

*Submission: They Are All Wrong!* / W. R. Stone // *IEEE Antennas and Propagation*, 2003. – Vol. 45. – № 4. – P. 47–49. 21. Sullivan, D. *Invisible Web Gets Deeper* [Electronic resource] / D. Sullivan // *Search Engine Report*. – 2002. – Access mode: <http://searchenginewatch.com/sereport/article.php/2162871>. – Title from the screen. 22. *The Content Management Possibilities Poster* [Electronic resource] / Metatorial Services, Inc. – Retrieved 20 July 2010. – Access mode: <http://metatorial.com/pagea.asp?id=poster>. 23. Vysotska, V. *Web Content Processing Method for Electronic Business Systems* / V. Vysotska, L. Chyrun [Electronic resource] // *International Journal of Computers & Technology*. – 2013. – Vol 12, № 2. – P. 3211–3220. – Access mode: <http://cirworld.com/index.php/ijct/article/view/3299>. – Title from the screen. 24. Vysotska, V. *Designing features of architecture for e-commerce systems* [Electronic resource] / V. Vysotska, L. Chyrun // *MEST Journal*. – Vol. 2, No.1. – 2014. – P. 57–70. – Access mode: [http://mest.meste.org/MEST\\_1\\_2014/R\\_06.pdf](http://mest.meste.org/MEST_1_2014/R_06.pdf). – Title from the screen. 25. Vysotska, V. *Analysis and evaluation of risks in electronic commerce* / V. Vysotska, I. Rishnyak, L. Chyrun // *Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics (CAD Systems in Microelectronics, CADSM '07): 9th International Conference, Lviv, 24 February 2007: proceedings*. – P.332–333.

УДК 004.942

М. О. Галушак, Р. А. Бунь

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра прикладної математики

## ПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПІД ЧАС ВИДОБУВАННЯ І ПЕРЕРОБЛЕННЯ КАМ'ЯНОГО ВУГІЛЛЯ У ПОЛЬЩІ

© Галушак М.О. Бунь Р.А., 2015

Розроблено математичні моделі для просторового аналізу процесів емісії парникових газів, які виникають при видобуванні і переробці кам'яного вугілля у Польщі. Створено цифрову карту розміщення шахт і коксовень. Удосконалено геоінформаційну технологію, за допомогою якої сформовано георозподілену базу даних і здійснено необхідні обчислення. Отриманні оцінки емісії парникових газів представленні за допомогою цифрових карт.

**Ключові слова:** геоінформаційна технологія, математичне моделювання, емісія парникових газів, просторова інвентаризація, вугільна промисловість.

**Mathematical models for the spatial analysis of the processes of greenhouse gases emission from the mining and transformation of coal in Poland were elaborated. The digital maps of mines's and coking's places were created. GIS technology, which makes it possible to form a geo-distributed database was improved and the necessary calculations were done. The obtained assessment of greenhouse gas emissions was represented by the digital thematic map.**

**Keywords:** geoinformation technology, mathematical modeling, greenhouse gas emission, spatial inventory, coal industry.

### Вступ. Постановка завдання та його актуальність

Глобальна зміна клімату – одна із найгостріших екологічних проблем, які постали перед людством сьогодні. Збільшення концентрації парникових газів в атмосфері нашої планети зумовлює так званий “парниковий ефект”, який викликає підвищення середньорічної температури на Землі. Причиною кліматичних змін є порушення вуглецевого балансу у біосфері Землі, використання викопного палива та неефективне споживання виробленої енергії.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є зменшення концентрації парникових газів у атмосфері. Для досягнення цієї мети було підписано низку міжнародних угод щодо встановлення допустимих меж емітування парникових газів. Для перевірки дотримання угод необхідно оцінювати емісії. З цією метою було створено Міжнародну групу експертів зі зміни клімату (МГЕЗК), яка розробила загальноприйняті методики створення національного кадастру емісій парникових газів. Такий кадастр забезпечує оцінки емісій на рівні країни загалом. Тому для ефективного скорочення емісій парникових газів важливою є інформація про територіальне розташування джерел 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 кам’яного вугілля” основними точковими джерелами емісії є шахти і заводи з перероблення кам’яного вугілля (кокові комбінати). Інвентаризація у цьому секторі здійснювалась лише на національному рівні без визначення розташування джерел і без врахування їх особливостей. Під час видобування і перероблення кам’яного вугілля у атмосферу потрапляють леткі емісії метану і вуглекислого газу, а також виникає емісія парникових газів під час спалювання викопного палива. За даними національних інвентаризаційних звітів, у 2010 році емісії метану під час видобування кам’яного вугілля становили 339 Гг, а при спалюванні палива на кокових заводах здійснено емісії в атмосферу 2883Гг вуглекислого газу, 0,07Гг метану і 0,01Гг закису азоту. Просторова інвентаризація парникових газів у вугільній промисловості Польщі ще не здійснювалась, тому розроблення математичних моделей, які б описували процеси емісії у цій галузі, а також геоінформаційної технології просторового аналізу, є актуальним науковим завданням.

