. Довідки про використання результатів дисертаційного дослідження	177

Вступ

Актуальність теми. Людство стикнулось з однією з найбільших глобальних проблем – зміною клімату на нашій планеті, яка зумовлена збільшенням концентрації парникових газів у атмосфері. Незважаючи на те, що очевидної шкоди парникові гази не завдають, але у довгостроковій перспективі, збільшення концентрації парникових газів викличе незворотні зміни у кліматі нашої планети: зміщення кліматичних зон, затоплення територій, стихійні катаклізми та інші. Тому людство спрямовує зараз великі зусилля на зменшення емісії парникових газів.

Одним з джерел емісії парникових газів є процеси видобування та спалювання палива у промисловості. Емісії у цих секторах становлять близько 15% від сумарних емісій. На сьогодні розроблено ряд методик для аналізу емісій парникових газів у промисловому секторі, проте вони пристосовані для проведення інвентаризації тільки на рівні країни чи на глобальному рівні. Однак джерела емісії розміщені вкрай нерівномірно, через що такі підходи не можуть врахувати територіальне розміщення населення, специфіку палива, що споживається, технологію спалювання та інші важливі параметри, які мають безпосередній вплив на величину емісії. Також важливо знати територіальне розміщення джерел емісії, що буде корисно для науковців та владних структур з метою скорочення емісій у результаті впровадження новітніх технологій.

В Україні значний внесок у створення математичних моделей для просторового аналізу емісій парникових газів у промисловому секторі зробили такі вчені як Бунь Р.А., Бойчук Х.В. та Лесів М.Ю. за кордоном досліджують емісії парникових газів від спалювання палива такі вчені 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.

Одним із секторів, який має великий потенціал щодо скорочення емісій парникових газів є сектор видобувної промисловості, особливо у країнах, що

розвиваються. Відомі підходи до аналізу емісій парникових газів не враховують особливості кожного джерела емісії. Проте, для урядових структур доцільно мати інформацію про обсяги емітованих парникових газів на локальному рівні (рівні заводів чи підприємств). Зокрема, це можна використовувати для вироблення ефективних шляхів зменшення емісій. Саме тому **актуальним науковим завданням** є розроблення математичних моделей та геоінформаційної технології просторового аналізу процесів емісії парникових газів від використання викопного палива у промисловому секторі з урахуванням географічної прив'язки емісійних джерел.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано автором у рамках планових робіт кафедри прикладної математики Національного університету «Львівська політехніка» та ряду міжнародних грантів, зокрема:

- гранту 7РП ЄС “Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів” (2011-2014 рр.; грант 7РП ЄС – Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES);
- українсько-австрійського проекту „Просторово-часове оцінювання невизначеності кадастрів емісії парникових газів: ретроспективний аналіз для Австрії та України та ефективне прогнозування” (угода М/196-2015 від 16.11.2015 р., номер держреєстрації 0115U006500 та угода М/85-2016 від 27.07.2016 р.; номер держреєстрації 0116U005309);
- українсько-китайського проекту "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень" (2013 р.; угода № М/12-2013 від 25.04.2013 р.; 2013 р.; номер державної реєстрації 0113U001997);
- держбюджетної теми “Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки

прийняття рішень” (2013-2014 рр.; номер державної реєстрації 0113U003181).

У межах цих робіт автор розробила: математичні моделі та алгоритми, а також геоінформаційну технологію просторового аналізу емісій парникових газів у промисловому секторі на регіональному рівні; геоінформаційну технологію та математичні моделі, методи і алгоритми просторової інвентаризації емісій парникових газів у видобувній та переробній промисловості Польщі та України; базові математичні описи для дезагрегації статистичних даних про використане паливо у промисловому секторі з врахуванням доступних статистичних даних; алгоритми і методи для здійснення ретроспективного аналізу інвентаризаційних звітів; методи оцінювання загальної невизначеності результатів інвентаризації парникових газів у промисловому секторі, а також методи аналізу впливу структурних змін в емісіях цього сектору на загальну невизначеність.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення роздільної здатності просторових кадастрів емісії парникових газів шляхом розроблення математичних моделей та геоінформаційних технологій для просторового аналізу емісій парникових газів від використання палива у промисловості, а також при видобуванні та переробці викопних видів палива на прикладі України та Польщі.

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

- аналіз відомих підходів та методів оцінювання емісій парникових газів від видобувної та переробної промисловостей;
- дослідження специфіки емісійних процесів у кожному із аналізованих секторів;
- розроблення математичних моделей процесів емісії парникових газів при видобуванні та переробці різних видів палива (кам'яного вугілля, природного газу тощо), від спалювання викопного палива у промисловості (хімічній, металургійній, харчовій та інших) на рівні

елементарних об'єктів з врахуванням територіального розміщення населення та різноманітних економічних показників;

- формування бази геопросторових даних з інформацією про джерела емісії парникових газів у кожному аналізованому секторі;
- створення геоінформаційної технології моделювання та просторового аналізу процесів емісії парникових газів, що використовує статистичні дані про економічну діяльність досліджуваних об'єктів, коефіцієнти емісії та цифрові карти аналізованих об'єктів;
- здійснення обчислювальних експериментів з моделювання процесів емісії парникових газів у видобувній та переробній промисловостях Польщі та України, з врахуванням особливостей статистичних даних у цих країнах, та просторовий аналіз емісій парникових газів у досліджуваних секторах;
- розроблення підходу для аналізу невизначеностей результатів просторової інвентаризації парникових газів у досліджуваних секторах господарської діяльності у Польщі та Україні.

Об'єктом дослідження є процеси емісії парникових газів при видобуванні та переробці викопного палива, а також від використання палива у переробній промисловості.

Предметом дослідження є методи просторового моделювання та аналізу процесів емісії парникових газів при видобуванні та переробці викопного палива та використання палива у промисловості, методи аналізу невизначеності результатів інвентаризації парникових газів у цих секторах.

Методи дослідження. При розробленні математичних моделей процесів емісії парникових газів у видобувній та переробній промисловостях з врахуванням географічної прив'язки використано елементи геокодування для точкових та площинних джерел емісії парникових газів, а також теорію баз даних. При створенні баз геопросторових даних зі статистичною інформацією про результати господарської діяльності та коефіцієнтами

емісій використано елементи теорії множин та баз даних. Моделювання та просторовий аналіз результатів інвентаризації здійснено за допомогою геоінформаційних технологій. При аналізі невизначеностей результатів інвентаризації використано методи теорії ймовірності та математичної статистики, метод Монте-Карло.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розв'язанні наукового завдання – розроблення математичних моделей та геоінформаційної технології просторового аналізу процесів емісії парникових газів від використання палива у промисловому секторі та реалізації обчислювальних експериментів на прикладі України та Польщі:

- вперше розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів у видобувній промисловості, які, на відміну від відомих, базуються на принципі дезагрегації статистичних даних до рівня точкових джерел емісії і дають змогу оцінювати леткі емісії парникових газів;
- вперше розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів у переробній промисловості (металургійній, хімічній, харчовій та інших промисловостях), які, на відміну від відомих, базуються на принципі дезагрегації статистичних даних до рівня заводів або промислових об'єктів з врахуванням особливостей окремо взятого заводу чи підприємства;
- вперше розроблено геоінформаційну технологію аналізу емісії парникових газів у промисловому секторі, яка враховує специфіку технологічних процесів на регіональному рівні і дає можливість будувати просторові кадастри емісій;
- вперше розроблено метод ретроспективного аналізу інвентаризаційних звітів та оцінено точність проведеної інвентаризації на основі переглядів кадастрів емісій парникових газів з часом;
- дістав подальшого розвитку метод аналізу невизначеностей результатів просторової інвентаризації парникових газів від

використання палива у промисловому секторі України та Польщі з застосуванням методу Монте-Карло та відповідних симетричних і несиметричних розподілів вхідних даних.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені математичні моделі емісійних процесів та геоінформаційна технологія їх реалізації дають можливість:

- автоматизовано формувати базу геопросторових даних для площинних джерел емісії парникових газів у промисловому секторі;
- враховувати особливості технологічних процесів та специфіку використання палива на промислових об'єктах;
- моделювати емісійні процеси у промисловому секторі з урахуванням специфічних параметрів та коефіцієнтів емісії;
- формувати зручні для сприйняття просторові кадастри емісій та аналізувати структуру емісій як на рівні окремих підприємств, так і на рівні регіонів;
- наочно ілюструвати результати моделювання та просторового аналізу емісій парникових газів у вигляді цифрових карт по різних рівнях деталізації;
- аналізувати невизначеність результатів просторової інвентаризації з врахуванням симетричних та несиметричних невизначеностей вхідних даних.

Реалізація результатів та впровадження. Розроблені математичні моделі та алгоритми просторової інвентаризації емісій парникових газів від видобування та переробки викопного палива, а також від спалювання палива у переробній промисловості програмно реалізовано із використанням спеціалізованої геоінформаційної системи та сформованої бази геопросторових вхідних даних.

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 виникають внаслідок спалювання викопного палива у промисловості Польщі»);

- в Національному університеті "Львівська політехніка":
 - при виконанні гранту 7РП ЄС "Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів" (розроблено геоінформаційну технологію та математичні моделі, методи і алгоритми просторової інвентаризації емісій парникових газів у промисловому секторі Польщі);
 - при виконанні українсько-австрійського проекту (розроблено методи оцінювання загальної невизначеності результатів інвентаризації парникових газів у промисловому секторі, а також методи ретроспективного аналізу інвентаризаційних звітів і алгоритми оцінювання точності проведеної інвентаризації на основі переглядів кадастрів емісій парникових газів з часом);
 - при виконанні українсько-китайського проекту (розроблено базові математичні описи для дезагрегації статистичних даних про використане викопне паливо у промисловому секторі до рівня точкових та площинних джерел у металургійній, хімічній та харчовій промисловості, а також створені відповідні бази геопросторових даних);
 - при виконанні держбюджетної теми (підходи до створення геоінформаційної технології формування просторових кадастрів емісії парникових газів з врахуванням невизначеності);
- у Природному заповіднику „Розточчя” (аналіз антропогенного впливу на природне середовище в сусідніх із заповідником територіях, зокрема процеси емісії парникових газів у промисловому секторі з врахуванням розташування промислових об'єктів та економічних потреб населення).

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі в Національному університеті „Львівська політехніка” в лекційних

курсах „Просторове моделювання екологічних процесів” та „Математичні моделі екологічних процесів” освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр" (спеціальність 113 – „Прикладна математика”, спеціалізація 0102 – „Математичне та комп’ютерне моделювання”).

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: [13] – формування бази геопросторових даних; [15, 116] – математичні моделі емісії парникових газів, результати обчислювальних експериментів та аналіз їх невизначеності; [16, 17, 21, 24] – математичні моделі емісії парникових газів та результати обчислювальних експериментів; [18, 19, 23] – структура геоінформаційної технології та алгоритми просторового моделювання; [26] – математичні моделі емісії парникових газів та алгоритми просторового аналізу; [58, 90] – математичні моделі емісії парникових газів від видобування палива та його використання у промисловості, результати обчислювальних експериментів; [94] – аналіз статистичних даних та алгоритми їх дезагрегації; [117] – математичні моделі емісії парникових газів при видобуванні палива, результати обчислювальних експериментів та аналіз їх невизначеності; [118] – методи та алгоритми ретроспективного аналізу даних інвентаризації парникових газів; [154, 171] – верифікація географічних координат джерел емісії точкового та площинного типів;

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародних та всеукраїнських конференціях, зокрема на: 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions (Kraków, Poland, 2015); YSSP Late Summer Workshop 2013 (Laxenburg, Austria, 2013); Public Scientific Conference of Institute of Applied Mathematics and Fundamental Science (Львів, 2016); Workshop on Geoinformation

Technologies, Spatio-Temporal Approaches, and Full Carbon Account for Improving Accuracy of GHG Inventories (Warsaw, Poland, 2015); 3-й Міжнародній конференції з автоматичного управління та інформаційних технологій (Київ, 2015); IV Міжнародній науково-практичній конференції „Проблеми інформатики та комп’ютерної техніки” (ПІКТ-2015) (Чернівці, 2015); VI Міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні проблеми дослідження довкілля” (Суми, 2015); Десятій та Одинадцятій Відкритих наукових конференціях Інституту прикладної математики та фундаментальних наук (Львів, 2012, 2013); X Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів “Проблеми та перспективи розвитку забезпечення безпеки життєдіяльності” (Львів, 2015); П’ятнадцятій всеукраїнській (Десятій міжнародній) студентській науковій конференції з прикладної математики та інформатики „СНКПМІ – 2012” (Львів, 2012); Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та студентів „Інформаційні технології, економіка та право” (ІТЕП-2012) (Львів, 2012); 70-й студентській науково-технічній конференції : Секція „Прикладна математика та фундаментальні науки” (Львів, 2012), регулярних наукових семінарах кафедри прикладної математики Національного університету „Львівська політехніка” (2012-2016).

Публікації. Результати проведених наукових досліджень відображені у 23 наукових працях, з них: 1 монографія [58], 4 статті у фахових наукових виданнях України [13, 15-17], 1 стаття у закордонному науковому періодичному виданні [116] та 17 публікацій у матеріалах наукових конференцій [18-26, 65, 90, 94, 117-119, 154, 171].

Дисертаційна робота складається з чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку.

У **першому розділі** здійснено огляд основних методів інвентаризації парникових газів та показано, що доступні методи не завжди враховують просторове розташування джерел емісії та їх особливості, а отже не можуть

бути безпосередньо використані для здійснення інвентаризації парникових газів на рівні елементарних об'єктів. Обґрунтовано доцільність розроблення математичних моделей та програмного забезпечення для просторового аналізу емісійних процесів, 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, а також моделюванню процесів емісій парникових газів у досліджуваних секторах.

У **другому розділі** здійснено аналіз та класифікацію основних джерел емісії парникових газів у секторі «Видобувна промисловість». Представлено основний підхід до просторового моделювання емісійних процесів у видобувній промисловості для точкових джерел емісії. На основі цього підходу розроблено математичні моделі емісійних процесів, які враховують регіональну специфіку та територіальне розміщення досліджуваних об'єктів. Розроблено програмні засоби формування баз геопросторових даних з вхідними параметрами інвентаризації. З використанням доступної статистичної інформації щодо результатів видобувної діяльності та специфічних коефіцієнтів емісії проведено обчислювальні експерименти, отримано оцінки емісій парникових газів та на їх основі побудовано набори геопросторових даних, які для зручного аналізу представлено у вигляді цифрових карт.

У **третьому розділі** здійснено аналіз джерел емісії парникових газів від використання викопного палива у промисловому секторі; представлено розроблені підходи до математичного моделювання емісійних процесів у досліджуваному секторі з врахуванням доступних статистичних даних. Розроблено методи побудови бази геопросторових вхідних даних для просторового оцінювання емісії парникових газів від спалювання палива у промисловості. Здійснено обчислювальні експерименти з просторового моделювання процесів емісії парникових газів, отримано георозподілені

результати аналізу емісій. На основі отриманих результатів побудовано цифрові тематичні карти та проаналізовано територіальний розподіл емісій парникових газів, які виникають внаслідок спалювання викопного палива в промисловості України та Польщі.

У четвертому розділі представлено структуру розробленої геоінформаційної системи просторового моделювання емісії парникових газів у промисловості. Введено поняття ретроспективного аналізу інвентаризаційних звітів та обґрунтовано актуальність такого типу аналізу. Оцінено точність проведеної інвентаризації на основі переглядів кадастрів емісій парникових газів з часом. Досліджено невизначеності при просторовому моделюванні процесів емісії парникових газів для видобувної та переробної промисловостей України та Польщі. Встановлено діапазони невизначеностей для входних параметрів розроблених математичних моделей та проаналізовано структуру об'єднаних невизначеностей при просторовому моделюванні процесів емісії парникових газів при видобуванні та переробці палива, а також при спалюванні палива у промисловості України та Польщі.

Дисертант висловлює щире подяку колективу кафедри прикладної математики Національного університету «Львівська політехніка», науковим співробітникам програм ESM та ASA Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (IIASA, Австрія), колективу Інституту системного аналізу Польської академії наук (SRI, Польща). Особлива подяка д-ру Матіасу Йонасу та д-ру Пьотру Жебровському за цінні наукові поради при написанні четвертого розділу дисертації.

Розділ 1. Аналіз відомих підходів та методів моделювання емісій парникових газів, які виникають внаслідок видобування і переробки різних видів палива та при спалюванні палива у промисловості

Розділ присвячено аналізу основних методів та підходів оцінювання емісій парникових газів. Розглянуто різні рівні інвентаризації, що визначені Міжнародною групою експертів зі зміни клімату та наведено їх переваги та недоліки. На основі доступної наукової літератури проаналізовано відомі методи просторового моделювання емісії парникових газів у видобувній та переробній промисловостях. Обґрунтовано доцільність проведення просторової інвентаризації парникових газів, яка дає змогу визначити розташування найбільших джерел емісій. Здійснено аналіз наукової літератури, присвяченої глобальній зміні клімату, просторовій інвентаризації парникових газів в досліджуваних секторах.

1.1. Глобальна зміна клімату. Причини, наслідки та шляхи подолання

Зміни клімату є найбільшою загрозою для природи й людства у 21-му столітті. Вже сьогодні в багатьох куточках нашої планети стають помітними наслідки кліматичних змін – танення льодовиків, що в свою чергу викликає зміну рівня морів і океанів, які підтоплюють населені території, сильні шторми та рясні повені, аномальні снігопади і посухи.

Клімат – надзвичайно складна річ. Жоден з науковців не може однозначно сказати, які чинники і за якої інтенсивності впливають на розвиток кліматичних процесів. У самому середовищі дослідників точиться дедалі більше дискусій з різноманітних питань щодо прогнозів на майбутнє. Хоча в одному науковці все ж одностайні – у тому, що людина своєю діяльністю робить основний внесок у справу нагрівання Землі – а саме викидаючи у повітря величезні обсяги двоокису вуглецю (CO_2) та інших

парникових газів, які мають безпосередній вплив на зростання середньорічної температури на нашій планеті. Для зменшення зміни клімату потрібно радикально скоротити емісії цих газів [31].

Парниковий ефект – основна з причин глобальної зміни клімату на нашій планеті. Парниковий ефект був виявлений Жозефом Фур'є в 1824 році і вперше був кількісно досліджений Сванте Арреніусом у 1896 році. Це процес, при якому поглинання і випромінювання інфрачервоних променів атмосферними газами викликає нагрівання атмосфери і поверхні планети [174].

Підвищення температури – це не випадковість, у цьому можна пересвідчитись аналізуючи льодові брили Антарктики. Науковці пробурили в кризі Антарктики глибокі свердловини й добули частини льоду, якому тисячі років. Проаналізувавши їхній хімічний склад, вчені визначили, якою була температура атмосфери і вміст вуглекислого газу понад 600 000 років тому. Результати цих досліджень представлено на рис. 1.1, де чітко видно, що з ростом вмісту вуглекислого газу зростала температура на планеті.

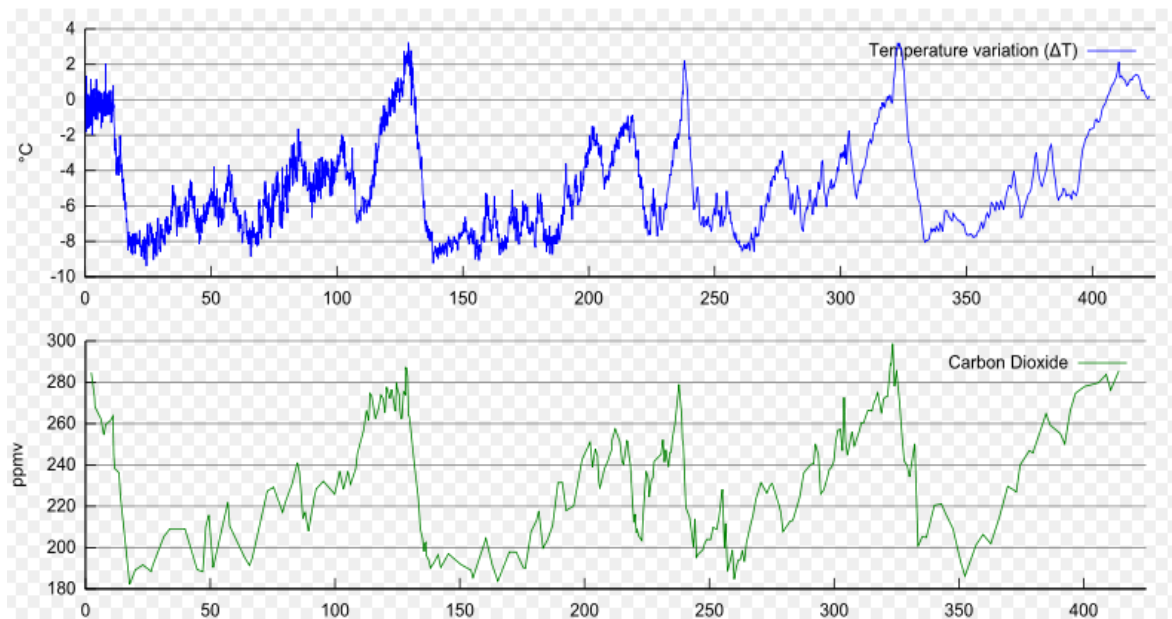


Рис. 1.1. Зміни температури та вмісту CO₂ в льодовиках Антарктики за останні 450 тис. років за даними зі станції Восток, тис. років [113]

Глобальне потепління зовсім не означає потепління скрізь і в будь-який час. Зокрема, в будь-якій місцевості може збільшитися середня температура літа і зменшитися середня температура зими, тобто клімат стане більш

континентальним. Глобальне потепління можна виявити тільки усереднивши температуру по всіх географічних широтах і всіх порах року. До кінця цього сторіччя середня температура Землі може підвищитися на $1.4 - 6.4^{\circ}\text{C}$ і більше. Однозначно вчені не можуть сказати на скільки відсотків зросте глобальна температура, але розроблено низку різноманітних сценаріїв зміни температури, в більшості з них наслідки невтішні. Для нашої планети критична позначка є зростання температури більше ніж на 2°C . Як бачимо з рис. 1.2 значна частина розроблених сценаріїв прогнозує до кінця цього сторіччя зростання температури більше ніж на 2°C [109].

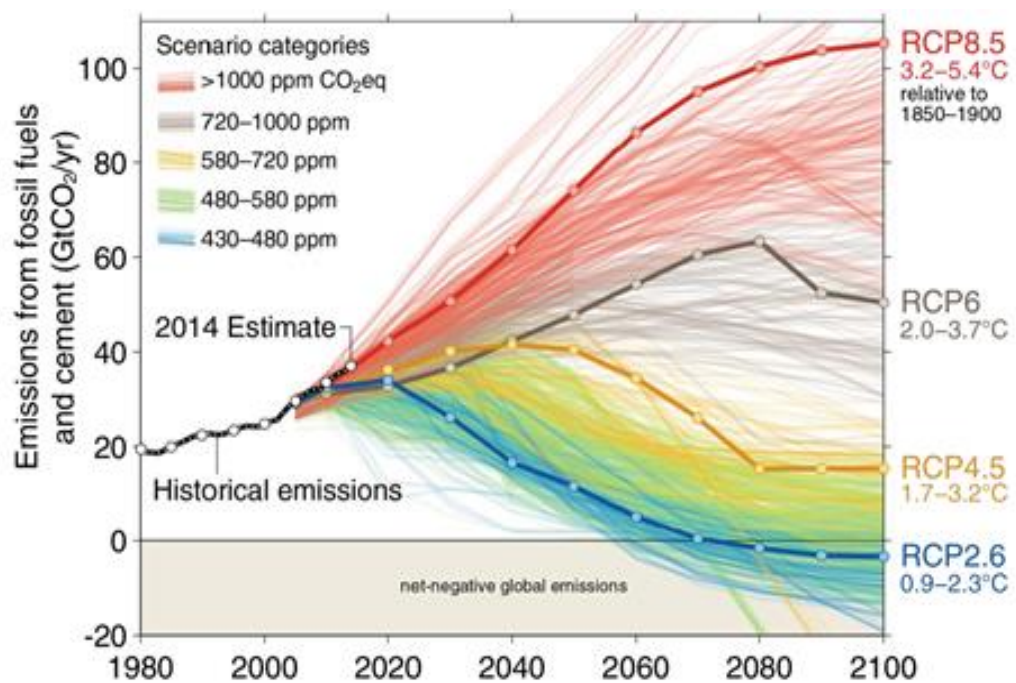


Рис. 1.2. Різноманітні сценарії зростання середньорічної температури планети [95]

У багатьох регіонах підвищення температур та посухи обмежують продуктивність сільського господарства, що є одним з найважливіших секторів економіки.

Основні наслідки глобальної зміни клімату:

- скорочення запасів води, оскільки підвищення температури спричиняє швидше випаровування з поверхні землі, що в свою чергу зумовлює подальший тиск на ґрунтові води, які й так бідніють; за прогнозами

вчених, якщо ситуація не зміниться, до 2025 року дві третини людей світу будуть відчувати нестачу питної води;

- затоплення населених територій внаслідок танення льодовиків (лише за минулі 50 років товщина арктичної криги зменшилась на 50%);

- лісові пожежі стають все частішими та спустошуючими (спустошливі пожежі в Австралії, Португалії, Каліфорнії та інші);

- знищення цілих екосистем внаслідок міграції тварин і птахів у більш придатні для них умови проживання, вимирання деяких видів тварин і рослин;

- поширення тропічних інфекційних хвороб (недавнє поширення вірусу лихоманки Західного Нілу) та інші.

Економічні збитки від глобального потепління неухильно зростають. Відповідно до нещодавнього звіту Британського уряду постійні кліматичні зміни можуть коштувати світу близько 5% валового внутрішнього продукту (ВВП) щорічно. Якщо справдяться найбільш драматичні прогнози, ця цифра зросте до 20% ВВП [14].

У той же час, вказаний звіт свідчить, що вартість зменшення емісій вуглекислого газу може становити всього лише близько 1 % світового ВВП. Інакше кажучи, прибуток від активних, своєчасних дій у цьому напрямку буде значно перевищувати збитки [14].

Фахівцями пропонуються різні способи подолання цієї проблеми, але є очевидним, що швидких, одноразових заходів неможливо придумати. Основними шляхами вирішення проблеми глобальної зміни клімату є зменшення емісій (впровадження новітніх технологій у спалюванні палива, використання альтернативних джерел енергії) і збільшення поглиначів парникових газів. Найбільшими поглиначами вуглекислого газу є океан і наземна біомаса. Таким чином, зменшення вирубки і нове насадження лісів можуть у значній мірі зменшити антропогенний вплив людини на нашу планету.

Для стабілізації концентрації парникових газів у атмосфері нашої планети міжнародним співтовариством у 1992 році підписано Рамкову

конвенцію ООН про зміну клімату (РКЗК ООН), а в 1997 році – прийнято Кіотський протокол до неї [133]. Основною метою цього документу є контроль за виконанням прийнятих зобов'язань щодо зменшення концентрації парникових газів в атмосфері шляхом встановлення обмеження на емісії для індустріально розвинутих країн. У 2012 році закінчилася дія Кіотського протоколу, а тому ще до його закінчення, на Конференції сторін COP-17 в місті Дурбан в Південно-Африканській республіці було домовлено про продовження дії протоколу до 2017 року. Паризька угода має прийти на заміну Кіотському протоколу. Текст самої угоди було затверджено в грудні 2015 року на 21 Конференції учасників UNFCCC в Парижі. Паризька угода набере чинності з 1 січня 2021 року після ратифікації не менш як 55 державами, обсяг емісій парникових газів яких становить щонайменше 55% від загальносвітових.

Польща ратифікувала Кіотський протокол у грудні 2002 року, чим прийняла на себе зобов'язання скоротити емісії у 2008 – 2012 роках протягом першого терміну його дії на 6% порівняно з базовим 1988 роком. Протягом 1988-2001 років емісії парникових газів у Польщі скоротилися на 33%. Цього вдалося досягнути в значній мірі внаслідок економічного спаду та переходу до ринкової економіки. У 2004 році країна стала членом Європейського Союзу, а тим самим приєдналася до внутрішніх процесів забезпечення виконання умов Кіотського протоколу. Сьогодні Польща інтенсивно впроваджує відновлювальні джерела енергії на своїй території.

Україна одна з небагатьох країн світу, яка з 1990 по 2000 рік різко скоротила емісії парникових газів через занепад промисловості, а за наступні вісім років зростання емісій вони так і не наблизилися до показників 1990-го (див. рис. 1.3). Ратифікувавши Кіотський протокол у 2004 році, Україна отримала можливість реалізувати невикористані нею квоти на емісії парникових газів. Згідно з інформацією Національного екологічного центру (НЕЦ), у державний бюджет України у 2009-2010 рр. надійшло 470 млн. євро у результаті продажу надлишку квот за Кіотським протоколом. При цьому

Україна взяла зобов'язання реалізувати на ці кошти проекти зі скорочення емісії парникових газів, але використання коштів отриманих від торгівлі квотами не завжди було спрямоване на впровадження новітніх технологій з метою скорочення емісій парникових газів. Україна не в повному обсязі забезпечила виконання механізмів Кіотського протоколу, а досягнуті скорочення в емісіях парникових газів були забезпечені в значній мірі внаслідок економічної кризи та зменшення населення країни.

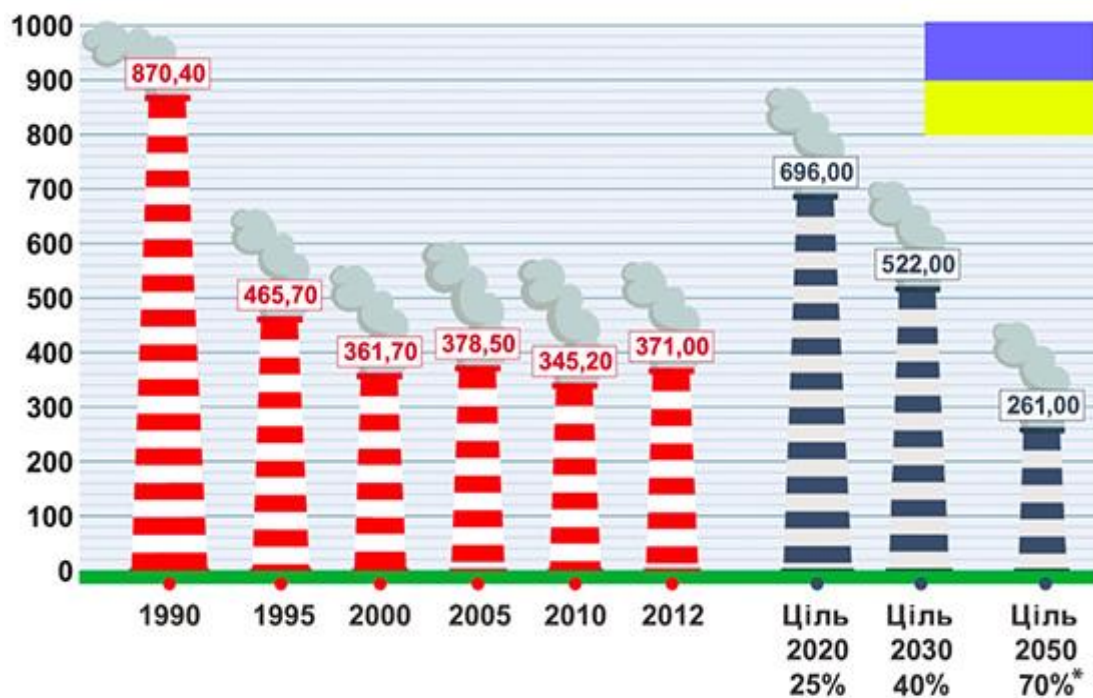


Рис. 1.3. Емісії парникових газів у 1990–2012 роках та цілі України у 2020 та 2030 роках та пропонована ціль на 2050 рік[54]

Однією з вимог Паризької угоди до країн-підписантів є розробка Стратегії низьковуглецевого розвитку до 2050 року. Проект такої стратегії був представлений в Україні у 2014 році за підтримки ПРООН, проте він потребує доопрацювання через неузгодженість планів розвитку енергетики, оскільки поки що в Україні відсутня узгоджена енергетична стратегія до 2050 року.

1.2. Огляд відомих методів здійснення інвентаризації парникових газів на різних рівнях дезагрегації

Згідно з Кіотським протоколом кожна країна-учасниця повинна створити національну систему для оцінювання антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами усіх парникових газів, передбачених протоколом. Такі національні системи повинні базуватись на спільних засадах, а результати інвентаризацій у країнах повинні бути представлені в однаковому форматі. З цією метою Міжурядова група експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) розробила "Керівництво для національних інвентаризацій емісій парникових газів" (методики МГЕЗК) [61], де пропонуються підходи до здійснення національних інвентаризацій антропогенних емісій із поділом на категорії джерел емісії парникових газів. У цих методиках взято до уваги такі парникові гази: вуглекислий газ (CO_2), метан (CH_4), оксид азоту (N_2O), гідрофторвуглеці (HFCs), перфторвуглеці (PFCs), гексафторид сірки (SF_6), трифторид азоту (NF_3) та інші галокарбонові сполуки. Крім того, враховуються також інші гази, такі як моноксид вуглецю (CO), оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO_2), аміак (NH_3) та леткі неметанові органічні сполуки (NMVOCs), які безпосередньо не є парниковими газами, але опосередковано впливають на парниковий ефект у результаті відповідних хімічних реакцій в атмосфері.

Згідно із методиками МГЕЗК усі джерела парникових газів поділено на основні сектори, які включають відповідні процеси і джерела:

- 1) енергетика;
- 2) промисловість;
- 3) сільське господарство, лісове господарство та інші види землекористування;
- 4) відходи;
- 5) інші сектори.

Кожен сектор включає в себе ряд підкатегорій. На рис. 1.4 для прикладу наведено структуру джерел емісії в енергетичному секторі. В свою чергу

категорія «Промислове виробництво та будівництво» поділяється на підкатегорії: хімічна, харчова, металургійна та інші категорії промисловості. Інвентаризація повинна проводитись для найнижчих підкатегорій із подальшим сумуванням результатів до більш загальних категорій та секторів. Національні загальні емісії обчислюють як суму усіх емісій та поглинань для кожного газу із врахуванням коефіцієнту глобального потепління.

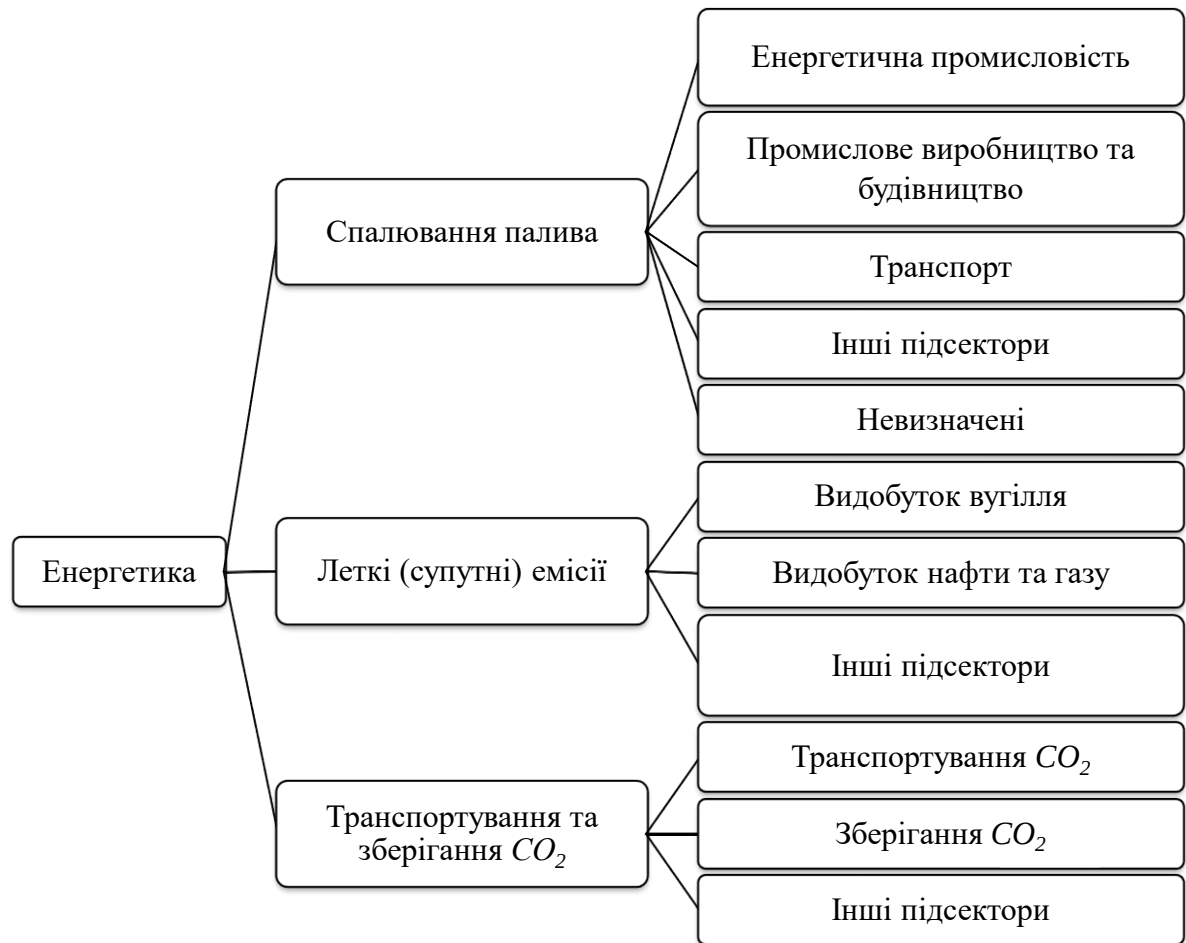


Рис. 1.4. Структура джерел емісії в енергетичному секторі [28]

Беззаперечним позитивним аспектом методик МГЕЗК є їх гнучкість та універсальність, адже вони можуть використовуватись фахівцями багатьох країн, незважаючи на те, що країни розміщені у різних кліматичних зонах, мають істотні відмінності в рівнях економічного розвитку, різний розподіл секторів економічної діяльності, національні особливості збору та обробки статистичної інформації і т.д.

Методики МГЕЗК є повністю сумісні з методиками CORINAIR [104], які стосуються певної технології та включають можливість просторового аналізу емісій від точкових та територіальних джерел.

Обидві методики базуються на одних принципах:

- 1) повне покриття антропогенних викидів;
- 2) результатом інвентаризації є узагальнені для країни значення по категоріях джерел;
- 3) чітке розмежування між емісіями, що виникли в наслідок енергетичної та неенергетичної діяльності;
- 4) прозорість та повна документація для перевірки даних та коефіцієнтів емісії.

Але на відміну від методик CORINAIR, які призначені для країн Євросоюзу, методики МГЕЗК можна застосувати до будь-якої країни світу.

Проте, через свою універсальність методики МГЕЗК не пристосовані до повноцінного врахування регіональних особливостей країн, що веде до зниження ефективності інвентаризації з точки зору окремої країни та веде до збільшення похибки інвентаризації. Саме тому автори методик заохочують до розробки нових національних підходів на основі методик МГЕЗК, але із врахуванням особливостей кожної країни.

Базова модель для оцінювання емісій є добутком щонайменше двох величин, наприклад:

- даних про показники діяльності (спожите паливо, кількість видобутої сировини тощо);
- емісійного коефіцієнта оціненого на основні здійснених досліджень (запропонованого МГЕЗК або самостійно оціненого певною країною чи підприємством).

На практиці підходи до інвентаризації емісій є набагато складнішими, але принцип залишається тим же.

1.2.1. Багаторівневі підходи до оцінювання емісій парникових газів

В залежності від потреб та доступності даних інвентаризацію емісій парникових газів проводять на різних рівнях. Можна виділити три основні рівні:

- а) інвентаризація на глобальному рівні;
- б) інвентаризація на національному рівні (рівень країни);
- в) просторова інвентаризація для деяких ділянок території.

Кожен із цих рівнів має свою специфіку проведення інвентаризації, недоліки та переваги, а також різноманітні застосування результатів.

Інвентаризація на глобальному рівні передбачає оцінювання емісій парникових газів на рівні всієї планети. Результати інвентаризації на такому рівні мають важливе значення для дослідження глобальної картини впливу людської діяльності на стан атмосферного повітря. Ці результати широко використовують у різноманітних кліматичних моделях, для прогнозування майбутнього розвитку подій згідно із прогнозованими сценаріями емісій. Найбільшими базами даних оцінок емісій парникових газів на глобальному рівні є: Carbon Dioxide Information and Analysis Center (CDIAC) у США [147] та Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) [103].

Інвентаризація на національному рівні полягає у побудові кадастрів емісії парникових газів на рівні окремої країни. При такому підході вхідною інформацією для інвентаризації є загальні для країни дані про споживання палива, виробництво промислової продукції, вирубування лісів та ін., а також коефіцієнти емісії характерні для країни в цілому. Така інвентаризація є швидкою, усі дані є легкодоступними і щорічно готуються органами статистики тієї чи іншої країни.

Усі країни-учасники Кіотського протоколу (в тому числі і Польща та Україна) щорічно готують національні звіти про інвентаризацію емісій парникових газів. Такі звіти подають у вигляді уніфікованих таблиць, що включають шість парникових газів із розбиттям на основні види джерел

емісії та абсорбції. Інвентаризація проводиться на основі методик МГЕЗК, але кожна країна сама вибирає рівень деталізації. Оцінки емісії парникових газів на національному рівні також наявні у базах даних CDIAC та EDGAR.

Результати інвентаризації на національному рівні є цінними для встановлення міжнародних домовленостей щодо зниження антропогенних емісій, дають можливість контролювати процес виконання країнами-учасниками своїх зобов'язань, ранжувати країни за рівнями емісії і т.д.

Недоліком такого підходу є те, що як вхідні дані для інвентаризації, так і результати є зосередженими, вони мають сенс лише для країни в цілому, тому є малокорисними для планування екологічного розвитку регіонів та обґрунтовування виправданості заходів на місцевому рівні щодо зниження емісій.

Найнижчий рівень інвентаризації полягає у проведенні інвентаризації для окремих, достатньо малих ділянок території визначеного розміру. На відміну від попередніх рівнів у цьому випадку вхідні та вихідні дані моделі відносяться до елементарної ділянки. За умови достатнього рівня деталізації результати добре відображають характер та структуру емісій на деякій території, що дає можливість здійснити різноманітні види аналізу. З іншого боку, інвентаризація такого рівня дає можливість використовувати специфічні коефіцієнти емісії, відомі, наприклад, для конкретних підприємств, що дає широкі можливості для зниження невизначеностей результатів інвентаризації.

Недоліком такої інвентаризації є важкість застосування, адже необхідно мати дуже детальні вхідні дані про господарську діяльність на певній ділянці території, коефіцієнти емісії парникових газів, які б враховували основні параметри тієї чи іншої діяльності в конкретній елементарній ділянці.

Інвентаризація емісій парникових газів для деякої території може бути здійснена декількома способами. Один із способів – це інвентаризація парникових газів за допомогою способу «знизу - верх». Він полягає у тому, що використовують локальну інформацію про окремі джерела емісії і відповідні коефіцієнти емісії для побудови кадастру.

Такий підхід найкраще і найточніше відображає специфіку емісійних процесів на відповідній території, за умови використання достовірних статистичних даних і застосування точних і вірних коефіцієнтів емісії. Прикладом використання підходу «знизу - вверху» є інвентаризація, проведена в Індії окремо для кожного із 466 її адміністративних районів. На жаль, проведення такого роду інвентаризації є досить важким заняттям, адже такого роду статистичні дані є досить часто конфіденційні, дослідження коефіцієнтів емісії в окремих регіонах чи на підприємствах є також досить затратне і не завжди можливе.

Інший спосіб інвентаризації полягає у використанні загально-національних значень емісії, які дезагрегують до рівня дрібніших об'єктів, використовуючи певні легкодоступні статистичні дані, які можна пов'язати з певним родом діяльності. Такий метод оцінювання емісій парникових газів часто називають інвентаризацією «зверху - вниз».

Для різних джерел емісії використовують різні статистичні показники, на основі яких здійснюють дезагрегацію. Наприклад, для дезагрегації загальнонаціональних емісій у промисловому секторі використовується значення валової доданої вартості, кількість населення, площа промислових об'єктів. Для інвентаризації емісій парникових газів у видобувній промисловості: кількість видобутого палива на одному родовищі, потужності заводів, тощо.

Методика оцінювання емісій парникових газів «зверху - вниз» є значно простішою у використанні у порівнянні з методикою «знизу - вверху» і вимагає менше ресурсів для її проведення [44]. Але використання меншого обсягу статистичного матеріалу зумовлює і певні неточності у обчисленнях. Результати інвентаризації є наближеними, не враховують розташування усіх джерел емісії та специфіку коефіцієнтів емісії на досліджуваній території. Представлений у цій дисертації підхід є гібридний, він поєднує у собі елементи, як методу «знизу - вверху», так і методу «зверху - вниз». Зокрема, сама просторова інвентаризація здійснюється методом «знизу - вверху»,

натомість при цьому використовуються як вхідні дані певні індикатори (проксі дані), які отримано методом «зверху - вниз».

1.2.2. Використання даних дистанційного зондування Землі для просторової інвентаризації парникових газів

Дані дистанційного зондування Землі часто використовуються для оцінювання емісій парникових газів у секторі «Зміни землекористування». Такі знімки дозволяють оцінити площі орних земель чи лісів, проаналізувати зміни внаслідок атропогенних чинників. За допомогою супутникових знімків було створено глобальні карти з найкращою роздільною здатністю (GLC-2000, MODIS, GlobCover). Провідні вчені Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (м.Лаксенбург, Австрія) розробили програмний додаток, який дає можливість кожному бажаючому перевірити вручну програмно розпізнані пікселі і таким чином долучитись до створення глобальних карт земельного покриття.

Також сьогодні стає все популярніший плагін «Google Земля» - віртуальна глобальна карта Землі, яка також отримана за допомогою космічного зондування супутниками NASA та інших. Зовсім недавно Google запустив хмарну програмну платформу - Google Earth Engine. Основним завданням цієї платформи є збір усіх супутникових знімків і даних про стан планети з інших джерел для моніторингу зміни у земельному господарстві (лісництві, орних землях тощо).

На кінець 2012 року нараховувалося понад два десятки космічних апаратів дистанційного зондування Землі, а в безпосередній реалізації програм супутникових спостережень брали участь 25 країн.

З усіх наявних проектів отримання знімків з супутників та зондів дистанційного застосування найбільш популярним є проект супутників дистанційного зондування Землі – Landsat (Land Remote Sensing Satellite) [95], що має явні переваги при інвентаризації парникових газів на регіональному та на рівні країн. Landsat забезпечує знімки дуже високої

якості, які робляться кожні 16 днів. База даних доступна з 1984 року, хоча давніші знімки не є достатньо точними. Серед інших засобів дистанційного зондування: Advanced Spaceborne Thermal, Emission and Reflection Radiometer (ASTER) – японський сенсор, встановлений на борту супутника Terra, запущеного в 1999 року агентством Національного управління аеронавтики і космосу уряду США; Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) – система, яка належить США і встановлена також на борту супутників Terra та Aqua; Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) – це унікальний оптичний сенсор, що періодично запускається на авіабазах США на спеціальних літаках[44].

1.2.3. Аналіз досліджень спрямованих на вивчення емісійних процесів у енергетичному секторі

Значна кількість наукових праць присвячена вивченню емісійних процесів у різних секторах економіки, зокрема у видобувній та переробній промисловості. Це зумовлено тим, що оцінити емісії у видобувній промисловості є нелегким завданням. Багато науковців також досліджує увесь енергетичний сектор, як джерело найбільших емісій вуглекислого газу у результаті використання викопного палива.

Міжнародна організація CDIAC на основі даних про споживання енергетичних ресурсів в окремих країнах світу проводить оцінювання емісій вуглекислого газу на глобальному рівні. На основі цих даних в [149] побудовано просторово розподілені оцінки емісій вуглекислого газу для ділянок, які виникли внаслідок умовного розбиття Землі сіткою $1^\circ \times 1^\circ$. Емісії CO_2 спочатку обчислили на національному рівні, а згодом використали показник щільності населення для розподілу по ділянках території у межах країн. Подібні проекти на глобальному рівні реалізовано в EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research) [103] та GEIA (Global Emission Inventory Activity) [132], причому теж із деталізацією $1^\circ \times 1^\circ$ (рис. 1.5).

Також варто відзначити величезна базу даних CARMA просторово розподілених емісій вуглекислого газу, які виникають внаслідок спалювання палива на електростанціях. CARMA – це один із найбільших проектів, який здійснив точну глобальну просторову інвентаризацію у енергетичному секторі, а саме в категорії «Виробництво електроенергії». Дані про використання палива отримані з різноманітних джерел зі всіх куточків світів.

