

*М.Ю. Лесів, канд. техн. наук, Р.М. Карась, П.І. Топилко
(Національний університет "Львівська політехніка")
М.П. Сорочич (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ: ГЕНЕРУВАННЯ ТЕПЛО- ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У ПІВДЕННІЙ ПОЛЬЩІ

Одним із ключових джерел емісії парникових газів є спалювання палива для генерування тепло- та електроенергії. У роботі представлено розроблені авторами математичні моделі процесів емісії парникових газів від стаціонарних джерел у секторі генерування тепла та електроенергії, які враховують територіальне розташування відповідних джерел емісії та основні регіональні фактори, що впливають на величину емісій, і дають змогу здійснювати їх просторовий аналіз. Реалізація цих моделей уможливує аналіз величини та структури емісій на рівні елементарних ділянок території заданого розміру. Здійснено числові експерименти з просторової інвентаризації парникових газів у секторі генерування тепла та електроенергії для південної Польщі, проаналізовано отримані значення емісій. Результати представлено у вигляді цифрових карт.

Ключові слова: математичне моделювання, геоінформаційна технологія, інвентаризація парникових газів, генерування тепло- та електроенергії.

Вступ. Для виконання екологічних і економічних міжнародних зобов'язань щодо зменшення та моніторингу емісій парникових газів (ПГ) важливо мати повну інформацію про емісії в країні. Просторово-розподілений аналіз емісій ПГ для різних секторів людської діяльності на регіональному рівні є важливим та суттєвим для створення нових ефективних природозахисних інструментів, вивчення шляхів зменшення емісій та невизначеностей результатів інвентаризації ПГ.

Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату розроблено методики національних інвентаризацій ПГ для оцінювання емісій в цілому на рівні країни [6]. Використання цих методик дає узагальнені результати, оскільки при цьому не враховуються регіональні особливості кожної країни. Тому доцільно оцінювати емісії ПГ з урахуванням таких особливостей та просторового розподілу джерел емісії. Така оцінка буде повною мірою відображати нерівномірний розподіл джерел забруднення повітря.

Ключовим джерелом емісій ПГ є спалювання викопного палива для генерування тепла та електроенергії [5]. Розроблення алгоритмів та моделей просторово-розподіленої інвентаризації емісій ПГ від спалювання палива є важливою та актуальною задачею. Потрібно зазначити, що для південних регіонів Польщі не здійснено такої інвентаризації ПГ, хоча для цих регіонів характерною є значна концентрація великих тепло- та електростанцій, які використовують в основному кам'яне чи буре вугілля.

Метою цієї роботи є представлення математичних моделей і програмних засобів для просторової інвентаризації ПГ для генерування тепло- та електроенергії для південних регіонів Польщі.

Вхідні дані. При моделюванні емісій ПГ під час генерування тепло- та електроенергії сформовано Excel-таблиці з вхідною статистичною інформацією про:

- обсяги споживання палива загалом на рівні воєводств;
- обсяги генерування тепло- та електроенергії великими та малими точковими джерелами емісій для окремих адміністративних одиниць;
- кількість котелень та довжина тепломреж у населених пунктах [4].

Використано також такі дані: таблиці нетто теплотворних значень для різних типів палива; таблиці коефіцієнтів емісій для окремих підприємств та середніх коефіцієнтів емісій для аналізованого сектора господарської діяльності.

При обчисленні емісії використано ряд допоміжних цифрових карт для територіального розподілу (деагрегації) обсягів використаного палива, зокрема:

- адміністративну карту воєводств, повітів, гмін;
- карту землекористування [3];
- створену авторами карту найбільших точкових джерел емісій у досліджуваному секторі.

Моделювання процесу емісії вуглекислого газу для великих електростанцій та невеликих теплоелектроцентралей. Емісії вуглекислого газу при стаціонарному спалюванні палива є результатом виділення вуглецю у процесі згорання і залежать від його вмісту в паливі. Вхідними даними для обчислення емісій є інформація про діяльність підприємства, тобто кількість і вид фактично використаного викопного палива за рік, за яким підприємства здійснюють статистичну звітність. Кожне паливо має певні фізико-хімічні характеристики, які істотно впливають на процеси горіння, а саме – нетто теплотворне значення і вміст вуглецю [1, 2]. Вміст вуглецю може визначатись в лабораторії на підприємстві, що дає змогу розрахувати „власний” коефіцієнт емісій вуглекислого газу і отримати дещо точніші значення емісій для певного підприємства. При моделюванні процесу емісії надається перевага використанню коефіцієнтів емісій, які враховують технологічні процеси на конкретному підприємстві, перед усередненими коефіцієнтами емісій на рівні країни.

