

Н.В. Чарковська<sup>1</sup>, Р.А. Бунь<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, професор, З. Нахорскі<sup>3</sup>, М.П. Сорочич<sup>4</sup>, І. Хорабік<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>НУ “Львівська політехніка”, <sup>2</sup>Академія бізнесу в Домброві Гурнічій, Польща,  
<sup>3</sup>Інститут системного аналізу Польської академії наук, Польща,  
<sup>4</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ: ТВАРИННИЦТВО ПОЛЬЩІ

Проаналізовано основні категорії джерел емісії парникових газів у тваринництві Польщі – кишкова ферментація тварин і розкладення, збір, зберігання та використання гною. Представлено розроблені математичні моделі емісійних процесів від цих джерел на рівні елементарних ділянок заданого розміру. Засобами геоінформаційної системи сформовано георозподілену базу вхідних даних на основі статистичних даних про поголів'я сільськогосподарських тварин у регіонах Польщі. В результаті числових експериментів отримано оцінки емісій метану та закису азоту за видами сільськогосподарських тварин на рівні елементарних ділянок 2 x 2 км. Побудовано просторові кадастри емісій та представлено їх у вигляді цифрових карт.

**Ключові слова:** математичне моделювання, просторовий аналіз, емісія парникових газів, сільськогосподарський сектор Польщі, тваринництво.

**Вступ.** Людство замислюється над проблемою зміни клімату. Спалювання викопного палива, промислове виробництво, нераціональне ведення сільського господарства, зміни в землекористуванні та вирубування лісів спричиняють значні викиди антропогенних парникових газів і виникнення так званого “парникового ефекту”. Накопичення парникових газів у атмосфері призводить до збільшення середньорічної температури на планеті, великої частоти природних катаклізмів і глобального потепління.

Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату розроблено методики інвентаризації парникових газів на національному рівні [1]. Ці методики охоплюють всі сектори господарської діяльності (промисловість, сільське та лісове господарство, енергетику тощо). Перевагою цих методик є їх універсальність та можливість застосування у різних країнах. Проте, вони не враховують регіональної специфіки окремо взятої країни та нерівномірність розподілу джерел емісії її територією [2].

Відповідно до міжнародної класифікації джерел емісій парникових газів у сільському господарстві виділяють такі категорії: кишкова ферментація худоби; розкладення гною худоби та птиці; збирання, зберігання та використання гною у твердому та рідкому станах. За обсягом емісії метану категорія “Внутрішня ферментація тварин” є беззаперечним лідером у сільськогосподарському секторі. Процеси збору, зберігання та використання відходів життєдіяльності свійських тварин характеризуються значними емісіями закису азоту. Оцінювання емісій парникових газів від сільськогосподарської діяльності є першочерговою задачею при перевірці виконання міжнародних домовленостей щодо скорочення рівня емісії. Метою цієї роботи є розроблення математичних моделей процесів емісії парникових газів у тваринництві Польщі та їх просторовий аналіз. Просторово розподілена інвентаризація парникових газів у тваринництві Польщі ніколи не здійснювалася.

**Математичні моделі процесів емісії парникових газів.** Підхід до просторового аналізу емісійних процесів у тваринництві Польщі полягає у поділі досліджуваної території на елементарні об'єкти – порівняно невеликі, як для країни, ділянки (наприклад, квадратні ділянки розміром 2 км x 2 км); формуванні георозподіленої бази вхідних даних на основі статистичних даних про поголів'я тварин і специфічних регіональних коефіцієнтів емісії парникових газів; здійсненні чисельних експериментів з використанням розроблених математичних моделей; аналізі та відображенні результатів на цифрових картах. Якщо через вказану квадратну ділянку проходить адміністративна границя воєводства/повіту/гміни, то тоді утворюємо кілька елементарних об'єктів, обмежених цією границею.

Оскільки немає можливості відстежувати емісії від окремо взятої тварини, наведена нижче математична модель враховує сумарні емісії від усіх тварин одного виду у кожному сільському населеному пункті. При цьому використано статистичну інформацію про поголів'я худоби та птиці, яку подано у розрізі гмін (найменша адміністративно-територіальна одиниця у Польщі) сумарно для великих сільськогосподарських підприємств, дрібніших фермерських господарств та домашніх господарств (населення). Окрім цього поголів'я тварин у власності населення подається окремо.