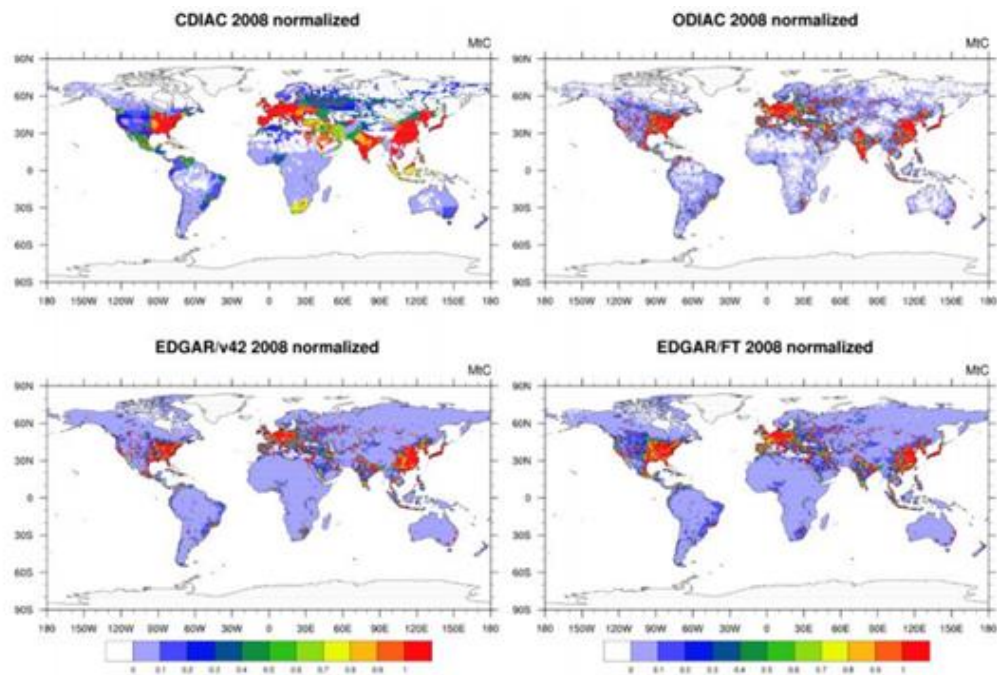


Рис. 1.5. Просторово розподілені емісії від використання викопного палива оцінені за допомогою 4 методик: CDIAC, ODIAC, EDGAR v4.2 та EDGAR Fast track, Ггб 2008 рік, роздільна здатність: $1^\circ \times 1^\circ$ [153]

Для Європи інвентаризацію починаючи з 1995 року щорічно проводить ЕМЕП/CORINAIR (Monitoring and Evaluation of the long-range Transmission of the Air Pollutants in Europe) [104] для комірок сітки розміром 50 км x 50 км із поділом на 11 категорій джерел.

Побудовою математичних моделей емісій парникових газів з врахування просторового розташування джерел та специфікою джерел займаються дослідники як в Україні, так і за кордоном. Більшість моделей описують процеси тільки в межах окремої країни або адміністративного району чи міста. Значну кількість досліджень було проведено для оцінювання летких емісій метану від видобувної промислості. Польські вчені досліджували леткі

емісії метану на одному родовищі і порівнювали свої результати моделювання з результатами вимірювання.

У роботах Х. Гамаль [28] представлено математичні моделі для оцінювання емісій парникових газів у видобувній та переробній промисловостях Західної України. Врахована територіальне розміщення джерел емісій, зокрема шахт, місць видобутку нафти та газу, а також міських населених пунктів.

У праці [44] розроблено та реалізовано підхід для просторового оцінювання емісій парникових газів в енергетичному секторі прикордонних регіонів Західної України, а також Люблінського та Підкарпатського воєводств Польщі. Здійснено інвентаризацію парникових газів від спалювання палива на найбільших заводах за допомогою методу зверху-вниз, дані з регіонального рівня дезаггеговані на рівень елементарних об'єктів пропорційно до економічних показників підприємств та густоти заселеності території.

1.3. Класифікація категорій господарської діяльності та специфіка моделювання емісійних процесів у аналізованих секторах

Частка промислового сектору Польщі в сукупних емісіях парникових газів від енергетичного сектору у 2010 році склала 9,5% (30 968, тис. т CO₂-екв.), а летких емісій – 3,6% (11 891 тис. т CO₂-екв.) [159]. У порівнянні з базовим 1988 роком рівень летких емісій від видобування та переробки палива зменшився аж на 41%. Таке значне скорочення емісій викликане впровадженням новітніх технологій на шахтах, а також скороченням видобування палива.

Натомість у 2010 р. емісії в категорії «Промисловість і будівництво» України склали 59 000 тис. т CO₂-екв., що становило близько 23,8% від загальних емісій у категорії «Спалювання палива», і в порівнянні з 2009 роком мав місце ріст на 8% [56]. З 1990 року (базового) емісії у цій категорії знизилися на 69,2%. Леткі емісії парникових газів, які виникають внаслідок видобування палива, в Україні становили в 2010 році 42 600 тис. т CO₂-екв.

або близько 14,6% від загальних емісій у секторі «Енергетика» і підвищилися на 2,4% у порівнянні з 2009 р. З 1990 р. емісії у цій категорії знизилися на 50,1%, подібно як і в Польщі це зумовлено скороченням видобування палива та впровадження сучасних технологій[152].

1.3.1. Аналіз класифікації економічної активності згідно з методиками МГЕЗК

Згідно із методиками МГЕЗК усі джерела емісії парникових газів поділено на основні сектори, які включають відповідні процеси і джерела. Енергетичний сектор дає найбільший внесок у сумарні емісії парникових газів, частка цього сектору у сукупних емісіях становить 70%-80%. До енергетичного сектору економіки відносять діяльності, пов'язані з виробництвом, транспортуванням, використанням, зберіганням та розподілом енергії. Внаслідок цих процесів емісії виникають при спалюванні палива чи як супутні емісії, які виникають внаслідок безпосереднього випаровування парникових газів [61]. Методики МГЕЗК пропонують проводити інвентаризацію емісій у цьому секторі окремо для кожної підкатегорії сектору. За методиками МГЕЗК сектор «Енергетика» поділяють на ряд основних підсекторів (див. рис. 1.4), деякі з яких для детальної інвентаризації ділять на окремі категорії джерел. Дисертаційна робота Х. Бойчук [28] присвячена просторовому оцінюванню емісії парникових газів, які виникають внаслідок видобування викопного палива і використання палива у переробній промисловості Західної України.

Згідно з методиками МГЕЗК [62] у видобувній промисловості розглядають емісії від видобування і переробки твердих видів палива (кам'яного вугілля) та емісії у нафто-газовій промисловості. Варто відзначити, що у категорії «Видобувна промисловість» мають місце також емісії від спалювання палива на переробних заводах, таких як коксовні та нафтопереробні заводи, а також леткі (супутні) емісії, які виникають внаслідок вивільнення метану під час видобувної діяльності чи хімічних реакцій на переробних заводах. Детальні структури емісій парникових газів у видобувній промисловості представлено на рис. 1.6 та рис. 1.7.

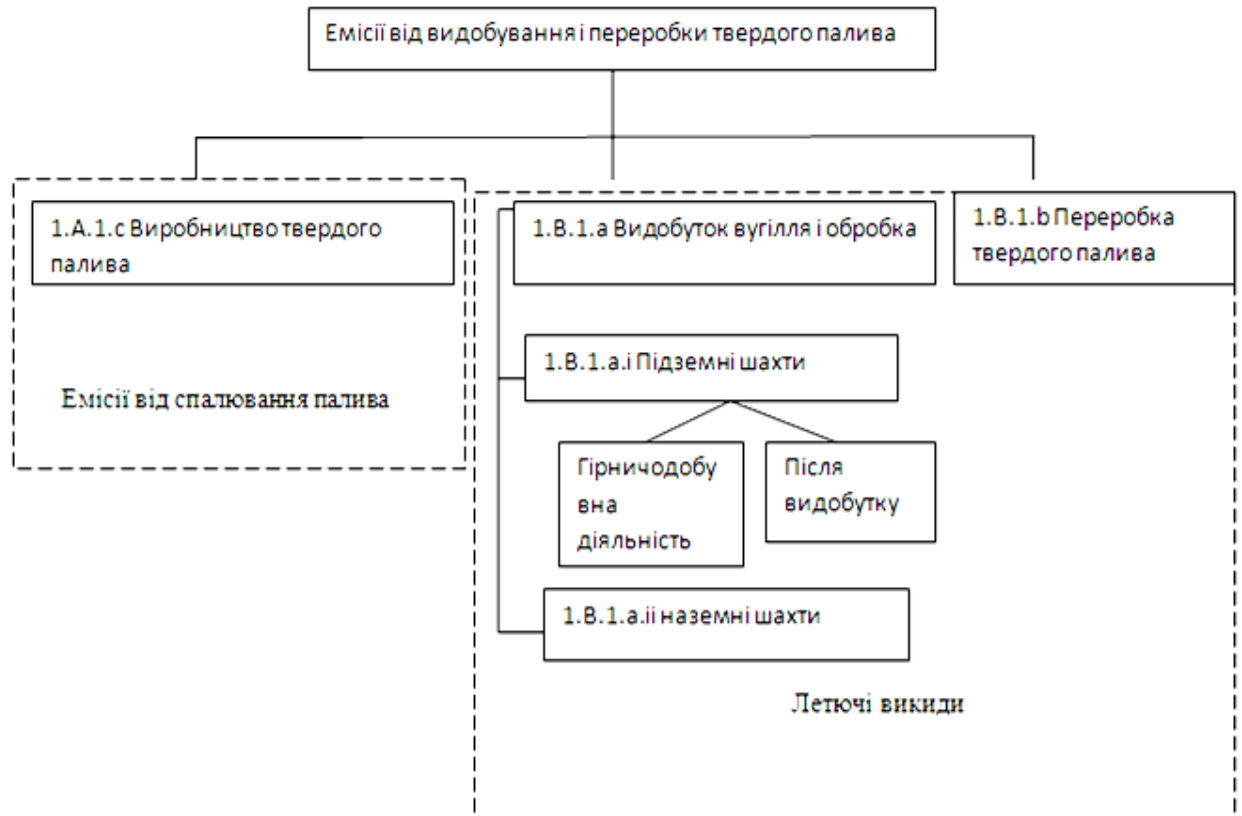


Рис. 1.6. Структура емісій парникових газів, які виникають при видобуванні і переробці твердих видів палива

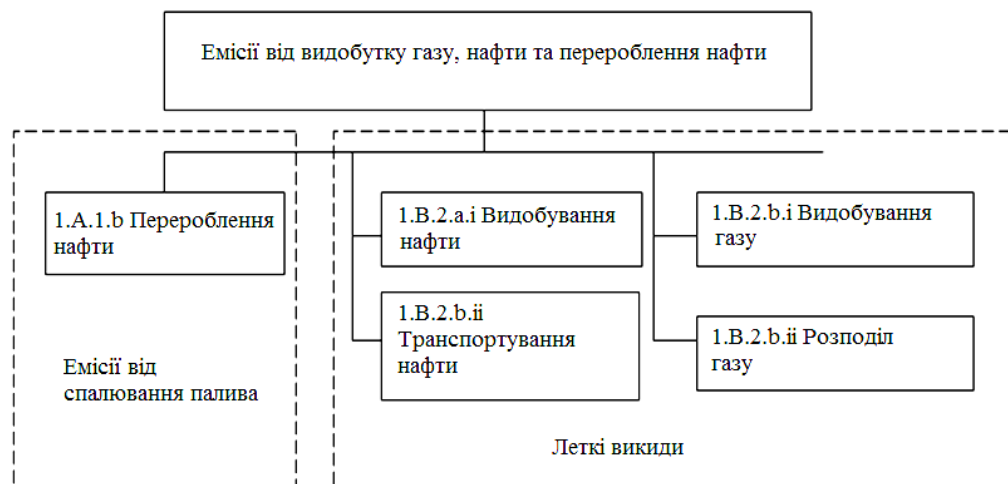


Рис. 1.7. Структура емісій парникових газів, які виникають при видобуванні рідкого та газоподібного палив і переробці рідкого палива

У секторі “Переробна промисловість та будівництво” виділяють ряд категорій. Варто зауважити, що у цьому секторі досліджують лише емісії від спалювання палива для енергетичних потреб промислових об’єктів,

натомість емісії від виробничих процесів враховуються у секторі «Промислові процеси» [75].

1.3.2. Поняття джерел емісії парникових газів та їх класифікація

Для здійснення інвентаризації парникових газів доцільно усі джерела емісії поділити на три основні типи – лінійні, площинні та великі точкові джерела. Підходи до моделювання та оцінювання емісій парникових газів для кожного з них є принципово різними.

До великих точкових джерел відносять здебільшого великі джерела емісій, які характеризуються значними емісіями парникових газів внаслідок своєї діяльності та відносно малою площею, яку вони займають у просторі. Прикладом великих точкових джерел є великі промислові об'єкти, нафтопереробні підприємства.

Великі точкові джерела необхідно точно ідентифікувати у просторі і емісії, що виникли внаслідок їх діяльності, безпосередньо відносити до точки у просторі за географічними координатами розташування відповідного джерела. При цьому важливою є наявність інформації на рівні окремого підприємства про показники діяльності. В Польщі усі необхідні дані на рівні окремого підприємства є недоступні в офіційних статистичних базах через конфіденційність такого роду інформації.

До лінійних джерел емісії парникових газів в атмосферу відносять джерела, зафіксовані у просторовій системі координат у вигляді лінії. До таких джерел відносять, наприклад, транспортні шляхи.

До площинних джерел емісії парникових газів відносять джерела, викиди від яких відбуваються з поверхні, що займає певне плочу, наприклад, сільськогосподарське угіддя. До такого класу джерел доцільно також віднести ділянки території, на яких сконцентрована велика кількість невеликих точкових чи лінійних джерел емісій. Наприклад, до таких джерел емісії варто віднести домогосподарства, території ведення будівельних робіт, дрібні підприємства та заводи, невеликі котельні тощо.

1.3.3. Специфіка моделювання емісій парникових газів, які виникають при видобуванні і переробці різних видів палива

У дисертаційній роботі розглянуто емісії, які виникають у вугільні та нафто-газовій промисловостях. Частка емісій від цих категорій у сумарних емісіях є незначна, але для цілісної картини варто здійснювати інвентаризацію і в цій галузі. Видобувна промисловість поділяється на вугільну промисловість та нафто-газову. Досліджувати емісії у цьому секторі вкрай важко, оскільки потрібно оцінити кількість вивільненого метану під час видобутку викопного палива, натомість необхідних замірів на шахтах чи родовищах не проводять. Часткові дослідження були здійсненні різними вченими на окремих шахтах, але кількість летких емісій безпосередньо залежить від глибини залягання палива, технології видобування і устаткування на шахті чи родовищі, а ці параметри слід аналізувати для кожного конкретного випадку.

1.3.3.1. Аналіз процесів емісії у вугільній промисловості

Вугільна промисловість – це галузь паливної промисловості, підприємства якої здійснюють видобування, збагачення і брикетування кам'яного та бурого вугілля.

Основним парниковим газом, який виникає у вугільній промисловості, є метан (CH_4). Цей газ утворюється під час вуглефікації (процес утворення вугілля), лише невелика його частка залишається у вугільному пласті під тиском вугілля. Такий метан вивільняється у процесі видобутку, коли руйнують вугільний пласт.

Вуглефікація – це фаза вуглеутворення, під час якої похований у надрах Землі торф послідовно перетворюється (за відповідних умов) спочатку в буре, а потім у кам'яне вугілля та антрацит. При цьому підвищується вміст вуглецю, знижується концентрація летких речовин, збільшується відбивна

здатність геліфікованих компонентів. Ступінь вуглефікації визначає кількість утвореного метану, а кількість метану, який утримується у вугіллі залежить в основному від тиску, температури вугільних пластів та від інших характеристик вугілля. Метан утримується у вугіллі до тих пір, поки не знизиться тиск на вугілля, що може бути спричинене як наслідком ерозії поверхневого пласту, так і процесом видобування вугілля. Як тільки метан вивільняється з вугілля, він рухається через вугільні пласти до місць з нижчим тиском (наприклад, до вугільної шахти) і відповідно вивільняється до атмосфери [28]. Кількість метану, що витікає під час добування вугілля, залежить від сорту вугілля, глибини його залягання та інших факторів (вологість, тиск та ін.) [67].

Сорт вугілля відображає різницю у стадіях утворення вугілля та залежить від історичної зміни тиску та температури вугільного пласту. Вугілля високого сорту, наприклад, бітумінозне вугілля містить більше CH_4 ніж низькосортне вугілля (наприклад, лігніт). Крім того, з плином часу метан може викидатися в атмосферу з приповерхневих вугільних пластів через природні тріщини в породі.

Важливим параметром, який впливає на рівень емісії, є глибина залягання вугілля, оскільки вона впливає на тиск та температуру вугільного пласту, що в свою чергу визначає обсяги утворення метану в процесі вуглеутворення. Для двох вугільних пластів одного класу, шар, який залягає глибше, утримує більшу кількість CH_4 , оскільки тиск та температура є більшими у глибших шарах.

Від глибини залягання вугілля залежить спосіб його видобутку. Розробка ведеться відкритим способом, якщо глибина залягання вугільного пласту не є великою. Відкритий спосіб видобування вугілля – це комплекс робіт, при якому всі виробничі процеси, необхідні для видобування вугілля з надр землі, здійснюються на поверхні. При сучасній техніці відкритим способом можна розробляти родовища твердих корисних копалин будь-якої форми, розташованих нижче рівня земної поверхні.

Переваги відкритого способу видобутку вугілля:

- застосування потужної техніки, в результаті чого досягаються більш високі техніко-економічні показники: продуктивність праці на кар'єрах значно вища, а собівартість видобутих корисних копалин нижча, ніж при підземній розробці;
- вищі темпи росту продуктивності праці і зниження собівартості видобутку;
- менші втрати корисних копалин, кращі умови роздільного виймання;
- легше збільшити, при необхідності, виробничу потужність кар'єру, ніж шахти;
- краща безпечність праці і кращі виробничі умови.

Недоліки відкритого способу:

- необхідність виймання, переміщення і складання у відвали великих об'ємів порожніх порід;
- потрібні великі площі для розміщення відвалів порожніх порід;
- залежність від кліматичних умов і пори року.

Переваги відкритого способу видобування вугілля в більшості випадків переважають над недоліками, і тому відкритий спосіб сьогодні найбільш ефективний і перспективний. Глибина відкритих кар'єрів досягає навіть 400 метрів. Види залягання родовищ відкритих розробок бувають: горизонтальні, пологі, нахилені, штокоподібні, залягання у вигляді антиклінальних та синклінальних складок на узвишші, залягання висотно-глибинного типу.

За технологічним призначенням розрізняють декілька етапів відкритої розробки родовищ вугілля. До основних етапів розробки відносяться:

- підготовка поверхні кар'єрного поля і осушення родовища;
- відкриття родовища і підготовка початкового фронту розкривних і видобувних робіт;
- розкривні роботи;
- видобувні роботи;

- рекультивация пошкоджених земель і поверхні відвалів.

Застосовують три основні способи відкритої розробки: *екскаваторний*, *гідравлічний* та *комбінований*. При *екскаваторному способі* використовують різні механічні засоби виймання та переміщення гірських порід – екскаватори, скрепери, колісний і конвейєрний транспорт та ін. При *гідравлічному способі* всі виробничі процеси здійснюються за допомогою води та спеціального обладнання – гідромоторів та землевсмоктувачів. *Комбінований* являє собою різні поєднання екскаваторного і гідравлічного способів відкритої розробки. Екскаваторний спосіб універсальний, може використовуватися при видобутку будь-яких гірських порід, і тому він є найбільш поширений; гідравлічний застосовують при розробці м'яких порід, які легко піддаються розмиву водою.

Якщо вугілля залягає глибше, то розробку вугільного родовища проводять підземним способом, при якому для добування вугілля використовують шахти.

Шахта – це самостійна виробничо-господарча одиниця гірничого підприємства. Родовища, які розробляють підземним способом, представлені лінзами, штоками, пластами, куполами, жилами. На рис. 1.8 представлено схему підземного видобутку вугілля.

Більше метану виділяється в атмосферу при добуванні вугілля підземним способом, ніж при відкритому видобутку, тобто коефіцієнт емісії метану при добуванні відкритим способом нижчий, ніж при підземному добуванні. У Польщі вугілля добувається в основному підземним способом. Метан є вибухонебезпечним у концентрації з повітрям від 5% до 15%.

Емісії метану при підземному видобуванні вугілля повинні включати оцінки емісій від вентиляційних систем та дегазаційних систем. Ці системи переганяють великі обсяги повітря через шахту та вивільняють суміші повітря та метану в атмосферу. У ряді країн застосовують системи, які дають можливість використовувати одержаний метан, що звичайно знижує емісії парникових газів при видобуванні вугілля. У залежності від якості газу,

який в деяких випадках може бути високим, метан можуть використовувати для виробництва електроенергії на місці або подати його в місцевий трубопровід [52].

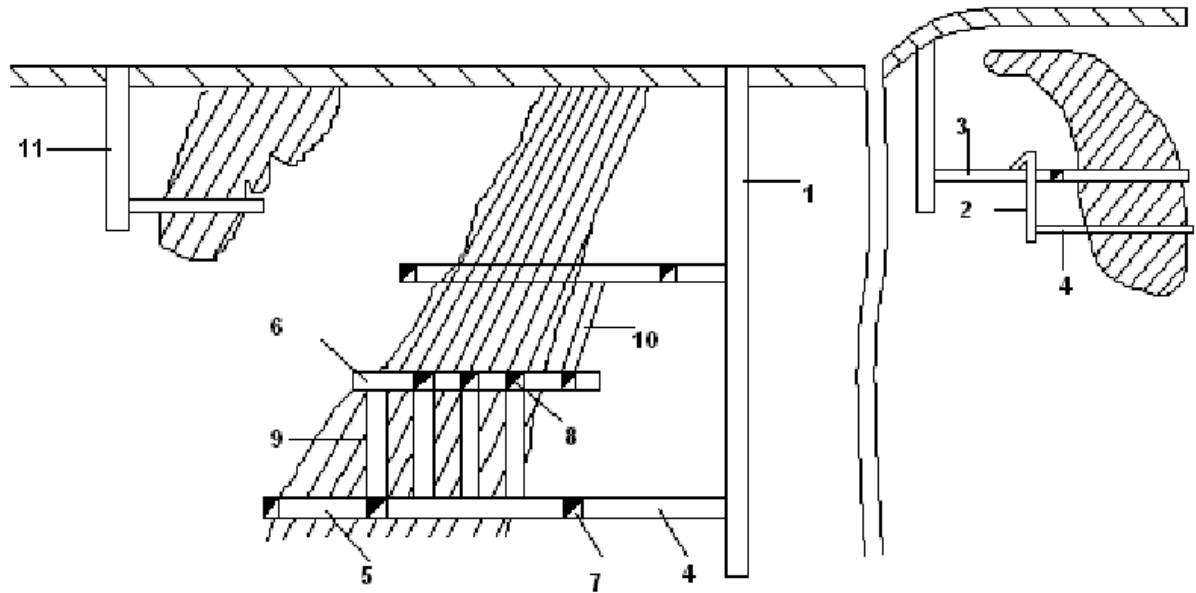


Рис. 1.8. Схема підземної розробки родовища: 1 – ствол; 2 – сліпий ствол (без виходу на поверхню); 3 – штільня; 4 – квершлаг; 5, 6 – орти; 7 – штрек; 8 – штрек (що проходить через вугілля); 9, 10 – вертикальні чи похилі гірничі виробки; 11 – шурф (для пошуку місцезнаходження пласта)[52]

При виробництві твердих видів палива розрізняють два види емісій – «леткі» емісії, які виникають при видобуванні і при переробці твердих видів палива, і емісії, які виникають від спалювання палива. Відповідну класифікацію наведено на рис. 1.6.

Леткі емісії – це емісії парникових газів, які виникають при видобуванні, зберіганні і транспортуванні палива. Відповідно до інвентаризаційних звітів Польщі, розглядають леткі емісії, які виникають від закритого і відкритого способу видобування вугілля, а також емісії від виробництва коксу (CO_2).

Емісії, що виникають від спалювання палива, – це емісії, які виникають від спалювання палива при виробництві коксу, брикетного бурого вугілля і брикетних видів палива.

Емісія метану також відбувається після видобутку, переробки і транспортування. Певна кількість CH_4 вивільняється з вугільних відвалів і

неробочих шахт. Емісії від цих джерел є незначними, оскільки набагато більше метану, швидше за все, виділилось у шахті під час самого видобування.

1.3.3.2. Аналіз процесів емісії у нафтогазовій промисловості

Нафтогазова промисловість – це галузь економіки, яка разом з іншими галузями забезпечує пошук, розвідку та розробку родовищ нафти і газу, транспортування, переробку, зберігання і реалізацію нафти, газу та продуктів їх переробки.

Видобування. Глибина нафтових і газових свердловин при сучасній техніці буріння може досягати 6-7 км. У перспективі – буріння свердловин глибиною 10-15 км [53].

Для видобутку нафти з земних глибин, бурять свердловини, частіше всього у вертикальному напрямі. Якщо тиск у нафтовому пласті високий, то видобуток нафти ведуть фонтанним способом через запірну арматуру. Нафта у цьому випадку поступає у трапи і ємності з надр землі під власним тиском. Якщо тиск у пласті малий, нафту добувають методом газліфту (компресорний спосіб). У свердловину, через кільцевий простір між трубами, закачують, під тиском 105 Па, природний газ.

Часто природний газ є побічним газом при видобутку нафти. Природний газ у пластових умовах (умовах залягання в земних надрах) знаходиться в газовому стані у вигляді окремих скупчень (газові поклади) або у вигляді газової шапки нафтогазових родовищ – це вільний газ, або в розчиненому стані в нафті чи воді (у пластових умовах), а в стандартних умовах (0,101325 МПа і 20 °C) – тільки в газовому стані. Також природний газ може знаходитися у вигляді газогідратів [67].

Газ добувають із надр землі за допомогою свердловин. Ці свердловини намагаються розмістити рівномірно по всій території родовища. Це робиться для рівномірного падіння пластового тиску в покладі. Інакше можливі переструми газу між областями родовища, а також передчасне обводнювання

покладу. Газ виходить з надр внаслідок того, що в шпарі він знаходиться під тиском, що багаторазово перевищує атмосферний. Таким чином, рушійною силою є різниця тисків у шпарі і системі збору [53].

Нафта, природний газ і вугілля є одними із основних викопних джерел енергії на нашій планеті. Нафта, видобута безпосередньо з надр землі, є непридатною для подальшого використання, тому її спеціально переробляють на нафтопереробних заводах.

Відповідно до методик МГЕЗК [62] розглядають леткі емісії, які виникають при видобуванні нафти та газу (CO_2), а також емісії метану, які виникають підчас видобутку, переробки і транспортування. Найбільша кількість метану вивільняється під час видобування нафти чи газу, від інших видів діяльності ці емісії не такі значні. Також виникають емісії від спалювання палива під час переробки нафти.

1.3.4. Особливості інвентаризації емісій парникових газів у промисловому секторі

До сектору «Переробна промисловість та будівництво» за методиками МГЕЗК [62] відносять емісії, пов'язані із спалюванням викопного палива для виробництва промислової продукції. Враховуються також процеси спалювання палива на електростанціях підприємств для виробництва електроенергії для власного споживання. Не включають у цю категорію емісії від спалювання палива у коксівних печах у чорній металургії та сталевій промисловості, їх відносять до категорії «виробництво твердих видів палива». Сектор „1.А.2 Промисловість та будівництво” складається з таких категорій:

- металургійна промисловість,
- хімічна промисловість,
- харчова промисловість,
- інші категорії.

У методиках МГЕЗК подано розгорнуту класифікацію категорій промислового сектору, яка охоплює всі види промисловості представлені у

світовій економіці. Але у випадку просторової інвентаризації парникових газів достатньо оцінити емісії від трьох основних категорій, оскільки ці категорії емітують в атмосферу значну кількість парникових газів і саме в цих категоріях доцільно впроваджувати новітні технології спрямовані на скорочення емісій.

Суттєвою завадою при здійсненні просторового моделювання емісійних процесів є те, що значна частина інформації про використання палива чи виробництво певної продукції є конфіденційною інформацією. Для прикладу, якщо регіон видає статистичний збірник, який включає інформацію про промисловість, але якщо в цьому регіоні є не більше ніж три підприємства, які належать до певної категорії промисловості, то інформація про цю категорію буде відсутня у збірнику, як статистична таємниця.

При моделюванні емісійних процесів у деяких категоріях промислового сектору використано джерела емісії точкового типу для моделювання емісії парникових газів від великих заводів (металургія, хімічна промисловість тощо). Проте, в багатьох інших випадках для моделювання емісії використано джерела площинного типу, оскільки занадто трудомістким було б визначення місця розташування кожного малого підприємства на рівні країни.

1.4. Поняття просторової інвентаризації парникових газів та аналіз просторових підходів до моделювання емісійних процесів

Просторова інвентаризація парникових газів – це оцінювання емісій парникових газів, що викидаються в атмосферу або поглинаються з неї за певний період часу на рівні елементарних об'єктів (точкових, лінійних чи площинних), з використанням розроблених математичних моделей та геоінформаційної технології. Таке оцінювання є корисним для відстеження основних тенденцій зміни у структурі емісій, розроблення стратегії їх зменшення та планування природоохоронних заходів. Крім того, такий підхід дає змогу враховувати нерівномірність зосередження джерел емісії на території, для якої здійснюються обчислювальні експерименти [32].

Просторова інвентаризація – це інвентаризація на найнижчому рівні деталізації з врахуванням географічної прив'язки джерел емісії. При достатній кількості даних така інвентаризація є найточніша, оскільки емісії оцінюють окремо від кожного джерела. Найкраще використовувати просторову інвентаризацію для великих точкових джерел емісій, таких як електростанції чи потужні промислові заводи. Для таких об'єктів надається достатня кількість статистичної інформації, а також у рамках збереження довкілля здійснюється оцінка емісійних факторів. Менш точна просторова інвентаризація для малих підприємств, оскільки тоді вхідні дані для моделювання оцінюють методом «зверху-вниз». Наприклад, доступні дані про спожите паливо на регіональному рівні дезагрегуують до рівня підприємства, використовуючи при цьому різноманітні економічні показники.

Порівняно із традиційною інвентаризацією (на основі узагальнених даних для рівня країни) просторово розподілена інвентаризація емісій парникових газів може відчутно вплинути на загальну оцінку емісій. Це пояснюється тим, що такий підхід дає можливість враховувати особливості ведення господарства на окремих, достатньо малих ділянках території, способи та норми спалювання всіх видів палива в різних галузях економіки, технологію виробництва та переробки первинних видів палива.

Просторові підходи до моделювання емісійних процесів у різноманітних секторах господарської діяльності в Україні та Польщі розвинуто у працях: Х.В.Бойчук – просторове моделювання емісійних процесів в енергетичному секторі Західної України [27-30]; П.І.Топилка – просторове моделювання емісійних процесів при виробництві електричної та теплової енергії в Україні та Польщі [63-66]; Н.В.Чарковська – просторове моделювання емісії парникових газів від хімічних перетворень матеріалів у промисловості та емісії у сільському господарстві та при оперуванні з відходами у Польщі [68-73]; О.Я.Данило – просторове моделювання емісії парникових газів у житловому секторі України та Польщі [32-36].

1.5. Висновки до розділу 1.

Як на глобальному, так і на регіональному рівнях зміни клімату стали незаперечним фактом. Такі зміни в основному спричинені зростанням антропогенних емісій парникових газів в атмосферу. З метою подолання глобальної зміни клімату провідними вченими світу запропоновано ряд способів подолання цієї проблеми, одним із яких є зменшення антропогенних емісій парникових газів. Оскільки неможливо виміряти емісії парникових газів, тому здійснюють так звану інвентаризацію емісій цих газів за даними про господарську діяльність та з врахуванням коефіцієнтів емісії внаслідок такої діяльності. При цьому складним процесам емісії парникових газів на території відповідної країни ставлять у відповідність математичну модель і оцінюють величину емісії за допомогою цієї моделі.

Проаналізовано проблему інвентаризації парникових газів, вирішення якої повинно дати ефективний інструментарій для перевірки виконання міжнародних домовленостей та дотримання міжнародних зобов'язань, спрямованих на вирішення проблеми глобальної зміни клімату (Киотський протокол, Паризька угода, тощо). Здійснено огляд основних методик інвентаризації парникових газів, розроблених Міжнародною групою експертів зі зміни клімату, та проаналізовано важливість їх застосування різними країнами для виконання прийнятих зобов'язань щодо скорочення емісій. Виділено основні рівні інвентаризації емісій парникових газів у атмосферу: глобальний, рівень країни (національний рівень), рівень елементарних ділянок території. Описано сфери застосування результатів інвентаризації для кожного рівня, основні недоліки та переваги.

Обґрунтовано потребу в розробленні геоінформаційних підходів для просторової інвентаризації парникових газів у видобувній та переробній промисловостях. Описано специфіку емісійних процесів у досліджуваних категоріях кожного із секторів із введенням поняття джерела емісії.

Обґрунтовано доцільність розроблення математичних моделей, які описують процеси емісії у видобувній і переробній промисловостях з врахуванням специфічних коефіцієнтів емісії та територіального розміщення джерел емісії парникових газів. Обґрунтовано актуальність вирішення наукової задачі розроблення методів та підходів до математичного моделювання та просторового аналізу процесів емісії парникових газів при видобуванні та переробці палива, а також при спалюванні викопного палива у промисловості. Просторові кадастри емісії парникових газів, отримані з використанням геоінформаційної системи, є особливо цінними для отримання реальної об'єктивної картини щодо територіального розподілу та структури емісій у досліджуваних секторах.

Розділ 2. Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів, які виникають при видобуванні та переробці різних видів палива в Польщі та в Україні

У цьому розділі проаналізовано специфіку основних джерел та типів емісій парникових газів, які виникають у секторі «Видобувна промисловість». Описано основні підходи просторового моделювання емісійних процесів у цьому секторі для точкових джерел емісії. Представлено математичні моделі процесів емісії парникових газів та програмні засоби, які дають можливість здійснювати просторову інвентаризацію емісії двоокису вуглецю, метану і закису азоту при видобуванні і переробці кам'яного вугілля, нафти та природного газу на рівні джерел емісії точкового типу. Для просторового моделювання емісійних процесів розроблено цифрові карти джерел емісій парникових газів у видобувній промисловості, які містять інформацію про досліджуванні об'єкти. У результаті здійснених обчислювальних експериментів отримано оцінки емісії парникових газів для кожної робочої шахти та коксового заводу, кожного родовища нафти чи газу і нафтопереробного заводу. Досліджено структуру сумарних емісій парникових газів у секторі «Видобувна промисловість» на досліджуваних територіях. Результати моделювання візуалізовано за допомогою тематичних цифрових карт та здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів просторової інвентаризації з даними національних інвентаризаційних звітів.

2.1. Особливості джерел емісії парникових газів у категорії

«Видобування та переробка різних видів палива»: специфіка об'єкту моделювання

Міжнародна група експертів зі змін клімату (МГЕЗК) розробила методики національних інвентаризацій парникових газів [61, 62, 115], які включають багато секторів, підсекторів та категорій господарської

діяльності. Ці методики рекомендують здійснювати аналіз емісії парникових газів також у категорії „Видобування і переробка різних видів палива”. Проте, реалізований за цими методиками кадастр забезпечує оцінки емісії на рівні країни у цілому. Натомість для ефективного скорочення емісії парникових газів важливою є інформація про територіальне розташування джерел емісії та їхні особливості. Просторова інвентаризація парникових газів дає можливість оцінювати емісії на невеликих ділянках території, а також використовувати „місцеві” коефіцієнти емісії для конкретних підприємств.

У секторі „Видобування і переробка різних видів палива” основними точковими джерелами емісії є шахти, родовища та заводи по переробці викопного палива (кокові комбінати та нафтопереробні заводи). Традиційно інвентаризація у цій категорії здійснюється лише на національному рівні без визначення розташування джерел емісії та без врахування їх особливостей. Під час видобування і переробки палива у атмосферу потрапляють леткі емісії метану і вуглекислого газу, а також мають місце емісії парникових газів при спалюванні викопного палива на паливопереробних підприємствах. У цьому розділі шляхом математичного моделювання просторово оцінено емісії від вугільної та нафтогазової промисловостей.

За даними національного інвентаризаційного звіту Польщі у 2010 році емісії метану при видобуванні кам'яного вугілля становили 339 Гг, а при спалюванні палива на коксових заводах здійснено емісії в атмосферу 2883 Гг вуглекислого газу, 0,07 Гг метану і 0,01 Гг закису азоту [159]. Натомість, емісії від вугільної промисловості України за 2010 рік становили: 6679 Гг CO_2 , 0,2 Гг C_4H та 0,04 N_2O , які виникли внаслідок спалювання палива під час переробки твердих видів палива та 933 Гг метану і 62,25 Гг діоксиду вуглецю від видобувної діяльності на шахтах [152].

Раніше просторова інвентаризація парникових газів у вугільній промисловості Польщі ще не здійснювалась, а для України було оцінено емісії у видобувній промисловості лише для областей Західного регіону [9,

28], тому описані нижче підходи до математичного моделювання та просторового аналізу є актуальним і практично корисним завданням, оскільки дає змогу визначити розміщення найбільших джерел і в подальшому розробити план для скорочення емісій.

Вугільна промисловість – це галузь паливної промисловості, підприємства якої здійснюють видобування, збагачення і брикетування кам'яного вугілля [53]. Основним парниковим газом, який виникає у цьому секторі є метан (CH_4). Метан утворюється під час вуглефікації, лише незначна його кількість залишається у вугільному пласті під тиском вугілля. Вуглефікація – це природний процес вуглеутворення, під час якого торф, який знаходиться у надрах Землі, під впливом високого тиску і температури послідовно перетворюється спочатку в буре, а потім у кам'яне вугілля та антрацит. Ступінь вуглефікації визначає кількість утвореного метану, а кількість метану, який утримується у вугіллі, залежить в основному від тиску та температури вугільних пластів, а також від інших характеристик вугілля. Метан утримується у вугіллі до тих пір, поки не знизиться тиск на вугілля, що може бути спричинене як наслідком ерозії поверхневого пласту, так і процесом видобування. Як тільки метан вивільняється з вугілля, він рухається через вугільні пласти до місць з нижчим тиском (наприклад, до вугільної шахти) і, відповідно, вивільняється в атмосферу [52].

Основним способом переробки кам'яного вугілля є коксування – метод термічної переробки кам'яного вугілля, що полягає у його нагріванні без доступу повітря до 1000-1100 °C і витримки 11-15 годин при цій температурі, внаслідок чого паливо розкладається з утворенням летких продуктів і твердого залишку коксу [67].

У вугільній промисловості розрізняють два види емісій:

- “леткі” емісії, які виникають при видобуванні і при переробці твердих видів палива,
- емісії, які виникають від спалювання палива.

Відповідну класифікацію можна представити у такому вигляді:

Емісії від видобування і переробки кам'яного вугілля:

А. Емісії від спалювання палива:

1.А.1.с – Переробка кам'яного вугілля

Б. Леткі емісії:

1.В.1.а – Видобування кам'яного вугілля:

– наземні шахти

– підземні шахти:

- гірничодобувна діяльність,

- післявидобувна діяльність;

1.В.1.б – Переробка кам'яного вугілля

Відповідно до методик МГЕЗК, розглядають леткі емісії, які виникають від закритого і відкритого способу видобування вугілля, а також емісії від виробництва коксу. Такі емісії виникають внаслідок видобутку, переробки і транспортування вугілля. Певна кількість CH_4 вивільняється з вугільних відвалів і неробочих шахт. Емісії від цих джерел є незначними, оскільки набагато більше метану виділяється у шахті під час самого видобування.

До летких емісій відносять і вуглекислий газ, який виникає внаслідок коксування кам'яного вугілля [75].

Емісії діоксиду вуглецю, метану і закису азоту, що виникають від спалювання палива – це емісії від використання викопного палива (вугілля чи природного газу) у енергетичних цілях при виробництві коксу та брикетного вугілля.

Вугільна промисловість Польщі представлена видобуванням як кам'яного, так і бурого вугілля. Цей вид палива – це основне джерело енергії для польської економіки. Саме тому у паливно-енергетичному комплексі домінує виробництво твердих видів палива, в основному кам'яного вугілля (його частка становить понад 75%). За видобутком вугілля країна займає восьме місце у світі з обсягом 176 млн. т у 2010 році (113 млн. т кам'яного вугілля і 63 млн. т бурого). Кам'яне вугілля видобувають у трьох кам'яновугільних басейнах – Верхньосілезькому, Нижньосілезькому та

Люблінському. Основним басейном є Верхньосілезький – 95% від усього видобутку. На території Польщі функціонує 25 шахт, найбільшими з них є KWK “Bogdanka”, KWK “Wujek” та “KWK Piast” [102].

Найрозвинутішою галуззю паливної промисловості в Україні є вугільна. Вона представлена видобутком кам'яного та бурого вугілля. Основні поклади кам'яного вугілля зосереджені в Донецькому, Львівсько-Волинському та Дніпровському басейнах (98% усього вугілля в Україні видобувається підземним способом). Станом на 2010 рік в Україні функціонувало 157 вугільних шахт, також на території України функціонують малі приватні шахти, статистична інформація про діяльність яких є недоступна. В Дніпровському басейні зосереджено запаси бурого вугілля, яке на відміну від кам'яного має меншу теплотворну здатність [152].

Переробкою кам'яного вугілля у Польщі займаються такі заводи: Koksownia Przyjaźń, Koksownia Jadwiga, Koksownia Dębieńsko, Koksownia Radlin, Koksownia Częstochowa Nowa, Koksownia Makoszowy, S.A. Oddział w Zdzeszowicach, Huta im. Sendzimira. Вони зосереджені у Сілезькому і Малопольському воєводствах [102]. Це зумовлено тим, що найбільші металургійні заводи розташовані саме у цих воєводствах, а кокс – це основне паливо у металургії.

В Україні усі коксові заводи розташовані у Східному регіоні України, це як і в Польщі зумовлено розташуванням великих покладів кам'яного вугілля та розміщенням металургійних заводів. Переробка кам'яного вугілля в Україні за останні 15 років суттєво скоротилась і більшість заводів працюють не на повну потужність. Це зумовлено відсутністю попиту на українське коксове вугілля, відсутність дешевої транспортної системи для експорту товару закордон та дефіциту вугілля. На території України функціонує 15 найбільших коксово-хімічних заводів: Авдіївський КХЗ, Азовсталь, ММК ім. Ільїча, Макіївкокс, Донецьккокс, Горлівський КХЗ, Ясиновський КХЗ, Єнакієвський КХЗ (ці заводи у 2010 році знаходилися у Донецькій області та виробляли близько 51% усього коксу України), Арселор Мітал Стіл Кривий

ріг, Дніпрококс, Баглейкокс та Дніпродзержинський КХЗ (Дніпропетровська область, частка виробленої продукції становила 25%), Алчевськкокс (Луганська область), Запоріжкокс (Запорізька область) та Харківський коксовий завод [55].

Значна кількість емісій виникає і від нафтогазової промисловості. За даними національного інвентаризаційного звіту Польщі у 2010 році сумарні леткі емісії від нафтової промисловості становили 185 Гг CO_2 та 2,68 Гг C_4H , а від газової промисловості – 4Гг CO_2 та 209Гг C_4H . При спалюванні палива на нафтопереробних заводах в атмосферу потрапило 6176 Гг вуглекислого газу, 0,19 Гг метану і 0,03 Гг закису азоту [159]. Натомість, емісії від нафтової промисловості України за 2010 рік становили: 1570Гг CO_2 , 0,06 Гг C_4H та 0,01 N_2O , які виникали внаслідок спалювання палива під час переробки рідкого палива. Леткі емісії від нафтової промисловості – 1,24 Гг CO_2 та 5,45 Гг C_4H , а від газової промисловості – 10,17Гг CO_2 та 943Гг C_4H [152].

Нафта і газ відіграють важливу роль у розвитку економіки кожної країни. Природний газ дуже зручний для транспортування по трубопроводах і спалювання для промислових чи побутових потреб.

З нафти виробляються всі види рідкого палива: бензини, гас, реактивні і дизельні сорти палива для двигунів внутрішнього згорання, мазути – для газових турбін і котельних установок. Із більш висококиплячих фракцій нафти виробляється величезний асортимент мастил, спеціальних масел і консистентних змазок. З нафти виробляється також парафін, сажа для гумової промисловості, нафтовий кокс, чисельні марки бітумів для дорожнього будівництва і т.п.

Як і у вугільній, у нафтогазовій промисловості розрізняють два види емісій: “леткі” емісії та емісії, які виникають від спалювання палива на переробних заводах. Згідно з класифікацією МГЕЗК у нафтогазовій промисловості розглядають такі емісії:

А. Емісії від спалювання палива:

1.А.1.б – Переробка рідкого палива

Б. Леткі емісії:

1.В.2.а – Нафтова промисловість:

- видобування нафти,
- переробка нафти,
- транспортування нафти.

1.В.2.б – Газова промисловість:

- видобування газу,
- транспортування газу.

Протягом 2008-2011 років у Польщі було виявлено близько 250 родовищ нафти і природного газу, які знаходяться у межах Центральноєвропейського, Північно-Передкарпатського і Карпатського нафтогазоносних басейнів (НГБ). Більшість родовищ знаходиться на Передсудетській монокліналі і в Помор'ї. Найбільш значні родовища нафти: Камень-Поморські, Дашево; газові: Богдай-Уцехув, Жухлюв, Вешховіце, Тархали, Равіч, Чешув, Гожіслав, Боженцін [165].

Північно-Передкарпатський нафтогазовий басейн знаходиться у Передкарпатському прогині. У зовнішній частині прогину знаходяться переважно газові родовища, поклади яких належать до гірських порід від девону до міоцену (міоцен – основний газоносний горизонт). Найбільш значні газові родовища: Перемишль-Яксманіце, Красне-Альбігова, Любачув, Тарнув, Каньчуга, Вигода, у Ясельсько-Кросненському нафтовому районі, а також у Балтійському морі та інші. Гази в основному метанові, з невеликим вмістом азоту.

За даними 2010 р. у Польщі функціонувало 82 нафтових родовища, а саме: в Карпатах – 29; в передгір'ї – 11; польська низовина – біля 40 родовищ; зона Балтійського моря – 2 родовища. Глибини залягання родовищ нафти і газу від сотень метрів до 1,5-2,5 км. Карпатський басейн охоплює флішеві (фліш – потужна серія морських осадових гірських порід) зони Зовнішніх Карпат. Родовища переважно нафтові, нафти переважно легкі,

малосірчисті. Родовища багатопластові, складної будови, залягають на глибині від сотень метрів до 3,5 км (Ванькова, Потік, Харкльова-Погожіна і ін.). Станом на 31 грудня 2010 року в Польщі працювали 3 компанії по видобутку нафти та газу та переробленні нафти: ORLEN, LOTOS, PGNiG (філії в Санок і Зелена-Гура, ОКР шахти Dębowiec, DPV обслуговування і FX Energy) [155].

Основні українські родовища нафти зосереджені в Карпатській та Причорноморсько-Карпатській нафтогазоносних провінціях, Дніпровсько-Донецькому нафтогазоносному регіоні. Найбільші родовища Передкарпаття (майже 60% видобутку нафти в Україні) – Бориславське (Львівська область), Долинське, Битківське (Івано-Франківська область). У Дніпровсько-Донецькій нафтовидобувній області також є великі родовища – Леляківське (Чернігівська обл.), Глинсько-Розбишівське (Полтавська обл.); нафтогазові – Гнідинцівське (Чернігівська обл.), Качанівське (Сумська обл.), Яблунівське (Полтавська обл.). Переробка нафти і виробництво нафтопродуктів в Україні здійснюється на 6 нафтопереробних заводах: ЗАТ “Укрнафта”, ЗАТ “ЛНИК”, ВАТ “Херсоннафтопереробка”, ВАТ “Херсоннафтопереробка”, ВАТ “Лукойл-Одеський НПЗ”, ВАТ “Нафтохімік Прикарпаття” та ВАТ “НПК Галичина” [28, 37].

Видобування природного газу у Польщі здійснюється у 8 воєводствах. Найбільше родовищ знаходиться у Підкарпатському і Великопольському воєводствах, відповідно саме там зосереджено найбільші емісії парникових газів від видобування, транспортування та розподілу природного газу [155].

Великі родовища природного газу України розташовані в Дніпровсько-Донецькій області: Шебелинське, Західнохрещищенське, Єфремівське (Харківська обл.). Близько 1/5 частини видобутку природного газу зосереджено в Передкарпатті: Дашавське (Львівська обл.), Косівське, Надвірнянське (Івано-Франківська область) [28].