Оцінювання емісій вуглекислого газу від спалювання палива тепло- та електростанціями здійснено за такою формулою:

$$E_i^{CO_2} = \frac{44}{12} \sum_{b=1}^B P_{b,i} \cdot C_{b,i}^{CO_2} \cdot K_b \cdot N_b, \quad i = \overline{1, M^*}, \quad (1)$$

де: $E_i^{CO_2}$ – величина емісії вуглекислого газу від спалювання різних видів палива за рік на i -му підприємстві, т; $P_{b,i}$ – маса використаного за рік палива b -го типу i -м джерелом емісії, т; $C_{b,i}^{CO_2}$ – коефіцієнт емісії вуглекислого газу при використанні палива b -го типу на i -му джерелі, т/Дж; K_b – коефіцієнт окислення вуглецю у паливі (див. табл. 2), т; N_b – нетто теплотворне здатність палива b -го типу, Дж/т; B – кількість типів палива; $44/12$ – коефіцієнт перерахунку вуглецю у вуглекислий газ; M^* – кількість джерел емісії (тепло- та електростанцій). Визначення фактичного використання палива здійснюється на основі облікових даних підприємств про споживання різноманітних видів палива. Коефіцієнт K_b враховує неповне згорання палива.

Для дрібних електроцентралей моделювання емісій вуглекислого газу доцільно проводити дещо за іншою схемою, оскільки для них неможливо отримати детальні дані про використання палива. Відповідна математична модель для оцінювання величини емісій CO_2 на j -му підприємстві має наступний вигляд:

$$E_j^{CO_2} = \frac{44}{12} \frac{W_j}{\sum_{k=1}^{M^{**}} W_k} \sum_{b=1}^B \left(P_b^{sum} - \sum_{i=1}^{M^*} P_{b,i} \right) \cdot C_b^{CO_2} \cdot K_b \cdot N_b, \quad j = \overline{1, M^{**}}, \quad (2)$$

де: $E_j^{CO_2}$ – емісії вуглекислого газу від спалювання різних видів палива за рік j -им дрібним підприємством, т; $C_b^{CO_2}$ – коефіцієнт емісії вуглекислого газу при використанні палива b -го типу, т/Дж; P_b^{sum} – сумарна кількість використаного палива b -го типу в аналізованій категорії, т; M^{**} – кількість дрібних підприємств, для яких здійснюється моделювання; W_j – коефіцієнт, пропорційно якому ділиться паливо за j -им дрібним підприємством, якщо відсутні конкретні дані про використання палива.

Коефіцієнт W_j використовуємо для перерозподілу палива дрібним підприємством. Для реалізації цієї моделі таким коефіцієнтом вибрано показник потужності відповідного підприємства.

Моделювання процесу емісії парникових газів від використання палива котельнями. Котельні – це порівняно з дрібними підприємствами значно менші джерела емісії, кількість яких залежить від густоти населення. Тому при моделюванні джерелами емісії вважають території населених пунктів, в яких кількість спожитого палива пропорційна до кількості котелень або довжини тепломережі у відповідному населеному пункті, тобто територію населеного пункту вважають площинним джерелом емісії.

Інформація про кількість використаного котельнями палива доступна на рівні воєводств. Тому моделювання емісій парникових газів для котелень на території південної Польщі доцільно проводити за таким алгоритмом:

- загальні дані про витрати палива на рівні воєводств розподіляють повітам пропорційно вибраному коефіцієнту – кількості котелень чи довжині відповідної тепломережі;
- в межах повіту дані про витрати палива розподіляють населеним пунктом пропорційно до кількості населення, що в ньому проживає;
- за отриманими даними та відповідними коефіцієнтами емісій знаходять рівні емісій в населених пунктах; при моделюванні процесу емісії важливим є використання специфічних коефіцієнтів емісій для досліджуваної території, які враховуватимуть рід діяльності та інші особливості.