Вважаємо, що поголів'я худоби, яка є у власності населення, розподілене територіально пропорційно сільському населенню гмін і є площинним джерелом емісії парникових газів. Для оцінювання емісії від кишкової ферментації тварин на рівні елементарних ділянок достатньо малого розміру необхідно розподілити дані про поголів'я тварин пропорційно до частки населення гміни в елементарній ділянці. За відсутності детальної цифрової карти меж сільських населених пунктів використано цифрову карту гмін з даними про населення за 2009 рік та цифрову карту густоти населення. Відношення кількості населення в аналізованій елементарній ділянці до кількості населення у гміні можна обчислити як:

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

де  $V(\delta_n)$  – шукана частка населення в  $n$ -ій елементарній ділянці  $\delta_n$ ;  $N$  – загальна кількість таких ділянок на території Польщі;  $p(\delta_n)$  – густина населення в  $n$ -ій елементарній ділянці;  $P(R_{3,n_3})$  – кількість населення у гміні  $R_{3,n_3}$  – адміністративній одиниці третього рівня, до якої належить  $n$ -та елементарна ділянка, тобто  $\delta_n \subset R_{3,n_3}$  (географічний об'єкт  $\delta_n$  знаходиться в межах географічного об'єкта  $R_{3,n_3}$ ), причому  $n_3 \in \overline{[1, N_3]}$ ;  $N_3$  – кількість гмін;  $\text{area}(x)$  – площа об'єкта  $x$ ,  $\cap$  – операція знаходження спільної території двох географічних об'єктів.

Великі сільськогосподарські підприємства є точковими джерелами емісії, тому їх необхідно точно локалізувати на карті за їх географічними координатами. Дрібніші фермерські господарства, завдяки їх скупченню на малій території, вважаємо джерелами емісії парникових газів площинного типу. Територіально фермерські господарства розташовані на сільськогосподарських землях, тому поголів'я худоби та птиці розподіляємо пропорційно до площі сільськогосподарських угідь (орних земель, пасовищ тощо). Якщо інформація про розташування великих сільськогосподарських підприємств відсутня, тому все поголів'я тварин у власності великих і малих підприємств дезагрегуємо пропорційно до площі сільськогосподарських земель:

$$S(\delta_n) = \frac{\sum_{f_i \in F} \text{area}(f_i \cap \delta_n)}{\sum_{f_j \in F} \text{area}(f_j \cap R_{3,n_3})}, \quad \forall f_i \cap \delta_n \neq 0, f_j \cap R_{3,n_3} \neq 0, \quad n = \overline{1, N}, \quad (2)$$

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

Процесам емісії метану від кишкової ферментації тварин, що перебувають у власності як населення, так і сільськогосподарських підприємств, поставлено у відповідність таку формулу:

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

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

Під час зберігання та оброблення сухих і рідких відходів життєдіяльності худоби та птиці до моменту їх внесення у сільськогосподарські ґрунти утворюється закис азоту – один із істотних парникових газів прямої дії. Величина емісії цього газу залежить від вмісту азоту в гною та сечовині тварин, а також від різних систем зберігання, наприклад, зберігання тільки сухих речовин, комбіноване зберігання гною та сечовини в резервуарах тощо. Процесам емісії закису азоту від систем збору, зберігання та використання відходів життєдіяльності худоби та птиці поставлено у відповідність таку формулу:

$$E_{ManureSystems}^{N_2O}(\delta_n) = \frac{44}{28} \sum_{s=1}^S K_s^{N_2O}(\delta_n) \cdot \sum_{t=1}^T K_t^N \cdot K_{t,s} \cdot \left[ V(\delta_n) \cdot A_t^{ind}(R_{3,n_3}) + S(\delta_n) \cdot A_t^{agr}(R_{3,n_3}) \right]$$

$$\delta_n \subset R_{3,n_3}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (4)$$