2.2. Підходи до геопросторового моделювання процесів емісії парникових газів у аналізованому секторі

2.2.1. Суть геопросторового аналізу

Просторова інвентаризація парникових газів полягає у визначенні розташування джерел емісії та оцінюванні їхніх емісій. На відмінну від традиційної інвентаризації на рівні країни, просторова враховує особливості джерел та специфічні для кожного джерела коефіцієнти емісії, що дає можливість будувати детальніші кадастри.

Створена геоінформаційна система для просторової інвентаризації парникових газів у видобувній промисловості являє собою моделюючий комплекс, у якому реалізовано процедури інвентаризації цих газів. На прикладі вугільної промисловості на рис. 2.1 представлено логічну структуру розробленої геоінформаційної технології. Вона включає у себе три модулі: Mod_maps, Mod_dis і Mod_inventory.

Основана функція модуля Mod_maps – створення цифрової карти вугільних шахт і коксових заводів, а також перенесення даних з полів вхідної таблиці Excel у базу даних векторних карт з врахуванням географічної прив'язки аналізованих джерел емісії. За допомогою цього модуля створено та візуалізовано на рис. 2.2 дві цифрові карти: карту діючих вугільних шахт і карту коксових заводів у Польщі.

Використовуючи модуль Mod_dis здійснено дезагрегацію даних про діяльність (обсяги видобутого вугілля та виробленого коксу) з рівня країни до рівня окремо взятої шахти чи заводу з переробки кам'яного вугілля. Обчислені дезагредовані дані записуються у відповідні колонки бази геопросторових даних.

Модуль Mod_inventory здійснює запити до бази даних з результатами дезагрегації статистичних даних, обчислює відповідні емісії парникових газів та формує нові геоінформаційні шари з результатами інвентаризації на рівні точкових об'єктів.

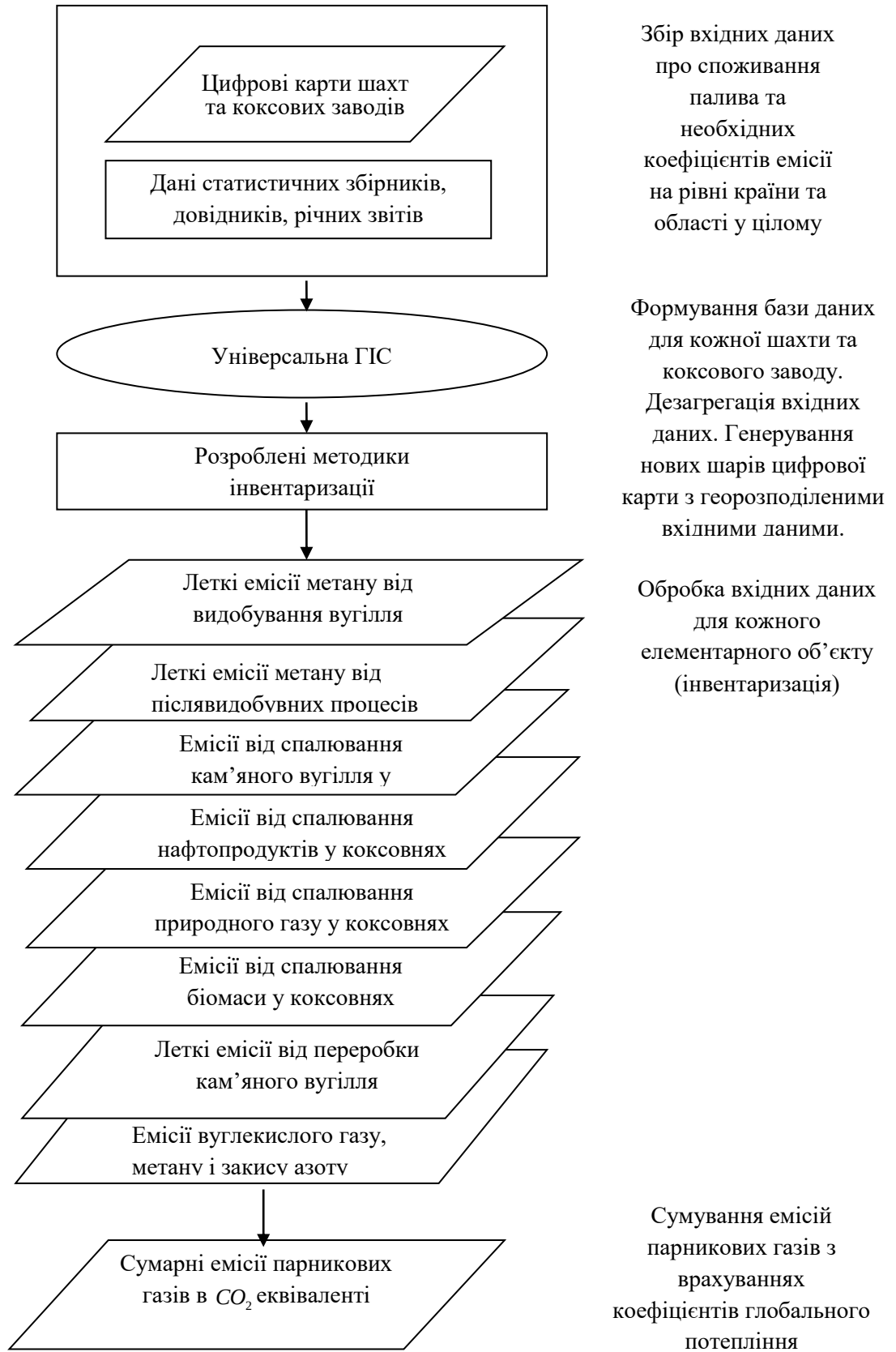
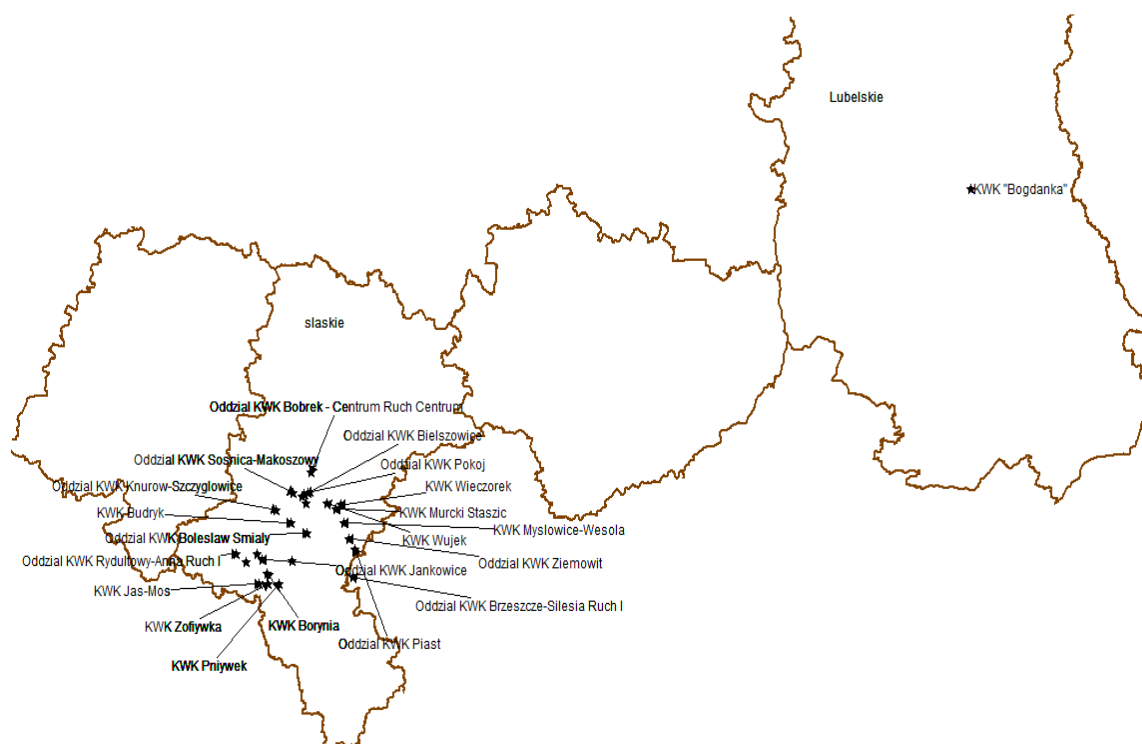


Рис. 2.1. Логічна структурна схема реалізації просторового моделювання та аналізу емісії парникових газів у вугільній промисловості



a)



b)

Рис. 2.2. Цифрові карти джерел емісії парникових газів у секторі вугільної промисловості Польщі: розміщення коксових заводів (а) та розміщення шахт з видобування кам'яного вугілля (б)

Вхідні та вихідні дані представлено у вигляді таблиці (стовпці відповідають відповідним шарам цифрової карти), елементи якої мають певну географічну прив'язку. Кожен рядок таблиці відповідає певній шахті чи коксовому заводу з даними про розташування (географічними координатами) та потужностями або обсягами видобування/переробки кам'яного вугілля на цьому об'єкті, а також іншу необхідну для дезагрегації статистичних даних інформацію.

2.2.2. Цифрові карти як основа формування геопросторової бази

вхідних даних для моделювання процесів емісії парникових газів

Для просторового моделювання емісійних процесів у видобувній промисловості, сформовано базу геопросторових даних аналізованих точкових джерел емісії парникових газів, яка включає необхідні для моделювання вхідні дані з відповідною географічною прив'язкою. Досліджено найбільші родовища нафти і газу, усі робочі шахти, а також підприємства з переробки різних викопних видів палива в Україні та Польщі.

Для кожного джерел емісії парникових газів у досліджуваному секторі в першу чергу проаналізовано доступну інформацію про розташування основних (найбільших) підприємств, які займаються видобуванням та переробкою різних видів викопного палива. В результаті аналізу сформовано базу даних у форматі MS Excel таблиці, яка містить інформацію про діяльність шахт, родовищ чи підприємств; географічні координати; виробничі потужності; коефіцієнти емісії та інші параметри. Для кожного джерела емісії здійснено пошук його географічних координат з використанням юридичної адреси та безкоштовного плагіну “Google Earth”.

Для побудови цифрової карти джерел емісії у видобувній промисловості розроблено програмні модулі у середовищі MapBasic. Для коректної роботи програмного модуля сформовано вхідний файл, який включає інформацію про географічне розташування досліджуваного об'єкта (широта та довгота), назву, ідентифікаційний номер. Наприклад, нижче наведено фрагмент коду

програмного модуля для створення цифрової карти джерел емісії парникових газів від видобування кам'яного вугілля:

Код підпрограми coal.mb

```
dim row_id as integer
close all
```

```
Register Table "D:\GESAPU\Coal.xls" TYPE XLS Titles Range
"Emissions!C3:K32" Interactive Into "D:\Coal\.TAB"
Open Table "D:\GESAPU\Coal.TAB" Interactive
Browse * From Coal
```

```
Create Map For Coal
row_id = 1
```

```
Fetch First From glass
Do While Not EOT (Coal)
    Update Coal
        Set Obj = CreatePoint( X, Y)
        Where Rowid = row_id
        row_id = row_id + 1
    Fetch Next From Coal
Loop
```

```
Map From Coal
Set Map Window FrontWindow() Zoom 1000
Commit Table Coal Interactive
```

Після виконання програмного модуля формується база геопросторових даних, яку можна відкрити за допомогою ГІС MapInfo. Інформація створеної геопросторової бази даних відображається за допомогою таблиць з розширенням .TAB, які легко конвертуються в інші формати, а також за допомогою цифрових векторних карт. Результати виконання написаного програмного модуля представлено на рис. 2.2 у вигляді цифрової карти джерел емісії парникових газів у секторі вугільної промисловості Польщі: розміщення коксових заводів (а) та розміщення шахт з видобування кам'яного вугілля (б).

2.3. Математичні моделі, які описують процеси емісії парникових газів від видобування різних видів палива

2.3.1. Моделі емісійних процесів при видобуванні кам'яного та бурого вугілля

При побудові просторових кадастрів емісії у вугільній промисловості відповідні шахти та підприємства з переробки кам'яного вугілля представляємо як точкові об'єкти (адже їхні розміри є невеликі у порівнянні з розміром країни, тому площею заводу можна знехтувати). Для проведення інвентаризації летких емісій парникових газів, які виникають при видобуванні кам'яного вугілля, використовуємо співвідношення:

$$E_{coal}^{g_l}(\xi_n) = E_{coal,m}^{g_l}(\xi_n) + E_{coal,p}^{g_l}(\xi_n), \quad (2.1)$$

де $E_{coal}^{g_l}(\xi_n)$ – річні леткі емісії парникового газу g_l , які виникають внаслідок видобування кам'яного вугілля на ξ_n -й шахті, $g_l \in (CO_2, CH_4)$; $E_{coal,m}^{g_l}(\xi_n)$ – емісії, які виникають безпосередньо під час видобування вугілля на ξ_n -й шахті; $E_{coal,p}^{g_l}(\xi_n)$ – емісії від післявидобувних процесів (зберігання і транспортування) кам'яного вугілля.

Леткі емісії парникових газів, які виникають під час видобування і від післявидобувних процесів можна записати за допомогою таких виразів:

$$E_{coal,m}^{g_l}(\xi_n) = \frac{A_{coal}^{\Sigma} \cdot P_{coal}(\xi_n)}{\sum_{j=1}^N P_{coal}(\xi_j)} \cdot K_{coal,m}^{g_l}, \quad (2.2)$$

$$E_{coal,p}^{g_l}(\xi_n) = \frac{A_{coal}^{\Sigma} \cdot P_{coal}(\xi_n)}{\sum_{j=1}^N P_{coal}(\xi_j)} \cdot K_{coal,p}^{g_l}, \quad (2.3)$$

де A_{coal}^{Σ} – річний видобуток кам'яного вугілля у Польщі; $P_{coal}(\xi_n)$ – потужність ξ_n -ї шахти; $K_{coal,m}^{g_l}$, $K_{coal,p}^{g_l}$ – коефіцієнт емісії g_l -го парникового газу на ξ_n -му підприємстві, відповідно, при видобуванні кам'яного вугілля та від післявидобувних процесів (зберігання і транспортування) кам'яного вугілля.

Для здійснення обчислювальних експериментів з використанням описаних вище математичних моделей використано статистичні дані на рівні країни про кількість видобутого вугілля та кількість використаного палива на коксових заводах. Потужності шахт і обсяги виробництва коксу отримано із статистичних щорічників і офіційних сайтів підприємств. Коефіцієнти емісії використано з традиційних методик інвентаризації парникових газів за 2006 рік [61] та національних інвентаризаційних звітів [152, 159].

2.3.2. Моделі емісійних процесів при видобуванні нафти

Основне завдання просторової інвентаризації парникових газів полягає у визначенні розташування джерел емісії та оцінюванні величини емісій. Така інвентаризація надає користувачу більше знань про емісійні процеси у порівнянні з традиційною інвентаризацією на національному рівні, оскільки при цьому емісії відображають у тих місцях, де вони в дійсності мають місце.

З метою формування бази геопросторових даних про емісії парникових газів, які виникають під час видобування і переробки нафти, створено цифрову карту родовищ і нафтопереробних заводів Польщі. При цьому зроблено припущення, що відповідні джерела емісії є точковими, оскільки розміри родовищ є невеликими у порівнянні з площею аналізованої території.

Для проведення просторової інвентаризації летких емісій парникових газів, які виникають внаслідок видобування нафти, представляємо їх у такому вигляді:

$$E_{oil}^g(\xi_n) = E_{oil,e}^g(\xi_n) + E_{oil,t}^g(\xi_n), \quad g \in (CO_2, CH_4), \quad (2.4)$$

де $E_{oil}^g(\xi_n)$ – річні леткі емісії g -го парникового газу, які виникають внаслідок видобування нафти на ξ_n -му родовищі; $E_{oil,e}^g(\xi_n)$ – емісії, які виникають безпосередньо під час видобування нафти на ξ_n -му родовищі; $E_{oil,t}^g(\xi_n)$ – емісії від розподілу і транспортування нафти з цього родовища.

Оскільки у статистичній звітності не відображено дані про видобуток нафти на кожному окремо взятому родовищі, зроблено ряд припущень для оцінювання таких емісій. Зокрема, математичні моделі летких емісій парникових газів, які виникають під час видобування і транспортування нафти, представлено, відповідно, у вигляді:

$$E_{oil,e}^g(\xi_n) = \frac{A_{oil}^{\Sigma} \cdot P_{oil}(\xi_n)}{\sum_{j=1}^N P_{oil}(\xi_j)} \cdot K_{oil,e}^g,$$

$$E_{oil,t}^g(\xi_n) = \frac{A_{oil}^{\Sigma} \cdot P_{oil}(\xi_n)}{\sum_{j=1}^N P_{oil}(\xi_j)} \cdot K_{oil,t}^g,$$

$$g \in (CO_2, CH_4), \quad (2.5)$$

де A_{oil}^{Σ} – річний видобуток нафти у Польщі; $P_{oil}(\xi_n)$ – потужність ξ_n -го нафтового родовища; $K_{oil,e}^g$ та $K_{oil,t}^g$ – коефіцієнти емісії g -го парникового газу на ξ_n -му родовищі, відповідно, при видобуванні та транспортуванні нафти.

2.3.3. Моделі емісійних процесів при видобуванні природного газу

Згідно з методиками Міжнародної групи експертів зі змін клімату [112] під час видобування природного газу виникають леткі емісії від видобувної активності, розподілу та транспортування газу. Для здійснення інвентаризації емісії у досліджуваному секторі використано математичну модель:

$$E_{gas}^{g_l}(\xi_n) = E_{gas,p}^{g_l}(\xi_n) + E_{gas,t}^{g_l}(\xi_n) + E_{gas,d}^{g_l}(\xi_n), \quad (2.6)$$

де $E_{gas}^{g_l}(\xi_n)$ – річні емісії парникового газу g_l , які виникають внаслідок видобування природного газу на ξ_n -му родовищі, $g_l \in (CO_2, CH_4)$; $E_{gas,p}^{g_l}(\xi_n)$, $E_{gas,t}^{g_l}(\xi_n)$ та $E_{gas,d}^{g_l}(\xi_n)$ – емісії, які виникають на ξ_n -му родовищі, відповідно, безпосередньо під час видобування природного газу, при його транспортуванні та під час його розподілу (ці величини

обчислюють на основі даних про діяльність та відповідних коефіцієнтів емісії. Оскільки інформація на рівні окремого родовища є конфіденційною, розроблено алгоритми дезагрегації статистичних даних про видобування природного газу з рівня країни до рівня точкових джерел.

2.4. Математичні моделі емісії парникових газів при спалюванні палива під час переробки різних видів викопного палива

2.4.1. Математичні описи емісійних процесів у нафтогазовій промисловості

Процесам емісії парникових газів від спалювання викопного палива на нафтопереробних заводах поставлено у відповідність таку математичну модель:

$$E_{ref}^{g,f}(\eta_k) = D_{stat,ref}^f \cdot K_{ref}^f(\eta_k) \cdot K_{em,ref}^{g,f}(\eta_k), \quad (2.7)$$

де $E_{ref}^{g,f}(\eta_k)$ – річні емісії g -го парникового газу, які виникають внаслідок спалювання викопного палива f -го виду на нафтопереробному заводі η_k , f – вид використаного палива, $f \in \{\text{нафта}, \text{природний газ}\}$, g – перерахункова змінна, яка відповідає певному парниковому газу, $g \in \{CO_2, N_2O, CH_4\}$; $D_{stat,ref}^f$ – загальнонаціональні статистичні дані про використане паливо f -го виду на переробку нафти; $K_{ref}^f(\eta_k)$ – дезагрегаційний коефіцієнт для використаного f -го виду палива для об'єкту η_k ; $K_{em,ref}^{g,f}(\eta_k)$ – коефіцієнт емісії g -го парникового газу від спалювання f -го виду палива на потреби нафтопереробного заводу η_k .

2.4.2. Математичні описи емісійних процесів у вугільній промисловості

Процесам емісії парникових газів від спалювання викопного палива під час переробки кам'яного вугілля поставлено у відповідність таку математичну модель на рівні джерела емісії:

$$E_{coke}^{g,f}(\eta_k) = D_{stat,coke}^f \cdot K_{coke}^f(\eta_k) \cdot K_{em,coke}^{g,f}(\eta_k), \quad (2.8)$$

де $E_{coke}^{g,f}(\eta_k)$ – річні емісії g -го парникового газу, які виникають внаслідок спалювання викопного палива f -го виду на коксовому заводі η_k , g – перерахункова змінна, яка відповідає певному парниковому газу, $g \in \{CO_2, N_2O, CH_4\}$; $D_{stat,coke}^f$ – загальнонаціональні статистичні дані про використане паливо f -го виду на коксування кам'яного вугілля; $K_{coke}^f(\eta_k)$ – дезагрегаційний коефіцієнт для використаного f -го виду палива для об'єкту η_k ; $K_{em,coke}^{g,f}(\eta_k)$ – коефіцієнт емісії g -го парникового газу від спалювання f -го виду палива на потреби коксового заводу η_k [24].

Дезагрегаційний коефіцієнт $K_{coke}^f(\eta_k)$ можна записати у такому вигляді:

$$K_{coke}^f(\eta_k) = \frac{C(\eta_k)}{\sum_i C(\eta_i)}, \quad (2.9)$$

$$\eta_k, \eta_i \in \Omega_{coke}, \quad k, i = \overline{1, K}, \quad (2.10)$$

де $C(\eta_k)$ – обсяги виробництва коксу на k -му заводі; Ω_{coke} – множина заводів з переробки кам'яного вугілля; K – їх загальне число.

Леткі емісії парникових газів, які виникають внаслідок коксування кам'яного вугілля, можна обчислити за формулою:

$$E_{coke}^{g_l}(\eta_k) = \frac{C(\eta_k)}{\sum_{i=1}^K C(\eta_i)} \cdot K_{coke}^{g_l}(\eta_k), \quad (2.11)$$

де $E_{coke}^{g_l}(\eta_k)$ – леткі емісії парникових газів, які виникають на η_k -му коксовому заводі під час переробки вугілля, $g_l \in (CO_2, CH_4)$; $C(\eta_k)$ – обсяги переробки кам'яного вугілля на η_k -му заводі; $K_{coke}^{g_l}(\eta_k)$ – коефіцієнт емісії g_l -го газу при коксуванні.

2.4.3. Адаптація математичних моделей відносно доступних статистичних даних певної країни

Ратифікувавши Кіотський протокол, кожна країна зобов'язалась щорічно здійснювати інвентаризацію парникових газів на державному рівні та у вигляді Національних інвентаризаційних звітів подавати оцінки до UNFCCC. Було розроблено один стандарт подачі звіту та узгоджено між країнами від яких джерел оцінюватимуть емісії. Більшість країн для спрощення підготовки інвентаризаційних звітів адаптували вимоги подачі статистичної інформації від кожного суб'єкта економічної діяльності. Розвинуті країни подають статистичну звітність у відкритому доступі і кожен бажаючий може ознайомитись з нею. Досить часто підприємства однієї галузі мають офіційні інтернет-сторінки, де представляють дані про обсяги видобування чи виробництва палива.

Для здійснення просторової інвентаризації важливою є наявність не лише географічних координат джерел емісій, а також статистичних даних про видобувну чи виробничу потужність на рівні окремого джерела емісій. У Польщі на сторінках Головного статистичного управління (GUS – Główny Urząd Statystyczny – для Польщі) та Банку локальних даних (BDL – Bank Danych Lokalnych) такі дані є недоступними на рівні окремо взятого джерела емісій (такого роду інформація є статистичною таємницею). Натомість великі підприємства видають різноманітні щорічники, в яких публікують інформацію про свою діяльність та досягнення. Також на офіційних сайтах підприємств представляють дані про їх діяльність. Наприклад, є створений сайт підприємств кам'яновугільної промисловості, де розміщена інформацію про усі шахти Польщі.

На жаль статистичний облік в Україні не так добре організований, значна частина інформації є статистичною таємницею, а деякі дані необхідні для здійснення інвентаризації парникових газів не збираються. Також на території України знаходиться велика кількість приватних чи

несанкціонованих копалень, де видобуток кам'яного вугілля не обліковується. Більшість шахт не ведуть відкритої звітності по видобутому вугіллі, а у відкритому доступі є лише юридична адреса, що також є мало інформативним для просторової інвентаризації парникових газів, оскільки сама шахта/шахти можуть знаходитись за десятки кілометрів.

За допомогою розроблених математичних моделей можна оцінити емісії парникових газів від окремо взятого джерела лише при наявності достатньої статистичної інформації про досліджуване джерело. Польща надає у відкритому доступі усі необхідні дані, що дозволило здійснити повну інвентаризацію видобувної промисловості в цій країні. В Україні більшість даних є комерційною таємницею або їх облік не ведеться. Тому просторова інвентаризація для України здійснена поверхнево згідно з доступними статистичними даними.

2.5. Результати просторового моделювання процесів емісії парникових газів при видобуванні і переробці різних видів палива

Для створення геопросторових кадастрів емісії парникових газів розроблено описану вище геоінформаційну систему, яка використовує статистичну інформацію, дані про обсяги чи потужності видобування та переробки кам'яного вугілля на шахтах/підприємствах, а також відповідні цифрові карти. З допомогою цієї геоінформаційної системи здійснено обчислювальні експерименти з оцінювання емісії парникових газів у вугільній промисловості Польщі. Результати інвентаризації збережено у вигляді бази геопросторових даних, які мають прив'язку до географічних координат.

Здійснюючи просторову інвентаризацію емісії парникових газів важливо мати точні цифрові карти розташування джерел емісії. Тому за допомогою плагіну Google Earth визначено розміщення діючих шахт і коксових заводів і застосувавши відповідний програмний модуль побудовано необхідні цифрові карти (див. рис. 2.2).

Використовуюючи створену геоінформаційну систему для просторової інвентаризації емісії парникових газів для кожної шахти, де здійснюється видобування кам'яного вугілля, оцінено леткі емісії метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2) від видобувної і післявидобувної діяльності. Як приклад отриманих результатів інвентаризації, на рис. 2.3 у вигляді цифрової карти представлено емісії метану від різних видів діяльності.

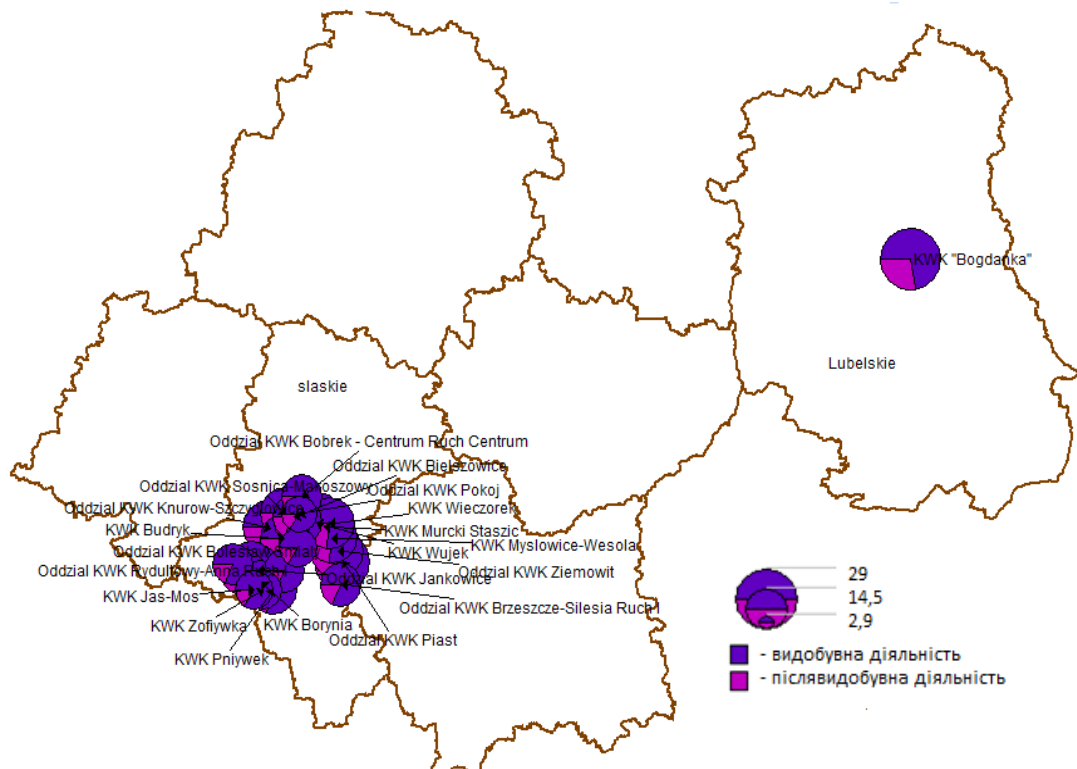


Рис. 2.3. Емісії метану при видобуванні кам'яного вугілля і від післявидобувної діяльності у Польщі (Гг, 2010 р.)

Результати аналізу показали, що найбільшими джерелами емісії парникових газів, які виникають під час видобування кам'яного вугілля, за результатами господарської діяльності у 2010 році були шахти: KWK "Bogdanka" (6,9 Гг), Oddział KWK Piast (6,66 Гг) та шахта KWK Wujek (6,35 Гг).

На рис. 2.4 відображено сумарні річні емісії парникових газів, які виникають при спалюванні палива під час переробки кам'яного вугілля. Результати представлені в CO_2 -еквіваленті, тобто значення емісії метану та закису азоту просумовано з врахуванням потенціалу глобального потепління.

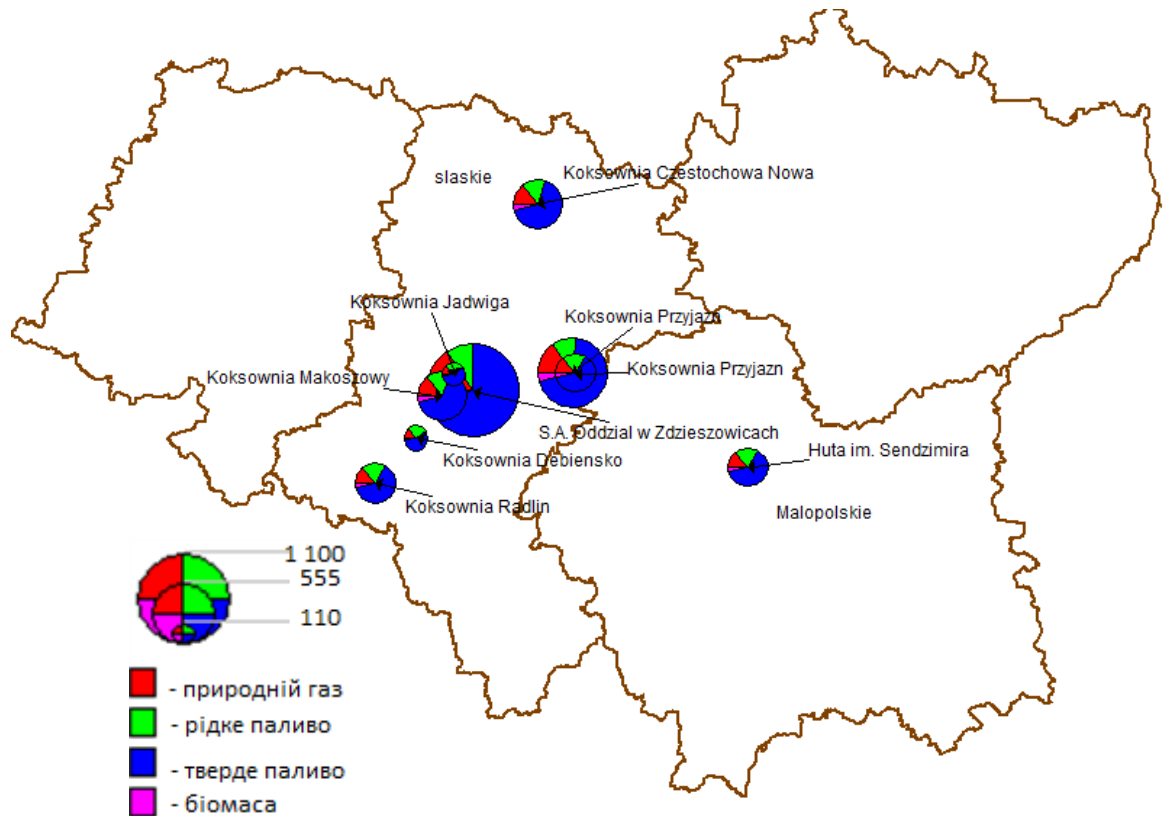


Рис. 2.4. Сумарні емісії парникових газів (CO₂-еквівалент) при використанні палива для коксування у Польщі (Гг, 2010 р.)

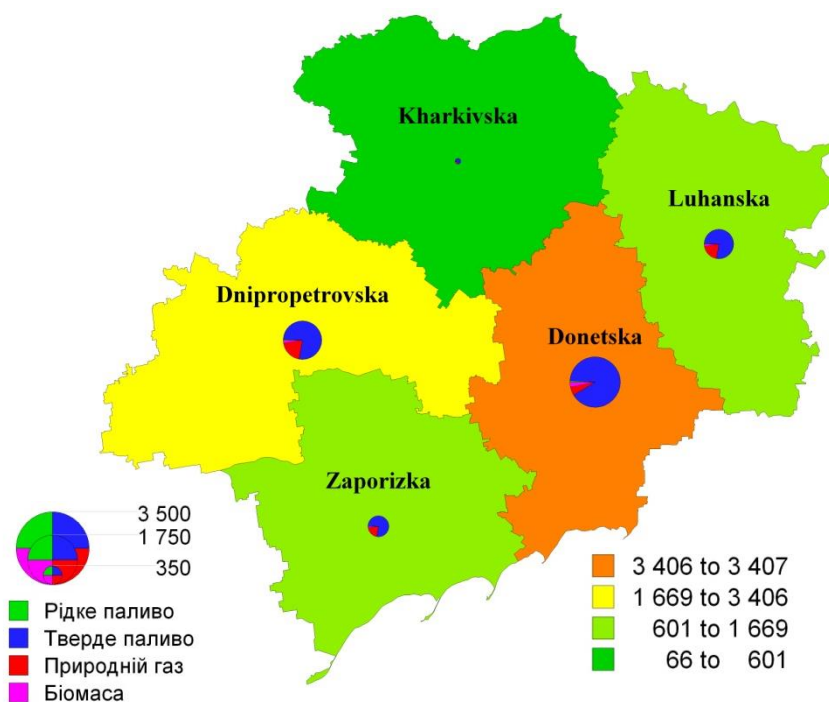


Рис. 2.5. Сумарні емісії парникових газів (CO₂-еквівалент) при використанні палива для коксування в Україні (Гг, 2010 р.)

На рис. 2.5 відображено сумарні річні емісії парникових газів, які виникають при спалюванні палива під час переробки кам'яного вугілля в Україні. У 2010 році лідером по емісіях від спалювання палива на коксових заводах була Донецька область, тут розміщено 8 коксових заводів, які виробляють більше ніж 50% коксового вугілля України.

Також, з використанням створеної геоінформаційної системи для кожного коксового заводу оцінено леткі емісії вуглекислого газу (CO_2). Результати інвентаризації парникових газів для заводів з переробки кам'яного вугілля представлено у вигляді розподілу цих емісій на рівні окремих заводів (рис. 2.6 та табл. 2.1). Отримані результати показали, що найбільшими джерелами емісії при коксуванні палива є S.A. Oddział w Zdziechowicach (становить 34% від усіх емісій при коксуванні), Koksownia Przyjaźń (21%) і коксовня Częstochowa Nowa (11%).

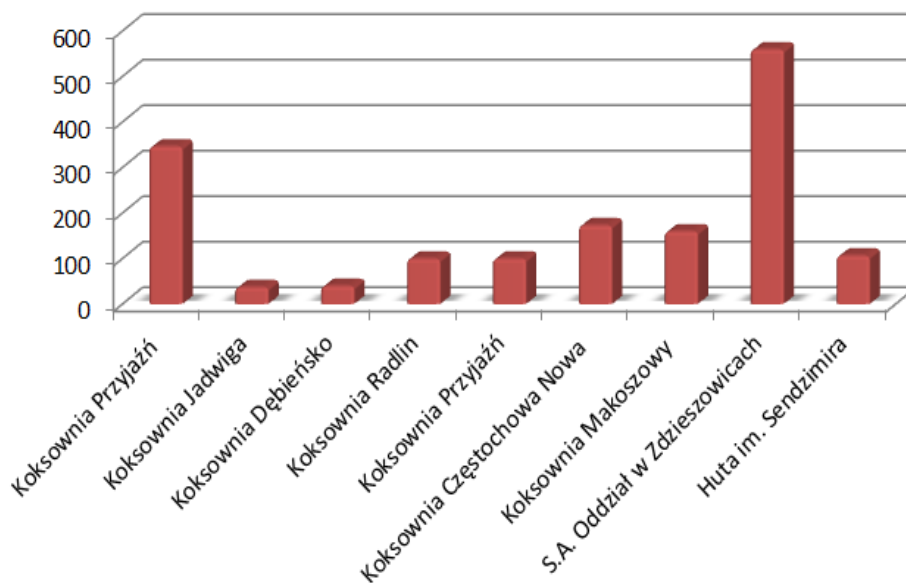


Рис. 2.6. Леткі емісії вуглекислого газу від переробки кам'яного вугілля на коксових заводах Польщі (Гт, 2010 р.)

Представлений підхід до реалізації просторової інвентаризації емісії парникових газів у вугільній промисловості Польщі дає нові можливості для визначення потенціалу країни щодо скорочення емісії цих газів. Створені математичні моделі та геоінформаційна система їх реалізації можуть бути застосовані для інших країн після врахування специфіки подання статистичної звітності.

Таблиця 2.1. Емісії парникових газів, які виникають при коксуванні у Польщі (2010 р.)

№ п/п	Назва підприємства	Сумарні емісії парникових газів від спалювання палива, Гг	Леткі емісії CO ₂ , Гг	Леткі емісії CH ₄ , Гг
1.	Koksownia Przyjaźń	615,57	346,49	1,04
2.	Koksownia Jadwiga	66,29	37,32	0,11
3.	Koksownia Dębieńsko	71,03	39,98	0,12
4.	Koksownia Radlin	177,57	99,95	0,3
5.	Koksownia Przyjaźń	177,57	99,95	0,3
6.	Koksownia Częstochowa Nowa	307,78	173,25	0,52
7.	Koksownia Makoszowy	284,11	159,92	0,48
8.	S.A. Oddział w Zdzeszowicach	994,38	559,72	1,68
9.	Huta im. Sendzimira	189,4	106,61	0,32

Використовуючи представлені вище математичні моделі та геоінформаційну систему сформовано бази геопросторових даних емісії парникових газів у нафтовій промисловості Польщі. Як приклад, на рис. 2.7 наведено цифрову карту емісій, які виникають при видобуванні нафти у Польщі. Відповідно до результатів просторової інвентаризації, леткі емісії парникових газів розподіленні вкрай нерівномірно, що пояснюється нерівномірним розташуванням покладів нафти у Польщі. Як бачимо з рис. 2.7 найбільші питомі емісії парникових газів зосередженні у Любуському та Підкарпатському воєводствах, найменші – у Великопольському.

Результати обчислень показали, що у секторі видобування і переробки нафти у Польщі найбільші емісії виникають внаслідок спалювання викопного палива (зокрема, нафти і газу) на нафтопереробних заводах, у наслідок чого до атмосфери емітується 6205,75 Гг діоксиду вуглецю, 0,18 Гг метану та 0,03 Гг закису азоту, а також 0,71 Гг летких емісій метану. Оскільки величини емісій парникових газів є різних порядків (діоксиду вуглецю у

порівнянні з метаном та закисом азоту), тому їх важко відобразити на одній карті. Саме тому на рис. 2.8 окремо представлено структуру річних летких емісій метану, а також емісії метану і закису азоту від спалювання палива на рівні нафтопереробних заводів (тобто без CO_2), а кольором відображено величину питомих емісій вуглекислого газу на рівні воєводств. Безперечним лідером у сумарних емісіях парникових газів є нафтопереробний завод, який знаходиться у м. Плоцьк Мазовецького воєводства, частка емісій від якого становить 63% від емісій у досліджуваному секторі для всієї Польщі.

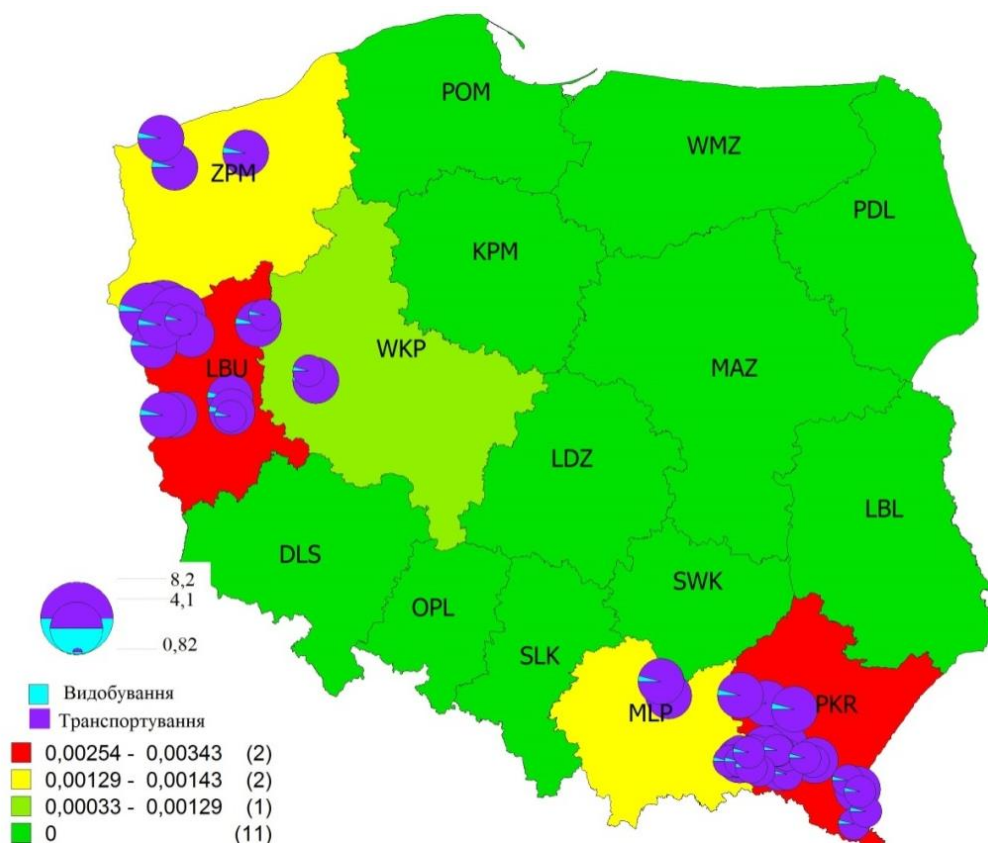


Рис. 2.7. Структура річних летких емісій метану і вуглекислого газу на рівні родовищ Польщі (Гг) та питомі емісії парникових газів (Гг/км²) від видобування нафти на рівні воєводств (CO₂-екв, 2010 р.)

Для створення геопросторових кадастрів емісії парникових газів розроблено геоінформаційну систему, яка використовує статистичні дані, дані про обсяги чи потужності видобування природного газу на рівні родовищ чи країни, відповідний математичний опис наведений вище, а також цифрові карти. Здійснено обчислювальні експерименти з оцінювання емісії

парникових газів від видобування природного газу у Польщі, результати інвентаризації представлено у вигляді бази геопросторових даних, яка має прив'язку до географічних координат. Розроблена інформаційна система дає можливість здійснювати просторовий аналіз емісії парникових газів і подавати результати у вигляді цифрових векторних карт.

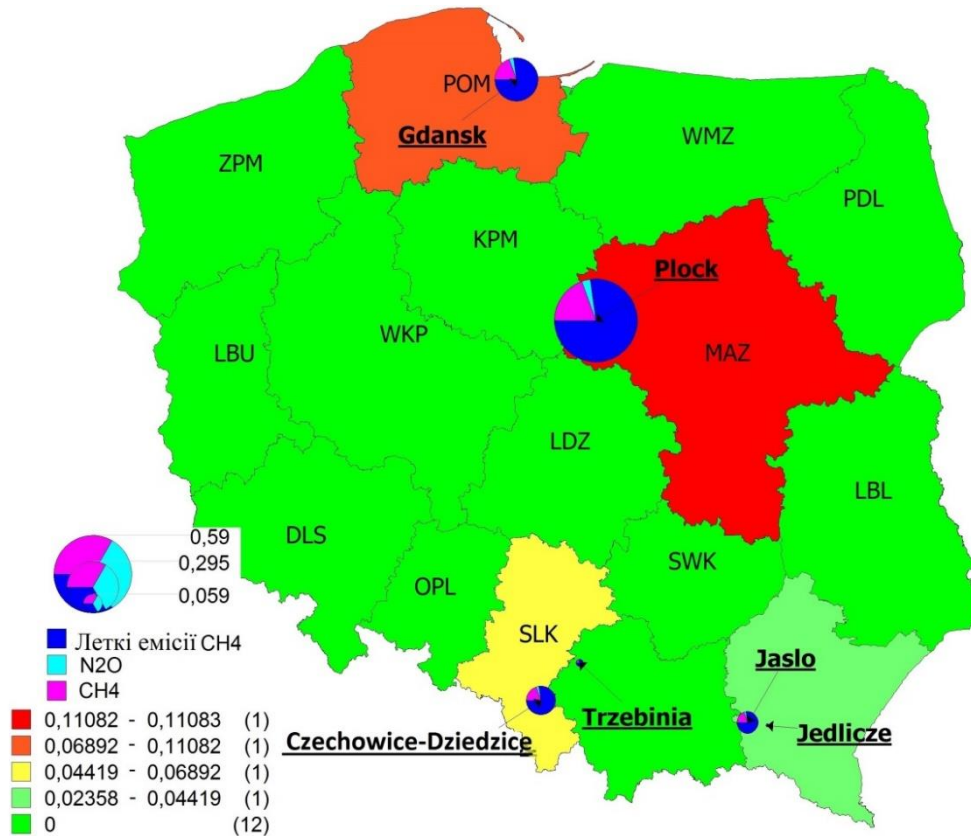


Рис. 2.8. Структура річної емісії парникових газів від переробки нафти у Польщі: емісії CH₄ та N₂O від спалювання палива і леткі емісії CH₄ на рівні заводів (Гт, CO₂-екв) та питомі емісії CO₂ на рівні воєводств (Гт/км²), 2010 р.

Використовуючи розроблену геоінформаційну систему оцінено емісії метану і вуглекислого газу, які виникають внаслідок видобування природного газу, на рівні родовищ. Результати інвентаризації представлено у вигляді цифрової карти (рис. 2.9), яка показує розміщення родовищ та відображає розподіл емісії від різних процесів, які мають місце під час видобування природного газу.

Видобування природного газу у Польщі здійснюється у 8 воєводствах. Найбільше родовищ знаходиться у Підкарпатському і Великопольському

воєводствах, відповідно саме там зосереджено найбільші емісії парникових газів від видобування, транспортування та розподілу природного газу. Результати аналізу засвідчили, що найбільші емісії мають місце при розподілі природного газу.