Для s -го населеного пункту в h -му повіті величину емісії можна представити таким математичним записом:

$$E_{h,s}^{kot} = \frac{G_h}{\sum_{l=1}^H G_l} \cdot \frac{Q_s}{\sum_{k=1}^{S_h} Q_k} \sum_{a=1}^A \sum_{b=1}^B P_b^{sum} \cdot C_{a,b} \cdot N_b, \quad s = \overline{1, S_h}, \quad h = \overline{1, H}, \quad (3)$$

де: $E_{h,s}^{kot}$ – емісії парникових газів від спалювання різних видів палива за рік котельнями розташованими в s -му населеному пункті h -го повіте, т; P_b^{sum} – маса використаного палива b -го типу котельнями в аналізованій категорії у межах воєводства, т; $C_{a,b}$ – усереднений для країни коефіцієнт емісії a -го ПГ в CO_2 еквіваленті при використанні палива b -го типу, т/Дж; G_h – коефіцієнт, пропорційно якому розподіляється паливо від рівня воєводства до h -го повіту; Q_s – кількість населення в s -му населеному пункті; S_h – кількість населених пунктів в h -му повіті; H – кількість повітів воєводства; A – кількість типів парникових газів. Як показник G_h можна використати довжину тепломережі або кількість котелень для населеного пункту.

Зважаючи на те, що емісії вуглекислого газу є в декілька разів вищими порівняно з емісіями інших парникових газів, але мають менший коефіцієнт впливу на глобальне потепління, емісії метану і закису азоту доцільно переводити в еквівалент CO_2 , використавши відповідні коефіцієнти: 1 – для вуглекислого газу, 21 – для метану, 310 – для закису азоту.

Сумарні емісії парникових газів при генеруванні тепло- та електроенергії δ -ої елементарної ділянки визначаються за формулою:

$$E_{\delta} = \sum_{i=1}^{M_{\delta}^*} E_i + \sum_{j=1}^{M_{\delta}^{**}} E_j + \sum_{h=1}^H \sum_{s=1}^{S_h} \frac{R_{h,s,\delta}}{R_{h,s}} E_{h,s}^{kot}, \quad \delta = \overline{1, \Delta}, \quad (4)$$

де: $R_{h,s,\delta}$ – площа спільної території s -го пункту в h -му повіті та δ -ої елементарної ділянки; $R_{h,s}$ – площа s -го населеного пункту в h -му повіті; M_{δ}^* – кількість великих точкових джерел, що попадають в δ -у елементарну ділянку; M_{δ}^{**} – кількість дрібних точкових джерел, що попадають в δ -у елементарну ділянку; $E_i, E_j, E_{h,s}^{kot}$ – обсяги емісій в еквіваленті вуглекислого газу, відповідно, від великих, дрібних точкових та площинних джерел емісії; Δ – кількість елементарних ділянок, які отримано в результаті розбиття досліджуваної території сіткою певного розміру (наприклад, 2x2 км).

Програмна реалізація та числові експерименти Для програмної реалізації розроблених математичних моделей створено два модулі мовою програмування MapBasic для обчислення емісій парникових газів, що утворились при використанні палива для генерування тепло- та електроенергії:

- модуль 1, який реалізує процес моделювання емісій, джерелом яких є великі та дрібні енергетичні підприємства;
- модуль 2, що реалізує математичну модель емісій, джерелом яких є котельні (тобто населені пункти, як площинні джерела).

Ці модулі реалізують такі функції: обчислення емісій ПГ великих підприємств на основі використаного ними палива та коефіцієнтів емісії, що враховують специфічні особливості їхньої роботи; розподіл палива дрібним електроцентралям за відсутності конкретних даних і обчислення для них величини емісій; обчислення обсягів емісій CO₂, N₂O та CH₄ для котелень з врахуванням пропорційного перерозподілу палива за допомогою відповідних коефіцієнтів на рівні елементарних ділянок; обчислення загальних емісій CO₂, N₂O та CH₄ від спалювання палива для генерування тепло- та електроенергії від усіх стаціонарних джерел на рівні елементарних ділянок; перетворення отриманих емісій в еквівалент CO₂ для формування георозподіленої бази даних і побудови георозподілених кадастрів. Результатом виконання програмних модулів є георозподілені бази даних, де кожній елементарній ділянці відповідає запис, що містить детальну інформацію про структуру та кількісні оцінки емісій для окремих ПГ, типів палива та джерел емісій.

На рис. 1 зображено тематичну карту Сілезького воєводства, яка відображає просторову оцінку емісій ПГ в еквіваленті CO₂ для окремих елементарних ділянок (розміром 2x2 км). На рис. 2 представлено інформацію про обсяги емісій вуглекислого газу від великих точкових джерел – тепло- та електростанцій. З цього рисунка видно, що емісії закису азоту всією територією є вищі порівняно з емісіями метану (використано логарифмічну шкалу через значну нерівномірність розподілу).