#### **Аналіз останніх досліджень**

МГЕЗК розробила методики для інвентаризації парникових газів на глобальному та національному рівнях [11]. Ця група експертів створила також класифікацію джерел емісії парникових газів від усіх видів економічної діяльності, яку використовують у всьому світі для моніторингу дотримання міжнародних угод щодо зменшення концентрації парникових газів у атмосфері нашої планети. Українські науковці Х. В. Бойчук (Гамаль), А. Р. Бунь, М. Ю. Лесів, П. І. Топилко та Н. В. Чарковська розробили і удосконалили геоінформаційні технології і відповідні математичні моделі, які описують процеси емісії та абсорбції парникових газів для просторового аналізу цих процесів у різних секторах економічної діяльності: енергетичний сектор, промисловість, сільське та лісове господарства [1, 3, 6, 7]. Такі дослідження дають можливість створювати просторові кадастри емісій парникових газів. Х. В. Бойчук розробила математичні моделі для просторового аналізу емісій парникових газів у енергетичному секторі Львівської області [2, 5]. У цій роботі було здійснено просторову інвентаризацію емісії метану при добуванні кам’яного вугілля на прикладі шахт у Львівській області.

#### **Мета та формування цілей статті**

Мета цієї роботи – розроблення геоінформаційної технології та математичних моделей для оцінювання процесів емісії парникових газів у вугільній промисловості та здійснення їх просторової інвентаризації. Для досягнення поставленої мети було вирішено такі завдання:

- проаналізовано доступні статистичні дані про видобування і переробку кам’яного вугілля у Польщі;
- сформовано базу даних з доступною інформацією про вугільну промисловість, обсяги видобування та перероблення вугілля;
- побудовано цифрову карту розміщення шахт і кокових заводів як точкових об’єктів на території Польщі;
- розроблено математичний опис процесів емісії парникових газів, які виникають внаслідок видобування кам’яного вугілля та спалювання викопного палива під час коксування;
- розроблено спеціалізовану геоінформаційну технологію для просторового оцінювання емісій парникових газів на основі створених математичних моделей із використанням сформованої геопросторової бази даних із вхідною інформацією про вугільну промисловість;

- здійснено обчислювальні експерименти з оцінювання емісій парникових газів у досліджуваній галузі – як летких емісій, так і емісій, спричинених використанням палива, та проведено просторовий аналіз отриманих результатів.

### Специфіка емісійних процесів у вугільній промисловості Польщі

Вугільна промисловість – це галузь паливної промисловості, підприємства якої здійснюють видобування, збагачення і брикетування кам'яного вугілля [8]. Основним парниковим газом, який виникає у цьому секторі, є метан. Метан ( $\text{CH}_4$ ) 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 на буре, а потім – на кам'яне вугілля та антрацит. Ступінь вуглефікації визначає кількість утвореного метану, а кількість метану, який міститься у вугіллі, залежить переважно від тиску та 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. Як тільки метан вивільняється з вугілля, він рухається крізь вугільні пласти до місць з нижчим тиском (наприклад, до вугільної шахти) і, відповідно, вивільняється в атмосферу [4].

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 °С і витримки 11–15 годин при цій температурі, внаслідок чого паливо розкладається з утворенням летких продуктів і твердого залишку коксу. У вугільній промисловості розрізняють два види емісій – “леткі” емісії, які виникають під час видобування і перероблення твердих видів палива, і емісії, які виникають від спалювання палива. Відповідну класифікацію наведено на рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема емісій парникових газів, які виникають при видобуванні і переробці твердих видів палива

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 видобування, перероблення і транспортування вугілля. Певна кількість  $\text{CH}_4$  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 належить і вуглекислий газ, який виникає внаслідок коксування кам'яного вугілля [11]. Емісії діоксиду вуглецю, метану і закису азоту, що виникають від спалювання палива – це емісії від використання викопного палива (вугілля чи природного газу) в 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, переважно кам'яного вугілля (його частка становить понад 75%). За видобуванням 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 видобування. На території Польщі функціонує 25 шахт, найбільшими з них є КWK “Bogdanka”, КWK “Wujek” та “КWK Piast” [9].