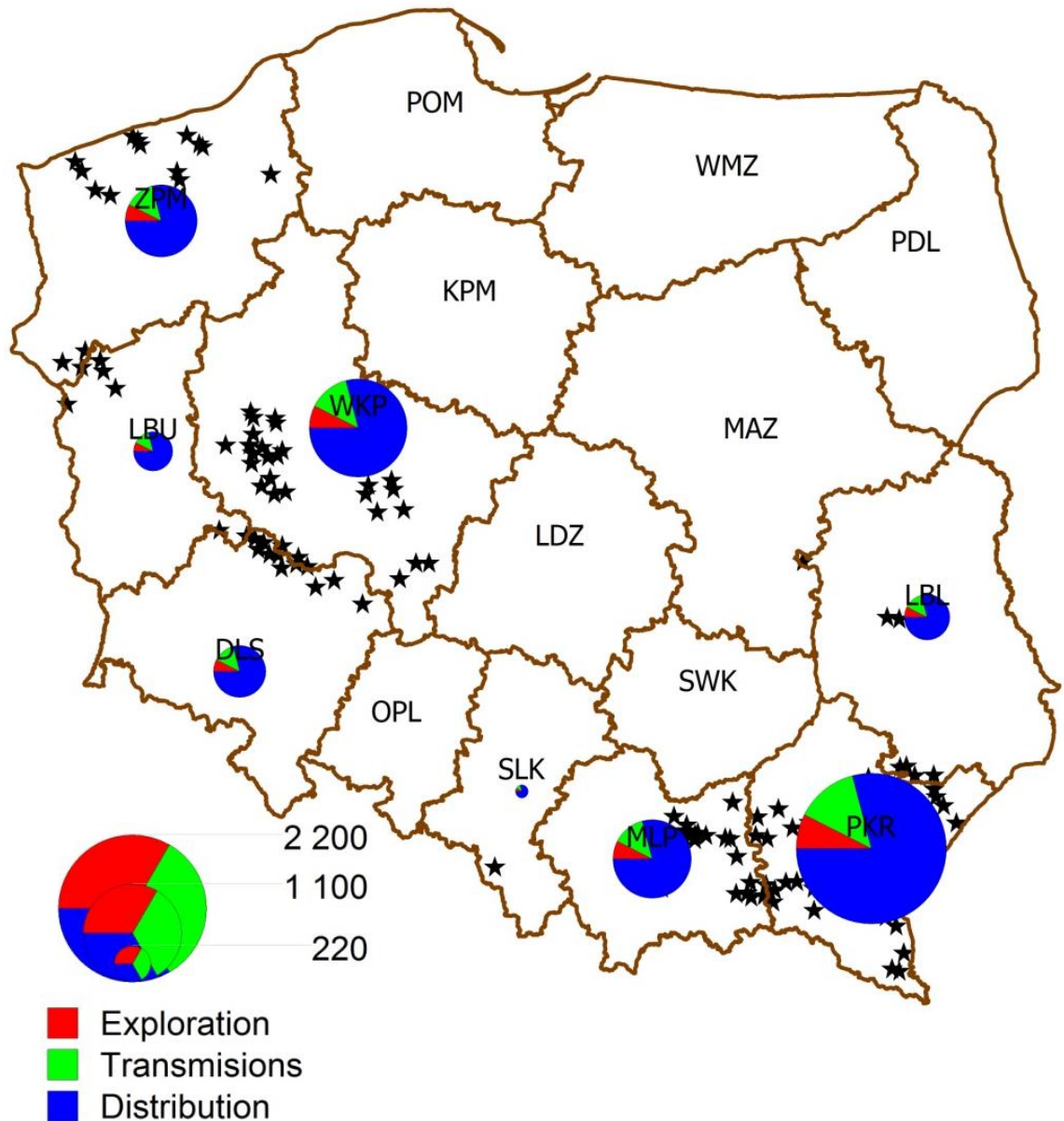


Рис. 2.9. Джерела емісії (родовища) та структура сумарних легких емісій вуглекислого газу і метану, які виникають внаслідок видобування природного газу, на рівні адміністративних регіонів Польщі у розрізі різних видів активності – видобування, транспортування та розподіл (Гт, CO₂-еквівалент, 2010)

2.6. Сумарний просторовий кадастр емісій та верифікація результатів моделювання

Для обчислення сумарної емісії парникових газів у досліджуваному секторі господарської діяльності, а саме при видобуванні і переробці нафти, використовуємо математичний опис, який враховує представлену на початку цього розділу структуру емісійних процесів:

$$E_{oil}^{\Sigma}(\xi_n, \eta_k) = \sum_{g \in G} \left\{ W_g \left[\sum_{f \in F} \sum_{\eta_k} E_{ref}^{g,f}(\eta_k) + \sum_{\eta_k} E_{ref}^g(\eta_k) + \sum_{\xi_n} E_{oil}^g(\xi_n) \right] \right\}, (2.12)$$

де $E_{oil}^{\Sigma}(\xi_n, \eta_k)$ – сумарні леткі емісії парникових газів, а також емісії, спричинені використанням усіх видів викопного палива у нафтовій промисловості, у CO_2 -еквіваленті; W_g – коефіцієнт глобального потепління відповідного парникового газу, зокрема $W_{CO_2} = 1$, $W_{CH_4} = 25$, $W_{N_2O} = 298$; $E_{ref}^{g,f}(\eta_k)$ – річні емісії g -го парникового газу, які виникають внаслідок спалювання викопного палива f -го виду на нафтопереробному заводі η_k , причому g – перерахункова змінна, яка відповідає певному парниковому газу, $g \in \{CO_2, N_2O, CH_4\}$; $E_{ref}^g(\eta_k)$ – леткі емісії парникових газів, які виникають у ході реалізації технологічного процесу на η_k -му нафтопереробному заводі; $E_{oil}^g(\xi_n)$ – річні леткі емісії g -го парникового газу, які виникають внаслідок видобування нафти з ξ_n -го родовища.

Тоді сумарні емісії у вугільній промисловості:

$$E_{coalInd}^{\Sigma} = \sum_{g \in G} \left\{ W_g \left[\sum_{f \in F} \sum_{\eta_k} E_{coke}^{g,f}(\eta_k) + \sum_{\eta_k} E_{coke}^g(\eta_k) + \sum_{\xi_n} E_{coal}^g(\xi_n) \right] \right\}, (2.13)$$

де $E_{coalInd}^{\Sigma}(\xi_n, \eta_k)$ – сумарні леткі емісії парникових газів, а також емісії, які виникають від використання всіх видів викопного палива у вугільній промисловості у CO_2 -еквіваленті; W_g – коефіцієнт глобального потепління відповідного парникового газу, $W_{CO_2} = 1$, $W_{CH_4} = 25$, $W_{N_2O} = 298$.

На рис. 2.10 зображено структуру сумарних емісій парникових газів, які виникають внаслідок спалювання різних видів палива на коксопереробних заводах Польщі та України.

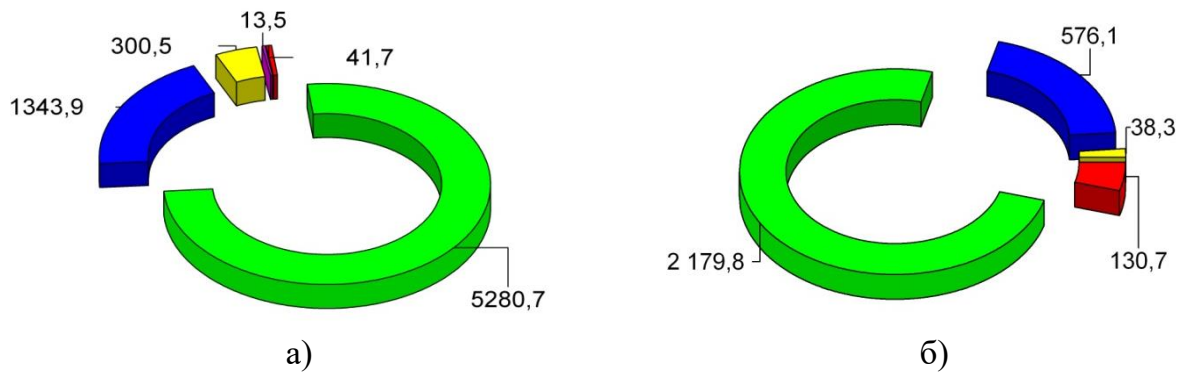


Рис. 2.10. Сумарні емісії від спалювання викопного палива при переробці кам'яного вугілля в Польщі (а) та Україні (б). Зелений колір відповідає емісіям від спалювання твердих видів палива, синій – газоподібних, жовтий –біомаси та червоний – рідких (Гг, 2010р.)

2.7. Висновки до розділу 2

Видобувна промисловість в Україні та Польщі є вагомим джерелом емісій парникових газів. У цьому секторі значну частку емісій складають леткі емісії метану, які виникають внаслідок видобувної діяльності і важко обліковуються, тому невизначеність таких емісійних процесів є значною. Саме тому доцільним є здійснення просторового моделювання емісії парникових газів у цьому секторі господарської діяльності для покращення знань про емісійні процеси.

Проаналізовано видобувну промисловість України та Польщі, розглянуто основні джерела емісії у досліджуваному секторі та показано територіальну нерівномірність їх зосередження. Обґрунтовано доцільність розроблення математичних моделей для просторового аналізу емісії парникових газів у видобувній промисловості.

Розроблено геоінформаційну систему, яка дає можливість моделювати емісії парникових газів на рівні окремо взятого родовища чи заводу як

точкових джерел емісії. Ця система включає збір доступної інформації, побудову цифрових карт та безпосередню оцінку емісії парникових газів. Оскільки значна частина даних доступна лише на рівні країни чи області, розроблено ряд алгоритмів дезагрегації відповідно до доступних даних про досліджуваний об'єкт (потужність підприємства, кількість виробленої продукції, а також емісійні коефіцієнти).

Розроблено математичну модель процесів емісії парникових газів у кам'яновугільній промисловості на рівні шахт та коксових заводів як точкових джерел емісії, які дають можливість будувати просторові кадастри емісій. Оцінено емісії від видобування та від переробки кам'яного вугілля. У роботі враховано леткі емісії метану, а також емісії вуглекислого газу, закису азоту та метану, які виникають внаслідок спалювання викопного палива на коксових заводах.

Розроблено математичні моделі процесів емісії від нафтогазової промисловості (емісії від видобування та переробки нафти, а також емісії від видобування природного газу), які дають можливість будувати просторові кадастри емісії на рівні нафто-газових родовищ та нафтопереробних заводів. У ролі індикатора дезагрегації статистичних даних використано потужності переробних заводів та кількість видобутої нафти чи газу.

З використанням розроблених підходів, математичних моделей та програмних засобів їх реалізації проведено обчислювальні експерименти з моделювання процесів емісії парникових газів від видобувної промисловості. Отримано геопросторові результати інвентаризації парникових газів на рівні точкових об'єктів по категоріях досліджуваного сектору та побудовано відповідні просторові кадастри емісій. Просторовий аналіз сумарних питомих емісій у видобувній промисловості свідчить про територіальну нерівномірність розміщення джерел емісії, що зумовлено нерівномірним розміщення покладів викопного палива на території досліджуваних країн. Показано, що нафтогазова промисловість (видобування та переробка нафти та природного газу) у Польщі дає найбільші емісії у

перерахунку на одиниці CO₂-еквіваленту, а в Україні лідером емісії видобувної промисловості є кам'яновугільна. Суттєвий внесок у сумарні емісії видобувної промисловості дають емісії від спалювання викопного палива. Також варто відзначити, що леткі емісії від видобувної промисловості України майже в три рази більші, від летких емісій видобувної промисловості Польщі, причому це у значній мірі зумовлено старими технологіями видобування кам'яного вугілля в Україні (емісійний коефіцієнт в 2,5 вищий). Розроблені математичні моделі та засоби їх реалізації можуть використовуватися владними структурами як ефективний інструментарій для прийняття стратегічно важливих рішень по зменшенню рівня емісії від видобувної промисловості та покращення охорони навколишнього середовища.

Розділ 3. Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів, які виникають при спалюванні палива у переробній промисловості

У цьому розділі проаналізовано особливості емісії парникових газів від використання викопного палива у промисловому секторі. Представлено математичні моделі для просторового аналізу процесів емісії парникових газів, які виникають внаслідок спалювання викопного палива у металургійній, хімічній, харчовій та інших промисловостях. Розроблено геоінформаційну технологію, яка дає можливість формувати базу геопросторових даних про емісії та будувати просторові кадастри емісії парникових газів у різноманітних категоріях промислового сектору. На основі доступної статистичної інформації щодо результатів промислової діяльності і специфічних коефіцієнтів емісії здійснено обчислювальні експерименти з побудови просторових кадастрів емісії парникових газів. Отримано результати обчислювальних експериментів з просторового аналізу емісії парникових газів від використання викопного палива у промисловому секторі на рівні промислових зон як джерел емісії площинного типу та найбільших заводів, як джерел точкового типу. Здійснено просторовий аналіз емісій та побудовано відповідні тематичні цифрові карти.

3.1. Особливості емісії парникових газів від використання викопного палива у промисловому секторі

Основними джерелами емісії парникових газів є категорії спалювання палива (1.А відповідно до методик МГЕЗК). Цей сектор спричинив більше 90% від сумарного обсягу емісій (без урахування ЗЗЗЛГ – змін у землекористування та змін у лісовому господарстві). За даними національних інвентаризаційних звітів за результатами господарської діяльності у 2010 році частка промислового сектору становила: у Польщі – 9,7%, в Україні – 23,8% [152].

Перш ніж формувати математичні моделі процесів емісії парникових газів у промисловому секторі слід проаналізувати і врахувати специфіку емісійних джерел у всіх категоріях господарської діяльності, що відносяться до цього сектора. У традиційних методиках інвентаризації емісій парникових газів МГЕЗК наведено базовий підхід до опису процесів емісії цих газів від виробництва промислової продукції, який представлено у вигляді добутку даних про обсяги виробництва промислових речовин та коефіцієнтів емісії для них. Останні прийнято виражати у вигляді маси відповідного емітованого парникового газу на одиницю маси виробленої продукції. Такий підхід є універсальним при оцінюванні емісій на рівні країни, проте він не враховує особливостей процесів емісії по окремих її регіонах, що веде до зниження ефективності інвентаризаційного процесу.

Методики МГЕЗК [62] пропонують таку класифікацію економічної діяльності для проведення інвентаризації емісії парникових газів у промисловому секторі окремо для кожного підсектору. У відповідності з методиками МГЕЗК енергетичний сектор ділиться на кілька основних підсекторів економічної діяльності, серед яких є підсектор „1.А.2 Промисловість та будівництво”, який у свою чергу складається з таких основних категорій:

- металургійна промисловість,
- хімічна промисловість,
- харчова промисловість,
- інші категорії, не вказані вище.

У досліджуваному секторі оцінюють емісії, які виникають від спалювання викопного палива для енергетичних потреб заводів та фабрик, але не враховуються емісії від хімічних реакцій внаслідок виробничої діяльності, цей тип емісій враховують у секторі 2.1. «Промислові процеси». Моделюванню процесів емісії у цьому секторі присвячено дисертаційну роботу Н.Чарковської [69]. Натомість у цьому розділі мова йде про

просторове моделювання емісійних процесів від спалювання викопного палива у промисловості, а не від хімічних реакцій.

3.2. Базова математична модель для просторового аналізу емісійних процесів у промисловому секторі

У цьому дослідженні, як вхідні дані для моделювання емісійних процесів, використано статистичні дані про спалювання викопного палива у категоріях промислового сектору на рівні країни, дані про валову додану вартість на рівні підрегіонів країни, інші економічні показники діяльності заводів і фабрик, коефіцієнти емісії парникових газів для кожної категорії промислового сектору (хімічна промисловість, металургія, харчова промисловість та інші категорії), адміністративні цифрові карти, а також карта землекористування Corine [18]. Також зроблено припущення, що промисловість зосереджена у містах з населенням більше 5 тис. мешканців та у промислових зонах.

Нехай w – номер воєводства чи області, $w = \overline{1, W}$ (W – їх загальна кількість); r_w – номер підрегіону ($r_w = \overline{1, R_w}$) у w -му воєводстві чи області, а R_w – число таких підрегіонів; $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$ – j_{w,r_w} -й елементарний об'єкт (промислова зона) на карті землекористування Польщі, $j_{w,r_w} = \overline{1, J_{w,r_w}}$; J_{w,r_w} – загальне число таких промислових об'єктів у r_w -му підрегіоні w -го воєводства чи області. Тоді емісії g -го парникового газу в i -му елементарному об'єкті можна обчислити використовуючи формулу

$$E_{g,i} = \sum_{Ind \in I} \sum_{f \in F} D_{Ind,f} \cdot K_{f,g,en} \cdot K_{f,g,em} \cdot K_{Ind,d}, \quad (3.1)$$

де парниковий газ $g \in \{CO_2, CH_4, N_2O\}$ належить до перерахункової множини з елементами: двоокис вуглецю, метан та закис азоту; i – номер елемента множини $\tilde{M} = \{m_1, \dots, m_i, \dots, m_n\}$, якою є множина емісійних джерел площинного типу (промислових зон чи урбанізованих територій); $D_{Ind,f}$ –

кількість палива f -го виду використаного в аналізованій категорії; $F = \{\text{тверде паливо, рідке паливо, газоподібне паливо, біомаса}\}$; $K_{f,g,en}$ та $K_{f,g,em}$ – відповідно, теплотворне значення палива f -го виду та емісійний коефіцієнт g -го парникового газу в підсекторі промисловості та будівництва; $K_{Ind,d}$ – коефіцієнт дезагрегації; $Ind \in \{\text{металургія, хімічна промисловість, харчова промисловість, інші}\}$. Коефіцієнти дезагрегації залежать від категорії антропогенної діяльності, оскільки для кожної категорії доступні інші статистичні дані.

При моделюванні емісійних процесів у деяких категоріях промислового сектору використано джерела емісії точкового типу для моделювання емісії парникових газів від великих заводів (металургія, хімічна промисловість тощо). Проте, в багатьох інших випадках для моделювання емісії використано джерела площинного типу, оскільки занадто трудомістким було б визначення місця розташування кожного малого підприємства на рівні країни. Крім того, цифрову карту землекористування Польщі було використано для локалізації промислових зон (територій з виробничою діяльністю).

Таким чином, основний підхід до дезагрегації даних про господарську діяльність (статистичних даних про спалювання викопного палива) у секторі промисловості складається з таких основних кроків (ці кроки реалізовано у створених програмних модулях геоінформаційної системи):

1) національні дані про спалювання викопного палива у промисловому секторі розподіляємо до рівня воєводств з використанням коефіцієнтів виробничої діяльності та інших наявних статистичних даних у ролі проксі даних (індикаторів) [32, 80, 37];

2) до рівня адміністративного району дезагрегацію даних про спалювання викопного палива здійснюємо з використанням даних про валову додану вартість;

3) обчислені дані про спалювання викопного палива на районному рівні дезагрегуємо до рівня промислових зон чи урбанізованих територій карти

землекористування з використанням наявних статистичних даних у ролі індикаторів (наприклад, кількість мешканців, собівартість реалізованої продукції і т.п.); також при цьому використовуємо наявні дані про місцезнаходження великих підприємств, як джерел емісії точкового типу.

3.3. Адаптація математичних моделей відносно доступних статистичних даних певної країни

Як уже згадувалось у розд. 2, найбільшою проблемою при здійсненні просторової інвентаризації парникових газів є доступність статистичних даних на якомога детальнішому рівні. У Польщі на сторінках Головного статистичного управління (GUS – Główny Urząd Statystyczny) та Банку локальних даних (BDL – Bank Danych Lokalnych) необхідні для аналізу емісій дані є представлені на рівні країни. Також Польща щорічно готує звіт про облік паливних матеріалів, які використано впродовж звітного року, дані такого звіту представлені в розрізі воєводств, а також від різних видів економічної діяльності. На жаль, у таких звітах наведено дані про споживання палива в загальному, без розрізнення, яка кількість палива пішла на енергетичні потреба, а яка як сировина для виготовлення продукції (для прикладу нафта широко використовується як сировина у хімічній промисловості). Такого типу інформація не може бути корисною для здійснення просторової інвентаризації парникових газів від спалювання палива. Натомість великі підприємства видають різноманітні щорічники, в яких публікують інформацію про свою діяльність та досягнення. Також у більшості випадків підприємства однієї галузі об'єднуються у асоціації, які мають офіційні інтернет-сторінки та звітують про ситуацію щодо обсягів виробництва, імпорту та експорту, а також викидів у цій галузі.

На жаль в Україні статистичний облік не так добре налагоджений, значна частина інформації є статистичною таємницею, а деякі дані, необхідні для здійснення інвентаризації парникових газів, взагалі не обліковуються (для прикладу, в Україні не обліковується кількість спожитого палива в

енергетичних цілях на рівні окремого заводу чи підприємства). Також на території України знаходиться велика кількість приватних заводів, інформація про діяльність яких подається поверхнево і є малоінформативна з точки зору інвентаризації парникових газів. Більшість великих заводів чи підприємств не ведуть відкритої звітності про їх діяльність, а у відкритому доступі є лише юридична адреса, що також є мало інформативним для просторової інвентаризації парникових газів, оскільки самі джерела емісій можуть знаходитись за десятки кілометрів від вказаної адреси.

За допомогою запропонованих математичних моделей можна оцінити емісії парникових газів від окремо взятого джерела лише при наявності даних про досліджуване джерело. Польща надає у відкритому доступі достатньо статистичної інформації, що дозволило здійснити повну інвентаризацію парникових газів від промислового сектору Польщі. В Україні більшість даних є комерційною таємницею або їх облік не ведеться. Тому просторова інвентаризація для України здійснена поверхнево згідно з доступними статистичними даними.

3.4 Моделювання емісії у харчовій промисловості

Для дрібних підприємств цієї категорії антропогенної діяльності використано припущення, що споживання викопного палива розподілено просторово пропорційно кількості мешканців відповідних населених пунктів. Причому, до уваги взято тільки населені пункти з більш ніж 1 тис. мешканців, оскільки ця галузь зосереджена в основному недалеко від великої кількості споживачів. Натомість у невеликих селах є менші потреби у промисловій переробці харчових продуктів у великих кількостях.

Деагрегацію даних про господарську діяльність у цій категорії до рівня воєводств здійснено на основі деяких коефіцієнтів (показників розвитку харчової промисловості у регіонах) у ролі індикаторів. Далі, деагрегацію даних про діяльність до рівня підгалузей проводилася з використанням, як індикаторів, даних про валову додану вартість. На останньому етапі,

дезагрегацію даних про діяльність до рівня населених пунктів здійснено пропорційно кількості мешканців цих населених пунктів. У цьому випадку коефіцієнт дезагрегації статистичних даних про діяльність у харчовій промисловості можна обчислити за такою формулою:

$$K_{food} = I_w \cdot \frac{G_{r_w}}{\sum_r G_{r_w}} \cdot \frac{P_i}{\sum_i P_i}, \quad (3.2)$$

де I_w – показник розвитку харчової промисловості у воєводстві, G_{r_w} – валова додана вартість у регіоні r_w , P_i – кількість мешканців у населеному пункті.

3.5. Математичне моделювання емісії парникових газів від використання викопного палива у металургійній промисловості

3.5.1. Специфіка металургійної промисловості

Оцінювання емісії парникових газів у металургійній промисловості є вкрай важливим, оскільки цей вид антропогенної діяльності включає матеріаломісткі та енергоємні технологічні процеси. Економічно не вигідно виробляти цей вид продукції на тих територіях, де немає необхідної сировинної бази.

Металургійний комплекс Польщі представлений чорною і кольоровою металургією. Чорна металургія розвинута в Сілезькому і Малопольському воєводствах (агломерація Домброва Гурніча, Катовіце, Ченстохова). Високоякісна сталь виплавляється також у Варшаві. У Польщі є 22 сталеплавильних заводи, у тому числі 10 великих, які виробляють близько 80 % усіх сталевих виробів. Найбільша корпорація ArselorMittal включає чотири великі металургійні комбінати – Huta Celder (входить у число 70 найбільших металургійних комбінатів світу), Huta Florian, Huta im. Sendzimira та Huta Katowice.

Серед галузей кольорової металургії виділяється мідна промисловість. Виробництво концентрується у трикутнику Легніца-Жуковиці-Орск

(Нижньої Сілезії). Свинець і цинк виплавляють у Катовіцах та інших промислових центрах Верхньої Сілезії. Для виробництва кольорових металів в основному споживається менше палива, але більша кількість електроенергії.

Україна є одним із світових лідерів виробників металів і займала до 2008 року 7 місце за обсягом виробництва сталі і 3 місце — за обсягом експорту металопродукції. Країна входить до десятки найбільших виробників і експортерів металу. Найбільші підприємства цієї галузі в Україні є: «Запоріжсталь», «Азовсталь», «Криворіжсталь», «Дніпроспецсталь», Харцизький трубний завод, Авдіївський коксохімічний завод, Дніпропетровський металургійний завод, Дніпропетровський металургійний комбінат, Єнакіївський металургійний завод, Макіївський металургійний комбінат, Нікопольський південнотрубний завод та ін.

Кольорова металургія в Україні розвинута недостатньо через брак власної сировини. Одним із найбільших заводів цієї галузі є Миколаївський глиноземний завод, який в основному працює на імпорتنій сировині.

3.5.2. Математична модель на рівні джерел емісії

Для оцінювання емісії парникових газів у цій категорії (металургійній промисловості), із використанням засобів Google Earth було ідентифіковано розташування найбільших металургійних комбінатів та їх виробничих потужностей (рис. 3.1,а), як джерел емісії точкового типу. На підставі цих ідентифікованих територій відповідні промислові зони як джерела емісії площинного типу були відзначені на карті землекористування (рис. 3.1,б), а емісії парникових газів були обчислені в залежності від обсягу виробництва (продажу) продукції кожним з цих металургійних комбінатів. Наступним кроком при підготовці карти джерел емісії у металургійному секторі було визначення за допомогою програмного модуля розташування промислових об'єктів, які відповідають металургійним заводам (рис. 3.2). Металургійні

комбінати доцільно представляти як площинні джерела емісії, оскільки їх площа сягає кількох квадратних кілометрів.

Знаходження розташування усіх заводів металургійної промисловості є досить трудомістким завданням, а інформація про кількість спожитого на конкретному заводі палива є статистичною таємницею. Тому було зроблено низку припущень при створенні математичного опису процесу емісій парникових газів у цьому секторі.

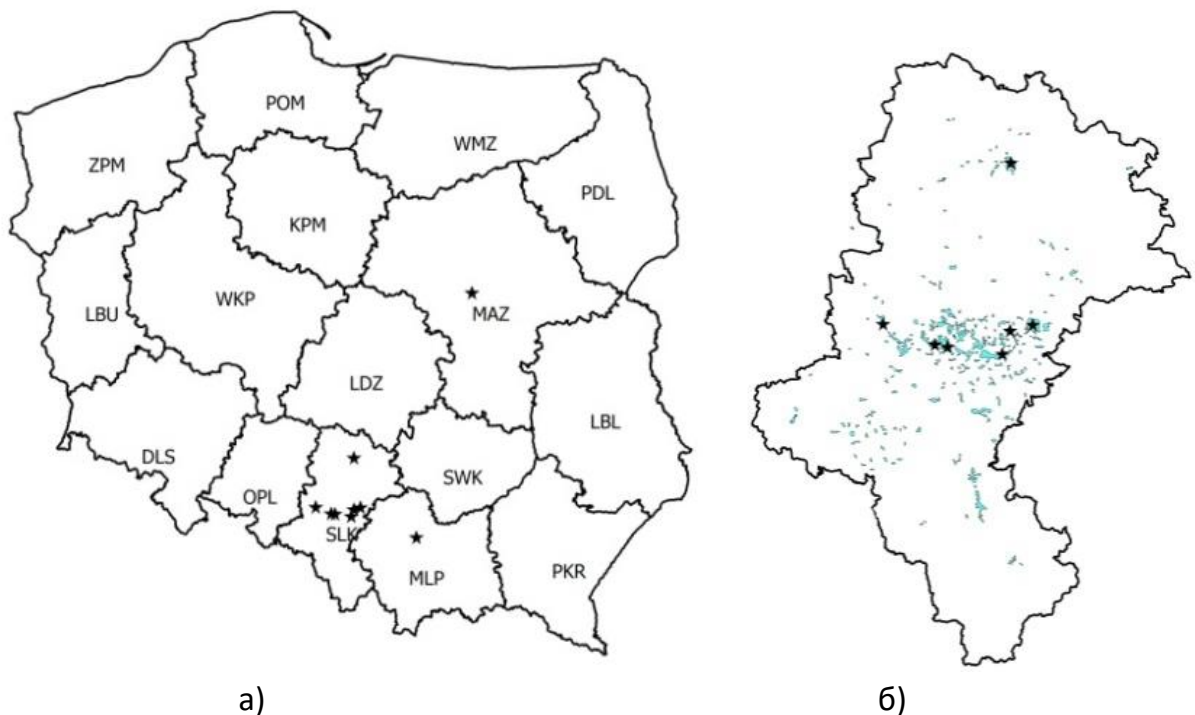


Рис. 3.1. Цифрова карта джерел емісії парникових газів у металургійному секторі Польщі: розміщення найбільших металургійних заводів (а); промислові об'єкти Сілезького воєводства (б)

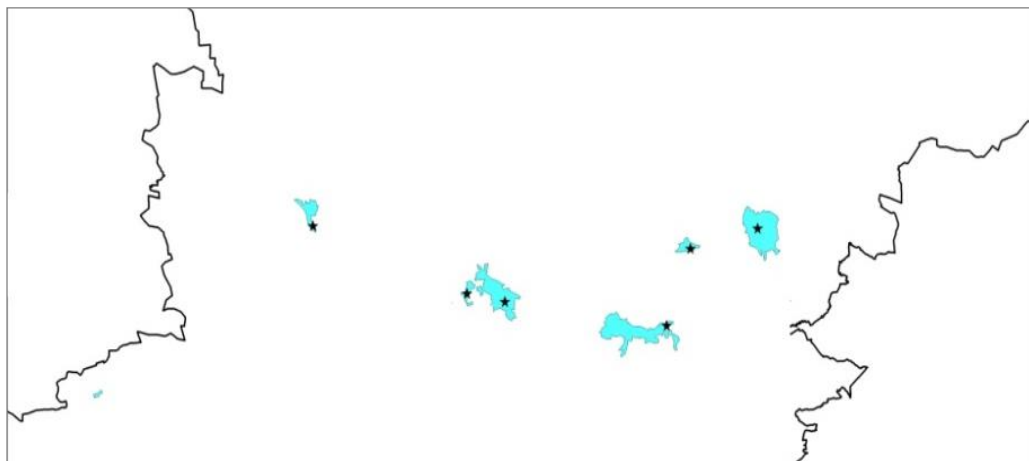


Рис. 3.2. Фрагмент цифрової карти найбільших металургійних заводів, як площинних джерел емісії

Нехай ξ_{metal, n_m} – n_m -те велике металургійне підприємство, потужності чи обсяги виробництва якого є відомі, $n_m = \overline{1, N_m}$, де N_m – число таких підприємств. Тоді математичну модель емісійних процесів у досліджуваній категорії можна представити у вигляді:

$$E_{metal}^{g, f}[\eta_{ind}(j_{w, r_w})] = D_{stat, metal}^f \cdot K_{metal}^f[\eta_{ind}(j_{w, r_w})] \cdot K_{em, metal}^{g, f}[\eta_{ind}(j_{w, r_w})],$$

$$j_{w, r_w} = \overline{1, J_{w, r_w}}, \quad r_w = \overline{1, R_w}, \quad w = \overline{1, W},$$

де $E_{metal}^{g, f}[\eta_{ind}(j_{w, r_w})]$ – річні емісії g -го парникового газу, які виникають внаслідок спалювання викопного палива f -го виду в елементарному об'єкті $\eta_{ind}(j_{w, r_w})$, причому на території деяких з цих об'єктів розміщені великі металургійні підприємства, потужності чи обсяги виробництва яких є відомі, а на території інших об'єктів є менші підприємства, потужності виробництва яких є невідомі; g – перерахункова змінна, яка означає парниковий газ, $g \in \{CO_2, N_2O, CH_4\}$; $D_{stat, metal}^f$ – загальнонаціональні статистичні дані про використане паливо f -го виду на виробництво металу; $K_{metal}^f[\eta_{ind}(j_{w, r_w})]$ – дезагрегаційний коефіцієнт для використаного f -го виду палива для об'єкту $\eta_{ind}(j_{w, r_w})$; $K_{em, metal}^{g, f}[\eta_{ind}(j_{w, r_w})]$ – коефіцієнт емісії g -го парникового газу від спалювання f -го виду палива на потреби металургійної промисловості на території об'єкту $\eta_{ind}(j_{w, r_w})$.

Коефіцієнт дезагрегації $K_{metal}[\eta_{ind}(j_{w, r_w})]$ для географічного об'єкта $\eta_{ind}(j_{w, r_w})$ r_w -го підрегіону w -го воєводства, як джерела емісії площинного типу, залежить від наявних даних про виробництво різних видів металів і його можна обчислити за такими формулами:

1) для промислової зони, в якій розміщено один з 10 найбільших металургійних комбінатів, які виробляють 80 % усіх сталевих виробів у Польщі:

$$K_{metal}[\eta_{ind}(j_w, r_w)] \Big|_{\eta_{ind}(j_w, r_w) \cap \xi_{n_m} \neq 0; n_m = \overline{1, N_m}} = 0,8 \cdot \frac{V_{metal}(\xi_{n_m})}{\sum_{l=1}^{N_m} V_{metal}(\xi_l)},$$

$$j_w, r_w = \overline{1, J_w, r_w}, \quad r_w = \overline{1, R_w}, \quad w = \overline{1, W}, \quad (3.3)$$

де $V_{metal}(\xi_{n_m})$ – виробнича потужність n_m -го металургійного комбінату ξ_{metal, n_m} ; $\cap$ – операція, яка визначає спільну площу двох географічних об'єктів $\eta_{ind}(j_w, r_w)$ та ξ_{metal, n_m} ; r_w – номер під регіону; w – номер воєводства;

2) для промислових об'єктів з невідомими виробничими потужностями:

$$K_{metal}[\eta_{ind}(j_w, r_w)] \Big|_{[\eta_{ind}(j_w, r_w)] \cap \xi_{n_m} = 0; \forall n_m = \overline{1, N_m}} =$$

$$= 0,2 \cdot K_{\%, metal, w} \cdot \frac{GVA_{r_w}}{\sum_{q=1}^{R_w} GVA_q} \cdot \frac{S(j_w, r_w)}{\sum_{i=1}^{J_w, r_w} S(j_w, i)},$$

$$j_w, r_w = \overline{1, J_w, r_w}, \quad r_w = \overline{1, R_w}, \quad w = \overline{1, W}, \quad (3.4)$$

де $K_{\%, metal, w}$ – частка сталеплавильної продукції w -го воєводства у цій продукції для всієї Польщі; GVA_{r_w} – валова додана вартість у металургійному секторі r_w -го під регіону w -го воєводства в Польщі; $S(j_w, r_w)$ – площа промислових зон (територій) $\eta_{ind}(j_w, r_w)$ на карті землекористування.

Кожен парниковий газ має певне значення потенціалу глобального потепління (GWP – англ. Global Warming Potential) – коефіцієнта, який визначає ступінь впливу на глобальне потепління. Тому сумарні результати аналізу емісії парникових газів подають у CO_2 -еквіваленті. Для представлення результатів у такому вигляді потрібно просумувати емісії вуглекислого газу, метану і закису азоту з врахуванням потенціалу глобального потепління. Це здійснюється за формулою:

$$E_{metal}^{\Sigma}[\eta_{ind}(j_w, r_w)] = \sum \left\{ W_g \cdot \sum_{f \in F} E_{metal}^{g, f}[\eta_{ind}(j_w, r_w)] \right\},$$

$$j_w, r_w = \overline{1, J_w, r_w}, \quad r_w = \overline{1, R_w}, \quad w = \overline{1, W},$$

де $E_{metal}^{\Sigma}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]$ – сумарна емісія всіх парникових газів від використання всіх видів викопного палива у елементарному об'єкті $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$ у CO_2 -еквіваленті; W_g – коефіцієнт глобального потепління відповідного парникового газу, $W_{\text{CO}_2} = 1$, $W_{\text{CH}_4} = 25$, $W_{\text{N}_2\text{O}} = 298$.

3.5.3. Результати математичного моделювання

За результатами математичного моделювання процесів емісії парникових газів у металургійному секторі Польщі та України отримано просторові кадастри емісії, які візуалізовано у вигляді тематичних карт, що ілюструють величину емісії кожним аналізованим джерелом. Як приклад, на рис. 3.3 представлено результати інвентаризації емісій парникових газів у CO_2 -еквіваленті для 2010 року. На цьому рисунку представлено структуру емісій основних парникових газів (вуглекислого газу, метану і закису азоту) на рівні воєводств Польщі.

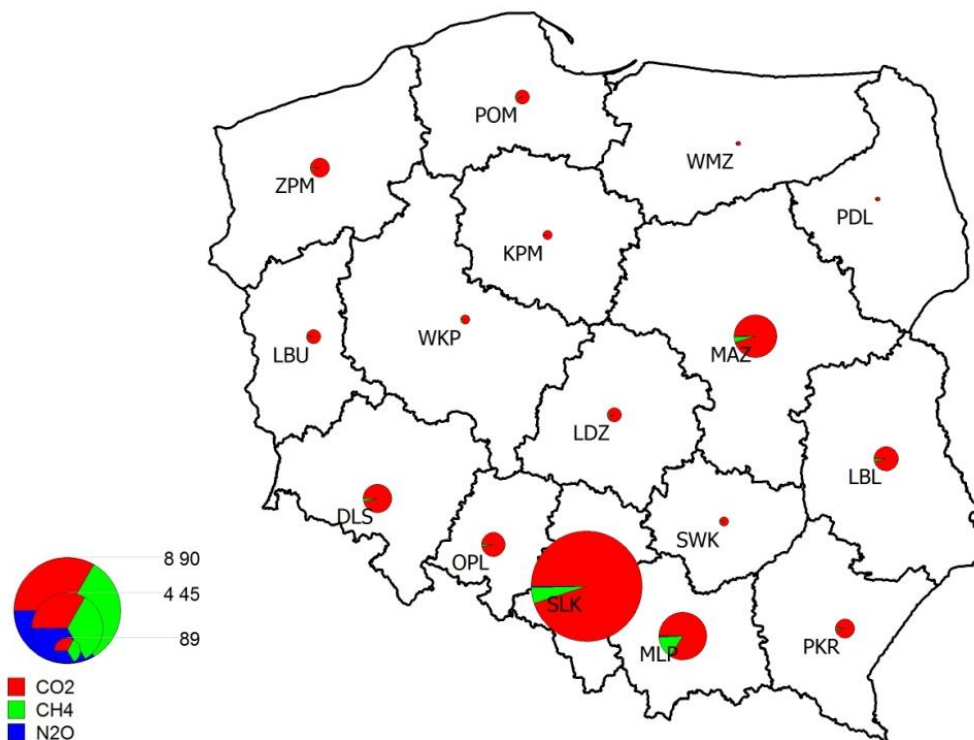


Рис. 3.3. Структура емісій двоокису вуглецю, метану і закису азоту (в CO_2 -еквіваленті) від спалювання викопного палива у металургійному секторі Польщі (Гг, 2010 р.)

Як бачимо з цього рисунку, найбільші емісії парникових газів мають місце у Сілезькому воєводстві, саме там розташовані 7 найбільших металургійних комбінатів Польщі. Це зумовлено тим, що металургійна промисловість потребує використання великої кількості кам'яного вугілля, а в Сілезькому воєводстві зосереджені майже усі шахти, які видобувають вугілля у цій країні.

Лідерами емісій металургійної промисловості України є Дніпропетровська та Запорізька області, де зосереджені найбільші металургійні заводи України.

Результати інвентаризації на рівні підприємств і промислових об'єктів було просумовано до рівня країни і представлено у табл. 3.1 для Польщі та в табл. 3.2 – для України. Це дає можливість порівняти отримані результати з даними національних інвентаризаційних звітів Польщі (табл. 3.3) та України (табл. 3.4.). Різниця в отриманих результатах становить менше 5 %. Ця різниця зумовлена тим, що в описаних у цій роботі дослідженнях використано специфічні коефіцієнти теплотворної здатності палива для деяких підприємств, отримані зі звітності цих підприємств, а у інвентаризаційних звітах ці коефіцієнти взято загальнодержавні.

Представлена вище математична модель процесів емісії вуглекислого газу, метану та закису азоту, які виникають внаслідок спалювання викопного палива на металургійних підприємствах Польщі дає змогу аналізувати величину та структуру емісій на рівні окремих джерел емісії чи ділянок території – елементарних об'єктів цифрової карти Польщі. Аналіз емісій на рівні елементарних об'єктів забезпечує максимальну адаптацію математичної моделі до реалізації просторової інвентаризації парникових газів, оскільки ці елементарні об'єкти містять дані про територіальну приналежність до відповідних адміністративних районів.

Представлений підхід та алгоритм аналізу процесів емісії парникових газів реалізовано у геоінформаційній системі, це дає можливість формувати бази геопросторових даних емісій та будувати відповідні цифрові карти, що

містять інформацію про джерела емісії, кількісні оцінки емісії та її структуру для окремих категорій джерел, видів палива та видів парникових газів.

Результати моделювання емісії парникових газів прямої дії у металургійному секторі з використанням реальних статистичних даних дають можливість проаналізувати структуру емісії та її територіальний розподіл. Результати просторової інвентаризації наочно ілюструють внесок кожної окремо взятої елементарної ділянки в загальні емісії парникових газів, дають змогу виявити території з найбільшими емісіями, а також досліджувати структуру емісій по категоріях джерел та по видах використаного палива.

Таблиця 3.1. Сумарні результати просторової інвентаризації емісій парникових газів у металургійному секторі Польщі на рівні країни у розрізі різних видів палива та парникових газів (Гг, 2010 р.)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Металургія	6 334,43	0,59	0,07
Рідке паливо	36,79	0,0014	0,0003
Тверде паливо	4 915,47	0,4522	0,0668
Газоподібне паливо	1 382,17	0,1149	0,0023

Таблиця 3.2. Сумарні результати просторової інвентаризації емісій парникових газів у металургійному секторі України у розрізі різних видів палива та парникових азів (Гг, 2010 р.)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Металургія	40 032	3,56	0,37
Рідке паливо	365	0,01	0,00
Тверде паливо	28 763	2,6	0,35
Газоподібне паливо	10 904	0,95	0,02

Таблиця 3.3. Результати інвентаризації парникових газів у металургійному секторі Польщі, наведені у національному інвентаризаційному звіті (Гг, 2010 р.)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Металургія	6 399,93	0,60	0,07

Таблиця 3.4. Результати інвентаризації парникових газів у металургійному секторі України, наведені у національному інвентаризаційному звіті (Гг, 2010 р.)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Металургія	39 700	3,55	0,37

3.6. Просторове моделювання емісії парникових газів від спалювання викопного палива у хімічній промисловості

Хімічна промисловість є однією з найбільш інноваційних, але в той же час вона відноситься до найбільш екологічно небезпечних секторів економіки. Для просторового аналізу емісії парникових газів від використання викопного палива у хімічній промисловості у цьому дослідженні взято до уваги такі категорії: органічні та неорганічні добрива, пластмаси та хімічні реактиви [68, 92]. Найбільшими джерелами емісії парникових газів у хімічній промисловості Польщі є: завод з виробництва добрив у місті Пулави (Puławy) в Люблінському воєводстві (Zakłady Azotowe Puławy), Anwil SA в Куявсько-Поморському воєводстві і ZAK SA в Опольському воєводстві. Anwil SA виробляє продукти на основі етилену, які використовуються як сировина для виробництва поліамідних ниток і пластикових елементів конструкцій (капролактаму), сульфат амонію, а також неорганічні продукти (сірчана кислота, хлор, гідроксид натрію). Завод нітратних добрив у м.Пулави і ZAK SA виробляють азотні добрива,

пластифікатори та інші хімічні речовини. Наприклад, річний обсяг виробництва заводу у м. Пулави становить близько 156 тис. тонн сульфату амонію.

Польська хімічна промисловість постійно розвивається, вона представлена всіма основними категоріями. Неорганічна хімічна промисловість базується на багатих родовищах кам'яної солі та сірки. Кам'яна сіль видобувається поблизу Іновроцлава (Inowrocław) і Клодави (Kłodawa), сірка – в Свентокшиському та Підкарпатському воєводствах. Центри виробництва азотних добрив – Пулави (Puławy), Влоцлавек (Włocławek), (Кендзежин-Козьле) Kędzierzyn-Koźle і Тарнув (Tarnów). Найбільші центри виробництва фосфатних добрив – Поліце (Police), Гданськ (Gdańsk) і Тарнобжег (Tarnobrzeg). У центральній частині країни виробляють різноманітні продукти органічної і неорганічної хімії (Варшава, Лодзь, Бидгощ, Іновроцлав).

Хімічна промисловість України представлена такими галузями як гірничо-хімічна (видобуток природної хімічної сировини); основна хімія: виробництво калійних добрив (Калуш, Стебник), виробництво азотних добрив (Сєверодонецьк, Горлівка, Черкаси, Рівне), виробництво фосфатних добрив (Вінниця, Одеса, Суми), виробництвом соди (Донбас, Крим), виробництвом сірчаної кислоти (Суми, Вінниця, Одеса, Горлівка); хімія органічного синтезу – виготовлення продукції на основі переробки нафти та газу та ін. (як приклад: виробництво лаків, пластмас, ліків, тощо).

Більшість підприємств хімічної промисловості України зосереджено у трьох районах: Придніпров'ї, Донбасі, Прикарпатті. Зокрема, основними виробниками хімічної продукції в Україні є холдингова група OSTCHEM, до складу якої входять Черкаський «Азот», Концерн «Стирол» (Горлівка), Сєверодонецький «Азот» та «Рівнеазот». Також великими виробниками хімічної продукції є Київхімволокно, Алчевський коксохімічний завод, Вінницяпобутхім, Дзержинський фенольний завод та інші.

У результаті дослідження доступних статистичних даних про використання викопного палива у хімічній промисловості та обсяги виробництва хімічної продукції сформовано базу геопросторових даних та цифрову карту джерел емісії парникових газів у хімічній промисловості. При цьому використано цифрову карту землекористування Corine [98], з якої за допомогою програмного модуля виділено всі промислові об'єкти. Із застосуванням плагіну Google Earth визначено розташування найбільших хімічних заводів, які додано до карти промислових об'єктів.

Знаходження розташування усіх заводів хімічної промисловості на території Польщі – це досить трудомістке завдання, а дані про спалювання палива на кожному конкретному заводі є недоступні. Тому зроблено низку припущень при створенні математичного опису емісійних процесів у хімічній промисловості.

На відміну від чорної металургії, підприємств хімічної промисловості є значно більше. Для Польщі проаналізовано 14 найбільших заводів, для яких відомі виробничі потужності, а також багато інших підприємств з невідомими потужностями чи обсягами виробництва. Деагрегацію даних про спалювання викопного палива до рівня аналізованих джерел емісії здійснено у кілька кроків таким чином. Спочатку дані про використання палива деагредовано до рівня воєводств із застосуванням коефіцієнтів економічного розвитку цієї промисловості у регіонах. Деагрегацію даних до рівня підрегіонів реалізовано відповідно до даних про валову додану вартість. Зроблено припущення, що 60 % палива використовується у промислових зонах, ідентифікованих на основі карти землекористування Corine (оскільки хімічні підприємства спричиняють забруднення навколишнього середовища, тому більшість з них знаходиться за межами населених кварталів), і 40 % всього палива використовується найбільшими заводами з відомими виробничими потужностями. На останньому кроці, для промислових зон (крім тих, де розташовані найбільші заводи) деагрегацію

даних про використане паливо здійснено пропорційно площі зон, а також в населених пунктах – пропорційно числу мешканців.

Математичну модель, яка описує емісії парникових газів у досліджуваній категорії, можна представити у вигляді:

$$E_{ch}^{g,f}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})] = D_{stat,ch}^f \cdot K_{ch}^f[\eta_{ind}(j_{w,r_w})] \cdot K_{em,ch}^{g,f}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})],$$

$$j_{w,r_w} = \overline{1, J_{w,r_w}}, \quad r_w = \overline{1, R_w}, \quad w = \overline{1, W}, \quad (3.5)$$

де $E_{ch}^{g,f}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]$ – річні емісії g -го парникового газу, які виникають внаслідок спалювання викопного палива f -го виду в елементарному об'єкті $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$, $g \in \{CO_2, N_2O, CH_4\}$; $D_{stat,ch}^f$ – загальнонаціональні статистичні дані про використане паливо f -го виду у хімічній промисловості; $K_{ch}^f[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]$ – дезагрегаційний коефіцієнт для використаного f -го виду палива для об'єкту $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$, який залежить від доступної інформації про споживання палива; $K_{em,ch}^{g,f}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]$ – коефіцієнт емісії g -го парникового газу від спалювання f -го виду палива на потреби хімічної промисловості на території об'єкту $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$.

Дані щодо обсягу використання викопного палива у хімічній промисловості у 2010 році взято зі звітів Центрального статистичного управління Польщі [67], інформацію про виробництво продукції хімічної промисловості найбільших заводів у Польщі – з їх щорічних звітів. Коефіцієнти емісії парникових газів використано з національних інвентаризаційних звітів [60].

На основі наведеного вище математичного опису обчислено і сформовано просторові кадастри емісії парникових газів, які виникають від спалювання викопного палива у хімічній промисловості Польщі. Для зручного аналізу отримані результати візуалізовано за допомогою відповідних тематичних карт, приклад якої показано на рис. 3.4.