На рис. 3 наведено сумарні емісії ПГ в еквіваленті CO₂ для південної Польщі на рівні повітів. Найбільші емісії ПГ спостерігаються у Сілезькому воєводстві.

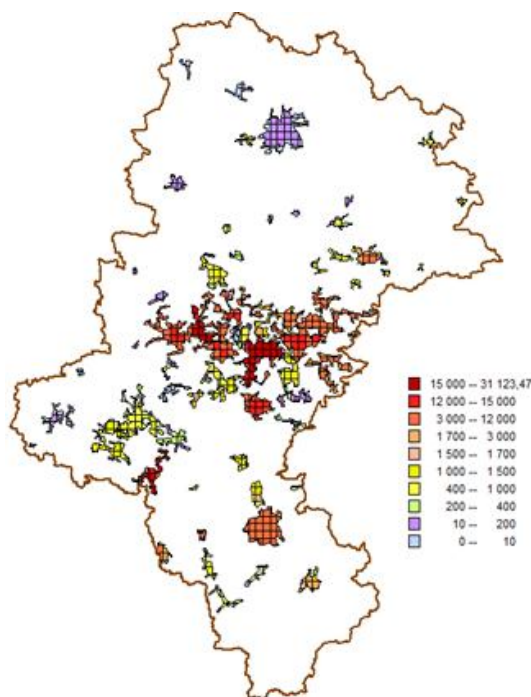


Рис. 1. Емісії ПГ на рівні ділянок 2x2 км від використання палива котельнями на території Сілезького воєводства в еквіваленті CO₂ (т, 2010 р.)

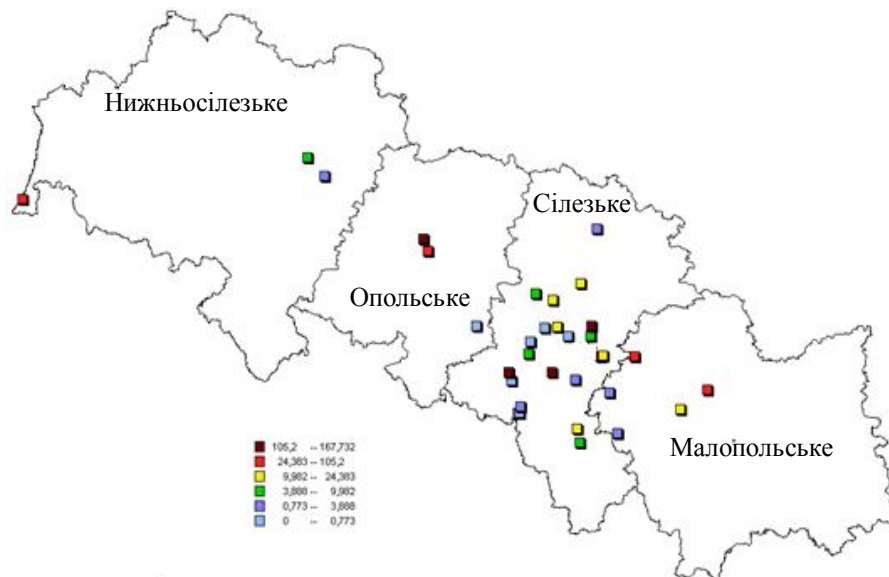


Рис. 2. Емісії CO₂ (т) у південній Польщі від спалювання палива великими точковими джерелами: тепло- та електростанціями, 2010 р.