де  $E_{ManureSystems}^{N_2O}(\delta_n)$  – річні сумарні емісії від систем зберігання та оброблення відходів тварин у  $n$ -ій елементарній ділянці  $\delta_n$ ;  $K_t^N$  – вміст азоту N в утворених за рік відходах однієї тварини  $t$ -го виду;  $K_{t,s}$  – частка середньорічного виділення відходів для сільськогосподарських тварин  $t$ -го виду, що зберігається та використовується у  $s$ -ій системі зберігання;  $K_s^{N_2O}(\delta_n)$  – коефіцієнти емісії закису азоту для  $s$ -ої системи зберігання відходів життєдіяльності тварин в елементарній ділянці  $\delta_n$ ;  $44/28$  – стехіометричне співвідношення між закисом азоту  $N_2O$  та азотом N в ньому; індекс *ManureSystems* вказує, що це є емісії від систем зберігання та оброблення відходів тварин.

Вхідними даними для математичних моделей (3)-(4) є відповідна статистична інформація на рівні гмін про поголів'я тварин та специфічні коефіцієнти емісії метану та закису азоту. Статистичні дані взято з сайту локального банку даних Польщі [4]. Специфічні параметри та коефіцієнти емісії для молочної та немолочної великої рогатої худоби та овець використано з польського національного звіту з інвентаризації парникових газів за 2012 рік [2], для решти видів (коней, свиней, кіз та птиці) – з традиційних методик інвентаризації парникових газів [1]. Як приклад, у табл. 1 наведено коефіцієнти емісії метану за видами сільськогосподарських тварин.

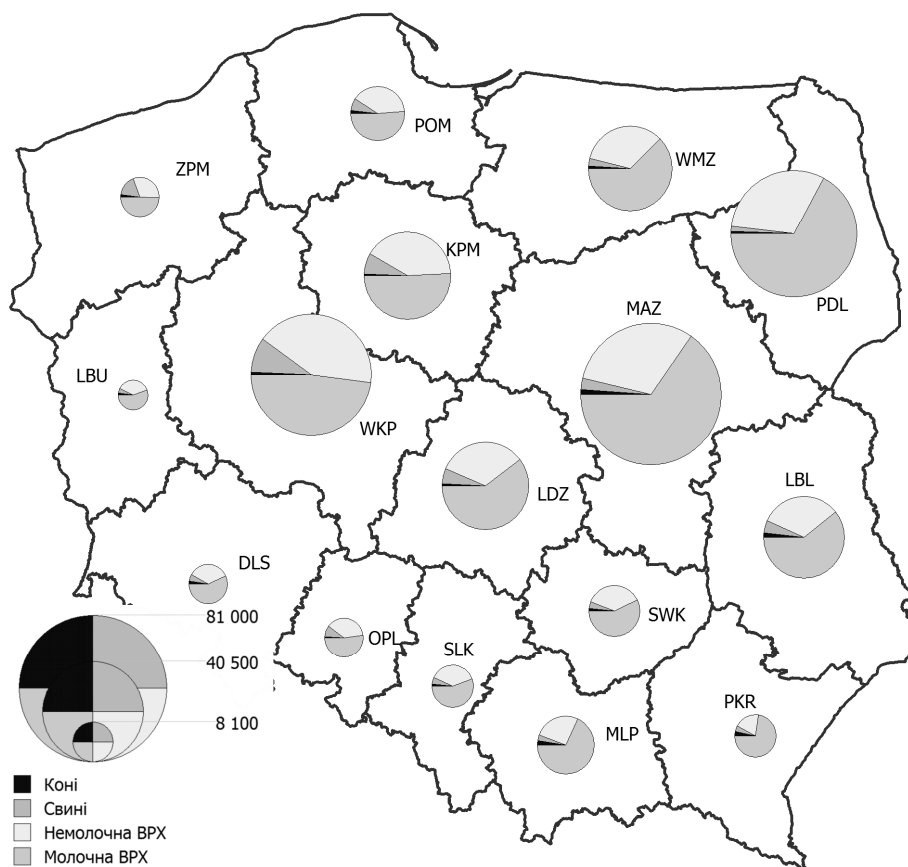
**Формування множини ділянок сільськогосподарських земель та множини елементарних об'єктів для моделювання.** Для проведення просторової інвентаризації парникових газів використано цифрову карту гмін, карту землекористування та допоміжну сітку з кроком 2 x 2 км. Карту гмін “розрізано” цією сіткою і отримано множину з 124 063 елементарними ділянками. Згідно з Eurostat, до угідь, що використовуються для фермерської діяльності, належать орні землі, пасовища тощо [3]. Оскільки статистичні дані про поголів'я тварин подано на рівні гмін, виправданим є “розрізання” карти орних земель та пасовищ також картою гмін. У результаті отримано множину з 152 939 ділянками сільськогосподарських земель. На наступному кроці розрізану карту сільськогосподарських земель накладено на карту гмін та знайдено для кожної гміни суму площ всіх ділянок сільськогосподарських земель, що в ній містяться. Потім цю ж карту накладено на карту елементарних ділянок та для кожної елементарної ділянки знайдено суму площ ділянок сільськогосподарських земель. Ці результати використано для дезагрегації даних про поголів'я худоби, що є у власності сільськогосподарських підприємств, за формулою (2).