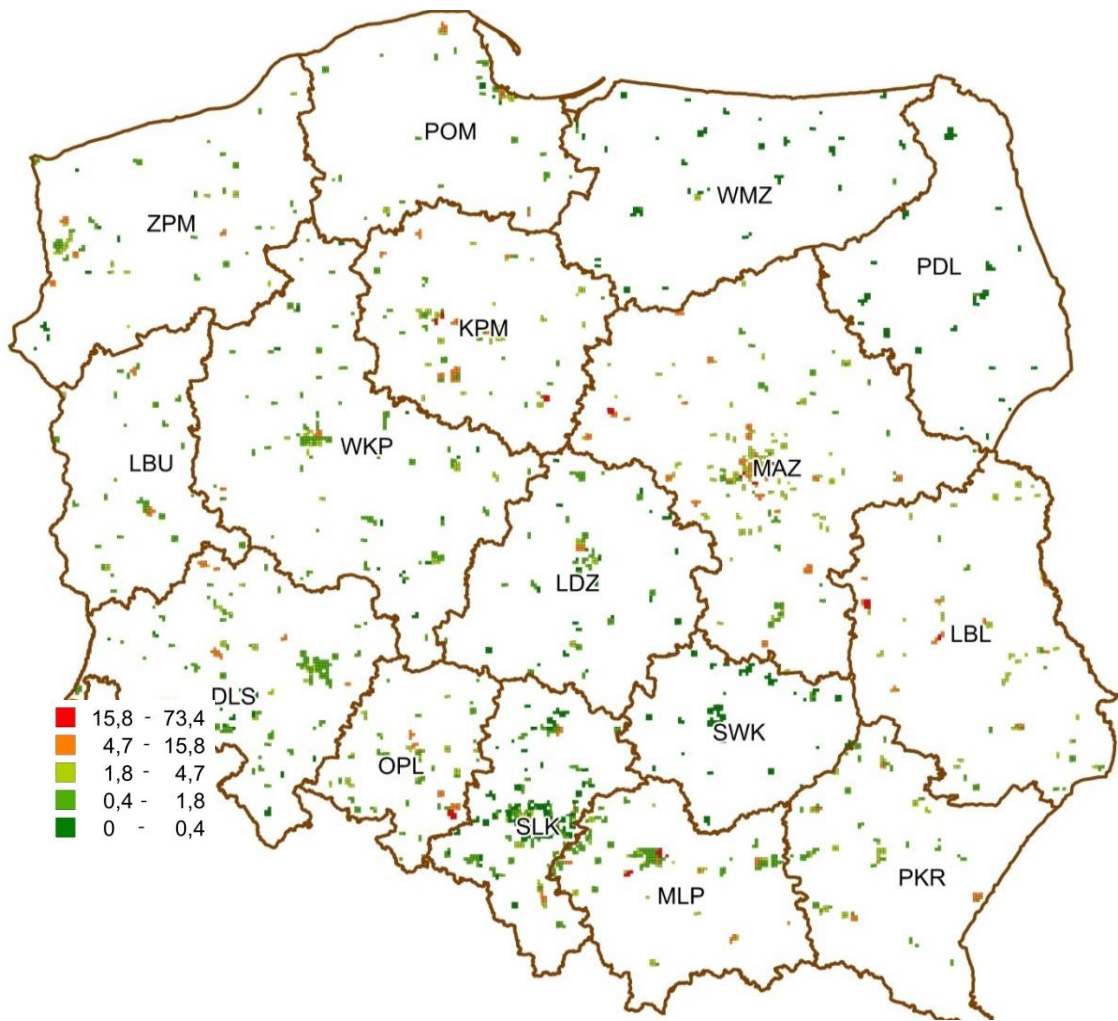


Рис. 3.4. Питомі сумарні емісії вуглекислого газу, метану і закису азоту, які виникають внаслідок спалювання викопного палива у хімічній промисловості Польщі (тис.т/км², CO₂-еквівалент, 2010 р.)

Отримані результати показали, що найбільшими джерелами емісії парникових газів у хімічній промисловості Польщі є: завод нітратних добрив у м. Пулави Люблінського воєводства (Zakłady azotowe Puławy), Anwil S.A у Куявсько-Поморському воєводстві та ZAK S.A у Опольському воєводстві. На основі цих даних здійснено аналіз структури емісії парникових газів у хімічній промисловості Польщі.

У табл. 3.5 наведено сумарні емісії вуглекислого газу, метану та закису азоту, які виникають внаслідок спалювання палива у хімічній промисловості України. Як бачимо, найбільші емісії спричинені спалюванням природного газу у цьому секторі.

Таблиця 3.5. Сумарні результати просторової інвентаризації емісій парникових газів від хімічної промисловості України на рівні країни у розрізі різних видів палива та парникових газів (ГГ, 2010 р.)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Хімічна промисловість	6690	0,46	0,01
Рідке паливо	23,42	0,01	0,00
Тверде паливо	45,21	0,00	0,00
Газоподібне паливо	6 612	0,45	0,01

3.7. Моделювання емісії парникових газів від інших категорій джерел у промисловості

Викопне паливо для промислових потреб використовують також при реалізації інших технологічних процесів, відмінних від тих, які описано вище. При цьому також мають місце емісії парникових газів. Тому при інвентаризації парникових газів такі джерела емісії об'єднано в категорію „інші джерела”.

Нереально аналізувати кожне підприємство окремо в цій категорії виробничої діяльності у масштабах країни. Тому дані про паливо, використане у цій категорії, дезагредовано до рівня воєводств та підрегіонів відповідно до валової доданої вартості. Зроблено припущення, що 60 % палива використано у промислових зонах. Такі дані було дезагредовано пропорційно площі промислових зон. Інше паливо було дезагредовано до рівня міст з більше ніж 5000 мешканців пропорційно до населення. Відповідно, коефіцієнт дезагрегації для промислових зон можна представити формулою

$$K_{other} [\eta_{ind}(i_w, r_w)] = I_w \cdot \frac{G_{r_w}}{\sum_{r_w} G_{r_w}} \cdot \frac{S_i}{\sum_i S_i}, \quad (3.6)$$

де I_w – показник розвитку інших галузей промисловості у воєводстві; G_{r_w} – валова додана вартість під регіону; P_i – число мешканців у відповідному населеному пункті.

3.8. Результати просторового моделювання емісії парникових газів у промисловості

За допомогою описаних вище математичних моделей емісійних процесів і з використанням у ролі індикаторів (проксі даних) ряду вхідних даних з Центрального статистичного бюро Польщі (GUS) [67], польського банку локальних даних (BDL) та Національного звіту Польщі про інвентаризацію парникових газів (NIR) [60] здійснено обчислювальні експерименти і обчислено емісії парникових газів від спалювання викопного палива в металургії, хімічній промисловості, харчовій промисловості та інших категоріях промисловості Польщі на рівні емісійних джерел площинного типу (структуру видів палива, що використовується у промисловості Польщі, представлено на рис. 3.5,а, та в Україні – рис. 3.5,б).

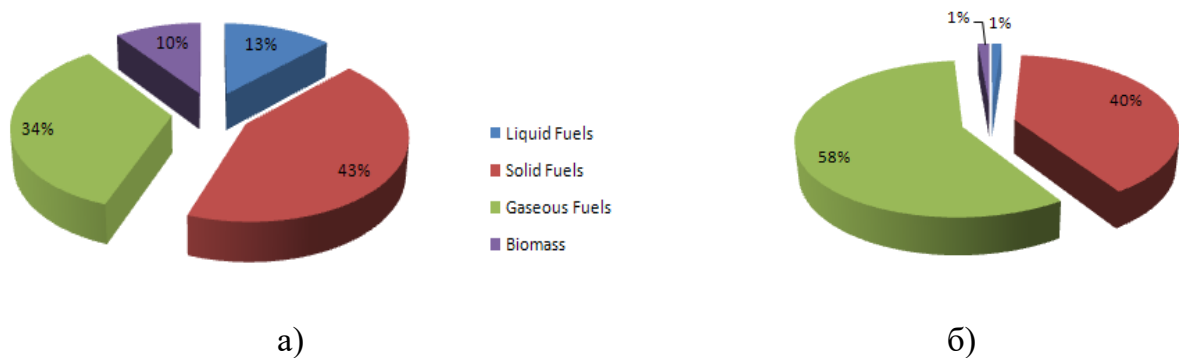


Рис. 3.5. Структура палива, що використовується у промисловості Польщі (а) та України (б) у 2010 році

Результати аналізу було також агреговано до рівня воєводств. Структуру сумарної емісії парникових газів у промисловому секторі по підгалузях представлено в CO_2 -еквіваленті на рис. 3.6. Цей рисунок демонструє нерівномірний розподіл емісій. Зокрема, Мазовецьке та Сілезьке воєводства виступають лідерами, водночас відносно невеликі емісії мають місце в Любуському, Підляському, Свентокшиському та Вармінсько-Мазурському воєводствах.

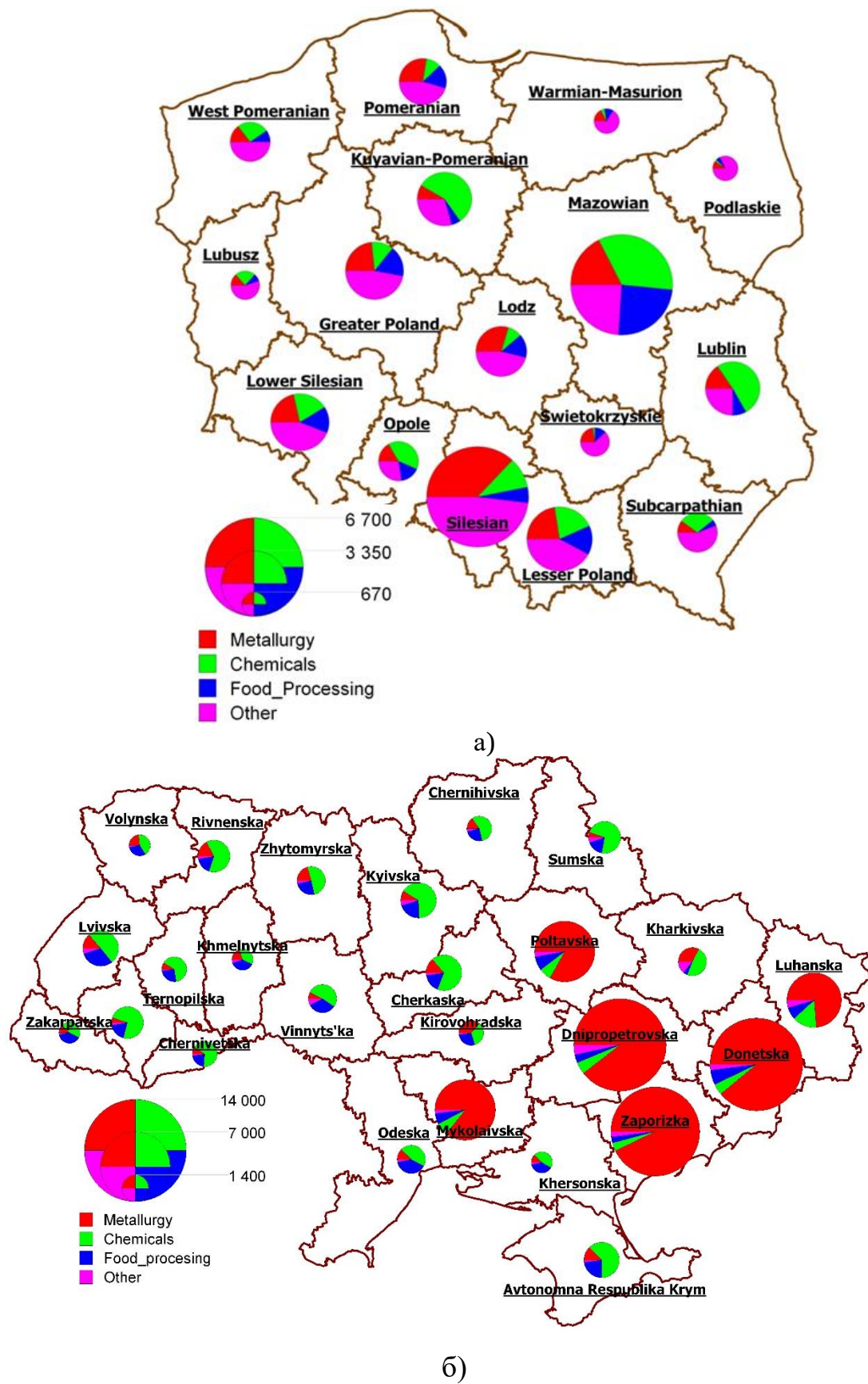


Рис. 3.6. Сумарні емісії парникових газів у промисловому секторі Польщі (а) та України (б) по підгалузях (CO₂-еквівалент, Gg, 2010)

Якщо проаналізувати емісії у промисловому секторі окремих парникових газів (рис. 3.7), то видно, що найбільші емісії спричинено двоокисом вуглецю. Обсяги емісії метану та закису азоту є значно меншими, навіть якщо перерахувати їх в CO₂-еквівалент з використанням потенціалів глобального потепління цих газів. Просторовий розподіл емісії представлено на рис. 3.8, на якому показано сумарні питомі емісії парникових газів у промисловому секторі Польщі. Найбільш промислово розвинуте воєводство – Сілезьке, спричиняє найбільші емісії. Тому на цьому рисунку наведено також детальну візуалізацію питомої емісії парникових газів у промисловому секторі цього воєводства. Емісії тут продемонстровано на сітці за допомогою карти-призми. Результати просторового аналізу, подані у такій формі, є корисними владним структурам, оскільки вони показують емісії саме там, де вони відбуваються.

3.9. Висновки до розділу 3

У цьому розділі обґрунтовано підхід до математичного моделювання процесів емісії парникових газів, спричинених використанням викопного палива при виробництві промислових речовин, який дає можливість відносити емісії до відповідних ділянок території (промислових зон, заводів тощо). Тому при такому підході географічна прив'язка здійснюється як на рівні вхідних даних, так і на рівні математичних моделей і результатів моделювання.

На основі аналізу специфіки основних джерел емісії парникових газів у промисловому секторі Польщі обґрунтовано два підходи до просторового моделювання емісійних процесів у промисловості: окремо для точкових та площинних джерел емісії. Для таких джерел розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів, в основі яких лежать принципи міжнародних методик інвентаризації, проте на відміну від останніх вони дають можливість досліджувати емісійні процеси від великої кількості джерел, технологічні процеси виробництва на яких значно відрізняються між

собою та характеризуються специфічними коефіцієнтами емісії. Ці моделі базуються також на принципах дезагрегації відомих статистичних даних про результати господарської діяльності на національному чи регіональному рівні до рівня окремо взятих підприємств, як точкових джерел емісії, чи певних територій, як площинних джерел емісії.

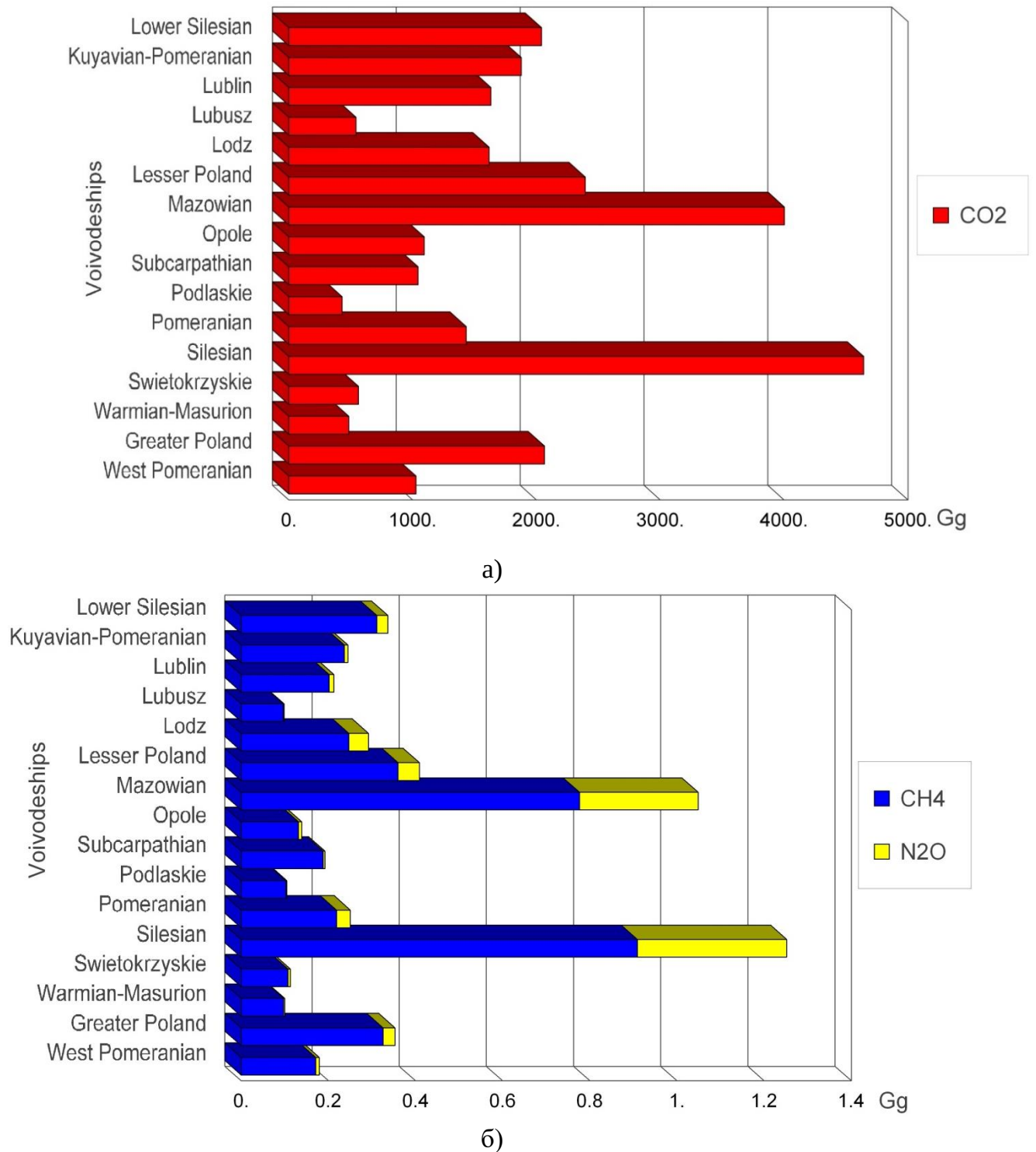


Рис. 3.7. Емісії CO₂ (а), CH₄ та N₂O (б) на рівні воєводств Польщі (CO₂-еквівалент, Gg, 2010)

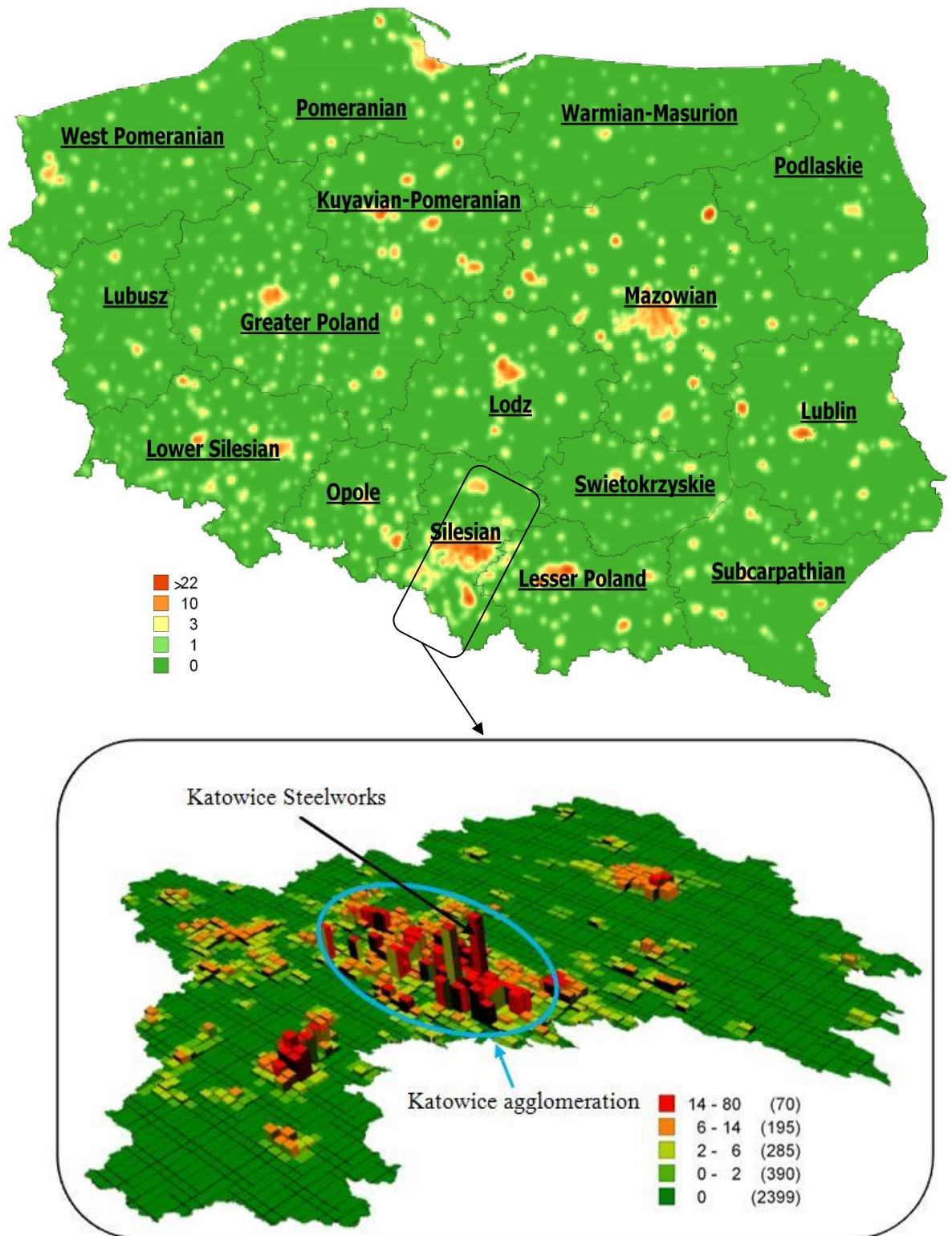


Рис. 3.8. Сумарні питомі емісії парникових газів у промисловому секторі Польщі, а також детальна візуалізація за допомогою карти-призми питомих емісій парникових газів у промисловості Сілезького воєводства на рівні промислових зон (CO_2 -еквівалент, $\text{Гг}/\text{км}^2$, сітка $2 \times 2 \text{ км}$, 2010)

Розроблені програмні засоби дали можливість сформувати бази геопросторових даних з вхідними параметрами, необхідними для просторової інвентаризації парникових газів (обсяги промислового виробництва підприємством та відповідні коефіцієнти емісії парникових газів) окремо для кожної категорії промисловості. У результаті здійснених обчислювальних експериментів отримано оцінки емісій парникових газів для кожного точкового та площинного джерела емісії у промисловості.

Засобами геоінформаційної системи отримані значення емісій від усіх джерел перенесено на цифрову карту елементарних ділянок заданого розміру. Здійснено просторовий аналіз питомих емісій парникових газів (віднесених до одиниці площі відповідної елементарної ділянки). Побудовано шари цифрових карт з емісіями для кожної категорії та на їх основі отримано сумарний просторовий кадастр емісій від промисловості загалом по воєводствах.

Перевірку адекватності розроблених математичних моделей та верифікацію отриманих результатів здійснено шляхом порівняння сумарних результатів просторового моделювання емісійних процесів, агрегованих до рівня країни, з результатами національної інвентаризації парникових газів, наведеними у національному звіті з інвентаризації парникових газів. Результати просторового моделювання порівняно добре узгоджуються з офіційними даними інвентаризації для країни загалом.

Розділ 4. Геоінформаційна технологія просторового моделювання процесів емісії парникових газів та аналізу невизначеності результатів. Дослідження часового покращення знань про емісійні процеси.

У розділі описано розроблену геоінформаційну технологію для моделювання та просторового аналізу емісій парникових газів, які виникають при видобуванні та переробці різних видів палива, а також під час спалювання палива у промисловості Польщі та України. Введено поняття „ретроспективного аналізу” інвентаризаційних звітів та обґрунтовано актуальність такого типу аналізу. Оцінено точність проведеної інвентаризації на основі переглядів кадастрів емісії парникових газів з часом. Здійснено аналіз невизначеності отриманих результатів моделювання емісій парникових газів у промисловому секторі, а також у видобувній промисловості Польщі та України. Описано поняття невизначеностей оцінок емісій парникових газів та пояснено причину виникнення невизначеності. Встановлено діапазони невизначеностей для вхідних параметрів розроблених математичних моделей та проаналізовано невизначеності при проведенні просторової інвентаризації парникових газів у досліджуваних категоріях, що супроводжуються найбільшими емісіями та мають найбільший вплив на загальну невизначеність. На основі отриманих результатів запропоновано ефективні шляхи покращення оцінок та зменшення невизначеності результатів інвентаризації парникових газів.

4.1. Геоінформаційна технологія просторового моделювання емісії парникових газів при оперуванні з паливом у видобувній та переробній промисловості

Представленні в розд. 2 та розд. 3 математичні описи емісійних процесів у видобувній та переробній промисловості використано для розроблення

геоінформаційної технології просторового моделювання емісій парникових газів у досліджуваних секторах.

Геоінформаційна система (ГІС) – це інтегрована сукупність апаратних, програмних та інформаційних засобів, що забезпечують введення, збереження, обробку, маніпулювання, аналіз і відображення (представлення) просторово-координованих даних [47]. Геоінформаційні технології представляють технологічну основу створення геоінформаційних систем.

Для реалізації розроблених підходів та алгоритмів просторового моделювання емісії парникових газів, автоматизації побудови кадастрів емісії та їхньої візуалізації за допомогою цифрових карт розроблено геоінформаційну систему, логічну структуру якої представлено на рис. 4.1.

Основним завданням розробленої геоінформаційної технології є оцінювання емісії парникових газів, які виникають під час видобування та переробки різних видів палива, а також внаслідок використання палива у енергетичних цілях у промисловості з врахуванням специфіки та особливостей конкретних точкових чи площинних джерел емісії. Крім того, така технологія дає можливість представити отримані результати інвентаризації за допомогою карт, що є зручнішим для аналізу і порівняння оцінок емісії парникових газів.

Логічна структура розробленого геоінформаційного підходу включає такі основні етапи:

- збір вхідних даних;
- оцінювання емісії парникових газів за допомогою розроблених математичних моделей;
- аналіз невизначеностей емісій парникових газів;
- візуалізація отриманих результатів.

Геоінформаційна технологія складається з основних трьох програмних модулів розроблених у середовищі MapBasic, які програмно реалізовано з використанням географічної інформаційної системи MapInfo. Основу геоінформаційної технології складають підпрограми: Input, Disaggregation та Estimation_GHG.

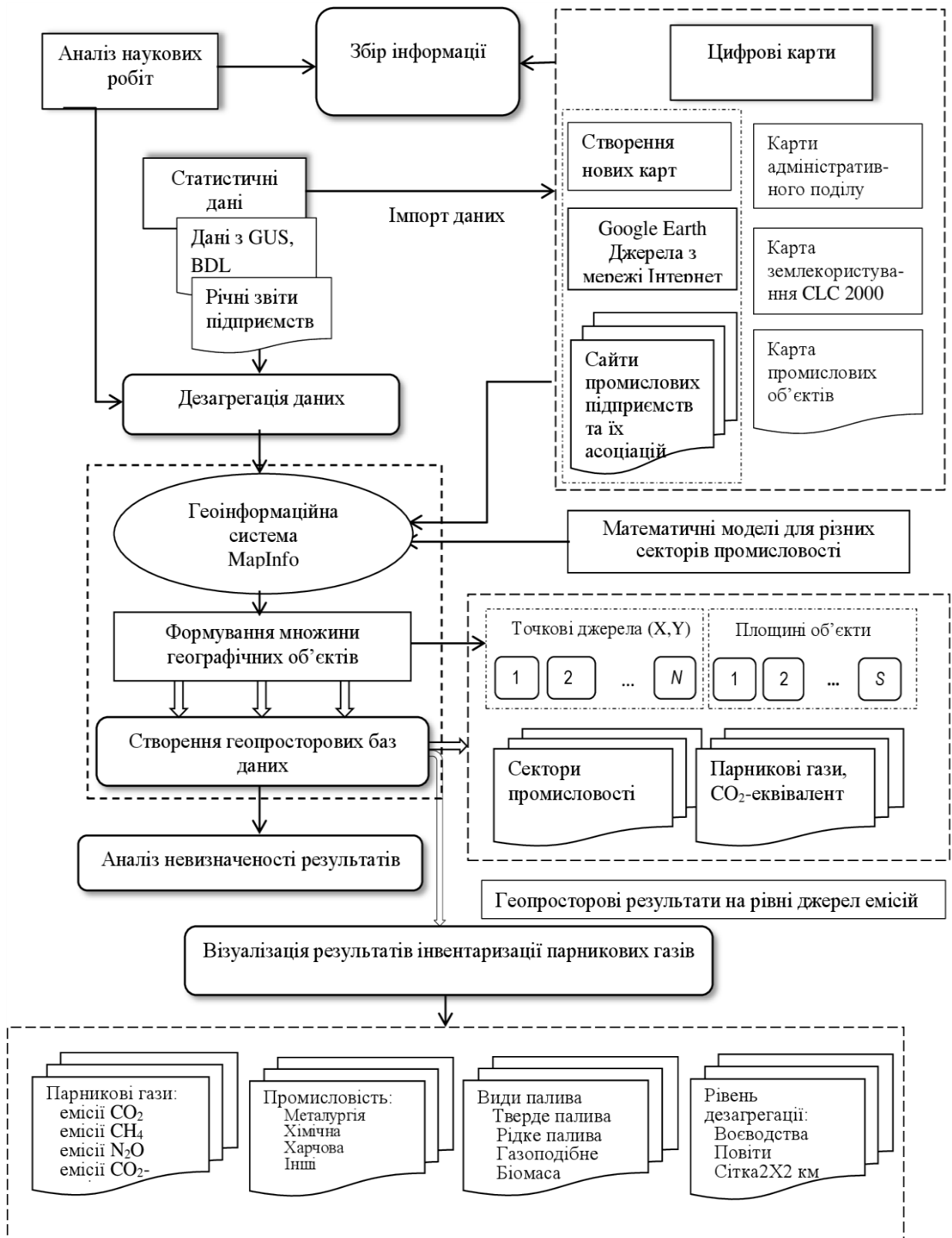


Рис. 4.1. Логічна структура геоінформаційної технології просторового моделювання емісії парникових газів у промисловості

На першому етапі реалізації розробленого підходу для оцінювання емісії парникових газів зібрано необхідні вхідні дані (статистичні дані про спалювання палива на рівні країни; значення валової доданої вартості на рівні підрегіонів; коефіцієнти промислового розвитку воєводств; необхідні цифрові карти: карти адміністративного поділу та карти землекористування). Сформовано Excel файли з доступними вхідними даними, які автоматично імпортовано у формат таблиць геоінформаційної системи MapInfo з використанням географічної прив'язки до цифрових карт адміністративних регіонів.

Оскільки в роботі представлено просторову інвентаризацію, то особливу увагу приділено обробці та створенню цифрових карт, необхідних для оцінювання емісій парникових газів. Оскільки у вільному доступі не було цифрових карт переробної та видобувної промисловостей України та Польщі, було модифіковано карти адміністративного поділу під потреби поставленої задачі. Використовуючи безкоштовний плагін Google Earth і з його допомогою визначено місцезнаходження родовищ палива та найбільших промислових підприємств. Збережено знайдені географічні координати у вхідному файлі, який у подальшому використано для створення засобами програмного забезпечення відповідних цифрових карт. Крім того, з карти землекористування виділено промислові об'єкти для подальшої роботи з ними.

На другому етапі дані про використане паливо у досліджуваних секторах дезагреговано з рівня країни до рівня підприємств чи промислових зон (у залежності від доступної інформації) з врахуванням усіх припущень, які описано у розд. 2 та розд. 3. На цьому етапі використано сформований вхідний файл (створений на першому етапі) з різними індикаторами дезагрегації: коефіцієнт промислового розвитку воєводств/областей; значення валової доданої вартості на рівні під регіонів/районів ; виробничі чи видобувні потужності підприємств, площа досліджуваних об'єктів та населення міст. Сформовано множину географічних об'єктів, для яких оцінено емісії вуглекислого газу, метану та закису азоту. Коефіцієнти емісії

парникових газів та інші допоміжні параметри для різних категорій джерел емісії вказано у національних інвентаризаційних звітах про емісії парникових газів і методиках інвентаризації МГЕЗК [61, 62, 163, 164]. Таким чином було сформовано геопросторовий кадастр емісії парникових газів на рівні підприємств чи промислових зон.

Невід’ємною частиною просторового моделювання процесів емісії парникових газів є оцінювання невизначеності результатів інвентаризації. Для початку було визначено функції розподілу густини ймовірності усіх випадкових величин, які входять у математичні моделі для оцінювання емісії парникових газів у досліджуваних секторах. На третьому етапі реалізації геоінформаційної технології за допомогою методу Монте-Карло, з врахуванням інформації про невизначеності вхідних параметрів, оцінено рівень невизначеності емісії парникових газів на рівні воєводств, окремих підприємств та в країні загалом.

На останньому етапі, використовуючи розроблений інструментарій геоінформаційної системи отримані результати просторової інвентаризації візуалізовано за допомогою тематичних карт з розбивкою по різних парникових газах (CO_2 , N_2O , CH_4), по різних рівнях дезагрегації (від рівня воєводств до рівня підприємств чи промислових зон), по різних типах джерел та різних підсекторах. База геопросторових результатів представлена у вигляді таблиць з географічною прив’язкою, яка легко конвертується у потрібний формат та готова для використання у інших наукових цілях.

Кожен описаний етап геоінформаційного підходу виконано за допомогою програмних модулів, які дали можливість автоматично реалізувати описані у розд. 2 та розд. 3 алгоритми просторової інвентаризації парникових газів у досліджуваних секторах. Розроблену геоінформаційну технологію можна використовувати для здійснення просторової інвентаризації парникових газів у видобувній та переробній промисловостях для різних країн, за умови адаптації вхідних та програмних файлів відповідно до доступної інформації.

4.2. Дослідження часового покращення знань про емісійні процеси

Кадастри емісії парникових газів містять невизначеності, спричинені недостатністю знань про емісійні процеси. Невизначеність має суттєвий дестабілізуючий вплив при практичній реалізації міжнародних угод, а також при встановленні цілей скорочення емісії парникових газів у короткостроковій та довгостроковій перспективі. Невизначеність не є постійною, вона змінюється з часом у результаті нашого «навчання» (покращення наших знань про емісійні процеси), а також унаслідок структурних змін в емісіях (наприклад, зміни у структурі споживання викопного палива, запровадження низьковуглецевих технологій, тощо). Багато країн та міжнародних організацій надають щорічні уточнення кадастрів емісії парникових газів та їх невизначеності. Тому на основі такого ретроспективного навчання існує можливість покращити наші знання про реальні емісійні процеси, щоб ефективніше враховувати невизначеності в різноманітних прогностичних сценаріях, і таким чином отримати засоби підтримки прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Проблема якісного оцінювання невизначеностей результатів інвентаризації парникових газів є особливо важливою з точки зору впровадження механізмів Кіотського протоколу – проектів спільного впровадження, торгівлі квотами на емісії тощо. Річ у тім, що для участі у зазначених проектах не достатньо лише здійснити оцінювання річних емісій парникових газів, важливо також оцінити невизначеність одержаних результатів. Адже в умовах високої невизначеності оцінок емісій неможливо науково обґрунтувати те, що деяка країна виконала взяті на себе зобов'язання по зниженню викидів парникових газів, навіть якщо рівень її оцінених емісій знизився до встановленого протоколом рівня і, звичайно ж, за таких умов неможливо торгувати квотами на викиди. Реальне зниження емісій можна виявити лише за умови, що із врахуванням невизначеності оцінка емісій не перевищує рівня емісій, встановленого Кіотським протоколом на даний

період часу. На рис. 4.2.а та рис. 4.2.б продемонстровано реальну ситуацію на ринку квот: не завжди «відзвітовані» емісії парникових газів разом з невизначеністю результату означають дотримання Кіотського протоколу (якщо країна «знизила емісії» за їх оцінкою, але невизначеність результатів є велика, досить ймовірно що реальне значення емісій є значно вищим, ніж відзвітоване).

Виходячи з вище вказаного, вкрай важливим є завдання розроблення універсального підходу, математичного апарату та інформаційних технологій для ретроспективного аналізу кадастрів емісії парникових газів.

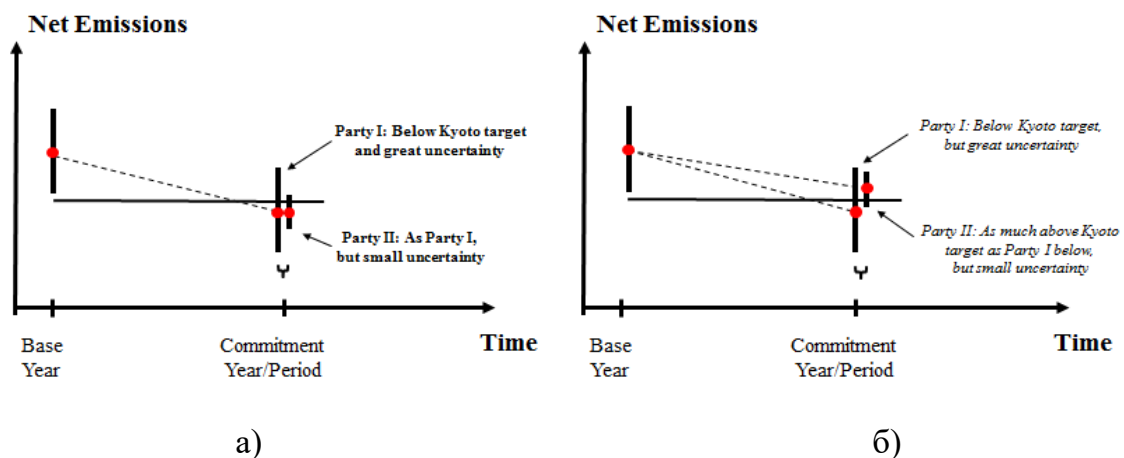


Рис. 4.2. Вплив невизначеності результатів інвентаризації парникових газів для дотримання умов Кіотського протоколу: а) країна-учасник відзвітувала зниження емісії, але результати оцінки мають (1) значну невизначеність та (2) малу невизначеність; б) країна-учасник відзвітувала недостатнє зниження емісій, але результати оцінювання парникових газів мають (1) значну невизначеність та (2) малу невизначеність

4.2.1. Збір та аналіз доступної інформації про кадастри емісії парникових газів

Згідно з міжнародними домовленостями з метою боротьби з глобальними змінами клімату на планеті, кожна країна з року в рік здійснює інвентаризацію парникових газів, а також переоцінює значення емісій парникових газів для попередніх років. Основними причинами різниці між переоцінками емісій є:

- покращення знань про емісійні процеси (нові знання про емісійні коефіцієнти, теплотворне значення тощо);
- удосконалення методології збору статистичної інформації, надходження зі запізненням детальних статистичних звітів;
- адаптація національної класифікації економічної активності відносно методик МГЕЗК;
- виявлення і виправлення випадкових помилок у попередніх обчисленнях;
- зміна експертів, які здійснюють інвентаризацію та ін.

Кожна переоцінка емісій парникових газів наближає нас до «точного» або іншими словами «істинного» значення. На жаль, таке значення виміряти в межах цілої країни неможливо. Тому відзвітовані емісії ми можемо представити за допомогою формули:

$$E = E_{true} + l,$$

де E – відзвітоване значення емісії, які представлено в інвентаризаційних звітах, E_{true} – «істинне» значення емісії, l – уточнення оцінки емісії парникових газів.

На цьому етапі роботи, основним завдання було оцінити l , іншими словами визначити, як змінились наші знання про емісійні процеси впродовж певного часового періоду.

На сайті Організації Об'єднаних Націй, зокрема Рамкової конвенції про зміну клімату (UNFCCC), кожен бажаючий може завантажити річний інвентаризаційний звіт «Національний кадастр антропогенних емісій парникових газів» з детальним описом обчислень [152]. Кожна країна, яка підписала Кіотський протокол зобов'язана надавати відкритий доступ до таких звітів. Більшість країн, у тому числі і Польща, подали інвентаризаційні звіти починаючи з 2001 року [159]. Україна свій перший інвентаризаційний звіт оприлюднила у 2002 році, а розгорнутий опис обчислень – у 2003р. На рис. 4.3 представлено деякі оцінки емісії вуглекислого газу для України та Польщі.

Year	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
2001	380697	366959	371591	363133	371588	348172	372530	361626	337448	329697	314812	317844											
2002	380697	366959	371591	363133	371588	348172	372530	361626	337448	329697	314812	317844	308277										
2003	380697	366959	371591	363133	371588	348172	372530	361626	337448	329697	314812	317844	308277	319082									
2004	377161	370963	364212	347067	362079	363737	382976	369838	343027	333268	320090	320900	307805	320271	319470								
2005	396861	389359	381945	365280	376280	377448	398763	385954	357125	345008	333253	330819	317546	330900	325382	326511							
2006	368678	368173	359597	366036	361535	366136	374857	368566	340612	328877	320365	316822	305578	316691	316873	317669	330524						
2007	368729	368209	359633	366079	361583	366186	375228	369176	341255	329446	320588	317217	305693	317003	317297	318216	329599	328172					
2008	368409	368030	359517	365944	361393	365910	374904	368882	340159	329374	320727	317344	305731	317028	317298	319286	330916	328511	325381				
2009	369238	368573	360198	366615	362074	366645	375599	369494	340646	329919	320926	317512	305724	316831	317097	318164	331023	328805	325058	313722			
2010	373475	371733	361984	362349	358074	359337	373243	364189	336761	327383	316114	312712	300927	312969	316630	317893	331446	332313	326620	312248	332067		
2011	373192	371399	362049	362352	358163	359393	372836	363739	336618	327374	317014	313550	302042	314111	317927	319048	332617	333672	327953	312745	333505	331267	
2012	374812	372752	363233	363798	359433	360976	374431	365460	338296	328871	318749	314938	303506	315455	319292	318387	331306	331557	324146	310279	329622	327723	320862

a)

Year	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
2003	672 450	670 683	585 797	513 091	394 721	379 096	352 017	319 320	264 396	257 274	253 297	252 655	252 588	267 629									
2004	595 318	511 803	428 287	396 067	363 848	331 629	296 783	274 484	236 758	234 052	216 484	217 975	219 605	233 798	228 642								
2005	592 613	511 803	428 287	396 067	363 848	331 629	296 783	274 484	236 221	233 618	216 061	217 818	219 466	233 614	228 432	234 492							
2006	593 126	511 803	428 287	396 067	363 848	331 629	296 783	274 484	241 014	232 490	217 157	219 036	222 280	235 517	231 757	240 661	250 980						
2007	593 126	511 803	428 287	396 067	363 848	331 629	296 783	274 484	241 014	232 490	217 157	219 036	222 280	235 517	231 757	240 661	251 944	246 992					
2008	593 126	511 803	428 287	396 067	363 848	331 629	296 783	274 484	241 014	232 490	217 157	219 036	222 280	235 517	231 757	240 661	250 143	245 490	239 398				
2009	600 323	522 746	470 694	411 528	360 790	321 301	286 571	267 440	249 240	239 743	226 316	229 719	233 427	245 090	243 412	249 545	258 637	252 502	245 299	211 871			
2010	643 745	555 735	479 890	416 301	364 917	326 473	292 681	274 193	272 637	265 018	253 810	256 733	259 856	271 547	270 326	271 500	284 405	282 174	272 307	235 213	246 615		
2011	643 745	555 735	479 890	416 301	364 917	326 473	292 681	274 193	272 637	265 018	253 810	256 733	259 856	271 547	270 326	271 500	284 405	282 174	272 307	235 213	246 615	260 887	
2012	648 774	559 980	483 445	419 755	367 745	329 276	294 810	276 526	274 857	266 797	255 648	258 688	261 985	273 763	273 024	273 727	286 555	284 484	274 502	237 152	248 621	262 666	263 206

б)

Рис. 4.3. Сумарні емісії вуглекислого газу від усіх секторів економічної активності без врахування сектору «Землекористування, зміни у землекористуванні та лісовому господарстві» у а) Польщі та б) Україні (Гг, по осі Х – роки, для яких здійснено оцінку емісій, по осі Y – роки, в які здійснили переоцінку

Year	1990 Gg CO ₂	1991 Gg CO ₂	1992 Gg CO ₂	1993 Gg CO ₂	1994 Gg CO ₂	1995 Gg CO ₂	1996 Gg CO ₂	1997 Gg CO ₂	1998 Gg CO ₂	1999 Gg CO ₂	2000 Gg CO ₂	2001 Gg CO ₂	2002 Gg CO ₂	2003 Gg CO ₂	2004 Gg CO ₂	2005 Gg CO ₂	2006 Gg CO ₂	2007 Gg CO ₂	2008 Gg CO ₂	2009 Gg CO ₂	2010 Gg CO ₂	2011 Gg CO ₂	2012 Gg CO ₂	2013 Gg CO ₂
2013	62216,9	65803,1	60311,5	60700,0	61099,5	64147,4	67591,0	67396,1	66976,0	65580,3	66229,1	70266,4	72122,2	78037,2	78417,8	79596,3	76968,5	74270,6	4040,0	67849,6	72690,8	70581,6	67843,3	67768,0
2012	62017,7	65602,1	60100,2	60482,2	60877,1	63924,0	67365,3	67162,5	66744,0	65343,2	65992,9	70029,3	71747,6	77801,0	78229,2	79392,9	76633,1	73980,1	3804,5	67567,8	72366,1	70353,7	67733,5	
2011	62059,6	65643,8	60138,3	60516,1	60899,8	63944,0	67383,7	67180,0	66763,0	65344,9	65969,7	69999,4	71714,0	77758,2	78215,9	79723,7	77032,5	74274,6	3921,7	67396,9	72590,8	70455,5		
2010	62059,6	65643,8	60138,3	60516,1	60899,8	63944,0	67383,7	67180,0	66763,0	65344,9	65972,2	70004,9	71720,1	77758,2	78215,9	79723,9	77032,5	74362,7	3921,5	67225,7	72290,5			
2009	62068,1	65656,0	60211,6	60527,9	60914,9	63951,2	67393,6	67187,8	66771,9	65349,4	65984,3	70009,4	71890,4	77773,4	77687,8	79719,3	77084,2	74377,3	3929,2	67535,8				
2008	62068,1	65656,0	60211,6	60527,9	60914,9	63951,2	67393,6	67187,8	66763,0	65352,6	65799,0	70191,0	72040,5	77840,3	77723,1	79773,0	76687,1	73972,3	3629,6					
2007	62081,5	65671,1	60226,2	60542,8	60929,6	63965,3	67407,1	67200,3	66774,9	65554,0	65951,3	70056,0	72014,9	78055,0	77590,8	79008,8	77586,1	74176,5						
2006	62084,9	65674,4	60228,8	60544,1	60930,4	63965,2	67406,8	67198,5	66773,2	65540,5	65928,4	70200,0	72115,1	78271,4	77529,0	79515,4	77282,8							
2005	61930,3	65483,3	60041,6	60411,3	60763,3	63660,9	67327,2	67148,0	66811,9	65336,6	65960,1	70044,6	71709,4	77972,5	77139,9	79650,4								
2004	61933,4	65485,8	60043,9	60415,3	60766,4	63664,4	67330,7	67155,4	66837,3	65444,1	66186,0	70179,0	71943,2	77561,8	77103,4									
2003	61262,6	64752,1	59348,1	59899,6	60203,2	63115,5	66562,5	66527,3	66217,8	64614,1	65454,1	69279,6	70994,5	76213,3										
2002	60899,2	64535,4	59080,1	59309,7	59703,6	62474,4	66147,0	65713,4	65808,1	64336,2	65064,1	69037,1	69671,3											
2001	60112,5	63595,0	58454,5	59307,0	59743,5	62626,8	66628,6	66208,3	66333,4	65020,4	64927,8	69120,0												
2000	62297,0	66174,0	60349,0	60717,0	61995,0	64015,0	65386,0	67012,0	65464,0	66025,0	66102,0													
1999	62132,1	66023,5	60153,9	59901,1	61756,1	63753,9	64889,4	66828,8	65489,5	65777,9														
1998	62130,0	66020,0	60150,0	59900,0	61750,0	63690,0	65910,0	66790,0	66600,0															
1997	62040,0	66440,0	60530,0	59530,0	61070,0	62430,0	64030,0	66060,0																
1996	61880,0	66490,0	60290,0	59310,0	59470,0	62020,0	64880,0																	
1995																								
1994	55000,0	64000,0	59000,0	59000,0	59000,0																			
1993																								
1992																								
1991	55000,0	65000,0																						
1990	54000,0																							

Рис. 4.4 Сумарні емісії вуглекислого газу від усіх секторів економічної активності без врахування сектору «Землекористування, зміни у землекористуванні та лісовому господарстві» у Австрії¹(Гг, по осі Х – роки, для яких здійснено оцінку емісій, по осі Y – роки, в які здійснили переоцінку).