Переробленням 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. Це зумовлено тим, що найбільші металургійні заводи розташовані саме у цих воєводствах, а кокс – це основне паливо у металургії.

### Математичні моделі емісійних процесів

Просторова інвентаризація емісій парникових газів полягає у визначенні розташування джерел емісії і оцінюванні емісій від таких джерел. На відмінну від традиційної інвентаризації на рівні країни, просторова враховує особливості джерел та специфічні для кожного джерела коефіцієнти емісії, що дає можливість будувати детальніші емісійні кадастри. Будуючи такі кадастри емісії у вугільній промисловості, відповідні шахти та підприємства з перероблення кам'яного вугілля представляємо як точкові об'єкти (адже їхні розміри невеликі порівняно з розміром країни, тому площею заводу можна знехтувати). Для інвентаризації летких емісій парникових газів, які виникають під час видобування кам'яного вугілля, використовуємо такий математичний опис:

$$E_{coal}^{g_l}(\xi_n) = E_{coal,m}^{g_l}(\xi_n) + E_{coal,p}^{g_l}(\xi_n), \quad (1)$$

де  $E_{coal}^{g_l}(\xi_n)$  – річні леткі емісії парникового газу  $g_l$ , які виникають внаслідок видобування кам'яного вугілля на  $\xi_n$ -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  $\xi_n$ -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:

$$E_{coal,m}^{g_l}(\xi_n) = \frac{A_{coal}^{\Sigma} \cdot P_{coal}(\xi_n)}{\sum_{j=1}^N P_{coal}(\xi_j)} \cdot K_{coal,m}^{g_l}, \quad (2)$$

$$E_{coal,p}^{g_l}(\xi_n) = \frac{A_{coal}^{\Sigma} \cdot P_{coal}(\xi_n)}{\sum_{j=1}^N P_{coal}(\xi_j)} \cdot K_{coal,p}^{g_l}, \quad (3)$$

де  $A_{coal}^{\Sigma}$  – річне видобування кам'яного вугілля у Польщі;  $P_{coal}(\xi_n)$  – потужність  $\xi_n$ -ї шахти;  $K_{coal,m}^{g_l}$ ,  $K_{coal,p}^{g_l}$  – коефіцієнт емісії  $g_l$ -го парникового газу на  $\xi_n$ -му підприємстві, відповідно, під час видобування кам'яного вугілля та післявидобувних процесів (зберігання і транспортування) кам'яного вугілля.

Процесам емісії парникових газів від спалювання викопного палива під час перероблення кам'яного вугілля відповідає такий математичний опис:

$$E_{coke}^{g,f}(\eta_k) = D_{stat,coke}^f \cdot K_{coke}^f(\eta_k) \cdot K_{em,coke}^{g,f}(\eta_k), \quad (4)$$

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  $\eta_k$ ;  $g$  – 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'єкта  $\eta_k$ ;  $K_{em,coke}^{g,f}(\eta_k)$  – коефіцієнт емісії  $g$ -го парникового газу від спалювання  $f$ -го виду палива на потреби коксового заводу  $\eta_k$  [13].

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

$$K_{coke}^f(\eta_k) = \frac{C(\eta_k)}{\sum_i C(\eta_i)}, \quad (5)$$

$$\eta_k, \eta_i \in \Omega_{coke}, \quad k, i = \overline{1, K}, \quad (6)$$

де  $C(\eta_k)$  – обсяги виробництва коксу на  $k$ -му заводі;  $\Omega_{coke}$  – множина заводів з перероблення кам'яного вугілля;  $K$  – їх загальна кількість.

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

$$E_{coke}^{gl}(\eta_k) = \frac{C(\eta_k)}{\sum_{i=1}^K C(\eta_i)} \cdot K_{coke}^{gl}(\eta_k), \quad (7)$$

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

Тоді сумарні емісії

$$E_{coalInd}^\Sigma = \sum_{g \in G} \left\{ W_g \left[ \sum_{f \in F} \sum_{\eta_k} E_{coke}^{g,f}(\eta_k) + \sum_{\eta_k} E_{coke}^g(\eta_k) + \sum_{\xi_n} E_{coal}^g(\xi_n) \right] \right\}, \quad (8)$$

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,  $W_{CO_2} = 1$ ,  $W_{CH_4} = 25$ ,  $W_{N_2O} = 298$ . Для здійснення обчислювальних експериментів з використанням описаних вище математичних моделей використано статистичну інформацію на рівні країни про кількість видобутого вугілля та кількість використаного на коксових заводах палива. 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 [11] та польських національних інвентаризаційних звітів [12].