**Моделювання емісій парникових газів від тваринництва.** Найбільше емісій метану в сільськогосподарському секторі відбувається внаслідок кишкової ферментації сільськогосподарських тварин, а саме молочної та немолочної великої рогатої худоби, овець та кіз, коней та свиней. Дещо менші емісії цього парникового газу спостерігаються у процесі розкладення гною худоби та птиці. У зв'язку з цим моделювання потоків метану та закису азоту від тваринництва має вкрай важливе значення.

У результаті чисельних експериментів отримано оцінки емісій парникових газів для кожної категорії на рівні елементарних ділянок 2 ? 2 км на території Польщі. На основі цих даних побудовано цифрову карту емісій метану від кишкової ферментації основних видів сільськогосподарських тварин на рівні воєводств, крім овець та кіз (рис. 1). Категорію тварин вважають не ключовою [1], якщо її частка в емісіях парникових газів є незначною. В аналізованому випадку середня частка овець та кіз у сукупних емісіях становить тільки 0,015% та 0,006%, відповідно.

Найбільші емісії метану мають місце від кишкової ферментації корів через велике значення коефіцієнта емісії та значне поголів'я. У Мазовецькому (80 694 тонн), Великопольському (60 956 тонн) та Підляському (66 266 тонн) воєводствах зосереджено найбільше емісій метану, а найменше – в Любуському (5 190 тонн). Сумарні емісії метану від кишкової ферментації всіх видів тварин у 2010 році становили 434,7 тис. тонн, тобто 75% від сумарних емісій цього газу в тваринництві, а решта 25% пов'язана з розкладенням гною.

Результати просторової інвентаризації метану від розкладення гною сільськогосподарських тварин, за винятком овець, кіз та коней, представлено на рис. 2. Лідерами серед воєводств у цій категорії емісій є Великопольське (30 623 тонни), Мазовецьке (19 217 тонн) та Куявсько-Поморське (14 351 тонна) воєводства.



**Рис. 1.** Річні емісії метану від кишкової ферментації сільськогосподарських тварин у воєводствах Польщі (тонни, 2010 р.)

Таблиця 1

Коефіцієнти емісії метану від тваринництва (на основі [1])

Вид тварини	Коефіцієнти емісії (кг СН <sub>4</sub> /гол. худоби/рік)	
	Кишкова ферментація	Розкладення гною
Молочна велика рогата худоба (корови)	97,36	13,76
Немолочна велика рогата худоба	49,21	2,56
Вівці	7,86	0,17
Кози	5,0	0,12
Коні	18,0	1,39
Свині	1,5	5,97
Птиця	-	0,08

В результаті дослідження двох систем збирання та зберігання відходів життєдіяльності тварин, виявлено, що в Польщі переважає одна з систем – гноєсховища. Зберігання гною та сечовини у зрідженому та рідкому станах супроводжується меншими емісіями парникових газів завдяки тому, що аміак майже не випаровується із закритих резервуарів (збірників гною), проте в економічному плані використання цієї системи є більш затратним. На рис. 3 відображено структуру емісій закису азоту від зберігання гною тварин у твердому стані в гноєсховищах. Найбільш забрудненими є території Великопольського, Мазовецького та Підляського воєводств, як і стосовно кишкової ферментації тварин. Сумарні національні емісії закису азоту від зберігання та використання рідких відходів становили 0,1 тис. тонн (0,96%), а від твердих відходів – 12,2 тис. тонн (99,04%).