¹ Дані, відзначенні різним кольорами, отримані з різних джерел. Жовтий колір – відсутня інформація.

Як бачимо з рисунку, ми оперуємо з невеликим часовим періодом. Логічно припустити, що країни здійснювали інвентаризацію і до 2001 року, оскільки перші методики МГЕЗК були опубліковані ще у 1996 році, але такої інформації Польща та Україна у відкритому доступі не надають.

Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) представляє дані про емісії вуглекислого газу в різних країнах починаючи ще з 19 століття (початок оцінок емісій вуглекислого газу для кожної країни різний і залежить від доступних даних), також цей центр здійснює переоцінку у кожні 3-5 років. Таких переоцінок зроблено декілька, що також не достатньо для ретроспективного аналізу [149].

Після особистого контакту з декількома організаціями, які оцінюють емісії парникових газів, прийнято рішення розробити інструментарій для ретроспективного аналізу та застосувати його на прикладі Австрії – ця країна надала найширший часовий період переоцінок емісій (рис. 4.4). На рис. 4.5 графічно відображено переоцінки емісій вуглекислого газу в Австрії за декілька років. Як видно з цього рисунку, зберігається загальна тенденція у поведінці оцінок емісій впродовж досліджуваного періоду. Різниця між першою і останньою переоцінками є значна, але якщо розглядати всі переоцінки, то з кожною новою переоцінкою така різниця між переоцінками зменшується.

Крім вуглекислого газу, країни звітують також інформацію і про інші парникові гази, але невизначеність їхньої оцінки значно вища. Наочно це представлено на рис. 4.6 [159]. Високий рівень невизначеності для метану і закису азоту пояснюють відсутністю достатньої кількості досліджень щодо визначення національних емісійних коефіцієнтів, які б враховували специфіку процесів, які зумовлюють уміслю метану та закису азоту. Натомість, невизначеність коефіцієнтів емісії при спалюванні палива для вуглекислого газу в основному залежить від вмісту вуглецю у паливі, яке дуже легко ідентифікувати [159].

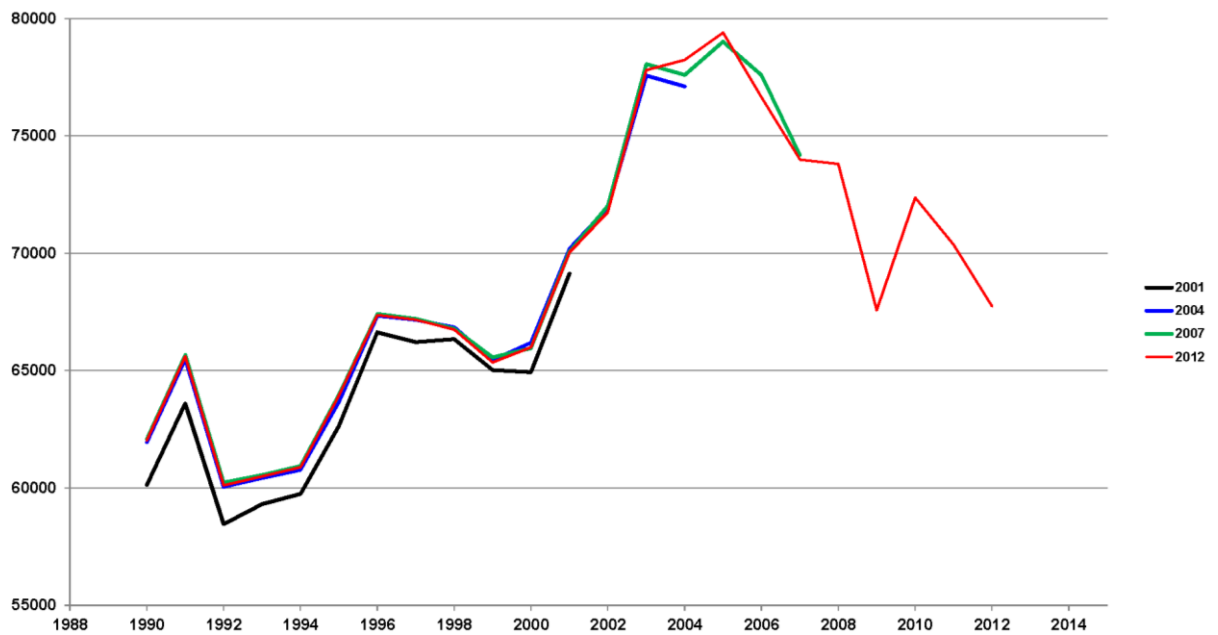


Рис. 4.5. Переоцінка емісій діоксиду вуглецю без врахування емісій від сектору «Землекористування, зміни у землекористуванні та лісовому господарстві» у Австрії за декілька років

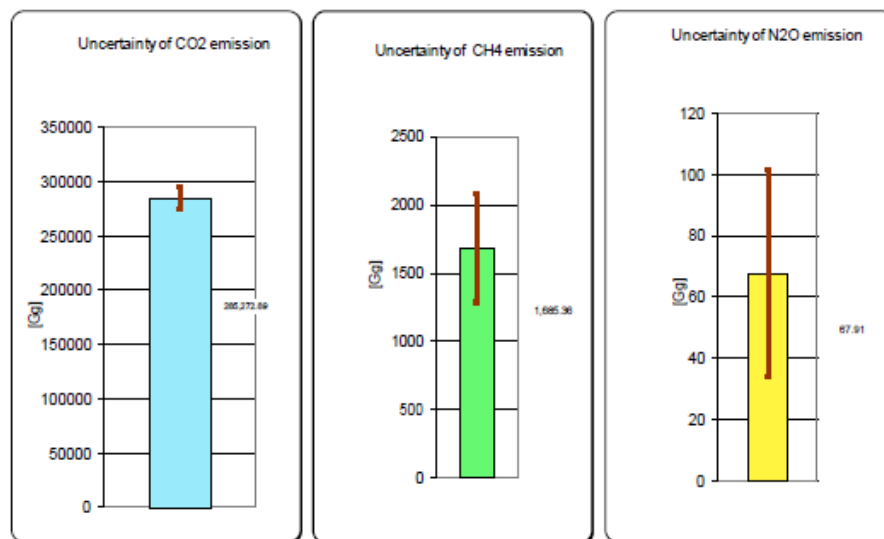


Рис. 4.6. Оцінки емісії вуглекислого газу, метану та закису азоту з відзвітованою невизначеністю у Польщі (Гг, 2015 р.) [159]

4.2.2. Ретроспективний аналіз інвентаризаційних звітів

Дослідження структурних та часових змін в інвентаризаційних звітах дає можливість отримати нові знання про оцінку емісій, що в свою чергу зумовить зменшення прогностичної невизначеності (невизначеності, яку

представлено у звітах). Ретроспективний аналіз інвентаризаційних звітів дає нам можливість оцінити точність проведеної інвентаризації протягом певного періоду часу, іншими словами – оцінити діагностичну невизначеність. Використовуючи розроблений підхід до оцінювання діагностичної невизначеності було ідентифіковано процес «навчання» – з кожною новою оцінкою емісій, було удосконалено розуміння емісійних процесів, що наблизило нас до точного значення оцінюваної величини. Тому у цій роботі розглянуто таке поняття як «діагностичне навчання» (або «ретроспективне навчання»).

Під «діагностичним навчанням» розуміємо процес поступового покращення якості оцінки емісій парникових газів протягом певного періоду часу. Це «поліпшення якості» в основному відображає збільшення точності інвентаризації парникових газів.

Вже було зроблено кілька спроб науковцями, щоб визначити у кількісному вигляді поняття «діагностичного навчання». У своєму дослідженні Х. Гамаль використовувала поняття повної невизначеності. Загальна невизначеність поєднує неточність (у відносному вираженні) між останньою і початковою оцінкою емісій, з похибками цих оцінок [122].

Інший підхід полягає в аналізі збіжності послідовностей оцінок емісій, представлених у національних інвентаризаційних звітах, як це було зроблено ученими з Польської академії наук під керівництвом проф. З.Нагурського [128, 150].

У працях Г.Марланда, США «навчання» розуміється як конвергенція переглянутих оцінок емісій до останніх, як найбільш точних [131, 148].

Спільною рисою усіх підходів, є те що вони прагнуть охопити процес ретроспективного навчання, порівнюючи наявні інвентаризаційні звіти в уніфікований спосіб, або іншими словами представити ретроспективне навчання у кількісному вигляді, щоб у подальшому мати змогу порівнювати покращення знань про емісійні процеси кожної окремо взятої країни.

Основним завданням ретроспективного аналізу було визначити певний параметр, який би зміг охарактеризувати покращення знань про емісії

(виходячи з інвентаризаційних звітів) на певному заданому часовому проміжку. Ученими з Інституту прикладного системного аналізу у Австрії було висунуто гіпотезу, що знання про емісійні процеси покращуються за експоненціальним законом [178]. На рис. 4.7 графічно представлено ситуацію, яка відображає монотонне зростання емісій шляхом покращення знань, а також внаслідок зростання самих емісій. Така ситуація є теоретична і не відображає реальну ситуацію, оскільки в основному величина емісій змінюється не монотонно і залежить у більшій мірі від економічних чи природних факторів, а частка «покращених знань» є відносно малою.

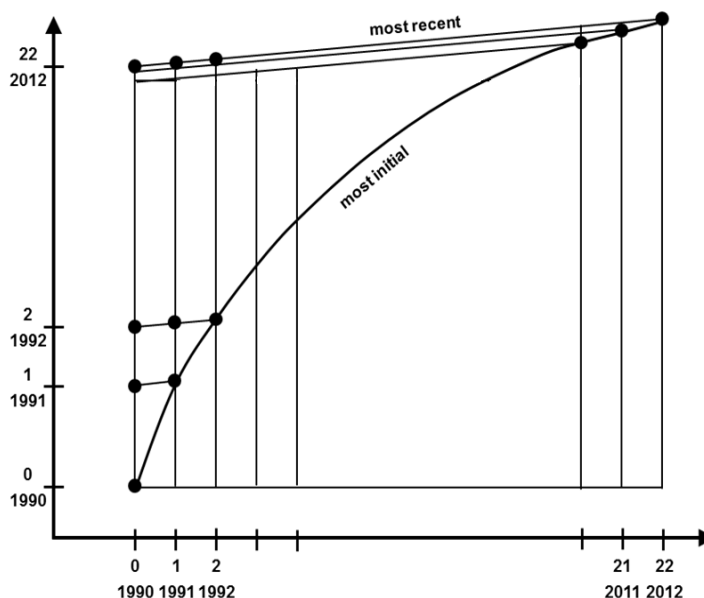


Рис. 4.7. Схематичне відображення покращення знань про емісійні процеси в діагностичному контексті

П. Жебровський, м.Лаксенбург (Австрія) у своїй роботі показав, що покращення знань за окремо взятий рік змінюються за експоненціальним законом, використовуючи різноманітні методи виключення трендів, нормалізації даних, для того щоб отримати «чисте покращення знань» з оцінок емісій. Але кожна переоцінка для окремо взятого року містить у собі знання про емісійні процеси за попередні роки. П. Жебровський доказав експоненціальну природу покращень знань, але не врахував прив'язку переоцінок емісій за попередні переоцінки [178].

Наступним кроком у дослідженні ретроспективного аналізу емісій парникових газів було оцінити покращення знань на так званому «глобальному» рівні – аналізуючи всі роки оцінок та переоцінок емісій загалом.

Для того щоб краще представити ретроспективний (діагностичний) аналіз проаналізуємо зміни у переглядах емісій парникових газів. Для прикладу вибрано лише 4 точки у часі, для яких оцінено емісії і їхні перегляди:

$$\begin{aligned} E_{14} &= EF_4 \cdot A_1 & E_{24} &= EF_4 \cdot A_2 & E_{34} &= EF_4 \cdot A_3 & E_{44} &= EF_4 \cdot A_4 \\ E_{13} &= EF_3 \cdot A_1 & E_{23} &= EF_3 \cdot A_2 & E_{33} &= EF_3 \cdot A_3 & & \\ E_{12} &= EF_2 \cdot A_1 & E_{22} &= EF_2 \cdot A_2 & & & & \\ E_{11} &= EF_1 \cdot A_1, & & & & & & \end{aligned} \quad (4.1)$$

де E_{ij} – переглянуті у j -му році емісії для i -го року, якщо $i=j$ то це перша оцінка емісій; EF_j – коефіцієнт емісії для j -го перегляду оцінок, A_i – статистичні дані про емісійні процеси для i -го року.

Припустимо, що зміни у статистичних даних A_i відбуваються лише в i -му році і виникли в наслідок зміни економічних, погодних чи інших факторів, а також у незначній мірі – від покращення знань про збір статистичної інформації. Статистичні дані кожного року можна представити за допомогою формули:

$$A_{i+1} = A_i + \Delta A_{i,i+1}, \quad (4.2)$$

де $\Delta A_{i,i+1}$ – зміна статистичних даних $(i+1)$ -го року відносно i -го року.

Розглянемо різницю між першою оцінкою емісій для другого року і першою переоцінкою для першого року (друга колонка мінус перша) і зробимо заміну з врахуванням формули (4.2):

$$E_{22} - E_{12} = EF_2 \cdot A_2 - EF_2 \cdot A_1 = EF_2 \cdot \Delta A_{12}, \quad (4.3)$$

Провівши аналогічні операції і для інших колонок, отримано результат, який представлено у табл. 4.1.

Досліджуючи різниці між оцінками чи переоцінками емісій у різні роки відокремити навчання від інших факторів, які спричинили числову зміну

емісій неможливо. Але варто відзначити, що оцінка чи переоцінка в попередньому році має вагомий вплив на наступні оцінки, оскільки ми покращуємо свої знання базуючись на попередніх дослідженнях.

Тепер розглянемо різниці між переоцінками емісій. З кожною новою переоцінкою для одного і того ж року, отримано різні емісійні коефіцієнти (за умови що з кожним переглядом не змінюються статистичні дані за кожен окремо взятий рік, для якого здійснюють оцінку емісій). Кожен наступний коефіцієнт емісій можна записати за допомогою формули, в якій використано значення попереднього:

$$EF_{j+1} = EF_j + \Delta EF_{j,j+1}, \quad (4.4)$$

де $\Delta EF_{j,j+1}$ – зміна коефіцієнта емісії переоціненого в $(j+1)$ -му році відносно j -го року.

Різницю між останньою і передостанньою переоцінками можна записати за допомогою формули:

$$E_{14} - E_{13} = (EF_4 - EF_3) \cdot A_1 = \Delta EF_{34} \cdot A_1. \quad (4.5)$$

Згідно з припущенням, що остання переоцінка емісій є найточнішою і відображає максимум знань про емісійні процеси, логічно всі попередні оцінки порівнювати з нею, тобто шукати різниці між останньою переоцінкою та іншими. Запишемо різницю між останньою переоцінкою і найпершою оцінкою емісій і зробимо заміну, беручи до уваги формулу (4.4):

$$\begin{aligned} E_{14} - E_{11} &= EF_4 \cdot A_1 - EF_1 \cdot A_1 = (EF_1 + \Delta EF_{12} + \Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) \cdot A_1 - EF_1 \cdot A_1 = \\ &= (\Delta EF_{12} + \Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) \cdot A_1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Формула (4.6) відображає покращення знань про емісійні процеси лише локально – відтворює числові зміни в оцінках емісій лише для одного року, без жодного зв'язку з переоцінками емісій за попередні роки, що також не відображає повну картину. Для охоплення формулами всього етапу навчання, яке відбувається з кожною переоцінкою (рухаючись вертикально по матриці (4.1)) і з кожною новою оцінкою для нового року (рухаючись горизонтально по матриці (4.1)) розглянемо різниці:

$$E_{34} - E_{33} = (EF_4 - EF_3) \cdot A_3 = \Delta EF_{34} \cdot A_3 \quad (4.7)$$

Наступним кроком є представлення формули (4.7) за допомогою переглянутих емісій за попередній рік з врахуванням замін (4.2) та (4.4) (рухаємось горизонтально до E_{23}):

$$E_{34} - E_{33} = \Delta EF_{34} \cdot (A_2 + \Delta A_{23}) = \Delta EF_{34} \cdot A_2 + \Delta EF_{34} \cdot \Delta A_{23}. \quad (4.8)$$

Оскільки E_{23} акумулює у собі знання, які отримано з оцінки емісій в першому році, представимо різницю $E_{34} - E_{33}$ через E_{13} :

$$E_{34} - E_{33} = \Delta EF_{34} \cdot (A_1 + \Delta A_{12} + \Delta A_{23}) = \Delta EF_{34} \cdot A_1 + \Delta EF_{34} \cdot (\Delta A_{12} + \Delta A_{23}). \quad (4.9)$$

Як видно з формули (4.9), числові зміни в переоцінках емісій залежать від змін емісійних коефіцієнтів та змін статистичних даних. Здійснивши аналогічні операції і для інших колонок, отримано результат, який представлений у табл. 4.1 та табл. 4.2. Записуємо загальну формулу для обчислення різниць, які відображають зміни у переглядах емісій з врахуванням навчання впродовж певного періоду часу:

$$\begin{aligned} E_{ij} - E_{im} &= \left(\sum_m^{j-1} \Delta EF_{k,k+1} \right) \cdot \left(A_1 + \sum_1^{i-1} \Delta A_{r,r+1} \right) = \\ &= \left(\sum_m^{j-1} \Delta EF_{k,k+1} \right) \cdot A_1 + \left(\sum_m^{j-1} \Delta EF_{k,k+1} \right) \cdot \left(\sum_1^{i-1} \Delta A_{r,r+1} \right), \\ &\quad (1 \leq m \leq i \leq j). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Формула (4.10) відображає теоретичну ситуацію, коли зміни в оцінках емісій виникають лише внаслідок покращення знань про коефіцієнти емісії. На практиці числові зміни можуть бути спричинені також змінами статистичних даних. Таке відбувається в наслідок запізнення детальних статистичних звітів, виправлення допущених помилок під час збору даних та ін. Наступна матриця (4.11) представляє ситуацію, коли для другої переоцінки емісій отримано нові покращені статистичні дані:

$$\begin{aligned} E_{14} &= EF_4 \cdot A_1 & E_{24} &= EF_4 \cdot A_{2,corr} & E_{34} &= EF_4 \cdot A_3 & E_{44} &= EF_4 \cdot A_4 \\ E_{13} &= EF_3 \cdot A_1 & E_{23} &= EF_3 \cdot A_{2,corr} & E_{33} &= EF_3 \cdot A_3 & & \\ E_{12} &= EF_2 \cdot A_1 & E_{22} &= EF_2 \cdot A_2 & & & & \\ E_{11} &= EF_1 \cdot A_1 & & & & & & \end{aligned} \quad (4.11)$$

Таблиця 4.1. Горизонтальні та вертикальні різниці в переоцінках емісій

	Horizontal Differences across Row back to Beginning of Row (De-trending)		
	Column 2 - Column 1	Column 3 - Column 1	Column 4 - Column 1
Row 4			$E_{44} - E_{14}$
			$= EF_4 * (\Delta A_{12} + \Delta A_{23} + \Delta A_{34})$
Row 3		$E_{33} - E_{13}$	
		$= EF_3 * (\Delta A_{12} + \Delta A_{23})$	
Row 2	$E_{22} - E_{12}$		
	$= EF_2 * \Delta A_{12}$		

	Vertical Differences (most recent – initial) and Comparison with Cell in 1 st Column		
	Column 1	Column 2	Column 3
Row 4 – Row 1	$E_{14} - E_{11}$ $= (\Delta EF_{12} + \Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * A_1$		
Row 4 – Row 2 vertical horizontal (→ Column 1)	$E_{14} - E_{12}$ $= (\Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * A_1$	$E_{24} - E_{22}$ $= (\Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * A_2$	
		$= (\Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * A_1$ $+ (\Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * \Delta A_{12}$	
Row 4 – Row 3 vertical horizontal (→ Column 1)	$E_{14} - E_{13}$ $= \Delta EF_{34} * A_1$		$E_{34} - E_{33}$ $= \Delta EF_{34} * A_3$
			$= \Delta EF_{34} * A_1$ $+ \Delta EF_{34} * (\Delta A_{12} + \Delta A_{23})$

Таблиця 4.2. Горизонтальні та вертикальні різниці в переоцінках емісій з врахування коректованих значень

	Horizontal Differences across Row back to Beginning of Row (De-trending)		
	Column 2 - Column 1	Column 3 - Column 1	Column 4 - Column 1
Row 4			$E_{44} - E_{14}$
			$= EF_4 * (\Delta A_{12} + \Delta A_{2,corr} + \Delta A_{23} + \Delta A_{34})$
Row 3		$E_{33} - E_{13}$	
		$= EF_3 * (\Delta A_{12} + \Delta A_{2,corr} + \Delta A_{23})$	
Row 2	$E_{22} - E_{12}$		
	$= EF_2 * \Delta A_{12}$		

	Vertical Differences (most recent – initial) and Comparison with Cell in 1 st Column		
	Column 1	Column 2	Column 3
Row 4 – Row 1	$E_{14} - E_{11}$ $= (\Delta EF_{12} + \Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * A_1$		
Row 4 – Row 2 vertical	$E_{14} - E_{12}$ $= (\Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * A_1$	$E_{24} - E_{22}$ $(\Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * A_2$ $+ EF_4 * \Delta A_{2,corr}$	
	horizontal (→ Column 1)	$(\Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * A_1$ $+ (\Delta EF_{23} + \Delta EF_{34}) * \Delta A_{12} + EF_4 * \Delta A_{2,corr}$	
Row 4 – Row 3 vertical	$E_{14} - E_{13}$ $= \Delta EF_{34} * A_1$		$E_{34} - E_{33}$ $= \Delta EF_{34} * A_3$
	horizontal (→ Column 1)		$= \Delta EF_{34} * A_1$ $+ \Delta EF_{34} * (\Delta A_{12} + \Delta A_{2,corr} + \Delta A_{23})$

Зміни у статистичних даних, які виникають внаслідок покращення збору інформації для одного і того ж року, можна представити формулою:

$$A_{2,corr} = A_2 + \Delta A_{2,corr}. \quad (4.12)$$

У такому випадку формулу (4.8), використовуючи заміну (4.12), переписуємо у такому вигляді:

$$E_{34} - E_{33} = \Delta EF_{34} \cdot (A_2 + \Delta A_{2,corr} + \Delta A_{23}) = \Delta EF_{34} \cdot A_2 + \Delta EF_{34} \cdot (\Delta A_{2,corr} + \Delta A_{23}). \quad (4.13)$$

При цьому формула (4.9) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} E_{34} - E_{33} &= \Delta EF_{34} \cdot (A_1 + \Delta A_{12} + \Delta A_{2,corr} + \Delta A_{23}) = \\ &= \Delta EF_{34} * A_1 + \Delta EF_{34} * (\Delta A_{12} + \Delta A_{2,corr} + \Delta A_{23}) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Це не єдиний сценарій розвитку подій, внаслідок чого відбулася зміна величини емісій. Усі можливі варіанти змодельовати важко, а ще важче вловити цю зміну у реальних даних, оскільки зміни величини емісій внаслідок покращення знань про процеси є значно меншими, ніж зміни емісій внаслідок зростання економічної активності. Отже, наступним кроком дослідження покращення знань про емісійні процеси було розроблення інструментарію, який би дозволив визначити «чисте навчання» у відзвітованих даних, охоплюючи цілий часовий проміжок.

4.2.3. Оцінка точності здійсненої інвентаризації на основі переглядів кадастрів емісії парникових газів з часом

Будь-який метод відокремлення «чистого покращення знань» з переоцінок емісій парникових газів передбачає впровадження низки припущень, оскільки немає точно вимірюваної величини емісії за рік для цілої країни.

На першому етапі роботи було припущено, що найкращі та абсолютні знання про емісійні процеси є в останній переоцінці, тобто припускаємо, що переоцінка, яка здійснена у 2013 році відповідає виміряним значенням. На рис. 4.8 показано, що нова переоцінка емісій зберігає основний тренд, але

відрізняється від переоцінки в попередні роки на певну величину. Різниця між еталонною переоцінкою та іншими переоцінками показує, на скільки змінились емісії відносно еталонного року.

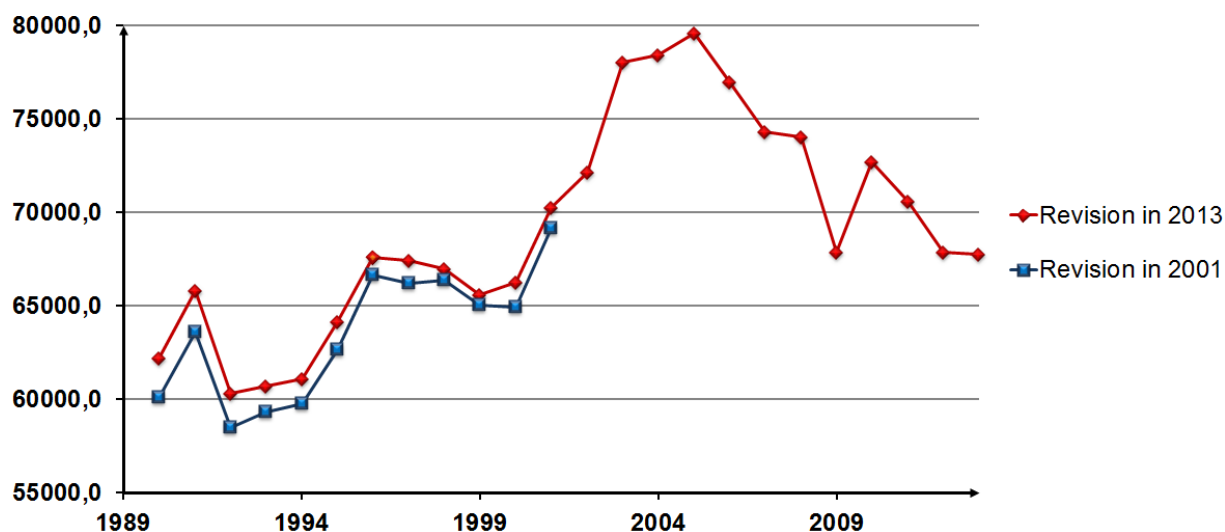


Рис. 4.8. Переоцінки емісій вуглекислого газу, здійснені у 2013 та 2001 роках у Австрії (Гг)

Такі різниці можна представити за допомогою формули:

$$\Delta E = E_{in} - E_{ik} = E_{true,i} + \varepsilon_{in} - E_{true,i} - \varepsilon_{ik} = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{ik}, \quad (4.15)$$

де ΔE – різниця емісій парникових газів; E_{ij} – j -та переоцінка емісій, які виникли у i -му році, $E = \overline{1;n}$; $E_{true,i}$ – «істинне» значення емісій для i -го року; ε_{ij} – різниця між відзвітованими оцінками емісій в j -му році та істинними значеннями для i -го року.

У такому випадку, різниці дають можливість оцінити «покращення знань» відносно певного року, зберігаючи у собі частку «не здобутих знань». Для того, щоб виключити з еталонних значень похибку оцінювання, здійснено параметричну та непараметричну апроксимацію останньої переоцінки емісій.

Останню переоцінку як основу для апроксимації вибрано з двох причин:

- вона акумулює максимум отриманих знань за весь період переоцінок;

- покриває всі роки, для яких здійснювалась оцінка та переоцінка емісій.

Засобами Microsoft Office Excel побудовано апроксимаційну криву, яка найкраще описує тенденції зміни табличних значень. Зі всіх можливих функцій найменша похибка виникала при апроксимації поліном п'ятого порядку (рис. 4.9).

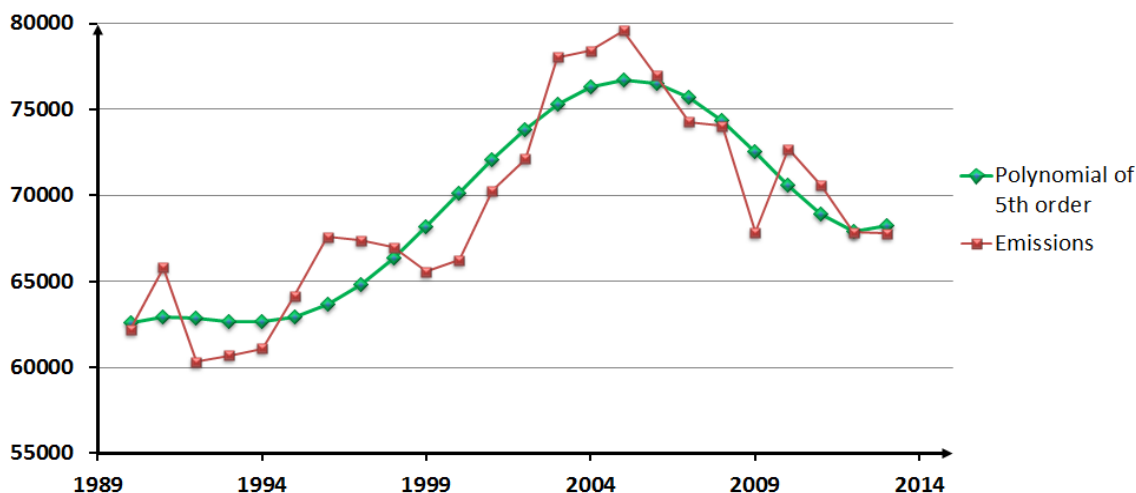


Рис. 4.9. Апроксимація переоцінки емісій парникових газів, здійсненої у 2013 році, за допомогою полінома 5-го порядку

Для чистоти експерименту було перевірено коефіцієнт детермінації для поліномів інших порядків, а також коефіцієнт асиметрії (момент третього порядку) для різниць між табличним значенням і отриманими величинами за допомогою апроксимації. Всі досліджувані параметри у випадку апроксимації поліномом п'ятого порядку були найкращими ($R^2 = 0,84$, $A = 0,1$).

Параметрична апроксимація не є досконалою, оскільки при обчисленні її параметрів ми збільшуємо похибку наближення. Як видно з рис. 4.9, відстань між табличними значеннями і апроксимованими є значна, але в загальному апроксимаційна пряма відтворює основний тренд. Більш точною є непараметрична апроксимація.

Як приклад непараметричної апроксимації використано кубічний сплайн. Бачимо з рис. 4.10, що він досить точно апроксимував табличні значення, згладивши значні стрибки.

Отже, таким чином отримано три еталони для оцінювання покращень знань: безпосередньо остання переоцінка емісій, параметрично апроксимовані дані та непараметрично апроксимовані дані.

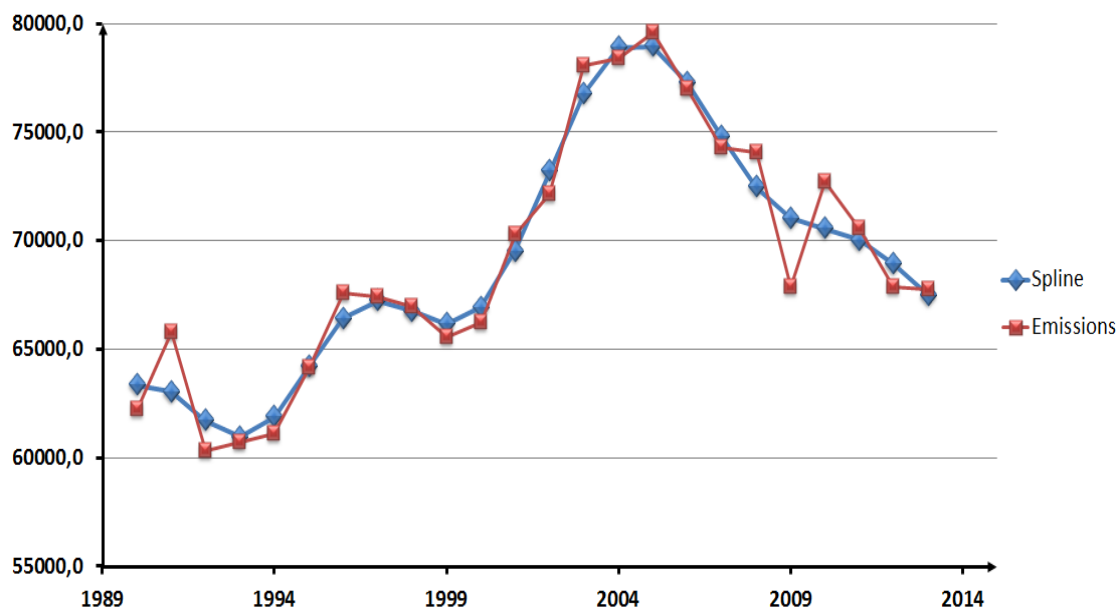


Рис. 4.10. Апроксимація переоцінки емісій парникових газів, здійсненої у 2013 році, за допомогою кубічного сплайна

Наступним етапом роботи була побудова різниць між «еталонами» та відзвітованими даними. Ці різниці виступають індикатором покращення знань на локальному рівні (без врахування здобутих знань за попередні оцінки) упродовж досліджуваного періоду. Важливою частиною роботи було перевірити чи після виключення тренду в емісіях не було змінено послідовності переоцінок. Тобто, як видно з рис. 4.11, оцінки емісій з року в рік не є монотонно зростаючою чи спадаючою функцією, і переоцінка в певні роки може збільшувати величину емісій, а в інші – зменшувати (для одного і того ж самого року). Тому для оцінювання «покращення знань» варто зберегти такі коливання, вони відображають немонотонність процесу навчання і зумовлені різноманітними причинами: змінами методологій, зміною експертів, отриманням нових статистичних даних. На рис. 4.12 – рис. 4.14 графічно відображено отримані різниці і після аналізу величин показано, що дійсно зберігається такий самий порядок величин як до, так і

після виключення з емісій тренду, а отже використана апроксимація достатньо точно вловила тренд «істинних емісій».

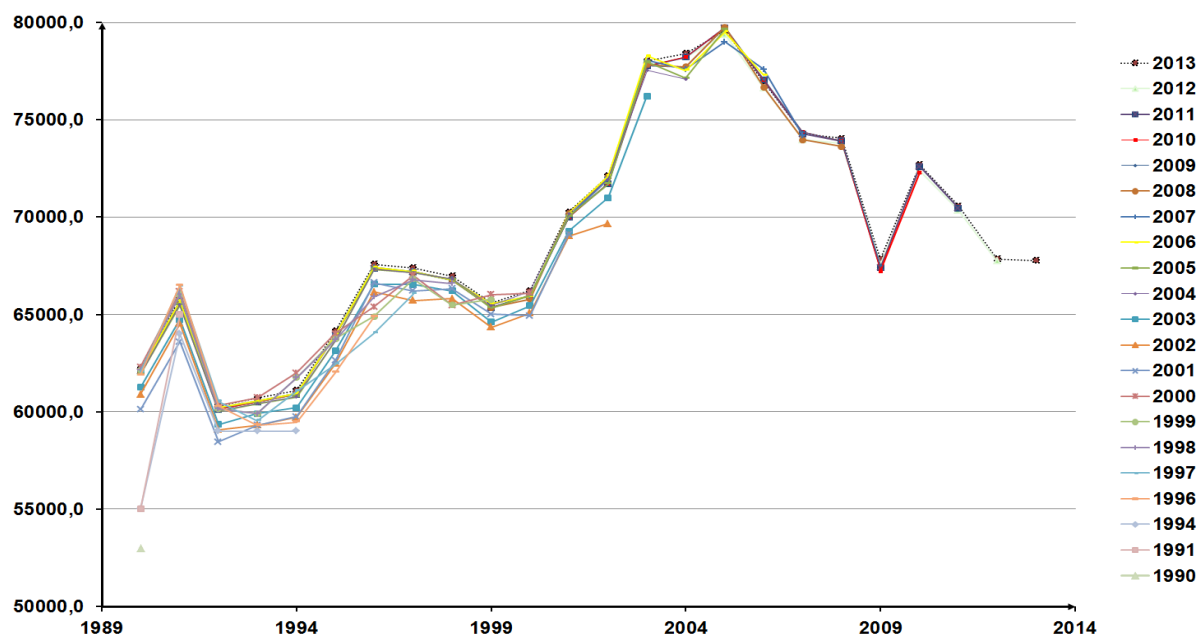


Рис. 4.11. Переоцінені за всі роки емісії діоксиду вуглецю без врахування сектору «Землекористування, зміни у землекористуванні та лісовому господарстві» у Австрії за весь досліджуваний період (Гг, по осі X – роки, для яких здійснено оцінку емісій, по осі Y – емісії CO_2 , різними кольорами представленні роки, в які було здійснено переоцінку).

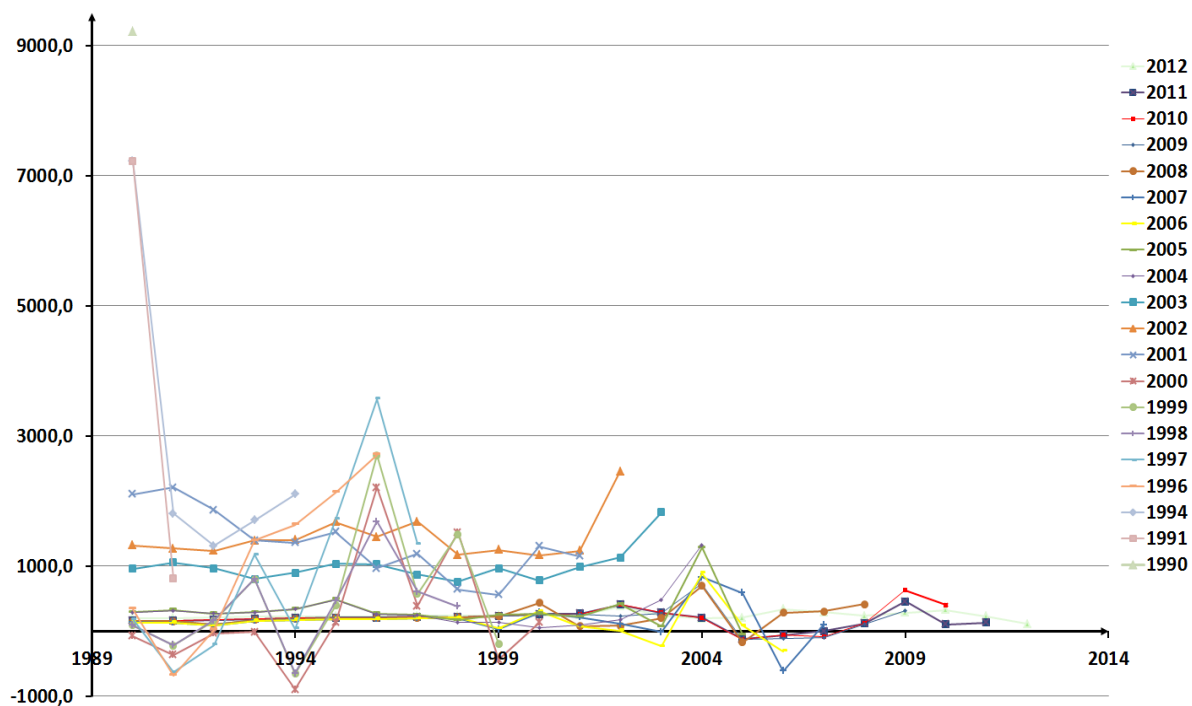


Рис. 4.12. Різниці між останньою переоцінкою емісій без апроксимації і попередніми (Австрія, Гг)

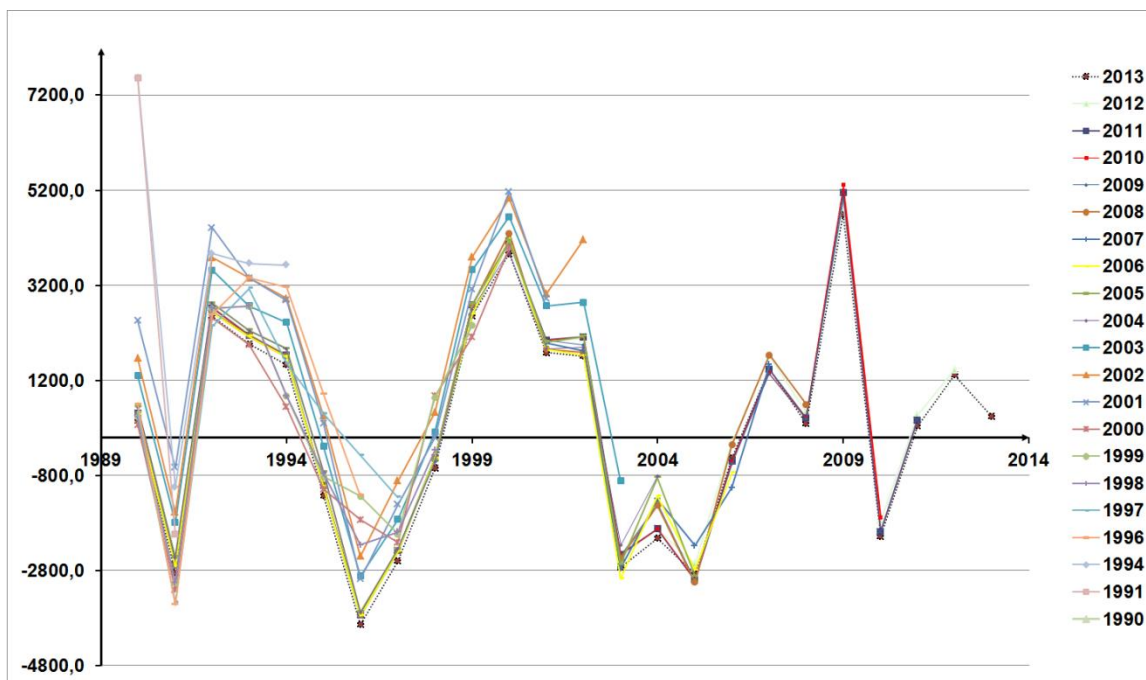


Рис. 4.13. Різниці між параметрично апроксимованими значеннями та відзвітованими значеннями емісій у Австрії, Гг

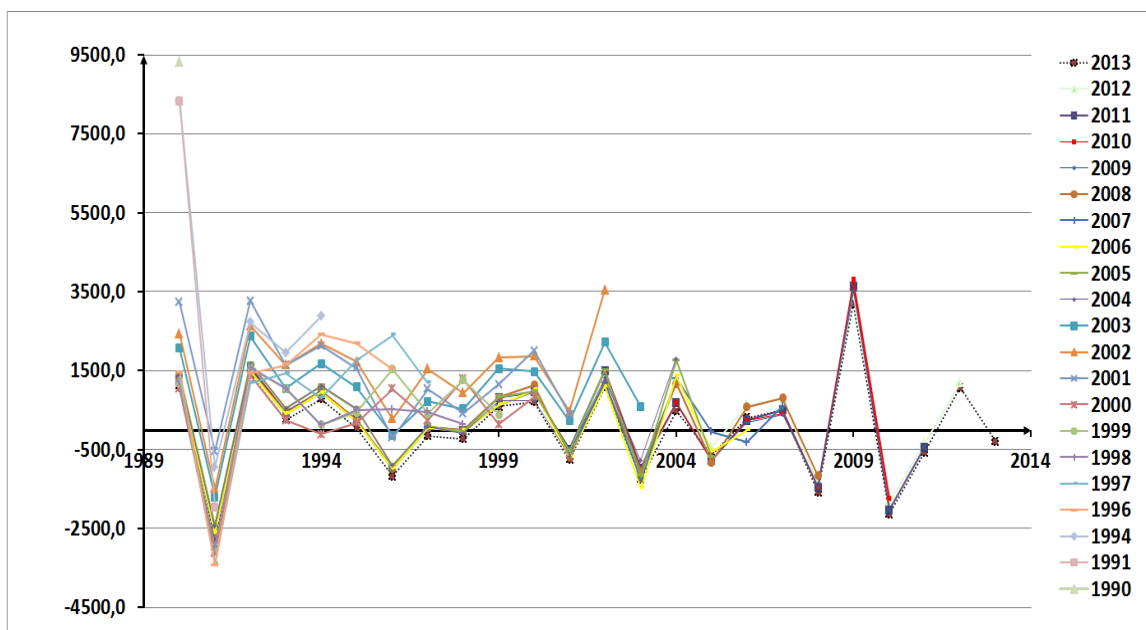


Рис. 4.14. Різниці між непараметрично апроксимованими значеннями та відзвітованими значеннями емісій у Австрії, Гг

Одним із найважливіших етапів роботи було об'єднати всі переоцінки за окремо взяті роки, щоб не втратити інформації про покращення знань, які отримано з попередніх оцінок емісій.

Покращення знань, яке представлено у числовому еквіваленті за допомогою різниць, можна розглядати як дискретні випадкові величини. Тому було сформовано вектор випадкових величин, причому кожна окрема випадкова величина включає в себе «покращення знань» від певної переоцінки. Обчислено математичне сподівання, дисперсію та коефіцієнт асиметрії для кожної вибірки чисел.

Математичне сподівання характеризує середнє значення, біля якого зосереджені всі можливі значення випадкової величини. Таким чином цілу вибірку узагальнено і зведено до одного числа.

За допомогою цього математичного апарату обчислено на скільки уточнено оцінки емісій вуглекислого газу для Австрії за 1991 – 2013 роки, а також оцінено тренд таких уточнень. Як і очікувалось, покращення знань про емісійні процеси найкраще описує експоненціальна крива. Як видно з рис. 4.15, всі три підходи для знаходження різниць дали майже однаковий результат (різними штрих-пунктирними лініями позначено відповідні тренд-лінії зважених значень математичного сподівання відповідних різниць).

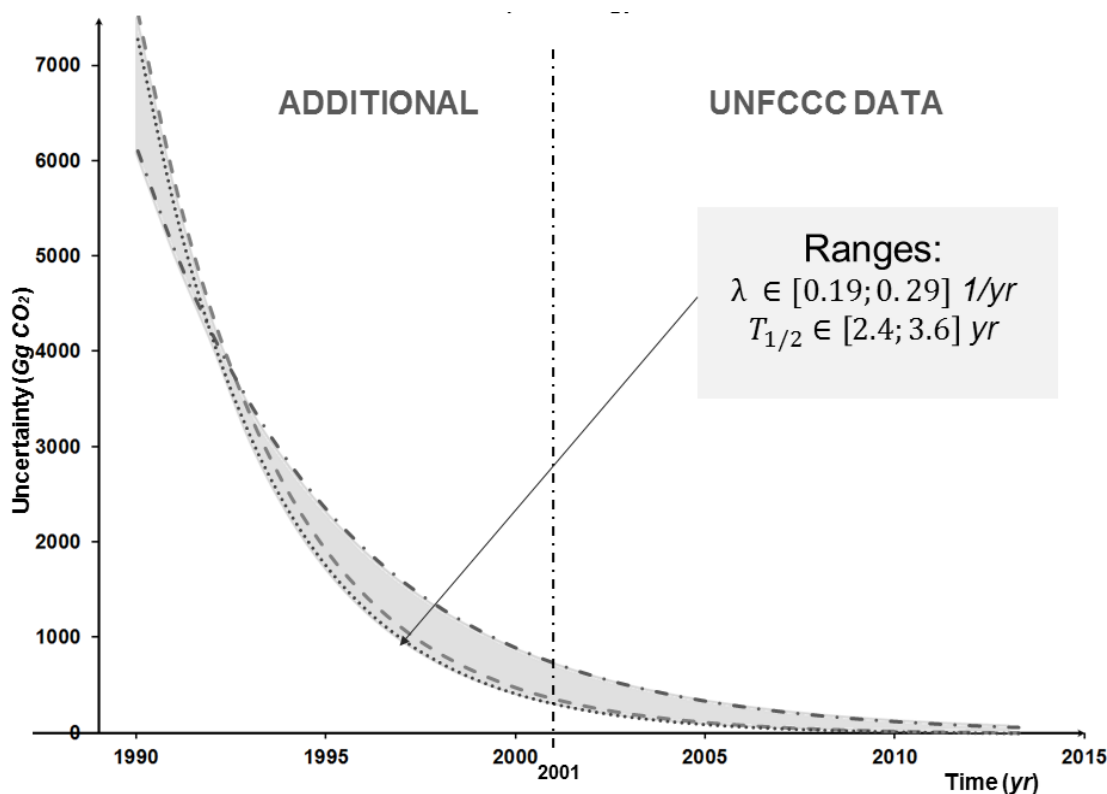


Рис. 4.15. Точність у відзвітованих емісіях вуглекислого газу у Австрії

Отриманий результат показує, зокрема, таке – щоб збільшити точність оцінок емісій вуглекислого газу у Австрії на 50% потрібно покращувати методологію оцінювання у тому ж темпі, що і останні 23 роки, ще 3-4 роки. Це досить незначний відрізок часу і означає, що така країна як Австрія має добре розроблений інструментарій для інвентаризації парникових газів. Такий результат є важливий для владних структур, оскільки дає зрозуміти, через скільки часу після удосконалення технологій та кращого вивчення техніки інвентаризації можна отримати суттєвий результат, а також на скільки та чи інша країна добре вивчила емісійні процеси.