### Логічна структурна схема реалізації просторової інвентаризації

Створена геоінформаційна система для просторової інвентаризації парникових газів у вугільній промисловості являє собою моделюючий комплекс, у якому реалізовано процедури інвентаризації цих газів відповідно логічною структурою, що представлена на рис. 2. Програмні модулі написано мовою програмування Basic з використанням середовища MapBasic 10.0. Структура геоінформаційної системи включає у себе три модулі: Modmaps, Mod\_dis і Mod\_inventory. Основана функція модуля Modmaps – 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 візуалізовані на рис. 3 дві цифрові карти: карту діючих вугільних шахт і карту коксових

заводів у Польщі. Використовуючи модуль Mod\_dis, дезагреговано дані про діяльність (обсяги видобутого вугілля та виробленого коксу) з рівня країни до рівня окремої взятої шахти чи заводу з перероблення кам'яного вугілля. Обчислені дезагреговані дані записуються у відповідні колонки геопросторової бази 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.

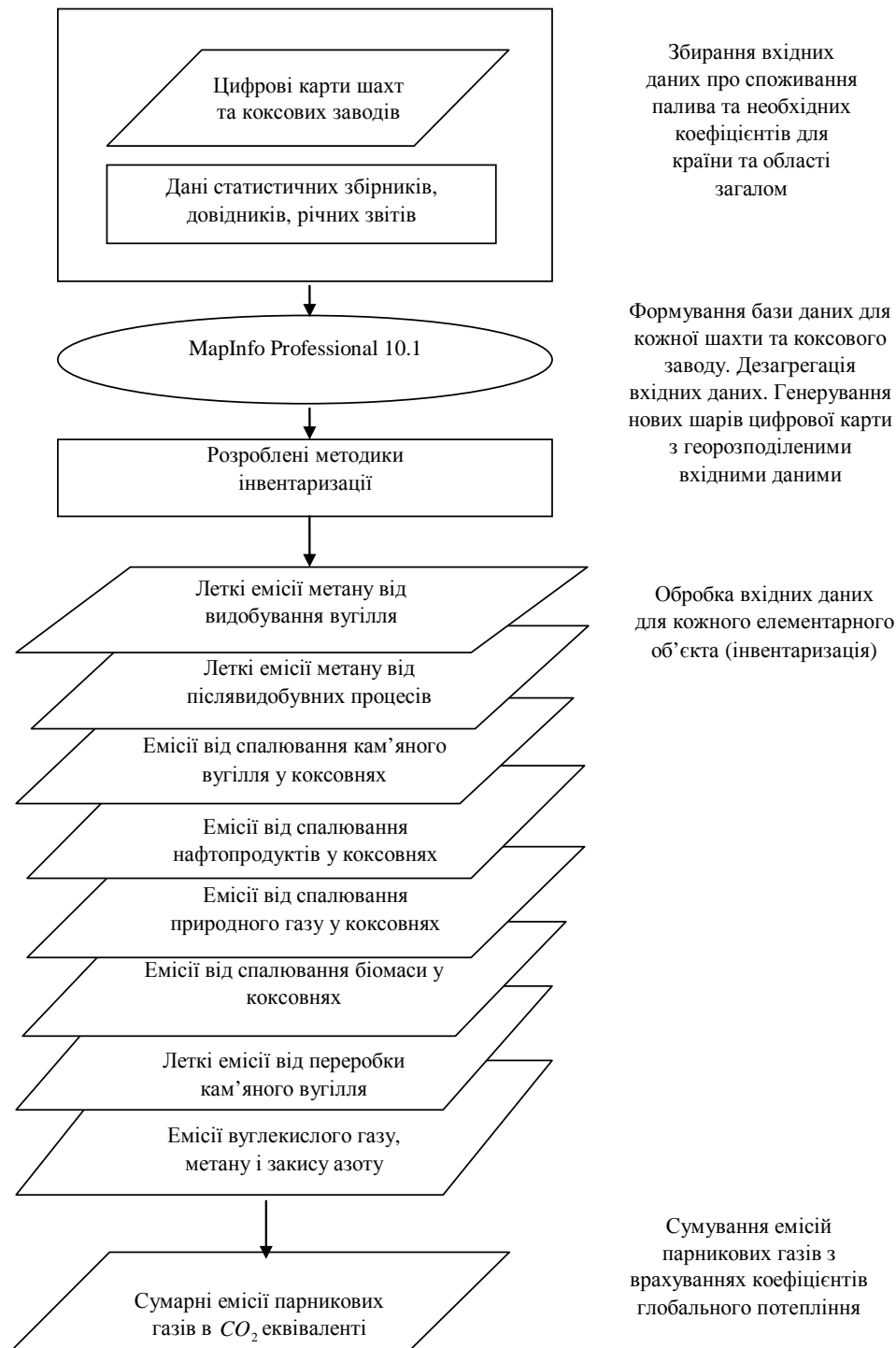


Рис. 2. Логічна структурна схема реалізації просторового моделювання та комплексу інвентаризації парникових газів