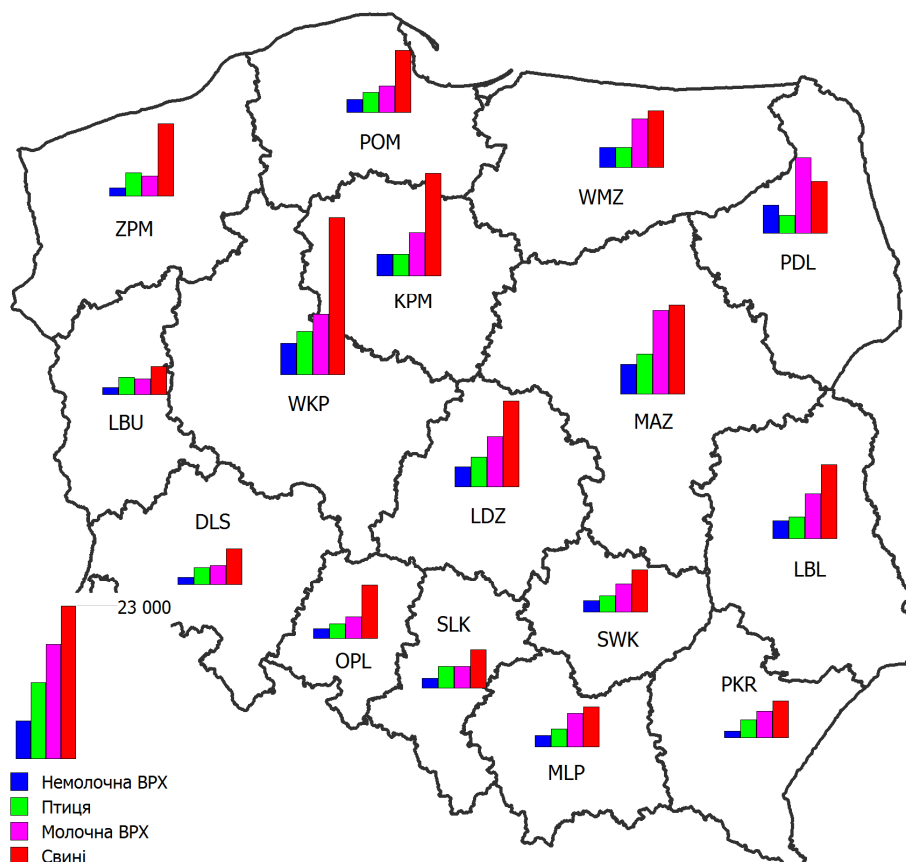
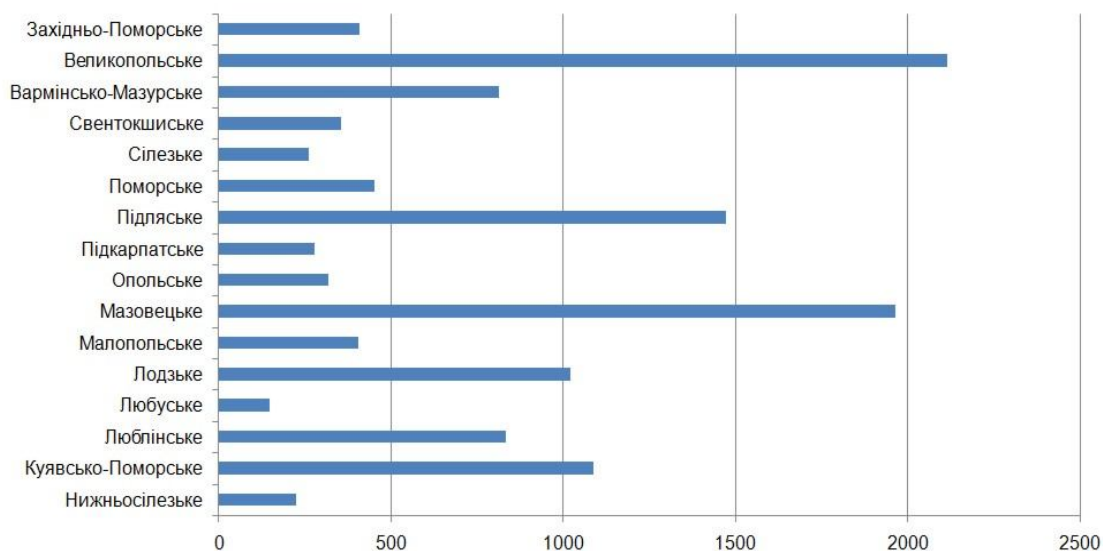