4.3. Загальні принципи аналізу невизначеностей при просторовому моделюванні емісій парникових газів

Усі країни, які підписали Рамкову конвенцію Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату зобов'язались здійснювати щорічну інвентаризацію емісій парникових газів. Виміряти кількість емісій від всіх джерел впродовж цілого року на рівні країни неможливо, тому було розроблено відповідні методики для їх оцінювання. Оцінюючи будь-яку величину ми стикаємось з поняттям невизначеності, оскільки ми не оперуємо з точно вимірними значеннями. Будь-які математичні моделі, які розроблені для оцінювання емісій, включають в себе ряд вхідних параметрів, таких як статистичні дані, емісійні коефіцієнти, тощо, які мають певну невизначеність, що спричинює невизначеність результатів інвентаризації.

При інвентаризації парникових газів під невизначеністю розуміють величину, яка вказує на відсутність абсолютної точності в компонентах кадастру в результаті довільних випадкових факторів, таких як невизначеність джерел емісій, недостатність розуміння емісійного процесу тощо. Рекомендовано використовувати відносну невизначеність, яка характеризується 95-процентним довірчим інтервалом (ймовірність попадання істинного значення параметру в цей інтервал становить 95%). Відносна невизначеність вимірюється у процентах як відношення величини довірчого інтервалу (2σ) до математичного сподівання (μ) [115].

4.3.1. Поняття невизначеності результатів просторового моделювання

Невизначеність – це відсутність знань про точне значення величини, яку можна описати за допомогою функції щільності розподілу, що характеризує діапазон та ймовірність можливих значень. Невизначеність залежить від стану знань аналітика, який, у свою чергу, залежить від якості та кількості придатних даних та знань про процеси [3].

Невизначеність емісій парникових газів від окремих джерел (наприклад, електростанцій, заводів, автомобілів, тощо) є або функцією характеристик, калібрування і частоти проведення прямих інструментальних вимірювань, або (частіше) поєднанням невизначеностей коефіцієнтів емісії для типових джерел і відповідних статистичних даних про діяльність. Випадкові величини, пов'язані з інвентаризацією емісій парникових газів є неперервними. Тому для їх характеристики найчастіше використовують функції щільності. Кадастр емісій парникових газів втрачає свою цінність та значимість без аналізу невизначеностей результатів, оскільки при інвентаризації парникових газів не оперують точними значеннями, а тому оцінена величина може лежати в певних межах.

4.3.2. Невизначеність статистичних даних про використання та видобування палива

Кожна країна ставить за мету зменшити невизначеність статистичної інформації. Для реалізації цього завдання існують відповідні контролюючі органи та фінансово-бюджетні стимули для підвищення точності обліку паливних ресурсів та звітності економічної діяльності підприємств. Дані про споживання палива на рівні підприємств регулярно збирають і подають у національні статистичні органи. Ці звіти можуть містити оцінки невизначеностей, але не завжди такого роду інформацію подають у

статистичних збірниках, в основному у щорічниках представляють усередненні значення на рівні цілої країни. Залежно від розвитку статистичної звітності в країні невизначеність даних енергетичного сектору може коливатися у межах від 2% до 20 %.

Невизначеність даних про паливо у промисловості та інших статистичних даних, необхідних для здійснення дезагрегації цих даних з рівня країни на більш детальний рівень, може бути спричинена рядом факторів, зокрема:

- неточністю приладів для вимірювання обсягу видобутого чи реалізованого палива;
- неточністю обліку об'єму чи маси виробленої продукції;
- похибками при обліку використаних сировинних матеріалів та кількості виробленої продукції на рівні підприємств (похибки балансу мас);
- технічними помилками при обробленні звітів органами статистики тощо.

У статистичних довідниках України не представлено оцінку невизначеності статистичних даних про використане паливо у енергетичних цілях з розбиттям по категоріях економічної діяльності. Наведено лише узагальнені межі невизначеності у енергетичному секторі, який крім промисловості включає ще чотири інші категорії, у тому числі і сектор “Виробництво електроенергії та тепла”, а частка емісій цього сектору становить більше ніж 65% (для порівняння частка емісій від сектору “Переробна промисловість” становить приблизно 9%), а невизначеність статистичних даних – 2% (згідно з МГЕЗК [115]). Це пояснюється наявністю досить детальної статистичної інформації та значної кількості наукових досліджень. Також мала невизначеність зумовлена використанням у цьому секторі в основному вугілля чи газу, натомість у промисловості використовують значно більше типів палива, що зумовлює більшу невизначеність. Тому використовувати усереднені дані по енергетичному секторі нелогічно.

У табл. 4.3 наведено невизначеності статистичних даних у промисловості України, а також коефіцієнтів емісії, які є вихідними даними для оцінювання загальної невизначеності емісій парникових газів у переробній промисловості, отримані з роботи [28].

Таблиця 4.3. Діапазони невизначеностей та типи розподілу для статистичних даних та коефіцієнтів емісії в Україні [28]

Тип палива	Невизначеності ¹⁾ (%)			
	Статистичні дані	Коефіцієнти емісії		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Тверде	±5 (N)	±4 (N)	-30: +88 (L-N)	-70: + 245 (L-N)
Рідке	±15 (N)	±3,9 (N)	-50: +130 (L-N)	-66: + 270 (L-N)
Газ	±10 (N)	±5,2 (N)	-50: +130 (L-N)	-66: + 270 (L-N)
Біомаса	±25 (N)	±19,5 (N)	-66 :+160 (L-N)	-80: + 368 (L-N)
¹⁾ в дужках вказано тип розподілу значень: (N) – нормальний; (L-N) – логнормальний				

У статистичних щорічниках по промисловості Польщі подано інформацію щодо невизначеності статистичних даних про споживання палива на рівні країни з розбиттям на чотири основні категорії за фізичними характеристиками: тверде, рідке, газоподібне паливо та біомаса [159]. Таку інформацію на рівні підприємств чи заводів взагалі неможливо отримати, оскільки вона становить комерційну таємницю або таких досліджень не проводиться.

Дані про спалювання біомаси характеризуються найбільшою невизначеністю через складність обліку цього ресурсу і становить 15%, натомість невизначеність даних про використання твердих і рідких видів палива – 3% [159]. Діапазони невизначеностей та типи розподілу для статистичних даних та коефіцієнтів емісії у Польщі представленні у табл. 4.4.

Вхідні дані, які використовуються для моделювання процесів емісій парникових газів, є випадковими величинами і можна представити за

допомогою функцій щільності. У більшості випадків для моделювання невизначеності статистичних даних використовують нормальний розподіл.

Таблиця 4.4. Діапазони невизначеностей та типи розподілу для статистичних даних та коефіцієнтів емісії у Польщі

Тип палива	Невизначеності ¹⁾ (%)			
	Статистичні дані	Коефіцієнти емісії ²⁾		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Тверде	±3 (N)	±1 (N)	-13,5 (L-N)	-12 (L-N)
Рідке	±3 (N)	±2 (N)	-41,8 (L-N)	-75 (L-N)
Газ	±4 (N)	±2 (N)	-17 (L-N)	-20 (L-N)
Біомаса	±15 (N)	± 19,5 (N)	-24 (L-N)	-37 (L-N)
1) у дужках вказано тип розподілу значень: (N) – нормальний; (L-N) – логнормальний				
2) у випадку логнормального розподілу подано нижню межу довірчого інтервалу				

Функція густини нормального розподілу для генерування випадкових величин для оцінювання невизначеності результатів інвентаризації парникових газів має вигляд:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad x > 0, \quad (4.16)$$

де μ - математичне сподівання, а σ - середньоквадратичне відхилення.

Невизначеність визначає межу 95% інтервалу довіри випадкової величини, у випадку нормального розподілу – це відношення двох середньоквадратичних відхилень до математичного сподівання випадкової величини, тобто $U = \pm(2\sigma / \mu) \cdot 100\%$ [166].

Якщо невизначеність даних є велика та несиметрична, а випадкова величина є додатною, тоді для моделювання використовують логнормальний розподіл. Для такої величини щільність розподілу можна записати за допомогою формули:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), x > 0, \quad (4.17)$$

де μ - математичне сподівання (параметр масштабу), а σ - стандартне відхилення (параметр форми).

У цьому випадку межі 95% довірчого інтервалу знаходять як:

$$\left[\mu_{geo} / \sigma_{geo}^2, \mu_{geo} \cdot \sigma_{geo}^2 \right],$$

де $\mu_{geo} = e^{\mu}$ - геометричне середнє, $\sigma_{geo} = e^{\sigma}$ - геометричне середньоквадратичне відхилення.

4.3.3. Невизначеність емісійних коефіцієнтів

Коефіцієнти емісії парникових газів при спалюванні різних видів палива залежать від типу палива, його хімічних характеристик, а також від способу і цілей використання. Через недостатні знання про емісійні процеси, невизначеність цих коефіцієнтів є значною.

У методиках МГЕЗК прийнято вважати, що все паливо, яке використовується на підприємстві повністю згоряє, але на практиці у більшості випадків незначна частина вуглецю все ж таки не окиснюється до кінця. Якщо відомо вміст вуглецю та процент його окиснення у процесі спалювання, то обчислити коефіцієнт емісії вуглекислого газу можна за формулою:

$$EF_{i,n}^{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot A_i \cdot B_i \cdot 1000, \quad (4.18)$$

де A_i - вміст вуглецю в одиниці палива (кг_C/ГДж), B_i - частка вуглецю, що окислюється у процесі спалювання [115].

У цьому випадку необхідно знати точні коефіцієнти згоряння палива для кожного конкретного джерела емісії. Але не завжди такі дані є доступними і відомими, також не для кожного підприємства чи галузі промисловості здійснюються такого роду дослідження.

При спалюванні палива невизначеність емісійних коефіцієнтів вуглекислого газу є відносно мала у порівнянні з іншими парниковими газами (табл. 4.4) [115, 177]. Це зумовлено тим, що величина емісійного коефіцієнта в основному залежить від вмісту вуглецю у паливі, що легко визначається.

Коефіцієнти емісії метану та закису азоту в значній мірі залежать від технології спалювання, а тому суттєво відрізняються у залежності від регіону країни та сектору, в якому здійснюється господарська діяльність. Невизначеність цих коефіцієнтів є значно вища і пояснюється відсутністю значної кількості досліджень і відповідної повноти розуміння емісійного процесу.

На теперішній час здійснено порівняно мало досліджень з оцінювання невизначеностей емісійних коефіцієнтів. У працях Ридпала та Вініватера зроблено розрахунок невизначеностей у кадастрах емісій парникових газів і здійснено порівняння з результатами по п'яти країнах, а саме: по Австрії (Winiwarter і Rypdal, 2001) [177], Нідерландах (van Amstel та ін., 2000), Норвегії (Rypdal, 1999) та США (EIA, 1999) [115]. Як видно з табл. 4.5 – табл. 4.7, емісійні коефіцієнти для кожної країни можуть описуватись різними типами розподілів.

Таблиця 4.5. Оцінка невизначеності коефіцієнтів емісії двоокису вуглецю для стаціонарних джерел спалювання нафтопродуктів

Країна	95% довірчий інтервал	Розподіл	Дослідники
Австрія	± 0.5	Нормальний	Вінівартер та Рипдал, 2004
Норвегія	± 3	Нормальний	Рипдал, 1999
Нідерланди	± 2	-	Ван Амстел та ін., 2005
США	± 2	-	EIA, 1999

Таблиця 4.6. Оцінка невизначеності коефіцієнтів емісії метану для стаціонарних джерел спалювання палива

Країна	95% довірчий інтервал	розподіл	Дослідники
Австрія	± 50	Нормальний	Вінівартер та Рипдал, 2004
Фінляндія	$-75\sigma + 10$	β	Монні та інш.
Норвегія	$-50\sigma + 100$	Логнормальний	Рипдал, 1999
Нідерланди	± 25	-	Ван Амстел та інш, 2005
США	Порядок величини	-	EIA, 1999

Таблиця 4.7. Оцінка невизначеності коефіцієнтів емісії закису азоту для стаціонарних джерел спалювання палива

Країна	95% довірчий інтервал	розподіл	Дослідники
Австрія	± 20	Нормальний	Вінівартер та Рипдал, 2004
Фінляндія	$-75\sigma + 10$	β	Монні та інш.
Норвегія	$-66\sigma + 200$	β	Рипдал, 1999
Нідерланди	± 75	-	Ван Амстел та інш, 2005
США	$-55\sigma + 200$	-	EIA, 1999

Через відсутність достатньої кількості досліджень невизначеності емісійних коефіцієнтів, більшість країн використовують загальноприйняті типи розподілів, які характеризують той чи інший коефіцієнт. Відповідно до [115], розподіл коефіцієнтів емісії двоокису вуглецю моделюється з використанням нормального розподілу, а метану та закису азоту – відповідно до логнормального розподілу.

В Національному інвентаризаційному звіті Польщі [159] прийнято, що коефіцієнти емісії основних парникових газів розподілені за нормальним законом, і це не залежить від джерела емісій (пояснюється відсутністю відповідних досліджень). У секторі «Видобувна промисловість» Польщі невизначеність коефіцієнтів летких емісій парникових газів становить 50%. Невизначеності емісійних коефіцієнтів у секторі «Переробна промисловість» представлено у табл. 4.3 для України та табл. 4.4 – для Польщі. Невизначеності коефіцієнтів емісії для України, які представлено у інвентаризаційних звітах, є значно меншими і подаються без розбиття на категорії економічної активності (сумарно для енергетичного сектору). Тому для дослідження невизначеності емісій парникових газів від переробної промисловості України у цій дисертаційній роботі використано дані з роботи [28].

Згідно з інвентаризаційним звітом України невизначеність коефіцієнтів летких емісій парникових газів становить 20% і є значно нижчою від загальноприйнятих значень запропонованих МГЕЗК. У цьому звіті не вказано спосіб отримання такого значення, а також детальних меж невизначеностей. Тому в дисертаційній роботі при дослідженні довірчих інтервалів результатів оцінювання цих парникових газів використано як вхідні параметри дані про діапазони невизначеностей та типи розподілу для статистичних даних та коефіцієнтів емісії за замовчуванням, наведені у роботі [28].

Для порівняння оцінок емісії різних парникових газів використовують потенціал глобального потепління, який відображає кількість тепла, що затримується одиницею певного парникового газу в атмосфері. Вуглекислий газ був вибраний як газ-еталон (для двоокису вуглецю цей коефіцієнт дорівнює 1, для метану – 25, для закису азоту – 298) [96, 101]. Ці коефіцієнти використовуються для представлення результатів інвентаризації в CO₂-еквіваленті, а їх невизначеність не враховується при оцінюванні загальної невизначеності.

4.4. Загальні підходи до об'єднання невизначеностей

Для аналізу невизначеностей результатів інвентаризації після визначення функцій щільності розподілу окремих величин та діапазону їх невизначеностей застосовують правила об'єднання невизначеностей для оцінок емісій парникових газів. Оцінку об'єднаної невизначеності можна отримати за допомогою двох методів: 1) на основі формул комбінування невизначеностей та 2) за допомогою моделювання невизначеностей методом Монте-Карло. Також існує і третій метод, більш теоретичний, він використовується лише для прямого вимірювання зміни запасу вуглецю на певному джерелі емісій. Такий метод нереально застосовувати на рівні всієї країни і він не виключає похибок вимірювальної техніки, але порівняно з іншими методами дає точніші результати [115].

У першому підході застосовують прості формули об'єднання невизначеностей окремих величин. Для обчислення невизначеності добутку невизначених величин використовується формула:

$$U_{total} = \sqrt{(U_1)^2 + (U_2)^2 + \dots + (U_n)^2}, \quad (4.19)$$

а для того, щоб обчислити невизначеність суми невизначених величин, застосовують формулу:

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot x_1)^2 + (U_2 \cdot x_2)^2 + \dots + (U_k \cdot x_k)^2}}{x_1 + x_2 + \dots + x_k}, \quad (4.20)$$

де U_{total} – результуюча відносна невизначеність, x_i – математичне сподівання невідомої величини X_i , U_i – відносна невизначеність цієї величини.

Підхід 1 також теоретично вимагає, щоб стандартне відхилення, поділене на середнє значення, було менше 0,3. На практиці, однак, підхід дасть змістовний результат, навіть якщо цей критерій дотримується нестрого і деякі кореляції зберігаються.

Багато країн, у тому числі і Польща, у інвентаризаційних звітах оцінюють невизначеність отриманих результатів за допомогою першого

підходу. Розвинуті країни розробляють власні методи для оцінювання невизначеності, модифікуючи та об'єднуючи уже відомі. Для прикладу, Австрія здійснює вимірювання зміни вуглецю на рівні джерел емісій, а потім за допомогою першого підходу об'єднує отримані результати. Для порівняння оцінок у інвентаризаційних звітах наведені невизначеності отримані також за допомогою першого і другого підходів.

На відмінну від першого підходу, метод Мотне-Карло можна застосовувати, якщо:

- невизначеності великі;
- розподіл випадкових величин не є гаусовим;
- алгоритми є складними функціями;
- існує кореляція між деякими з комплектів даних (коефіцієнтами емісії, статистичними даними тощо).

Суть методу Монте-Карло полягає у генеруванні псевдовипадкових вибірок вхідних даних відповідно до густини розподілу ймовірностей, заданої для кожної вхідної величини. Вибірки називаються „псевдовипадковими”, тому що генеруються певним алгоритмом, який називають генератором псевдовипадкових чисел. На вході такого оцінювання отримуємо відтворювані числові ряди (згідно з випадковими вхідними значеннями), які володіють заданими характеристиками. Якщо ж при оцінюванні результуючої невизначеності є дві або більше вхідних невизначених величин, тоді випадкові вибірки генерують для кожної з вхідних величин і таке одне випадкове число для кожного вхідного параметра вводиться у математичну модель для обчислення вихідної величини. Цей процес виконують достатню кількість разів для отримання множини оцінок на виході моделі. Множина отриманих оцінок є вибіркою значень функції щільності ймовірностей для досліджуваної величини. Оскільки моделювання методом Монте-Карло є чисельним методом, важливим елементом є точність отриманих результатів. Для її покращення збільшують кількість ітерацій.

Кількість реалізацій, на основі яких можна отримати оцінку математичного сподівання, що з заданою ймовірністю належить інтервалу шириною w можна визначити з такої нерівності [4]:

$$N > \left(\frac{2c\sigma}{w} \right)^2,$$

де σ – середньоквадратичне відхилення, w – ширина інтервалу, для якого оцінка математичного сподівання з ймовірністю α знаходиться у межах цього проміжку, c – межа для заданого довірчого інтервалу α нормально розподіленої величини $\Phi \approx N(0,1)$, $P(-c < \Phi < c) = \alpha$. Для оцінювання кількості реалізації таким методом необхідно спочатку згенерувати невелику вибірку, щоб оцінити значення σ .

Враховуючи, що при збільшенні вибірки оцінка математичного сподівання наближається до точного значення модельованої величини, альтернативним підходом до визначення точності отриманої оцінки є поступове збільшення кількості реалізації вибірки та порівняння результату оцінювання з результатами моделювання вибірки меншої довжини.

4.5. Результати аналізу невизначеностей при просторовому моделюванні емісій парникових газів

Описаний у попередньому підрозділі підхід для аналізу невизначеностей із застосуванням методу Монте-Карло використано для дослідження невизначеності інвентаризації парникових газів на основі невизначеності вхідних даних для видобувної та переробної промисловостей України та Польщі. Результати представлено у вигляді таблиць з величинами меж довірчих інтервалів для основних парникових газів та на різних рівнях. Оцінено також невизначеність сумарних емісій парникових газів для досліджуваних категорій.

Розроблений підхід до аналізу невизначеностей базується на використанні основних параметрів, які входять у математичний опис

емісійного процесу, та меж їх довірчих інтервалів для кожного джерела емісій (як точкового, так і площинного). Проте, у зв'язку з відсутністю таких детальних даних на відповідному детальному рівні (окремого заводу чи родовища), в реалізованих обчислювальних експериментах використано узагальнені для всієї країни („національні”) коефіцієнти та їх невизначеності.

4.5.1. Видобування і переробка палива

На основі отриманої бази геопросторових даних та розробленого підходу до аналізу невизначеностей емісій парникових газів здійснено обчислювальні експерименти з використанням методу Монте-Карло для дослідження невизначеності емісійних процесів, які виникають внаслідок видобування і переробки різних видів палива. При моделюванні можливих значень емісій парникових газів та відповідних діапазонів невизначеності зроблено припущення, що усі вхідні параметри є статистично незалежними (некорельованими) величинами.

Результати моделювання невизначеностей у видобувній промисловості Польщі за допомогою методу Монте Карло наведено у табл. 4.8 – табл. 4.10 (для кількості реалізацій 50 000).

Найвищою невизначеністю емісій парникових газів у видобувній промисловості характеризуються процеси летких емісій при видобутку кам'яного вугілля, нафти та газу. Наприклад, у табл. 4.10 представлено результати моделювання летких емісій та оцінки їх невизначеностей від видобувної діяльності на шахтах.

Результати моделювання демонструють значну невизначеність на рівні окремих емісійних об'єктів, що зумовлено недостатністю знань про леткі емісії, які виникають внаслідок видобування кам'яного вугілля, а також відсутність відповідної техніки, яка б здійснювала необхідні вимірювання. У табл. 4.10 представлено одержані результати моделювання невизначеностей летких емісій метану для десяти найбільших кам'яновугільних шахт Польщі у 2010 році.

Таблиця 4.8. Результати дослідження невизначеностей емісій парникових газів у нафтопереробній промисловості на рівні міст Польщі, 2010 рік

Місто	Емісії CO ₂ , Гг; невизначеності, %	Емісії CH ₄ , Гг; невизначеності, %	Емісії N ₂ O, Гг; невизначеності, %	Сумарні емісії, Гг CO ₂ -екв.; невизначеності, %
Плоцьк	3 936,04	0,11	0,02	3936,34
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Тшебіня	67,91	0,001	0,0003	67,9003
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Єдліче	11,95	0,0003	0,0001	11,95003
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Гданськ	1 248,28	0,03600	0,01	1 248,41
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Ясло	407,49	0,011	0,002	407,5
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Чеховіце	543,32	0,02	0,003	543,42
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51

У табл. 4.11 наведено отримані узагальнені результати дослідження невизначеностей емісій (сумарно від спалювання палива та леткі емісії) основних парникових газів (вуглекислого газу, метану, закису азоту та сумарні емісії в еквіваленті вуглекислого газу) від видобувної промисловості на основі статистичних даних щодо виробничої потужності у 2010 році в Україні, а також специфічних заводських та національних коефіцієнтів емісії.

Згідно з інвентаризаційними звітами України, сумарна невизначеність емісій у категорії видобувна промисловість становить 36,0%. Основний внесок у невизначеність вносить невизначеність оцінки емісій метану, яка оцінена на рівні 36,0% і викликана, в першу чергу, невизначеністю коефіцієнтів емісії метану, який вивільняється внаслідок видобування палива. Емісії вуглекислого газу у цій категорії також мають значну невизначеність, оскільки величину CO₂ важко обчислити, тому що ці емісії в основному виникають внаслідок спалювання метану у факелах.

Таблиця 4.9. Результати моделювання емісій від спалювання палива у коксовнях та відповідних невизначеностей по заводах Польщі (2010 р.)

Завод	CO ₂ Емісії, Мг; невизначеність, %	CH ₄ Емісії, Мг; невизначеність, %	N ₂ O Емісії, Мг; невизначеність, %	Сумарні емісії, МгCO ₂ -екв.; невизначеність, %
Коксовня Przyjaźń	464,408.5	2,756.6	603.8	466,722.0
	±3.6	-37.3..+49.3	-45.4..+68.1	-3.6..+3.7
Коксовня Jadwiga	50,018.4	968.5	65.0	50,154.675
	±3.6	-37.3..+49.3	-45.4..+68.1	-3.6..+3.7
Коксовня Dębieńsko	53,585.6	1,037.7	69.8	54,731.6
	±3,6	-37.3..+49.3	-45.4..+68.1	-3.6..+3.7
Коксовня Radlin	133,964.0	2,594.2	174.2	136,328.9
	±3.6	-37.3..+49.3	-45.4..+68.1	-3.6..+3.7
Коксовня Przyjaźń	133,964.0	2,594.2	174.2	136,328.9
	±3.6	-37.3..+49.3	-45.4..+68.1	-3.6..+3.7
Коксовня Częstochowa Nowa	232,204.2	4,496.6	301.9	236,936.8
	±3.6	-37.3..+49.3	-45.4..+68.1	-3.6..+3.7
Коксовня Makoszowy	206,434.0	4,150.7	268.4	210,996.3
	±3.6	-37.3..+49.3	-45.4..+68.1	-3.6..+3.7
S.A. Oddział w Zdzieszowicach	722,518.0	1,4527.5	939.5	724,486.3
	±3.6	-37.3..+49.3	-45.4..+68.1	-3.6..+3.7
Метал. завод im. Sendzimira	137,623.0	2,767.1	178.9	139,997.9
	±3.6	-37.3..+49.3	-45.4..+68.1	-3.6..+3.7

Одержані результати показали, що відносна невизначеність сумарних емісій парникових газів у еквіваленті вуглекислого газу найбільше залежить від невизначеностей емісійного коефіцієнта діоксиду вуглецю та статистичних даних. Невизначеність сумарних емісій майже не змінюється зі зміною невизначеності коефіцієнтів емісії закису азоту та метану, але відчутно зменшується при зменшені невизначеності коефіцієнта емісії вуглекислого газу та невизначеності статистичних даних (рис. 4.16). При зниженні, наприклад, на половину невизначеності коефіцієнтів емісії CH₄ невизначеність загальних результатів інвентаризації сумарних емісій

практично не змінюється (із 3,68% до 3,65%), натомість показник невизначеності сукупних емісій парникових газів при зменшенні невизначеності коефіцієнта емісії вуглекислого газу на 50% знижується із 3,68% до 2,63%.

Таблиця 4.10. Результати аналізу невизначеностей емісій парникових газів для кам'яновугільних шахт Польщі, 2010 рік

Шахта	Потужності видобування; 10 ³ т/рік	CH ₄ Емісійний коефіцієнт; тCO ₂ /т	CH ₄ Леткі емісії, Гг	Невизначеність, %
KWK Murcki Staszic	3.875	4.90	18.977	48.49
KWK Myslowice-Wesoła	3.229	4.91	19.029	48.49
KWK Wujek	4.982	4.91	24.466	48.49
Oddział KWK Jankowice	2.759	4.91	13.547	48.49
Oddział KWK Knurów-Szczygłowice	3.792	4.91	18.622	48.49
Oddział KWK Sośnica-Makoszowy	3.285	4.91	16.13	48.49
Oddział KWK Ziemowit	4.097	4.91	19.912	48.49
Oddział KWK Piast	4.613	4.87	22.423	48.49
KWK Wieczorek	3.405	4.9	16.548	48.49
KWK Bogdanka	5.351	4.91	26.011	48.49

Таблиця 4.11. Результати аналізу невизначеностей сумарних емісій для видобувної промисловості України, 2010 рік

Межі невизначеності, %			
CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Сумарні емісії
-38,94..+31,72	-45,82..+48,54	-2,8..+328,9	-44,47:+46,94

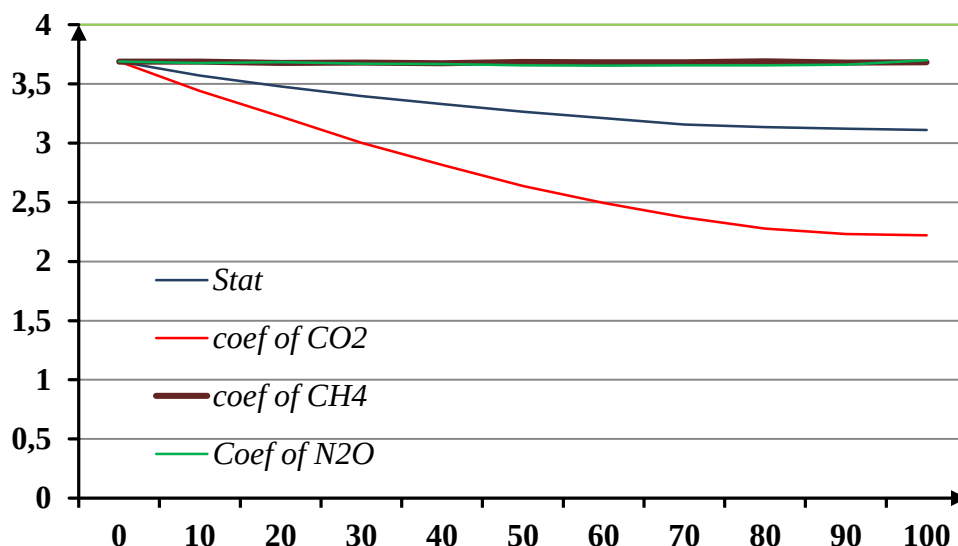


Рис. 4.16. Чутливість невизначеностей сумарних оцінок емісій парникових газів у видобувній промисловості до зміни невизначеностей (на P %) вхідних параметрів інвентаризації (метод Монте-Карло)

Тобто, попри великі невизначеності коефіцієнтів емісії для CH_4 та N_2O підвищення їх точності не має суттєвого впливу на зниження невизначеностей оцінок сумарних емісій парникових газів в CO_2 -еквіваленті, натомість найбільш ефективним є покращення знань про емісійні коефіцієнти вуглекислого газу та статистичні дані щодо обсягів спаленого палива у видобувній промисловості.

4.5.2. Промисловий сектор

Згідно з проведеними дослідженнями для національних інвентаризаційних звітів сумарна невизначеність оцінок емісій парникових газів у промисловому секторі Польщі складає 2,4% для вуглекислого газу, 13,5% для метану та 23,4% для закису азоту. Варто відзначити, що ці оцінки отримані за допомогою першого методу дослідження невизначеностей, а також було зроблено припущення, що всі вхідні дані є нормально розподіленими. У інвентаризаційних звітах України представлено лише сумарні невизначеності у енергетичному секторі без поділу на парникові гази та різні види господарської діяльності, відзвітована невизначеність становить 4,3%.

На основі отриманої бази геопросторових даних та розробленого підходу до аналізу невизначеностей емісій парникових газів здійснено обчислювальні експерименти з використанням методу Монте-Карло для об'єднання невизначеностей всіх вхідних параметрів математичної моделі, яка описує емісійні процеси у переробній промисловості (за даними 2010 року). Результати моделювання представлено у табл. 4.12 для Польщі та табл. 4.13 – для України.

Важливим елементом програмної реалізації такого дослідження невизначеності є MS Excel файл з вхідними даними, в якому кожному джерелу емісії поставлено у відповідність дані про спожите паливо, обсяги виробництва та специфічні коефіцієнти емісії.

Загальна невизначеність результатів інвентаризації парникових газів від спалювання палива у переробній промисловості в Польщі в 2010 році склала (%): для вуглекислого газу (-2,3: +2,4), метану (-18,7: +22,7) та закису азоту (-19,8,6: +31,4). Загалом, невизначеність отриманих результатів інвентаризації основних парникових газів у еквіваленті CO_2 знаходяться в межах від -2,4% до 2,5%. Відмінність результатів моделювання невизначеностей методом Монте-Карло від відзвітованих можна пояснити тим, що у цьому дослідженні використано несиметричні функції щільності емісійних коефіцієнтів, а також враховано специфіку використання палива в певному воєводстві.

У цілому невизначеність емісій парникових газів у секторі “1.A.2. Видобувна промисловість” в Україні за 2010 рік становить для: вуглекислого газу – (-5,8: +6,0), метану – (-38,5: +51,3) та закису азоту – (-52,3: +91,8). Невизначеність сумарних емісій у CO_2 -еквіваленті, отриманих внаслідок моделювання методом Монте-Карло, становить (-5,9%: +6,0%). Оцінки невизначеностей з розбиттям на області представлено у табл. 4.13. Відмінності у величинах невизначеностей для різних областей можна пояснити використанням різного палива, а також різними типами промисловості, представлених у тому чи іншому регіоні.

Таблиця 4.12. Результати дослідження невизначеностей емісій парникових газів у переробній промисловості на рівні областей Польщі, 2010 рік

Воєводство	Невизначеність (%)			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Сумарні емісії
Вармінсько-Мазурське	-5,8: +6,2	-22,6: +24,4	-21,4: +38,2	-5,9: +6,4
Великопольське	-4,0: +5,8	-22,8: +26,9	-24,4: +38,2	-4,3: +6,0
Західнопоморське	-5,8: +5,4	-22,7: +26,6	-21,4: +24,8	-5,9: +6,0
Куявсько-Поморське	-6,2: +6,4	-22,7: +26,8	-31,8: +49,6	-6,8: +6,9
Лодзинське	-5,4: +6,3	-22,8: +26,7	-26,4: +41,6	-5,7: +6,6
Люблінське	-4,0: +4,2	-22,4: +26,6	-26,9: +44,7	-4,4: +5,3
Любуське	-5,4: +6,4	-22,7: +26,7	-23,3: +31,2	-5,7: +6,8
Мазовецьке	-4,9: +5,7	-22,7: +26,6	-24,1: +37,9	-5,2: +6,0
Малопольське	-4,3: +5,1	-22,7: +26,6	-30,7: +46,1	-4,6: +5,4
Нижньосілезьке	-4,4: +6,9	-22,7: +26,6	-23,3: +31,4	-4,6: +7,2
Опольське	-3,9: +4,4	-22,3: +26,2	-26,3: +43,6	-4,1: +4,6
Підкарпатське	-5,8: +6,2	-22,8: +26,8	-24,2: +37,2	-6,2: +6,4
Підляське	-4,8: +5,4	-22,8: +26,8	-24,7: +39,0	-5,1: +5,9
Поморське	-4,2: +4,9	-22,6: +26,6	-26,4: +42,4	-4,6: +5,3
Свентокшиське	-4,4: +5,2	-22,7: +26,7	-22,6: +29,4	-4,6: +6,0
Сілезьке	-3,2: +4,2	-22,8: +26,9	-24,9: +39,4	-3,7: +5,0
Сумарні	-2,3: +2,4	-18,7: +22,7	-19,8: +31,4	-2,4: +2,5

Отримані результати показали, що вагомий вплив на сумарні невизначеності емісій мають оцінки вуглекислого газу. Незважаючи на те, що розподіли функцій щільності емісій закису азоту і метану є несиметричними, сумарні невизначеності по всіх трьох основних парникових газах дали майже симетричну функцію.

Таблиця 4.13. Результати дослідження невизначеностей емісій парникових газів у переробній промисловості на рівні областей в Україні, 2010 рік

Область	Невизначеність (%)			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Сумарні емісії
Республіка Крим	-6,4: +6,5	-42,3: +63,4	-61,6: +119,1	-6,4: +6,5
Вінницька	-6,5: +6,6	-40,5: +78,5	-63,2: +122,7	-5,4: +5,6
Волинська	-6,3: +6,5	-45,2: +60,4	-61,8: +118,2	-6,3: +6,5
Дніпропетровська	-6,3: +6,5	-50,3: +70,3	-61,0: +117,4	-6,3: +6,5
Донецька	-6,4: +6,6	-55,6: +72,7	-64,6: +124,7	-6,4: +6,6
Житомирська	-6,4: +6,6	-49,0: +71,4	-64,8: +124,8	-6,4: +6,6
Закарпатська	-6,2: +6,3	-38,4: +52,0	-60,9: +104,8	-6,1: +6,3
Запорізька	-6,4: +6,6	-49,0: +66,2	-63,4: +122,3	-6,4: +6,5
Ів-Франківська	-6,4: +6,6	-46,9: +72,8	-65,0: +125,6	-6,4: +6,6
Київська	-6,0: +6,1	-43,5: +66,0	-61,2: +101,7	-5,9: +6,1
Кіровоградська	-6,4: +6,6	-45,0: +69,6	-64,4: +123,7	-6,4: +6,6
Луганська	-6,4: +6,7	-50,5: +78,2	-66,2: +127,9	-6,4: +6,7
Львівська	-6,0: +6,2	-46,0: +60,3	-59,7: +103,0	-6,0: +6,2
Миколаївська	-5,5: +6,0	-40,0: +53,1	-62,2: +124,2	-5,6: +6,2
Одеська	-6,5: +6,6	-49,5: +76,9	-65,8: +127,0	-6,5: +6,6
Полтавська	-6,1: +6,2	-40,9: +65,9	-58,5: +99,9	-6,0: +6,2
Рівненська	-6,3: +6,5	-40,3: +61,2	-62,3: +118,7	-6,3: +6,5
Сумська	-6,5: +6,6	-48,5: +75,2	-65,6: +126,8	-6,5: +6,6
Тернопільська	-5,2: +5,7	-39,7: +51,8	-61,0: +120,3	-5,3: +5,8
Харківська	-6,5: +6,6	-50,0: +77,9	-66,1: +127,7	-6,5: +6,6
Херсонська	-6,4: +6,5	-40,5: +61,9	-62,6: +119,6	-6,4: +6,5
Хмельницька	-6,5: +6,6	-50,0: +77,6	-66,0: +127,7	-6,4: +6,6
Черкаська	-6,5: +6,6	-50,5: +78,3	-66,3: +128,2	-6,5: +6,6
Чернівецька	-6,5: +6,6	-49,5: +77,0	-66,0: +127,4	-6,5: +6,6
Чернігівська	-5,9: +6,1	-40,5: +62,8	-60,1: +99,8	-5,9: +6,1
Сумарні	-5,8: +6,0	-38,5: +51,3	-52,3: +91,8	-5,9: +6,0

Найбільш істотний вплив на загальну невизначеність оцінки емісій у цій категорії робить невизначеність емісій CO₂ у категорії «Чорна металургія», причому в основному невизначеність коефіцієнтів емісії і статистичних даних для газоподібного і твердого палива. Отже, для зменшення сумарної невизначеності результатів інвентаризації варто зменшити невизначеність коефіцієнтів емісії вуглекислого газу, особливо у металургії.

4.6. Висновки до розділу 4

Розроблено геоінформаційну технологію для моделювання та просторового аналізу емісій парникових газів, які виникають при видобуванні та переробці різних видів палива, а також під час спалювання палива у промисловості Польщі та України. Розроблена технологія включає в себе чотири основні етапи роботи: збір статистичної інформації, дезагрегацію даних з рівня країни на більш детальний рівень (воєводств, підрегіонів чи клітинок заданого розміру, наприклад 2 x 2 км), оцінювання емісій парникових газів за допомогою математичної моделі, яка описує досліджуваний процес для кожного об'єкта, а також оцінка невизначеностей отриманих результатів. Геоінформаційна технологія дає можливість представляти отримані результати інвентаризації за допомогою цифрових карт чи таблиць.

Введено поняття ретроспективного аналізу інвентаризаційних звітів та обґрунтовано актуальність такого типу аналізу. Оцінено точність проведеної інвентаризації на основі переглядів кадастрів емісій парникових газів з часом. Визначено параметр, який є індикатором на скільки окремо взята країна має добрі знання, що стосуються процедури інвентаризації парникових газів.

У розділі проаналізовано загальні підходи до аналізу невизначеностей просторового моделювання процесів емісії парникових газів у видобувній та переробній промисловості та обґрунтовано доцільність використання методу Монте-Карло для оцінювання невизначеностей емісій парникових газів. Цей

метод полягає у здійсненні аналізу невизначеностей обчислених емісій для кожного джерела, зокрема з використанням відповідних для цього джерела коефіцієнтів та їх невизначеностей, а також з врахуванням особливостей технологічних процесів. Цей метод допускає аналіз випадкових величин, що описуються як симетричними, так і несиметричними розподілами.

У результаті обчислювальних експериментів отримано значення невизначеностей емісій парникових газів для 95% довірчого інтервалу. Проаналізовано невизначеності результатів просторового моделювання емісій парникових газів у промисловості України та Польщі.

Здійснено аналіз отриманих результатів моделювання величин емісії парникових газів та меж їхніх довірчих інтервалів. Верифікацію отриманих результатів здійснено у порівнянні з даними з річних національних звітів про емісії парникових газів.

Показано, що здійснення аналізу невизначеності емісії парникових газів у промисловості є важливою компонентою побудови просторового кадастру емісій, оскільки дає змогу оцінити не тільки величину емісії, яка є неточним числом, але й визначити межі інтервалу, в якому знаходиться це значення.

Висновки

У дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання розроблення підходів, математичних моделей та геоінформаційної технології для просторового аналізу емісії парникових газів, які виникають внаслідок спалювання палива у промисловому секторі, а також при видобуванні та переробці викопного палива з врахуванням географічного розташування джерел емісії. При цьому отримано такі наукові та практичні результати:

1. Обґрунтовано актуальність вирішення наукового завдання розроблення методів та підходів до математичного моделювання та просторового аналізу процесів емісії парникових газів при видобуванні та переробці палива, а також при спалюванні викопного палива у промисловості. Встановлено, що досліджуваний сектор має великий потенціал для зменшення емісій парникових газів шляхом впровадження новітніх технологій у виробничі процеси.

2. Розроблено математичні моделі, які описують процеси емісії парникових газів у кам'яновугільній промисловості на рівні шахт та коксових заводів, які враховують територіальне розміщення джерел емісії та специфіку подання статистичної звітності, базуються на принципі дезагрегації даних про обсяги видобутку та переробки вугілля до рівня точкових джерел емісії та дають можливість оцінити леткі емісії метану у процесі видобутку та зберігання вугілля, а також емісії вуглекислого газу, закису азоту та метану, які виникають внаслідок спалювання викопного палива на коксохімічних заводах.

3. Розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів у нафтогазовій промисловості (емісії від видобування та переробки нафти, а також емісії від видобування природного газу), у яких у ролі індикатора дезагрегації статистичних даних використано потужності переробних заводів та кількість видобутої нафти чи газу і які дають можливість будувати

просторові кадастри емісії на рівні нафтогазових родовищ та нафтопереробних заводів.

4. Розроблено математичні моделі процесів емісії двоокису вуглецю, метану та закису азоту при використанні викопного палива у переробній промисловості (металургійній, хімічній, харчовій та інших), які базуються на принципі дезагрегації доступних статистичних даних про результати господарської діяльності на національному чи регіональному рівні до рівня окремо взятих підприємств, як точкових джерел емісії, чи промислових зон, як площинних джерел емісії, і враховують специфіку емісійних процесів на окремо взятому заводі чи підприємстві та дають можливість формувати просторові кадастри емісій.

5. Розроблено геоінформаційну технологію формування кадастру емісій парникових газів від видобувної та переробної промисловостей, структура якої включає модулі підготовки вхідних даних, дезагрегації даних про використане паливо з рівня країни чи регіону до рівня елементарних об'єктів, а також оцінювання емісій парникових газів з використанням математичних моделей досліджуваних процесів. Обґрунтовано доцільність здійснення обчислювальних експериментів та формування просторових кадастрів емісій діоксиду вуглецю, метану та закису азоту, а також сумарних емісій у CO_2 -еквіваленті, з використанням доступних статистичних даних.

6. Використовуючи засоби геоінформаційної системи здійснено просторовий аналіз емісій парникових газів від видобувної та переробної промисловостей Польщі та України. Створено геопросторові кадастри емісії парникових газів на рівні окремо взятих точкових чи площинних джерел. У результаті обчислювальних експериментів, отримано оцінки емісій на рівні елементарних ділянок території, які відображають внесок кожної такої ділянки у сумарні емісії.

7. Розроблено загальний підхід до аналізу невизначеності результатів просторової інвентаризації емісій парникових газів при видобуванні та переробці викопного палива, а також при спалюванні викопного палива у

промисловості, який базується на використанні методу Монте-Карло і полягає у здійсненні аналізу невизначеностей обчислених емісій для кожного джерела, зокрема з використанням відповідних для цього джерела коефіцієнтів та їх невизначеностей, а також з врахуванням особливостей технологічних процесів. Він допускає аналіз випадкових величин, що описуються як симетричними, так і несиметричними розподілами. В ході досліджень невизначеностей оцінок парникових газів здійснено ретроспективний аналіз інвентаризаційних звітів про емісії парникових газів та обґрунтовано актуальність такого типу аналізу. З використанням процедур дитрендингу оцінено точність проведеної інвентаризації на основі переглядів кадастрів емісій парникових газів з часом та визначено параметр, який є індикатором на скільки окремо взята країна має добрі знання, що стосуються процедури інвентаризації парникових газів.

Список використаних джерел

1. Березницкая М. В. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ в Украине за 1990-2010 гг. / [М. В. Березницкая, О. В. Бутрим, Г. Г. Панченко, Ю. В. Пироженко, А. П. Хабатюк]. – Киев : Министерство экологии и природных ресурсов Украины, 2012. – 530 с.
2. Бунь А. Р. Математичні моделі для інвентаризації парникових газів з урахуванням невизначеності / А. Р. Бунь // Моделювання та інформаційні технології. – Вип. 41. – 2007. – С. 151–158.
3. Бунь А. Р. Методи оцінки невизначеностей та їх використання в інформаційних технологіях інвентаризації парникових газів / А. Р. Бунь // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2008. – № 616. – С. 137–142.
4. Бунь А. Р. Методи та засоби аналізу процесів емісії парникових газів з врахуванням невизначеностей вхідних даних : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Бунь Андрій Ростиславович. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2009. – 185 с.
5. Бунь А. Р. Моделі та програмні засоби для аналізу динаміки емісій парникових газів та верифікації виконання зобов'язань / А. Р. Бунь, М. Ю. Лесів // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України. – 2008. – Вип. 45. – С. 172-180.
6. Бунь Р. А. Геоінформаційна технологія формування кадастру емісій парникових газів при виробництві електроенергії в Україні / Р. А. Бунь, П. І. Топилко, М. Ю. Лесів // Матеріали III-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції "Сучасні технології в економіці, менеджменті та освіті" (СІТЕМ-2012). – Львів : Львівська філія ПВНЗ "Європейський університет", 2012. – С. 206-208.
7. Бунь Р. А. Геоінформаційний підхід до інвентаризації парникових газів на Прикарпатті / Р. А. Бунь, Х. В. Гамаль, Н. І. Лапій, В. В. Смейко // Автоматика - 2008: Доповіді XV міжнар. конф. з автоматичного управління. – Ч. 2. – Одеса, 2008. – С. 707-710.