Вхідні та вихідні дані наведено у вигляді таблиці (стовпці відповідають за відповідні шари цифрової карти), елементи якої мають певну географічну прив'язку. Кожен рядок таблиці відповідає певній шахті чи коксовому заводу з даними про розташування (географічні координати) та потужності або обсяги видобування/переробки кам'яного вугілля на цьому об'єкті, а також іншу необхідну для дезагрегації статистичних даних інформацію.

### Геопросторові результати аналізу емісії парникових газів у вугільній промисловості Польщі

Для створення геопросторових кадастрів емісії парникових газів розроблено геоінформаційну технологію, яка використовує статистичну інформацію, дані про обсяги чи потужності видобування та перероблення кам'яного вугілля на шахтах/підприємствах, а також цифрові карти [10]. Здійснено обчислювальні експерименти з оцінювання емісії парникових газів у вугільній промисловості, результати інвентаризації збережено у вигляді геопросторової бази даних, яка має прив'язку до географічних координат.

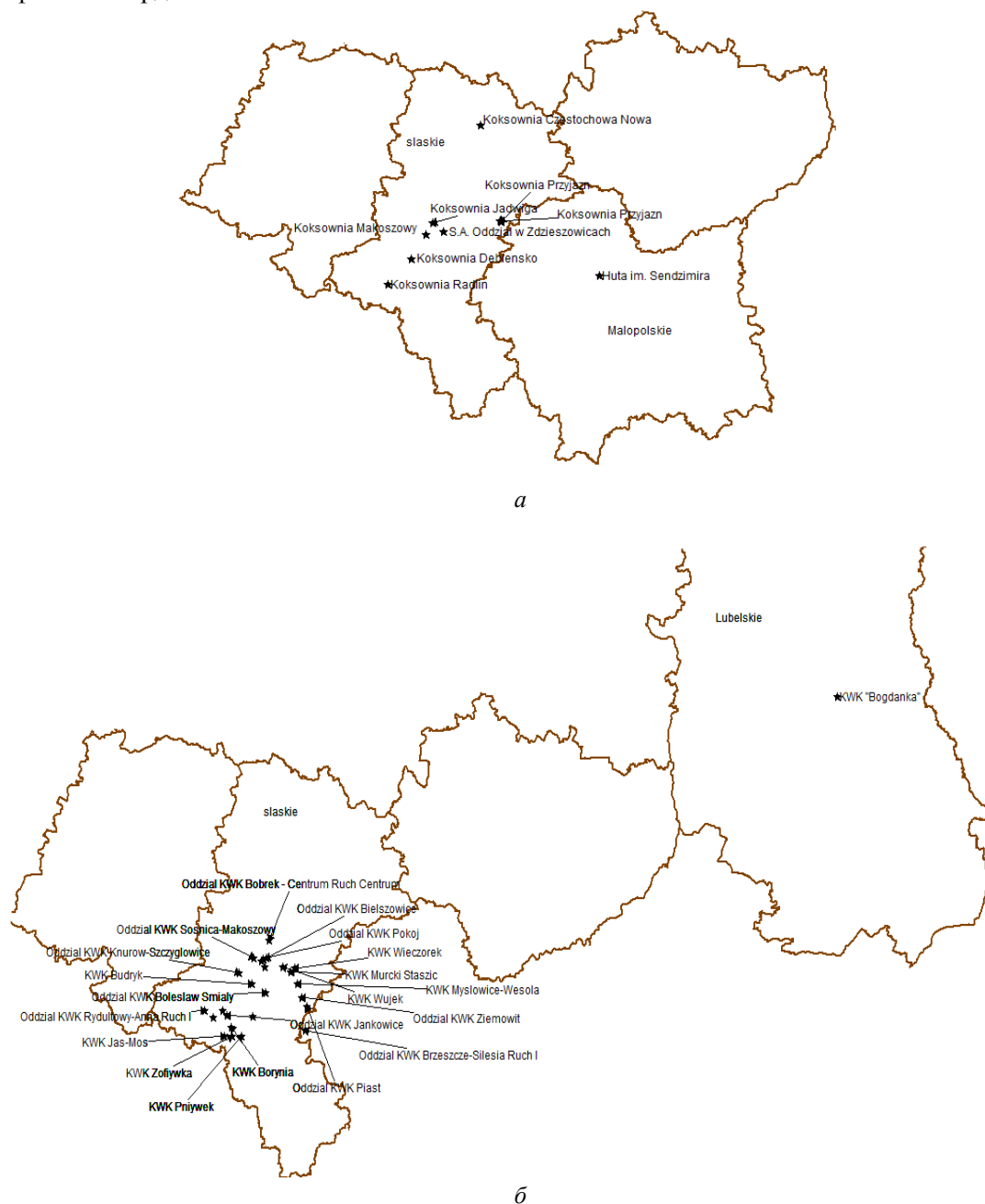


Рис. 3. Цифрові карти джерел емісії парникових газів у секторі вугільної промисловості Польщі: розміщення коксових заводів (а) та розміщення шахт з видобування кам'яного вугілля (б)

Здійснюючи просторову інвентаризацію емісій парникових газів важливо мати точні цифрові карти розташувань джерел емісій. Тому за допомогою плагіну Google-Earth визначено розміщення діючих шахт і коксових заводів у Польщі і застосувавши відповідний програмний модуль побудовано необхідні цифрові карти (див. рис. 3).

Використовуючи створену геоінформаційну технологію просторової інвентаризації емісій парникових газів для кожної шахти, де здійснюється видобування кам'яного вугілля, оцінено леткі емісії метану ( $\text{CH}_4$ ) та вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) від видобувної і післявидобувної діяльності. Як приклад отриманих результатів інвентаризації, на рис. 4 представлено емісії метану від різних видів діяльності у вигляді цифрової карти.

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. 5 відображено сумарні річні емісії парникових газів, які виникають при спалюванні палива під час переробки кам'яного вугілля. Результати представлені в  $\text{CO}_2$ -еквіваленті, тобто значення емісії метану та закису азоту просумовано з врахуванням потенціалу глобального потепління (див. формулу (8)).

Також, з використанням створеної геоінформаційної технології для кожного коксового заводу оцінено леткі емісії вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ). Результати інвентаризації парникових газів для заводів з переробки кам'яного вугілля представлено у вигляді розподілу цих емісій на рівні окремих заводів (рис. 6).

Отримані результати показали, що найбільшими джерелами емісії при коксуванні палива є S.A. Oddział w Zdzieszowicach (становить 34% від усіх емісій при коксуванні), Koksownia Przyjaźń (21%) і коксовня Częstochowa Nowa (11%).