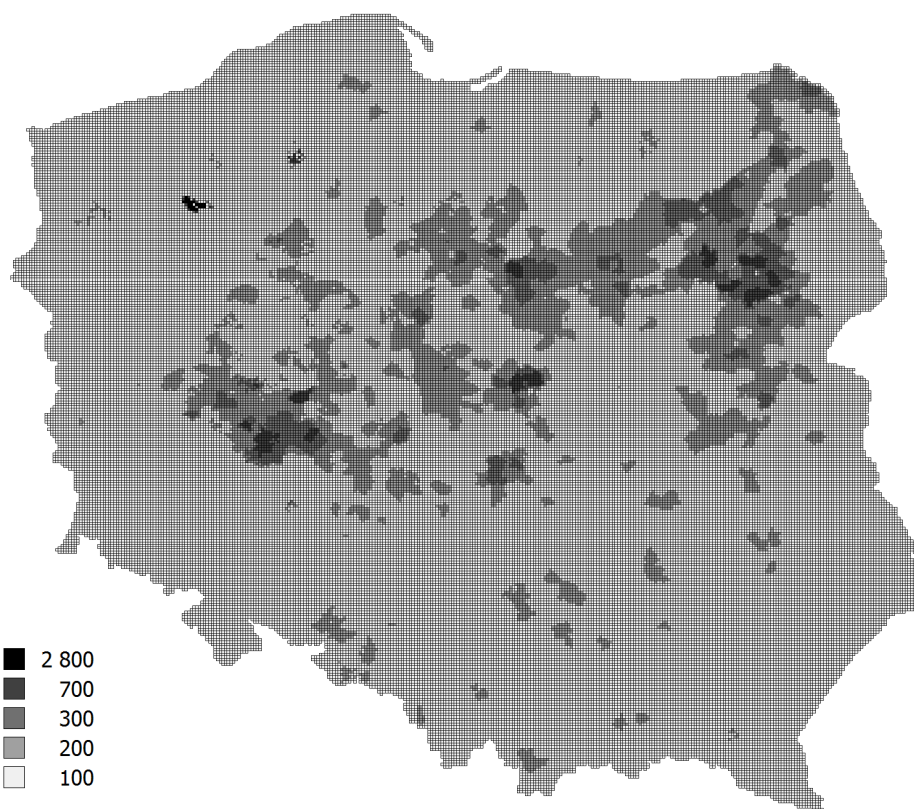