8. Бунь Р. А. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України / Р. А. Бунь, М. І. Густі, В. С. Дачук та ін.; За ред. Р. А. Буни. – Львів : УАД, 2004. – 376 с.
9. Бунь Р. А. Інформаційні технології просторової інвентаризації парникових газів у енергетичному секторі та аналіз невизначеності / Р. А. Бунь, Х. В. Бойчук, А. Р. Бунь, М. Ю. Лесів. – Львів : ПП Сорока Т.Б., 2012. – 464 с.
10. Бунь Р. А. Інформаційні технології формування кадастру емісій парникових газів Львівщини / Р. А. Бунь, Н. О. Шпак, Б. М. Матолич, Х. В. Бойчук, К. І. Дмитрів, О. Б. Яремчишин. – Львів : Видавничий дім «Укрпол», 2010. – 272 с.
11. Бунь Р. А. Математичні моделі для просторової інвентаризації парникових газів в енергетичній галузі Львівщини / Р. А. Бунь, Х. В. Гамаль // Моделювання та інформаційні технології. – Вип. 40. – 2007. – С. 167–175.
12. Бунь Р. А. Спеціалізоване програмне забезпечення для географічного аналізу та інвентаризації парникових газів / Р. А. Бунь, Б. Б. Любінський // Дев'ята відкрита наукова конференція професорсько-викладацького складу Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Тези доп. – Львів : Вид-во НУ “ЛП”, 2010. – С. 35.
13. Валах М. А. Просторовий аналіз емісії парникових газів від лінійних об'єктів: транспортний сектор Підкарпатського воєводства / М. А. Валах, Р. А. Бунь, М. О. Галушак, О. Я. Данило // Моделювання та інформаційні технології. – Київ, 2015. – Вип. 74. – С. 82-89.
14. Всесвітній фонд захисту дикої природи. Наслідки зміни клімату для України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://wwf.panda.org>
15. Галушак М. О. Математичне моделювання та аналіз невизначеності емісії парникових газів при видобуванні і переробці нафти у Польщі / М. О. Галушак, Р. А. Бунь, М. Йонас // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2015. – № 12. – С. 59-66.
16. Галушак М. О. Математичне моделювання та просторовий аналіз емісії парникових газів від використання викопного палива у металургійній

- промисловості Польщі / М. О. Галушак, Р. А. Бунь // Математичне моделювання та інформаційні технології : Зб. наук. праць. – Вип. 73. – Київ, 2014. – С. 99-104.
17. Галушак М. О. Просторове моделювання та аналіз процесів емісії парникових газів при видобуванні і переробці кам'яного вугілля у Польщі / Галушак М. О., Бунь Р. А. // Вісник Національного університету „Львівська політехніка”: № 814: Інформаційні системи та мережі. – Львів, 2015. – С. 434-443.
 18. Галушак М. О. Інформаційна технологія моделювання та просторового аналізу емісій парникових газів від видобування природного газу у Польщі / Галушак М. О., Бунь Р. А. // Матеріали 3-ї Міжнародної конференції з автоматичного управління та інформаційних технологій. – Київ, 2015. – С. 84-87.
 19. Галушак М. О. Геоінформаційна технологія моделювання та аналізу емісій парникових газів, які виникають при спалюванні викопного палива у хімічній промисловості Польщі / Галушак М. О., Бунь Р. А. / Праці IV Міжнародної науково-практичної конференції „Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки” (ПІКТ-2015). – Чернівці : Родовід, 2015. – С. 155-157.
 20. Галушак М. О. Математичне моделювання емісій парникових газів при коксуванні кам'яного вугілля у Польщі / Галушак М. О. / Актуальні проблеми дослідження довкілля: Зб. наук. праць VI Міжнародної науково-практичної конференції. – Т. 2. – Суми : СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2015. – С. 154-155.
 21. Галушак М. О. Особливості формування кадастру емісій парникових газів від використання палива у промисловості та будівництві Сілезького воєводства Польщі / Галушак М. О., Бунь Р. А., Топилко П. І. / Одинадцята Відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Збірник матеріалів. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – С. 148.
 22. Галушак М. О. Математичне моделювання процесів емісії парникових газів у результаті використання викопного палива: промисловість та будівництво Південної Польщі / Галушак М. О. // П'ятнадцята

- всеукраїнська (Десята міжнародна) студентська наукова конференція з прикладної математики та інформатики „СНКПМІ – 2012”. – Львів : ЛНУ, 2013. – С. 142-143.
23. Галушак М. О. Геоінформаційна технологія формування кадастру емісій парникових газів від використання палива промисловістю Підляського воєводства Польщі / М. О. Галушак, Р. А. Бунь // 10-та Відкрита наукова конференція ІМФН „PSC-IMFS-10”: Збірник матеріалів. – Львів : НУ”ЛП”, 2012. – С. J6-J7.
 24. Галушак М. О. Моделювання процесів емісії парникових газів у промисловому секторі Підляського воєводства Польщі / Галушак М. О., Бунь Р.А. // Інформаційні технології, економіка та право (ІТЕП-2012) : Матер. міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів. – Ч. 1. – Чернівці, 2012. – С. 69-70.
 25. Галушак М. Просторовий аналіз емісій парникових газів від використання викопного палива у підсекторі «Промисловість і будівництво» Східної Польщі / Галушак М. // 70-та студентська науково-технічна конференція : Секція „Прикладна математика та фундаментальні науки” : Тези доп. – Львів : НУ «ЛП», 2012. – С. 11-12.
 26. Галушак М. О. Екологічні аспекти емісії парникових газів у вугільній промисловості Польщі / Галушак М. О., Кадюк О. І. // Проблеми та перспективи розвитку забезпечення безпеки життєдіяльності : Зб. наук. праць X Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів. – Львів : ЛДУБЖ, 2015. – С. 158-160.
 27. Гамаль К. В. Разработка подхода к моделированию пространственного распределения эмиссий парниковых газов на примере их инвентаризации в жилищном секторе Закарпатской области Украины / К. В. Гамаль, О. И. Пылыпчак // Искусственный интеллект. – 2010. – № 4. – С. 342-349.
 28. Гамаль Х. В. Геоінформаційна технологія для просторового аналізу парникових газів в енергетичному секторі : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Гамаль Христина Володимирівна. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2009. – 246 с.

29. Гамаль Х. В. Математичні моделі та програмні засоби для просторового аналізу емісій парникових газів в енергетичному секторі Івано-Франківської області / Х. В. Гамаль, Н. І. Лапій // Моделювання та інформаційні технології. – Київ, 2008. – Вип. 45. – С. 190–197.
30. Гамаль Х. В. Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі Волинської області / Х. Гамаль, В. Теглівець // Матеріали III Міжнар. конф. молодих вчених "Комп'ютерні науки та інженерія" (CSE-2009). – Львів : НУ "ЛП", 2009. – С. 197-200.
31. Глобальний захист клімату. Світогляд №1, 2010 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/vavilov1-2010.pdf
32. Данило О. Я. Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів у житловому секторі. дис. ... канд. техн. наук : 01.05.02 / Данило Ольга Ярославівна. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2015. – 224 с.
33. Данило О. Я. Моделювання емісії парникових газів у житловому секторі західної України з використанням геоінформаційних технологій / О. Я. Данило, Ксу Ксіангян, Р. А. Бунь, М. Ю. Лесів // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2014. – № 9. – С. 130-136.
34. Данило О. Я. Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів від використання населенням твердих видів палива / Данило О. Я., Чарковська Н. В. // Інформатика та системні науки (ІСН-2014) : Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. / за ред. О. О. Ємця. – Полтава : ПУЕТ, 2014. – С.79-80.
35. Данило О. Моделювання емісії парникових газів від спалювання вугілля в Східній Польщі / О. Данило // 69-та наукова студентська конференція. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2011. □ – С. 37-38.
36. Данило О. Я. Цифрова карта населення України адаптована для проведення просторової інвентаризації парникових газів / Данило О. Я., Бунь Р. А. / Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : Матер. 3 Міжнар. наук.-практ. конф. – Вінниця, 2012. – С. 87-88.

37. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. URL: <http://ukrstat.gov.ua/> (дата доступу: 20.09.2016).
38. Зміна клімату, причини, наслідки, рішення / за ред. Н. А. Пустовіт. – Київ : Імідж-прінт, 2006. – 32 с.
39. Изменение климата, 2007 г.: физическая научная основа : Материал Рабочей группы I к Четвертому докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Соломон, С., Д. Чин, М. Мэннинг, Чен Женлинь, М. Маркис, К.Б. Аверит, М. Тигнор и Х.Л. Миллер (ред.). – МГЭИК, 2007.
40. Лесів М. Ю. Аналіз впливу структурних змін в емісіях парникових газів на загальну невизначеність результатів інвентаризації / М. Ю. Лесів // Восьма відкрита наук. конф. професорсько-викладацького складу Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Тези доп. – Львів : НУ "ЛП", 2009. – С. 47.
41. Лесів М. Ю. Аналіз змін в невизначеностях результатів інвентаризації парникових газів / М. Ю. Лесів, М. П. Сорочич // Проблеми екологічної безпеки та якості середовища: Зб. тез міжнар. наук.-практ. конф. – Львів, 2010. – С. 40-41.
42. Лесів М. Ю. Аналіз змін в невизначеностях результатів інвентаризації парникових газів від спалювання викопного палива / М. Ю. Лесів // Моделювання та інформаційні технології. – Вип. 58. – 2010. – С. 180-186.
43. Лесів М. Ю. Математичні моделі для просторової інвентаризації парникових газів в енергетичному секторі Хмельницької області / М. Ю. Лесів, Х. В. Бойчук // Актуальні проблеми інформаційних технологій, економіки та права: Матер. міжнар. наук.-практ. конф. – Чернівці, 2011. – С. 59-60.
44. Лесів М. Ю. Математичне моделювання та просторовий аналіз емісії парникових газів у прикордонних регіонах України : дис. ... канд. техн. наук : 01.05.02 / Лесів Мирослава Юріївна. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2011. – 195 с.
45. Лесів М. Ю. Просторове моделювання процесів емісії парникових газів: генерування тепло- та електроенергії у південній Польщі / Лесів М. Ю.,

- Карась Р. М., Топилко П. І., Сорочич М. П. // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2012. – № 6, Ч. 1. – С. 23-28.
46. Лесів М. Ю. Просторове моделювання емісій парникових газів у промисловості та будівництві південних регіонів Польщі / Лесів М. Ю., Боянівська Н. І. / Моделювання та інформаційні технології. – Вип. 67. – 2013. – С. 105-110.
 47. Любінський Б. Б. Архітектура спеціалізованого програмного модуля ГІС: побудова карт векторного формату / Б. Б. Любінський, І. О. Пеняк // Вісник Національного університету „Львівська політехніка” : № 783 : Інформаційні системи та мережі. – Львів, 2014. – С. 154-160.
 48. Любінський Б. Б. Оцінювання параметрів поверхневих джерел емісії при просторовій інвентаризації парникових газів / Любінський Б. Б., Данило О. Я. / Одинадцята Відкрита наук. конф. Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Збірник матеріалів. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – С. 147.
 49. Любінський Б. Б. Програмні засоби візуалізації результатів просторової інвентаризації парникових газів / Любінський Б. Б., Стрянець О. С., Чарковська Н. В. // Інформатика та системні науки (ІСН-2014) : Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. / за ред. О. О. Ємця. – Полтава : ПУЕТ, 2014. – С.198-200.
 50. Любінський Б. Б. Програмні засоби моделювання процесів емісії парникових газів у житловому секторі: просторовий аналіз для Житомирської області / Любінський Б. Б., Бунь Р. А. // Штучний інтелект. – Донецьк, 2013. – № 4. – С. 377-385.
 51. Любінський Б. Б. Оцінювання параметрів поверхневих джерел емісії при просторовій інвентаризації парникових газів / Любінський Б. Б., Данило О. Я. / Одинадцята Відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Збірник матеріалів : 13 червня 2013, Львів. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – С. 147.
 52. Мала гірнича енциклопедія: В 3-х т. / За ред. В. С. Білецького. – Донецьк: Донбас, 2004. – 388 с.

53. Основи технології гірничих робіт / За. ред. К. Ф. Сапицького. – К. : ІСДО, 1993. – 196 с.
54. Оцінка виконання Плану дій Україна-ЄС: довідник та сталий розвиток / Під ред. Н. Андрусевич. – Львів, 2009. – 104 с
55. Паливно-енергетичний комплекс України : Загальноукраїнський проект. Впуск перший / Редакційна рада : М. Мартиненко, В. Болгов, Н. Гороховська, Ю. Бойко, С. Тулуб. – Київ : Новий світ, 2006. –143 с.
56. Паливно-енергетичні ресурси України : 2010 рік : Статистичний збірник. – Київ : Державна служба статистики України 2011. – 316 с.
57. Промисловість Львівщини : Статистичний збірник. – Львів : Головне управління статистики у Львівській обл., 2011. – 195 с.
58. Просторове моделювання емісії парникових газів від стаціонарних джерел / Р. Бунь, Н. Чарковська, О. Данило, П. Топилко, М. Галушак, З. Нахорські, І. Хорабик-Пизель. – Львів : ПП Сорока Т.Б., 2016. – 480 с.
59. Результати використання котельно-пічного палива, теплоенергії та електроенергії : Статистичний збірник. – Київ: Державна служба статистики України 2011. – 79 с.
60. Рекомендації щодо створення національної системи оцінки викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів відповідно до міжнародних стандартів : Заключний звіт. Канадсько-українська програма екологічного співробітництва / [відп. викон. проекту – к.т.н. Іваненко Н. П.]. – Київ : Інститут загальної енергетики, 2002. – 48 с.
61. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. [в 5 т.] / [Х. С. Игглестон, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе (редакторы)]. – ИГЕС, Япония, 2006. – Т. 1 : Общие руководящие указания и отчетность. – 2006. – 309 с.
62. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. [в 5 т.] / [Х. С. Игглестон, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе (редакторы)]. – ИГЕС, Япония, 2006. – Т. 2 : Энергетика. – 2006. – 309 с.

63. Топилко П. І. Геоінформаційна технологія формування кадастру емісій парникових газів у електроенергетичному секторі України / П. І. Топилко, Р. А. Бунь // Штучний інтелект. – Донецьк, 2013. – № 4. – С. 432-440.
64. Топилко П. І. Алгоритми та програмні засоби врахування невизначеностей вхідних даних при інвентаризації парникових газів для Європейського Союзу / Топилко П. І., Данило О. Я., Йонас М., Лесів М. Ю., Бунь Р. А. / Інформаційні технології, економіка та право (ІТЕП-2012) : Матер. міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів. – Ч. 1. – Чернівці, 2012. – С. 69-70.
65. Топилко П. І. Математичне моделювання процесів емісії парникових газів при виробництві електроенергії та тепла в Україні з врахуванням невизначеності вхідних параметрів / Топилко П. І., Лесів М. Ю., Галушак М. О. / Одинадцята Відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук : Зб. матер. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – С. 146.
66. Топилко П. І. Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів при виробництві електро- та теплоенергії в Україні та Польщі : дис. ... канд. техн. наук : 01.05.02 / Топилко Петро Іванович. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2014. – 194 с.
67. Хімія і фізика горючих копалин / [В. І. Саранчук, В. В. Ошовський, Г. А. Власов, В. С. Білецький]. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2008. – 600 с.
68. Чарковська Н. В. Моделювання емісій парникових газів від скляної промисловості Польщі з використанням геоінформаційних технологій / Чарковська Н. В. // Матеріали 10-тої Відкритої наукової конференції ІМФН. – Львів : НУ"ЛП", 2012. – С. J4–J5.
69. Чарковська Н. В. Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторах Польщі : дис. ... канд. техн. наук : 01.05.02 / Чарковська Надія Василівна. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2015. – 224 с.
70. Чарковська Н. В. Моделювання процесів емісії закису азоту від випасання сільськогосподарських тварин у Польщі / Чарковська Н. В.,

- Стрямець О. С. // Матеріали 11-ї Відкритої наукової конференції ІМФН. – Львів : НУ“ЛП”, 2013. – С. 159-160.
71. Чарковська Н. В. Моделювання та просторовий аналіз емісійних процесів від внесення гною у сільськогосподарські ґрунти / Н. В. Чарковська // Матеріали III-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції "Сучасні технології в економіці, менеджменті та освіті". – Львів : Львівська філія ПВНЗ "Європейський університет", 2012. – С. 84-89.
 72. Чарковська Н. В. Моделювання та просторовий аналіз емісійних процесів від целюлозно-паперової та харчової промисловостей Польщі / Чарковська Н. В., Стрямець О. С., Бунь Р. А. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": № 783 : Інформаційні системи та мережі. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – С. 478-486.
 73. Чарковська Н. В. Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів від хімічної промисловості Польщі / Н. В. Чарковська, Р. А. Бунь // Моделювання та інформаційні технології. – Київ, 2013. – Вип. 69. – С.118-125.
 74. Яремчишин Е. Б. Специализированная геоинформационная система моделирования и анализа эмиссии парниковых газов в промышленном секторе на региональном уровне / Е. Б. Яремчишин, Р. А. Бунь, К. В. Гамаль // Штучний інтелект. – 2009. – N. 3. – С. 152-159.
 75. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, eds. // [IPCC]. – Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan. – 2006. – 5 volumes. Available online at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
 76. 2011 Informator SPC. Przemysł cementowy w liczbach. Stowarzyszenie Przemysłu Cementowego. – Available online at: http://www.polskicement.com.pl/3/3/artykuly/16_105.pdf
 77. Addressing uncertainty in oil and natural gas industry greenhouse gas inventories. Technical considerations and calculation methods / [IPIECA, Energy API, CONCAWE] // London, 2009. – 186 p.

78. Andres R. J. A one degree by one degree distribution of carbon dioxide emissions from fossil-fuel consumption and cement manufacture, 1950-1990 / R. J. Andres, G. Marland, I. Fung // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1996. – V. 10, No3. – P. 419-429.
79. Annual report 2010 Chemical Industry in Poland. Available online at: http://www.pipc.org.pl/attachments/article/74/raport_roczny_2010.pdf
80. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). – European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau. – Available online at: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/GLS_Adopted_03_2012.pdf
81. Bieda B. Life cycle inventory processes of the ArcelorMittal Poland (AMP) S.A. in Krakow, Poland – basic oxygen furnace steel production / B. Bieda // *Int. J Life Cycle Assess.* – 2012. – V. 17. – P. 463-470.
82. Boychuk Kh. Regional spatial cadastres of GHG emissions in Energy sector: Accounting for uncertainty / Boychuk Kh., Bun R. // *Climatic Change*. – 2014. – V. 124, Is. 3. – P. 561-574.
83. Bun A. Analysis and minimization of uncertainty of results of multilevel greenhouse gases inventory / A. Bun, M. Gusti, Kh. Hamal, R. Bun // *Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems “ENVIROMIS’2006”*. – Tomsk, Russia, 2006. – P. 45.
84. Bun A. Verification of compliance with GHG emission targets: Annex 1 countries / A. Bun, Kh. Hamal, M. Jonas // *Proc. of the 2nd Intern. Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories*. – Laxenburg, Austria, 2007. – P. 21–26.
85. Bun R. A spatial GHG inventory on regional level: Accounting for uncertainty / Bun R., Hamal Kh., Gusti M., Bun A. // *Climatic Change*. Springer Netherlands. – 2010. – V. 103, Is. 1. – P. 227-244.
86. Bun R. Information technology for spatial inventory of greenhouse gases on regional level / R. Bun, Kh. Hamal, M. Gusti, O. Savchyn // *Internet in the Information Society: Application of the Information Technologies*. – Dąbrowa Górnicza, Poland : WSB, 2007. – P. 154-163.

87. Bun R. Multilevel model for greenhouse gas inventory and uncertainty analysis concerning the Kyoto Protocol implementation / R. Bun, M. Gusti, A. Bun, K. Hamal // International Conference on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006). – Yamaguchi, Japan, 2006. – P. 118–119.
88. Bun R. Spatial GHG inventory: Analysis of uncertainty sources. A case study for Ukraine / Bun R., Gusti M., Kujii L. et al. // Water, Air, & Soil Pollution: Focus. – Springer Netherlands, 2007. – Vol. 7, Is. 4-5. – P. 483-494.
89. Bun R. Spatial inventory of greenhouse gases on regional level / R. Bun, Kh. Hamal., M. Gusti et al. // Information Technologies in Environmental Engineering “ITEE 2007” : Third International ICSC Symposium, Oldenburg, Germany, 2007. – Springer, 2007. – P. 271–280.
90. Bun R. High resolution spatial inventory of GHG emissions from stationary and mobile sources in Poland: summarized results and uncertainty analysis / Rostyslav Bun, Zbigniew Nahorski, Joanna Horabik-Pyzel, Olha Danylo, Nadiia Charkovska, Petro Topylko, Mariia Halushchak, Myroslava Lesiv, Oleksandr Striamets / 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Kraków, Poland: Proceedings. – Warszawa : SRI PAS, 2015. – P. 41-48.
91. Carbon Control and Competitiveness Post 2020: The Cement Report Final Report February 2014. – Available at:
<http://www.climatestrategies.org/research/our-reports/category/61/384.html>
92. Charkovska N. Mathematical modeling and spatial analysis of emission processes in Polish industry sector: cement, lime and glass production / Charkovska N., Bun R., Nahorski Z., Horabik J. // Econtechmod. – 2012. – V. 1, no.4. – P. 17-22.
93. 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.
94. Charkovska N. Uncertainty analysis of GHG spatial inventory from the industrial activity: A case study for Poland / Nadiia Charkovska, Mariia

- Halushchak, Rostyslav Bun, Matthias Jonas / 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Kraków, Poland: Proceedings. – Warszawa : SRI PAS, 2015. – P. 57-63.
95. Clarke L. Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations / L. Clarke, J. Edmonds, H. Jacoby et al // U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington, DC, USA. – SAP 2.1, 2007. – 154 p.
 96. Climate Change Connection – CO₂ equivalent. – Available at:
http://www.climatechangeconnection.org/emissions/CO2_equivalents.htm
 97. CO₂ emissions from fuel combustion: 1971–2005/ [IEA] // International Energy Agency, Paris. – 2007. – 576 p.
 98. Corine Land Cover 2000 seamless vector data. – Available at:
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-2006>
 99. Danylo O. Modeling and spatial analysis of GHG emissions in the residential sector: case-study for the Silesian Voivodeship in Poland / Olha Danylo, Rostyslav Bun, Oleksander Striamets, Petro Topylko // Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2013). – Lviv, 2013. – P. 43-44.
 100. Danylo O. Spatial modeling of greenhouse gas emissions from burning biomass in the residential sector in Volyn region / Olha Danylo, Bogdan Lyubinsky // Computer Science & Engineering: Proceedings of the 6th International Conference of Young Scientists CSE-2013. – Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – P. 112-113.
 101. Direct Global Warming Potentials - AR4 WGI Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing [Електронний ресурс]. URL: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html
 102. Działające kopalnie węgla kamiennego w Polsce [Електронний ресурс]. – Режим доступ – <http://gornictwo.wnp.pl/kopalnie/>
 103. Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.0. / [EC-JRC/PBL]. – 2009. Available at:
<http://edgar.jrc.ec.europa.eu>

104. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2007. Technical Report No. 16. – Copenhagen, Denmark: European Environment Agency. – Available at:
http://reports.eea.europa.eu/EMEP_CORINAIR5/en/page002.html.
105. Environmental protection. Municipal wastewater treatment plants. Sewage sludge generated during the year. – Available at:
<http://www.stat.gov.pl/bdlen/>
106. Ermolieva T. Carbon emission trading and carbon taxes under uncertainty / T. Ermolieva, Y. Ermoliev, G. Fischer et al. // Climatic Change. – V. 103 (1- 2). – 2010. – P. 277–289.
107. European Environment Agency. – Available at:
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps>
108. Faostat. – Available at: <http://faostat.fao.org/site/550/default.aspx#ancor>
109. Fifth Assessment Report (AR5). Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. – Available online at: AR5. <http://www.ipcc.ch/report/ar5>
110. Food sector in Poland. Economic Information Department. Polish Information and Foreign Investment Agency. Warsaw, 2011. – Available online at: <http://www.paiz.gov.pl>.
111. Gallego F. J. A population density grid of the European Union / F. J. Gallego // Population and Environment. – 2010. – V. 31. – P. 460-473.
112. Gawlik L. Results of research on inventory of methane fugitive emission from coal mining system / Gawlik L., Grzybek I. // Archiwum Ochrony Srodowiska (Instytut Podstaw Inżynierii Srodowiska PAN), 2003. – V. 29(1). – P. 3-23.
113. GEIA: Global Emission Inventory Activity. Available at: <http://geiacenter.org>.
114. Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2010, 2011. – GUS, 2012. – Available online at: http://www.stat.gov.pl/gus/5840_3674_ENG_HTML.htm
115. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories / Penman Jim, Dina Kruger, Ian Galbally et al. // [IPCC]. – 2000.

116. Halushchak M. Modeling and spatial analysis of greenhouse gas emissions from fuel combustion in the industry sector in Poland / M. Halushchak, R. Bun, N. Shpak, M. Valakh // *Econtechmod.* – 2016. – Vol. 5, Is. 1. – P. 19-26.
117. Halushchak M. Spatial inventory of GHG emissions from fossil fuels extraction and processing: An uncertainty analysis / Mariia Halushchak, Rostyslav Bun, Matthias Jonas, Petro Topylko / 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Kraków, Poland: Proceedings. – Warszawa : SRI PAS, 2015. – P. 64-70.
118. Halushchak M. Taking advantage of the UNFCCC Kyoto policy process: What can we learn about learning? / Halushchak M., Jonas M., Żebrowski P., Jarnicka J., Bun R., Nahorski Z. // Public Scientific Conference of Institute of Applied Mathematics and Fundamental Science. – Lviv : LPNU, 2016. – P. 112-113.
119. Halushchak M. Spatial inventory of greenhouse gas emissions in the industry sector / Mariia Halushchak / Proceedings of the YSSP Late Summer Workshop 2013. – Laxenburg, Austria : IIASA, 2013. – P. 26.
120. Hamal K. Spatial cadastres of GHG emissions: Accounting for uncertainty / K. Hamal, R. Bun, N. Shpak, O. Yaremchyshyn // 3rd Intern. Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories : Proceedings. – Lviv : LPNU, 2010. – P. 81-90.
121. Hamal Kh. Carbon dioxide emissions inventory with GIS / Kh. Hamal // *Artificial Intelligence.* – Donetsk, 2008. – № 3. – P. 55-62.
122. Hamal K. Reporting GHG Emissions: Change in Uncertainty and its Relevance for the Detection of Emission Changes / Hamal K. // Interim Report IR-10-003, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2010. – 40 p.
123. Harrison M. R. Methane Emission from the Natural Gas Industry / Harrison M. R., Shires T. M., Wessels J. K., Cowgill R. M. – 1997. – EPA/GOO/SR-96/080.
124. IMPRESAREO: Improving the spatial resolution of air emission inventories using Earth observation data / Final Report of an EC research project co-funded by the Environment and Climate Programme within the topic

- “Space techniques Applied to Environmental Monitoring and Research”. – Culham, UK, 2001. – 143 p.
125. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report (AR4), Working Group 1 (WG1), Chapter 2, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. – 2007. – 212 p.
 126. International Cement Review. – Available online at: <http://www.cemnet.com>
 127. International Environmental Agency (IEA). – Available online at: <http://www.iea.org>.
 128. Jarnicka J. A method for estimating time of evolution of precision and accuracy of GHG inventories from revised reports / Jolanta Jarnicka, Zbigniew Nahorski / 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Kraków, Poland: Proceedings. – Warszawa : SRI PAS, 2015. – P. 64-70.
 129. Jonas M. Comparison of preparatory signal analysis techniques for consideration in the (post-) Kyoto policy process / M. Jonas, M. Gusti, W. Jeda, Z. Nahorski, S. Nilsson // Climatic Change. – V. 103. – 2010. – P. 175-213.
 130. Jonas M. Prior to economic treatment of emissions and their uncertainties under the Kyoto Protocol: scientific uncertainties that must be kept in mind / M. Jonas, S. Nilsson / Accounting for climate change. Uncertainty in greenhouse gas inventories – verification, compliance, and trading. – Springer, 2007. – P. 75-91.
 131. Jonas M. Benefits of dealing with uncertainty in greenhouse gas inventories: introduction / M. Jonas, G. Marland, W. Winiwarter et al // Climatic Change. Springer Netherlands. – 2010. – V. 103, Is. 1. – P. 3-18.
 132. GLC 2000 (Global Land Cover) data layer. – Joint Research Centre, Italy, 2005. – Available online at: <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php>
 133. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. – United Nations, 1998. – 20 p. – Available online at: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

134. Lesiv M. Analysis of change in relative uncertainty in GHG emissions from stationary sources for the EU 15 / M. Lesiv, A. Bun, M. Jonas // Climatic Change. – 2014. – V. 124, Is. 3. – P. 505-518.
135. Lesiv M. Changes in uncertainty due to structural changes in GHG emissions considering EU's "20-20-20" targets / M. Lesiv, M. Jonas, R. Bun // Proc. of the Workshop "Information Logistic". – Bielsko-Biała, Poland : CIM, 2009. – P. 10-17.
136. Lesiv M. Geoinformation technologies and models for spatial analysis of GHG emissions: energy production in eastern Polish regions / Lesiv M., Bun R., Topylko P. // Proceedings of the International Workshop "Methods and Applications of Artificial Intelligence", 22-23 September 2011. – Bielsko-Biała, Poland : CIM, 2011. – P. 38-48.
137. Lesiv M. Influence of structural changes in emissions on total uncertainty / M. Lesiv. – IIASA IR-12-018. – International Institute for Applied Systems Analysis Laxenburg, Austria, 2012. – 16 p.
138. Lesiv M. Method and tool to develop a forest map by using GWR model in R: case study for Ukraine / Myroslava Lesiv, Dmitry Schepaschenko, Oleksandr Striamets, Zbigniew Nahorski // Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2013), November 11-16, 2013. – Lviv, 2013. – P. 6-7.
139. Lesiv M. Preparatory signal detection for the EU-27 Member States under EU burden sharing — advanced monitoring including uncertainty (1990–2007) / Lesiv M., Bun A., Hamal K., Jonas M. – IIASA IR-11-005. – 2011. – 55 p.
140. Lesiv M. Spatial analysis of GHG emissions in eastern Polish regions: energy production and residential sector / Lesiv M., Bun R., Shpak N., Danylo O., Topylko P. // Econtechmod. – 2012. – Vol. 1, N. 2. – P. 17-23.
141. Lesiv M. Uncertainties of results of GHG inventories: Analysis of dynamics and undershooting / M. Lesiv, A. Bun // Young Scientists School and International Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences. – Krasnoyarsk, Russia, 2009. – P. 53-54.
142. Limpert E. Log-normal distributions across the sciences / E. Limpert, W. A. Stahel, M. Abbt // Bioscience. – 2001. – V. 51, Is. 5. – P. 341–352.

143. Lindley S. J. Procedures for the estimation of regional scale atmospheric emissions – an example from the North West region of England / S. J. Lindley, W. S. Longhurst, A. F. R. Warson, D. E. Conland // *Atmospheric Environment*. – 1996. – V. 30, Is. 17. – P. 3079–3091.
144. Luyssaert S. Old-growth forests as global carbon sinks / S. Luyssaert, E. D. Schulze, A. Börner, A. Knohl, et al // *Nature*. – V. 455. – 2008. – P. 213-215.
145. Lyubinsky B. B. Software tools to handle the layers in a specialized GIS analyzing greenhouse gas emissions / B. B. Lyubinsky, V. Yu. Khmelovskiy, O. Danylo // *Computer Science & Engineering: Proceedings of the 6th International Conference of Young Scientists (CSE-2013)*. – Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – P. 166-167.
146. Mały Rocznik Statystyczny Polski 2010. – Warszawa GUS, 2010. – 289 s.
147. Marland G. Global, regional, and national fossil fuel CO₂ emissions / G. Marland, T. A. Boden, R. J. Andres, A. L. Brenkert, C. A. Johnston // *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. – Oak Ridge, TN, USA, 2003. – P. 34-43.
148. Marland G. How uncertain are estimates of CO₂ emissions? / G. Marland, K. Hamal, M. Jonas // *Journal of Industrial Ecology*. – 2009. – V. 13, Is. 1. – P. 4-7.
149. Marland G. Trends: A Compendium of Data on Regional, and National CO₂ Global Change: Global, Regional, and National fossil fuel emissions / G. Marland, T. A. Boden, R. J. Andres et al. // *Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge 29 30*. – 2008. Available at: <http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/overview.html>.
150. Nahorski Z. Processing national CO₂ inventory emissions data and their total uncertainty estimates / Z. Nahorski, W. Jeda // *Water Air Soil Pollution: Focus*. – V. 7, Is. 4-5. – 2007. – P. 513-527.
151. Najlepsze dostępne techniki (BAT) wytyczne dla produkcji stali. Stalownie elektryczne z odlewaniem stali. – Warszawa : Ministerstwo Środowiska, 2005. – 35 s. – Available online at: <http://ippc.mos.gov.pl/ippc/custom/BAT%20-%20stalownie%20elektryczne.pdf>

152. National Inventory Reports (2003-2013) under the UNFCCC Treaty. – Available online at:
http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/5270.php
153. Oda T. A very high-resolution (1 km×1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights / T. Oda, S. Maksyutov // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2011. – V. 11, Is. 2. – P. 543-556.
154. Oda T. Uncertainty associated with fossil fuel carbon dioxide (CO₂) gridded emission datasets / Tomohiro Oda, Lesley Ott, Petro Topylko, Mariia Halushchak, Rostyslav Bun, Myroslava Lesiv, Olha Danylo, Joanna Horabik-Pyzel / 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Kraków, Poland: Proceedings. – Warszawa : SRI PAS, 2015. – P. 124-129.
155. Ochrona Srodowiska 2013. Główny Urząd Statystyczny, 2012. – Available online at: http://www.stat.gov.pl/gus/5840_1523_ENG_HTML.htm
156. Olivier G. J. A 1990 global emission inventory of anthropogenic sources of carbon monoxide on 1°x1° developed in the framework of EDGAR/GEIA / G. J. Olivier, J. P. J. Bloos, J. M. Berdowski et al. // *Chemosphere: Global Change Science*. –1999. – V. 1, Is. 1. – P. 1–17.
157. Ometto J. P. Uncertainties in greenhouse gases inventories – expanding our perspective / Ometto J. P., Bun R., Jonas M., Nahorski Z., Gusti M. // *Climatic Change*. – 2014. – V. 124, Is. 3. – P. 451-458.
158. Orthofer R. Spatial and temporal disaggregation of emission inventories / R. Orthofer, W. Winiwarter // *Air Pollution Emissions Inventory* [Power H., Baldasano J. M. (Eds.)]. – Southampton: Computational Mechanics Publications. – 1998. – Vol. 3. – P. 51–70.
159. Poland's National Inventory report 2012: Greenhouse Gas Inventory for 1988-2010. – Warszawa : National Centre for Emission Management at the Institute of Environmental Protection - National Research Institute, 2012. – Available online at:
http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/6598.php.

160. Prather M. J. Tracking uncertainties in the causal chain from human activities to climate change / M. J. Prather, J. E. Penner, J. S. Fuglestvedt, et al. // *Geophysical Research Letters*. – 36, L05707. – 2009. – 19 p.
161. Produkcja wyrobów przemysłowych w 2010 r., Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2011. – Available online at:
http://www.stat.gov.pl/gus/5840_792_PLK_HTML.htm
162. Rainer R. Best Available Techniques (BAT). Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. Integrated Pollution Prevention and Control / Rainer Remus, Miguel A. Aguado-Monsonet, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho. – Joint Research Centre, 2013.
163. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 1: Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions; Volume 2: Greenhouse Gas Inventory Workbook; Volume 3: Greenhouse Gas Inventory Reference Manual. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). / [IPCC] Working Group I (WG I) Technical Support Unit. – 1997. – Available online at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
164. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Software Manual. Greenhouse Gas Inventory Software for the Workbook. Instruction Manual. – Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996. – 23 p.
165. Rocznik statystyczny przemysłu 2011. – Główny Urząd Statystyczny, 2012. – Available online at: http://stat.gov.pl/gus/5840_3921_PLK_HTML.htm
166. Rypdal K. Uncertainties in greenhouse gas emissions inventories — Evaluation, comparability, and implications / K. Rypdal, W. Winiwarter // *Environmental Science and Policy*. – V. 4, Is. 2-3. – 2001. – P. 107-116.
167. Sektor chemiczny w Polsce. – Warszawa: Departament Informacji Gospodarczej, Polska Agencja Informacji i Inwestycji Zagranicznych S.A., 2013. – 16 s.
168. Searchinger T. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change / T. Searchinger, R. Heimlich, R. A. Houghton, et al. // *Science*. – V. 319. – 2008. – P. 1238-1240.

169. Statistical Atlas. Eurostat regional yearbook 2012. – Available online at:
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
170. Striamets O. Geodistributed analysis of forest phytomass: Subcarpathian voivodeship as a case study / Striamets O., Lyubinsky B., Charkovska N., Stryamets S., Bun R. // *Econtechmod.* – 2014. – V. 3, no.1. – P. 95-104.
171. Topylko P. Spatial greenhouse gas (GHG) inventory and uncertainty analysis: A case study for electricity generation in Poland and Ukraine / Petro Topylko, Mariia Halushchak, Rostyslav Bun, Tomohiro Oda, Myroslava Lesiv, Olha Danylo / 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Kraków, Poland: Proceedings. – Warszawa : SRI PAS, 2015. – P. 49-56.
172. Topylko P. Uncertainty of greenhouse gases spatial inventory: power and heat production / Petro Topylko, Rostyslav Bun, Oleksander Striamets, Olha Danylo // Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2013). – Lviv, 2013. – P. 15-16.
173. Topylko P. Geoinformation technology for spatial inventory of greenhouse gas emissions: electricity and heat generation in Poland / Topylko P., Lesiv M., Bun R., Nahorski Z., Horabik J. // *Econtechmod.* – 2013. – V. 2, N. 2. – P. 51-58.
174. United Nations Framework Convention on Climate Change. – United Nations, 1992. – 24 p. – Available online at:
http://unfccc.int/essential_background/convention/background/items/2853.php.
175. van der Werf G. R. CO₂ emissions from forest loss / G. R. van der Werf, D. C. Morton, R. S. DeFries, et al. // *Commentary, Nature Geoscience.* – V. 2. – 2009. – P. 737-738.
176. Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements / Committee on Methods for Estimating Greenhouse Gas Emissions, National Research Council. – National Academies Press, Washington, 2010. – 124 p. – Available online at:
http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12883
177. Winiwarter W. Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories: a case study for Austria / W. Winiwarter,

K. Rypdal // *Atmospheric Environment*. – 2001. – V. 35, Is. 32. – P. 5425-5440.

178. Zebrowski P.. Assessing the improvement of GHG inventories: can e capture diagnostic learning?/ Piotr Zebrowski, Matthias Jonas, Elena Rovenska / 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Kraków, Poland: Proceedings. – Warszawa : SRI PAS, 2015. – P. 64-70.
179. Zużycie paliw i nośników energii w 2010 r. – Warszawa : Główny Urząd Statystyczny, 2011.

Довідки

про використання результатів дисертаційного дослідження



"Затверджую"
Професор з наукової роботи
Національного університету
"Львівська політехніка"

проф. Чухрай Н.І.

2016 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи "Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів від використання палива у промисловості України і Польщі" аспіранта кафедри прикладної математики Галушак Марії Омелянівни, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, при виконанні держбюджетних тем та госпдоговірних робіт Національного університету "Львівська політехніка"

Ми, що нижче підписалися, начальник НДЧ, к.т.н., доц. Жук Л.В. та члени комісії: завідувач відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г.В., заступник начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М. та зав. кафедри прикладної математики, д.ф.-м.н., проф. Костробій П.П. цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри прикладної математики Галушак М.О. використано під час виконання наукових завдань у рамках держбюджетних тем та робіт за міжнародними грантами кафедри прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка", зокрема:

- гранту 7РП ЄС "Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів" (грант 7РП ЄС – Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES; 2010-2014 pp.);

В рамках гранту Галушак М.О. розробила геоінформаційну технологію та математичні моделі, методи і алгоритми просторової інвентаризації емісій парникових газів при використанні викопного палива у промисловості, а також при добуванні і переробці корисних копалин у Польщі).

- українсько-австрійського проекту „Просторово-часове оцінювання невизначеності кадастрів емісії парникових газів: ретроспективний аналіз для Австрії та України та ефективне прогнозування" (угода М/196-2015 від 16.11.2015 р., номер держреєстрації 0115U006500 та угода М/85-2016 від 27.07.2016 р.; номер держреєстрації 0116U005309);

В рамках проекту Галушак М.О. розробила метод ретроспективного аналізу невизначеностей інвентаризацій парникових газів, спричинених покращенням знань та структурними змінами в емісіях, на основі проаналізованих відмінностей між діагностичними та прогностичними невизначеностями.

- українсько-китайського проекту "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень" (угода № М/12-2013 від 25.04.2013 р.; номер держреєстрації 0113U001997 та угода № М/125-2014 від 24.06.2014 р.; номер держреєстрації 0114U003703);

В рамках проекту Галушак М.О. обґрунтувала базові математичні описи для дезагрегації статистичних даних про використане викопне паливо у промисловому секторі до рівня точкових та площинних джерел у металургійній, хімічній та харчовій промисловості, а також створила відповідні бази геопросторових даних.

- держбюджетної теми ДБ/Інформ “Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень” (2013-2014 рр., номер державної реєстрації 0113U003181);

В рамках теми Галушак М.О. розробила підходи до створення геоінформаційної технології формування просторових кадастрів емісій парникових газів з врахуванням невизначеності.

Використання розроблених Галушак М.О. математичних моделей, методів та програмних засобів моделювання процесів емісії парникових газів від використання викопного палива у промисловому секторі України та Польщі дало можливість сформувати зручні для сприйняття бази геопросторових даних емісій як на рівні окремо взятих точкових та площинних джерел емісії, так і на рівні регіонів. Методи оцінювання невизначеності результатів просторової інвентаризації з врахуванням розподілів використовуваних вхідних даних дали можливість дослідити невизначеність результатів інвентаризації парникових газів на регіональному рівні.

Начальник НДЧ,
канд. техн. наук, доц.

Л.В. Жук

Члени комісії:
Зав. відділу НОСНД,
канд. техн. наук

Г.В. Лазько

Заст. нач. ПФВ

Т.М. Чулой

Зав. кафедри
прикладної математики,
докт. фіз.-мат. наук, проф.

П.П. Костробій

Nasz znak: SD-074-05/14

Warszawa, dn. 13 lutego 2014 r.

Z A Ś W I A D C Z E N I E

o wdrożeniu rezultatów naukowych doktoranta Uniwersytetu Narodowego „Politechnika
Lwowska” **Marii Halushchak**

Niniejszym zaświadcza się, że w Instytucie Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie zostały wdrożone następujące teoretyczne i praktyczne rezultaty prac doktoranta **Marii Halushchak**:

- metody modelowania i przestrzennej analizy emisji gazów cieplarnianych w procesie wykorzystania paliw kopalnych w sektorze przemysłu na terenie Polski;
- georozproszona baza danych głównych punktowych i powierzchniowych źródeł emisji pochodzących ze spalania węgla, gazu ziemnego i ropy w hutnictwie, przemyśle chemicznym, przemyśle spożywczym i innych;
- technologia geoinformacyjna dla potrzeb przestrzennej inwentaryzacji gazów cieplarnianych ze spalania paliw kopalnych w przemyśle;
- rezultaty przestrzennej analizy w postaci katastrof emisji dwutlenku węgla, metanu i tlenu azotu ze spalania paliw kopalnych w sektorze przemysłu; analiza niepewności otrzymanych wyników.

Opracowane modele matematyczne i technologie geoinformacyjne umożliwiły budowę przestrzennych katastrof emisji gazów cieplarnianych ze spalania paliw kopalnych w sektorze przemysłu na obszarze Polski z uwzględnieniem specyfiki regionalnej. Prace zostały zrealizowane w ramach projektu UE GESAPU – *Geoinformation Technologies, Spatio-Temporal Approaches, and Full Carbon Account For Improving Accuracy of GHG Inventories* (FP7-PEOPLE-2009, Projekt Marie Curie Nr 247645) w latach 2011-2014.

DYREKTOR

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski

Інститут системного аналізу
Польської академії наук
Вул. Невельська, 10, 01-447 Варшава, Польща
Тел. +48 22 38 10 100
+48 22 38 10 275
Факс. +48 22 38 10 105
Електронна пошта: ibs@ibspan.waw.pl
Сторінка в інтернеті: WWW.ibspan.waw.pl

Номер SD-074-05/14

Варшава, 13 лютого 2014 р.

Д О В І Д К А

про впровадження наукових результатів аспіранта Національного університету "Львівська політехніка" **Марії Галушак**

Цим підтверджується, що в Інституті системного аналізу Польської академії наук у Варшаві впроваджено такі теоретичні та практичні результати аспіранта **Марії Галушак**:

- методи моделювання та просторового аналізу емісії парникових газів у процесі використання викопних палив у секторі промисловості на території Польщі;
- георозподілена база даних основних точкових та площинних джерел емісії, пов'язаних із спалюванням вугілля, природного газу та нафти в металургії, хімічній промисловості, харчовій промисловості та інших;
- геоінформаційна технологія для потреб просторової інвентаризації парникових газів від спалювання викопних палив у промисловості;
- результати просторового аналізу у вигляді кадастрів емісії двоокису вуглецю, метану та закису азоту від спалювання викопних палив у секторі промисловості; аналіз непевності отриманих результатів.

Розроблені математичні моделі та геоінформаційні технології дали можливість побудувати просторові кадастри емісії парникових газів від спалювання викопних палив у секторі промисловості для території Польщі, з урахуванням регіональної специфіки. Роботи проводились у рамках проекту ЄС GESAPU "Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів" (FP7-PEOPLE-2009, Marie Curie Project No.247645) в 2011-2014 роках.

Директор

{нерозбірливий підпис}

Проф. Д-р хаб. Інж. Збігнєв Нагурський



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

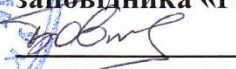
Природний заповідник "Розточчя"

81070 Львівська обл., Яворівський район, смт. Івано-Франкове,
вул. Січових Стрільців, 7, тел (03259)3-33-91, zaproz25@gmail.com



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Природного
заповідника «Розточчя»

 **Я.С. Бовт**

«17» жовтня 2016 р.

АКТ

**про використання результатів дисертаційної роботи
на тему «Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових
газів від використання палива у промисловості України і Польщі»
аспіранта кафедри прикладної математики Національного
університету «Львівська політехніка» Галушак Марії Омелянівни**

Даний акт укладено про те, що при науковому обґрунтуванні створення транскордонного білатерального українсько-польського біосферного резервату "Розточчя" використано низку результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри прикладної математики Національного університету «Львівська політехніка» Галушак Марії Омелянівни. Зокрема, використано наступне:

- математичні моделі та підходи до просторового аналізу емісії парникових газів від використання викопного палива у промисловості на сусідніх із резерватом територіях;
- інформаційну технологію формування геопросторових наборів даних про емісії парникових газів від точкових та площинних джерел при використанні викопного палива у технологічних процесах на сусідніх із резерватом територіях;
- методи оцінювання невизначеностей основних параметрів процесів емісії парникових газів, а також методи аналізу невизначеності з врахуванням особливостей кожного виду палива, що використовується на сусідніх із резерватом територіях.

Використання розроблених Галушак М.О. математичних моделей та геоінформаційних технологій дало можливість проаналізувати результати антропогенного впливу на природне середовище в сусідніх із резерватом територіях, зокрема процеси емісії парникових газів у промисловому секторі з врахуванням розташування промислових об'єктів та економічних потреб населення.

Заступник директора
з наукової роботи,
к.с.-г.н.
старший науковий співробітник

Г.В. Стрямець



"Затверджую"

Проректор з науково-педагогічної роботи

Національного університету

"Львівська політехніка"

Давидчак О.Р.

31.10.2016 р.

А К Т

про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи аспіранта Галушак Марії Омелянівни на тему "Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів від використання палива у промисловості України і Польщі" у навчальний процес на кафедрі прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка"

Даним актом засвідчується, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри прикладної математики Галушак М.О. на тему "Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів від використання палива у промисловості України і Польщі" впроваджено в навчальний процес кафедри прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка", а саме:

- підходи до просторового моделювання екологічних процесів, пов'язаних з видобуванням та переробленням вугілля, нафти і газу, оцінювання невизначеності результатів математичного моделювання екологічних процесів, а також створення геоінформаційних систем просторового моделювання використано в лекційному курсі „Просторове моделювання екологічних процесів” для студентів 1-го курсу освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр" (спеціальність 113 – „Прикладна математика”, спеціалізація 0102 – „Математичне та комп'ютерне моделювання”) у таких темах:
 - тема № 6: Просторове моделювання екологічних процесів, пов'язаних з видобуванням та переробленням вугілля, нафти і газу;
 - тема № 15: Невизначеність результатів математичного моделювання екологічних процесів;
 - тема № 23: Геоінформаційний підхід до просторового моделювання емісії парникових газів;
- підходи до формування математичних моделей екологічних процесів, пов'язаних з використанням викопного палива у переробній промисловості та будівництві, підготовки вхідних даних для математичного моделювання, засади реалізації обчислювальних експериментів з математичного моделювання складних екологічних процесів, а також підходи до верифікації результатів математичного моделювання використано в лекційному курсі „Математичні моделі екологічних процесів” для студентів 1-го курсу освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр" (спеціальність 113 – „Прикладна

математика”, спеціалізація 0102 – „Математичне та комп’ютерне моделювання”) у таких темах:

- тема № 8: Формування математичних моделей екологічних процесів, пов’язаних з використанням викопного палива у переробній промисловості та будівництві;
- тема № 13: Підготовка вхідних даних для математичного моделювання складних екологічних процесів.
- тема № 14: Принципи реалізації обчислювальних експериментів з математичного моделювання складних екологічних процесів.
- тема № 16: Верифікація результатів математичного моделювання екологічних процесів.

Розроблені Галушак М.О. підходи до побудови геоінформаційної системи просторового аналізу емісій парникових газів у промисловості, відповідні алгоритми та програмні засоби аналізу дають студентам можливість: оволодіти основними підходами до моделювання екологічних процесів; вивчити принципи формування математичних моделей та отримання вхідних даних для математичного моделювання; ознайомитися з основними підходами до моделювання процесів емісії парникових газів на національному і регіональному рівнях; ознайомитися з принципами реалізації сучасних геоінформаційних систем для потреб екології та охорони довкілля; оволодіти основними математичними методами просторового моделювання; ознайомитися з основними принципами використання геоінформаційних систем.

Лектор курсів
докт. техн. наук, проф.



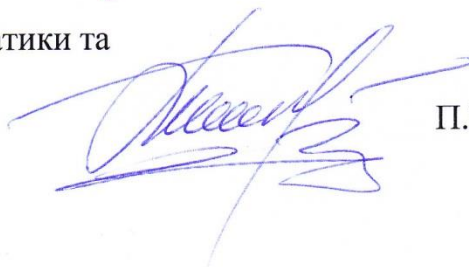
Р.А. Бунь

Завідувач кафедри
прикладної математики,
докт. фіз.-мат. наук, проф.



П.П. Костробій

Директор
Інституту прикладної математики та
фундаментальних наук,
докт. фіз.-мат. наук, проф.



П.І. Каленюк