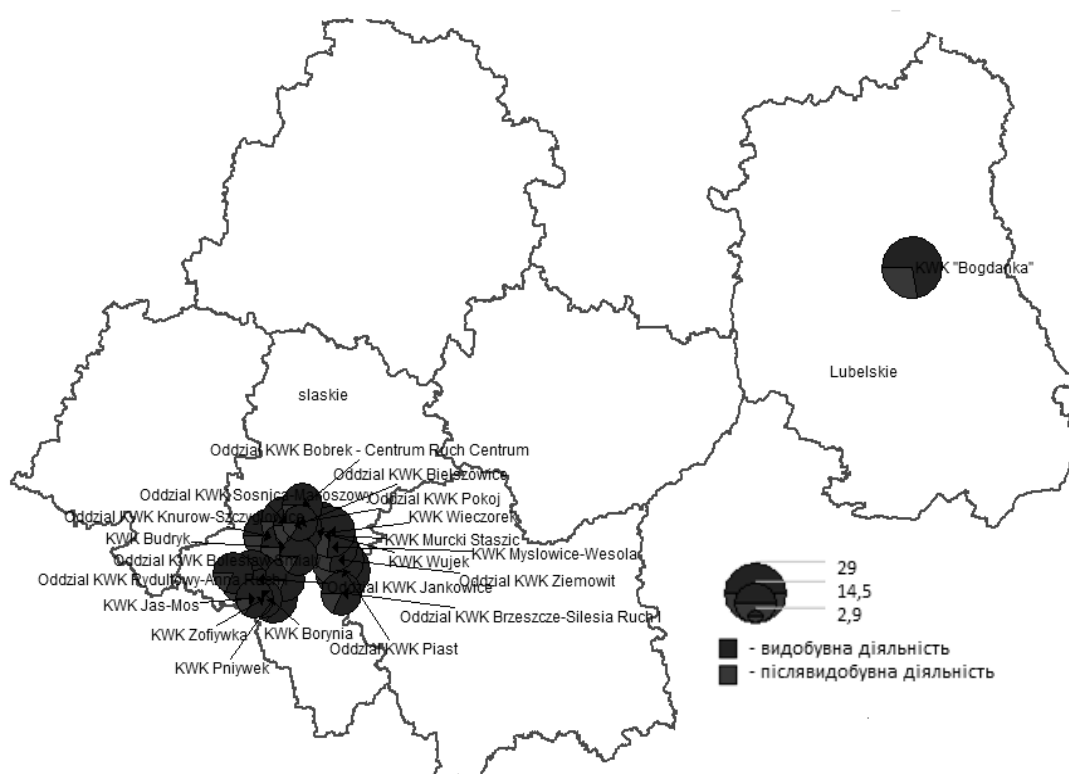


Рис. 4. Емісії метану при видобуванні кам'яного вугілля і від післявидобувної діяльності у Польщі (Гг, 2010 р.)



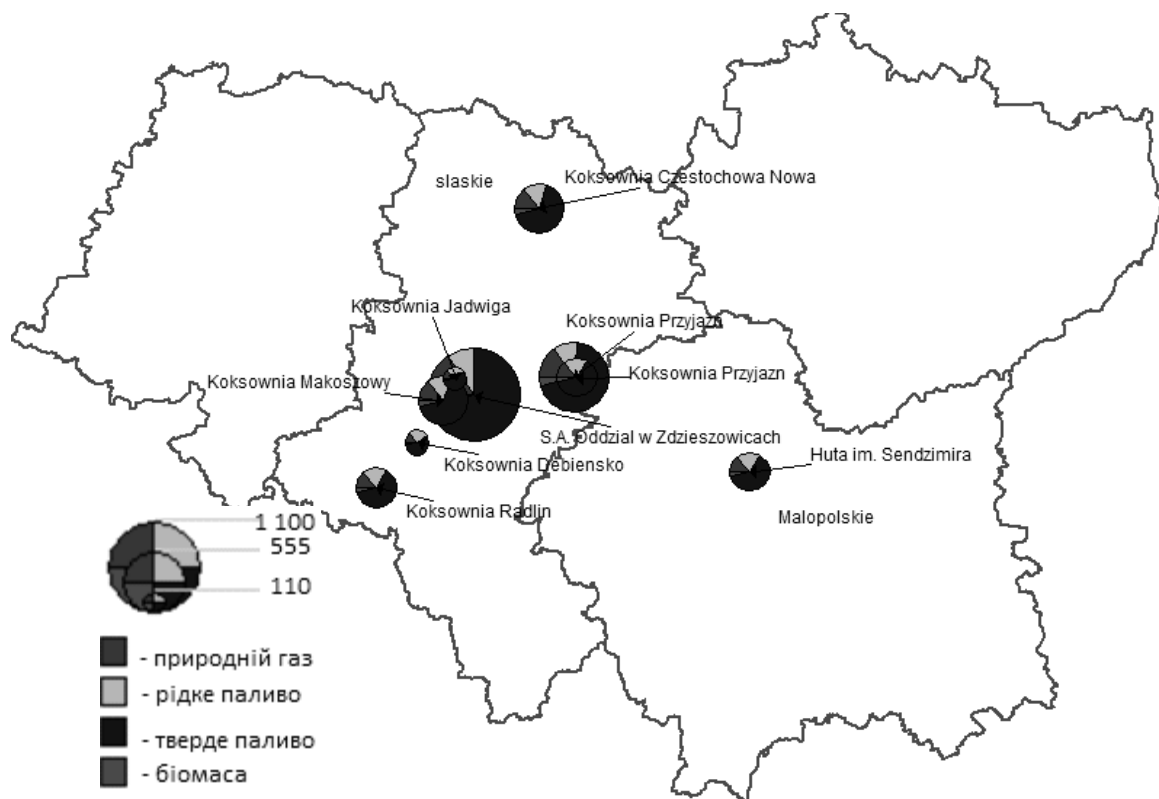


Рис. 5. Сумарні емісії парникових газів ( $CO_2$ -еквівалент) при використанні палива для коксування у Польщі (Гг, 2010 р.)