Рис. 2. Річні емісії метану від розкладення гною свійських тварин на рівні воєводств Польщі (тонни, 2010 р.)

На рис. 4 відображено сумарні річні питомі емісії (емісії з одиниці площі) від тваринництва загалом. Результати вказано в  $\text{CO}_2$ -еквіваленті, тобто емісії метану та закису азоту помножено на їх коефіцієнти глобального потепління (25 – для метану і 298 – для закису азоту). Аналіз отриманих результатів свідчить, що розподіл джерел емісій нерівномірний. Зокрема, у Західно-Поморському воєводстві в гміні Weirzchowo поголів'я свиней у 2010 році становило 829 597 голів. Звідси в 27 елементарних ділянках цієї гміни, позначених на рис. 4 чорним кольором, мали місце найбільші питомі емісії від 700 до 2756 тонн у  $\text{CO}_2$ -еквіваленті на  $1 \text{ км}^2$ .



**Рис. 3.** Річні емісії закису азоту від системи зберігання відходів життєдіяльності тварин у твердому стані у воєводствах (тонни, 2010 р.)



**Рис. 4.** Річні сумарні питомі емісії від кишкової ферментації сільськогосподарських тварин, а також збирання, зберігання та розкладення гною на рівні елементарних ділянок  $2 \times 2 \text{ км}$  (2010 рік,  $\text{т/км}^2$ ,  $\text{CO}_2$ -еквівалент)

**Висновки.** Розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів та програмні засоби, які дають можливість здійснити просторову інвентаризацію емісій метану (CH<sub>4</sub>) від кишкової ферментації сільськогосподарських тварин, а також закису азоту (N<sub>2</sub>O) від різних систем зберігання відходів їх життєдіяльності. В результаті чисельних експериментів отримано оцінки емісій парникових газів для кожної категорії на рівні елементарних ділянок 2 × 2 км для Польщі в цілому і на цій основі побудовано цифрові карти відповідних емісій на рівні воєводств, а також просторові кадастри емісій в CO<sub>2</sub>-еквіваленті від тваринництва загалом. Результати інвентаризації, представлені у такій формі, є вкрай важливими для владних структур при прийнятті стратегічних рішень щодо шляхів скорочення емісій парникових газів на відповідних територіях. Здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів з тими, що їх подано на рівні країни у звіті [2]. Роботи виконано в рамках проекту 7FP Marie Curie Actions IRSES project No. 247645.

#### Список літератури:

1. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories** / Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds). – IPCC, IGES, Japan, 2006.

2. **Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України** / Р. А. Бунь, М. І. Густі, В. С. Дачукта ін.; За ред. Р. А. Буня. – Львів : УАД, 2004. – 376 с.

3. **Poland's National Inventory report 2012: Greenhouse Gas Inventory for 1988-2010.** National Centre for Emission Management at the Institute of Environmental Protection. National Research Institute, Warszawa, May 2012. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/6598.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/6598.php)

4. **Statistical Atlas.** Eurostat regional yearbook 2012. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

5. **Agricultural census 2010. Livestock population.** – Режим доступу: <http://www.stat.gov.pl/bdlen>

*Н.В. Чарковская, Р.А. Бунь, З. Нахорски, М.Ф. Сорочич, И. Хорабик*

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ: ЖИВОТНОВОДСТВО ПОЛЬШИ

Проанализированы основные категории источников эмиссии парниковых газов в животноводстве Польши - кишечная ферментация животных и разложение, сбор, хранение и использование навоза. Представлены разработанные математические модели эмиссионных процессов от этих источников на уровне элементарных участков заданного размера. Средствами геоинформационной системы сформирована геораспределенная база входных данных на основе статистической информации о поголовьи сельскохозяйственных животных в регионах Польши. В результате численных экспериментов получены оценки эмиссий метана и закиси азота по видам сельскохозяйственных животных на уровне элементарных участков 2 × 2 км. Сформированы пространственные кадастры эмиссий и представлены в виде цифровых карт.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, пространственный анализ, эмиссия парниковых газов, сельскохозяйственный сектор Польши, животноводство.

**MODELING AND SPATIAL ANALYSIS OF GREENHOUSE GAS EMISSION PROCESSES: ANIMAL SECTOR OF POLAND**

The main greenhouse gas emission sources in the Animal subsector in Poland, in particular enteric fermentation of animals, and decomposition, collection, storage and usage of animal manure are analyzed. Mathematical models of emission processes from these sources at the level of elementary objects of fixed size are presented. Using geoinformation system tools, the georeferenced database of statistical information about the number of livestock in Polish regions is formed. In the results of numerical experiments, the estimates of methane and nitrous oxide emissions by type of animals at the level of elementary areas 2 x 2 km in size are obtained. The spatial cadastre of emission are build and presented in the form of digital maps.

**Keywords:** mathematical modeling, spatial analysis, emission of greenhouse gases, the agricultural sector of Poland, animal production.