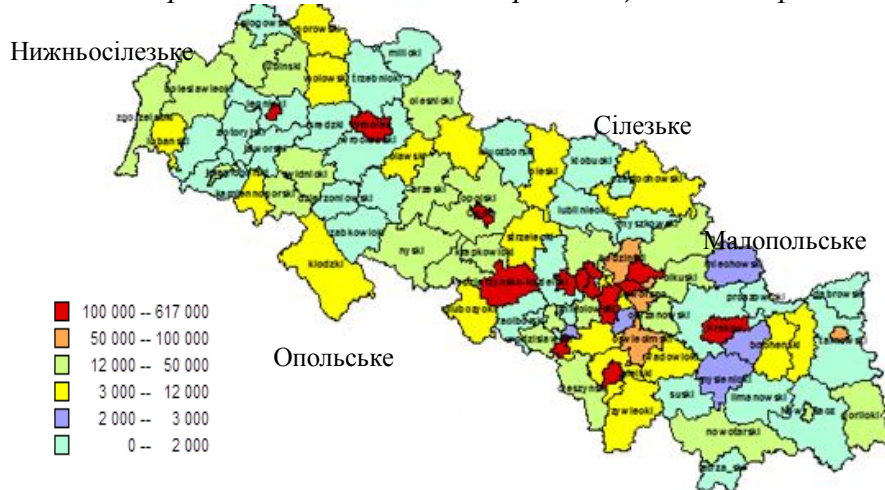


Рис. 3. Сумарні емісії ПГ в еквіваленті CO₂ (т) на рівні повітів для південної Польщі, 2010 р.

Висновки. Розроблено математичні моделі та створено на їх основі геоінформаційні технології просторового аналізу процесів емісії ПГ для різних категорій діяльності у секторі генерування тепла та електроенергії. Результатом виконання розроблених підпрограм є цифрові карти та відповідні георозподілені бази даних, що містять інформацію про джерела емісій для окремих елементарних ділянок, кількісні оцінки емісій та їх структура для окремих категорій джерел, сортів палива та видів парникових газів.

З використанням реальних даних проведено моделювання емісії ПГ прямої дії, утворених внаслідок спалювання палива для генерування тепло- та електроенергії на території південної Польщі; проаналізовано структуру емісій та їх територіальний розподіл. Зокрема, показано, що найбільші емісії ПГ спостерігаються в Сілезькому воєводстві.

Представлені результати отримано в рамках виконання проекту GESAPU (Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES): „Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів”.

Список літератури:

1. 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., 2012. – 464 с.

2. **Гамаль Х. В.** Геоінформаційна технологія для просторового аналізу парникових газів в енергетичному секторі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.06 „Інформаційні технології” / Х. В. Гамаль. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2009. – 20 с.

3. **Карта** землекористування Corine land cover 2006 [Електронний ресурс] <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-clc2006-100-m-version-12-2009>.

4. **База** регіональних даних Польщі. – Режим доступу: <http://www.stat.gov.pl/bdlen/app>

5. **Poland's National Inventory Report 2012. Greenhouse Gas Inventory for 1988-2010.** – National Centre for Emission Management (КОBiZE) at the Institute of Environmental Protection – Nation Research Institute, 2012. – 263 с.

6. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / [IPCC] Working Group I (WG I) Technical Support Unit.** – 1997. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>

М.Ю. Лесив, Р.М. Карась, П.И. Топилко

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ: ГЕНЕРИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЮЖНОЙ ПОЛЬШЕ

Одним из ключевых источников эмиссии парниковых газов является сжигание топлива для генерирования тепло- и электроэнергии. В работе представлены разработанные авторами математические модели процессов эмиссии парниковых газов от стационарных источников в секторе генерирования тепло- и электроэнергии, которые учитывают территориальное расположение соответствующих источников эмиссии и основные факторы, влияющие на величину эмиссий, и дают возможность осуществлять их пространственный анализ. Реализация этих моделей позволяет анализировать объем и структуру эмиссий на уровне элементарных участков территории заданного размера. Проведены численные эксперименты по пространственной инвентаризации парниковых газов в секторе производства тепла и электроэнергии для южной Польши, проанализированы полученные значения эмиссий. Результаты представлены в виде цифровых карт.

Ключевые слова: математическое моделирование, геоинформационная технология, инвентаризация парниковых газов, генерирование тепло- и электроэнергии.

М. Lesiv, R. Karas, P. Topylko, M.P.Sorochych

SPATIAL MODELING OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS: ELECTRICITY AND HEAT PRODUCTION OF SOUTHERN POLAND

Burning of fossil fuel to produce heat and electricity is one of the key sources of greenhouse gas emissions. This paper presents the developed mathematical models of spatial analysis of greenhouse gas emissions from stationary sources in the sector of production of heat and electricity. These models enable to take into account geographical location of relevant sources and the main factors that affect the magnitude of emissions. Implementation of these models allows us to analyze an amount and structure of emissions at different level. Numerical experiments of spatial inventory of greenhouse gases from production of heat and electricity have been carried out and analyzed for Southern Poland. Results are presented in the form of digital maps.

Key words: mathematical modeling, GIS technology, greenhouse gas inventory, electricity and heat production.