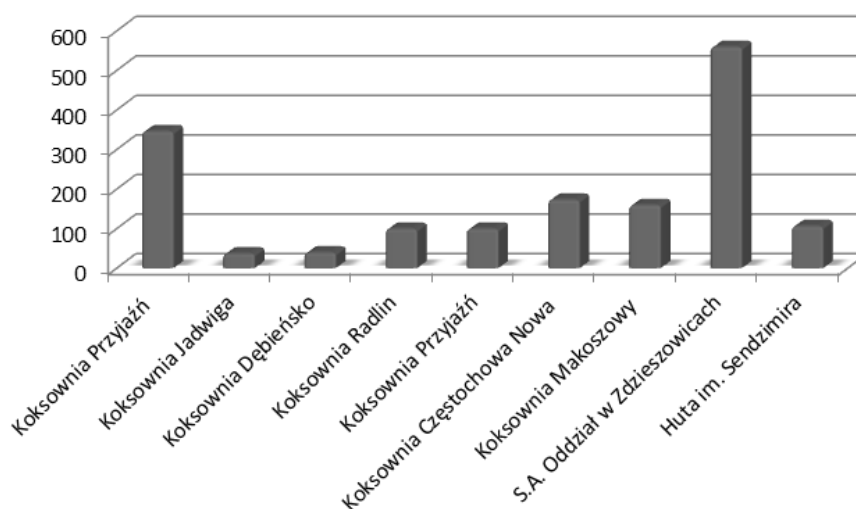


Рис. 5. Леткі емісії вуглекислого газу від переробки кам'яного вугілля на коксових заводах Польщі (Гг, 2010 р.)

### Висновки та перспективи подальших наукових розвідок

Розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів та програмні засоби, які дають можливість здійснювати просторову інвентаризацію емісій вуглекислого газу, метану і закису азоту під час видобування і перероблення кам'яного вугілля у Польщі. У результаті обчислювальних експериментів отримано оцінки емісії парникових газів для кожної робочої шахти та коксового заводу. Результати моделювання візуалізовано за допомогою тематичних цифрових карт. Здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів просторової інвентаризації з даними національних інвентаризаційних звітів Польщі.

Розроблений підхід до здійснення просторової інвентаризації емісій парникових газів у вугільній промисловості Польщі дає нові можливості для визначення потенціалу країни щодо скорочення емісій цих газів. Створені математичні моделі та геоінформаційна технологія їх реалізації можуть бути застосовані для інших країн після врахування специфіки подання статистичної звітності. Роботу виконано в рамках проекту 7FP Marie Curie Actions IRSES project No. 247645.

1. 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. 2. Гамаль Х. В. *Геоінформаційні технології просторового аналізу емісії парникових газів у енергетичному секторі* : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Христина Володимирівна Гамаль. – Львів : Національний університет “Львівська політехніка”, 2009. – 246 с. 3. *Геоінформаційна технологія просторової інвентаризації парникових газів в енергетичній галузі на регіональному рівні* / Р. А. Бунь, Х. В. Гамаль // *Вісник СНУ ім. Даля*. – 2008. – № 1. – С. 25–31. 4. *Гірничий енциклопедичний словник* : Т. 1 / за ред. В. С. Білецького. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2001. – 514 с. 5. *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. 6. *Інформаційні технології формування кадастру емісій парникових газів Львівщини* / Р. А. Бунь, Н. О. Шпак, Б. М. Матолич, Х. В. Бойчук та ін.; За ред. Р. А. Буна та Н. О. Шпака. – Львів : Видавничий дім “Укрпол”, 2010. – 272 с. 7. Лесів М. Ю. *Математичне моделювання та просторовий аналіз емісії парникових газів у прикордонних регіонах України* : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Мирослава Юріївна Лесів. – Львів : Національний університет “Львівська політехніка”, 2011. – 195 с. 8. *Словник-довідник з економічної географії* / Т. В. Буличева, К. О. Буткалюк, Т. А. Гринюк та ін.; За наук. ред. В. Г. Щабельської. – Харків : Основа, 2004. – 112 с. 9. *Działające kopalnie węgla kamiennego w Polsce [Електронний ресурс]*. – Режим доступ – <http://gornictwo.wnp.pl/kopalnie/> 10. *GIS, Spatial Analysis and Modeling* / Eds. D. J. Maguire, M. Batty, M. Goodchild. – Redlands : ESRI Press, 2005. – 482 p. 11. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* / Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds). – IPCC, IGES, Japan, 2006. 12. *Poland's National Inventory report 2012: Greenhouse Gas Inventory for 1988-2010*. National Centre for Emission Management at the Institute of Environmental Protection. – Warszawa : National Research Institute, 2012. 13. *Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO2 (WE) w roku 2009 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2012*. – Warszawa, 2011.