

УДК 004.94:519.876.5

О. Я. ДАНИЛО^{1*}, Р. А. БУНЬ¹, П. ТИМКУВ²

¹ Кафедра прикладної математики, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел.: +38 (032) 258 23 68, ел. пошта: olha.danylo@gmail.com.

² Інститут геодезії та геоінформатики, Вроцлавський природничий університет, вул. Норвіда 24, Вроцлав, 50375, Польща.

ГЕОПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ У ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ: ПОРІВНЯННЯ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ ТА ПІВДЕННО-СХІДНОЇ ПОЛЬЩІ

Мета. Розробити підходи для просторового моделювання емісій парникових газів у житловому секторі на рівні елементарних об'єктів, побудувати набори геопросторових даних розподілу емісій і на їх основі проаналізувати структурні відмінності в емісіях на території Західної України та Південно-Східної Польщі.

Методика. Досліджено основні джерела емісії парникових газів у житловому секторі. Розроблено підхід для оцінювання енергетичних потреб населення, результати якого використано для дезагрегації даних про спожите паливо з регіонального рівня до рівня елементарних об'єктів. З використанням можливостей програмного забезпечення ГІС, розроблених підходів та методик МГЗЕК побудовано набори геопросторових даних розподілу емісій парникових газів для регіонів Західної України та Південно-Східної Польщі з використанням регулярної Grid-моделі з кроком 2 км за результатами обчислювального експерименту

Результати. На основі отриманих наборів геопросторових даних здійснено порівняння результатів просторового моделювання для регіонів Польщі та України. Встановлено, що основним джерелом енергії для забезпечення побутових потреб населення в Польщі є кам'яне вугілля, а в Україні – природний газ. Встановлено, що емісії у розрахунку на людину в житловому секторі Західної України становили 0,98 т в CO_2 -еквіваленті у 2010 році, а для Південно-Східної Польщі – 1,39 т. Таку суттєву відмінність пояснено тим, що коефіцієнти емісії двоокису вуглецю, метану та закису азоту для вугілля є значно більшими за відповідні коефіцієнти для природного газу. **Наукова новизна.** На базі розробленої математичної моделі емісійних процесів у житловому секторі та здійснених обчислювальних експериментів отримано цифрову карту та відповідні набори геопросторових даних, які містять інформацію про джерела та кількісні оцінки емісій двоокису вуглецю, метану та закису азоту. **Практичність результатів.** Результати просторового моделювання емісії парникових газів дають можливість оцінювати потенціал окремих регіонів для зменшення емісій та приймати зважені рішення щодо спрямування інвестицій для впровадження низько-вуглецевих технологій.

Ключові слова: геоінформаційна технологія; житловий сектор; парниковий газ; геопросторове моделювання; Західна Україна; Південно-Східна Польща.

Вступ

Зміна клімату – це глобальна екологічна проблема, з наслідками якої людство стикнулося вже сьогодні. Основною причиною кліматичних змін експерти вважають посилення антропогенного впливу на довкілля. Внаслідок зростання потреб населення в енергії та неефективного використання енергетичних ресурсів відбувається швидке збільшення концентрації парникових газів в атмосфері. На думку вчених, уникнути катастрофічних наслідків глобального потепління можна тільки за умови, якщо зростання температури не перевищить 2 °C порівняно з доіндустріальним періодом – [Schellnhuber J. S., 2006]. Для цього необхідно

прийняти заходи з пом'якшення та адаптації до змін клімату.

Житловий сектор має значний потенціал для зменшення емісії парникових газів, особливо в країнах, що розвиваються [Balarama S. A., 2007]. Емісії у цьому секторі виникають внаслідок спалювання викопного палива та біомаси, та становлять близько 10 % від сумарних викидів у всіх секторах [National Inventory Submissions, 2012]. Скорочення емісій у житловому секторі можливе в разі впровадження енергозберіжних технологій, розвитку відновлювальної енергетики та створенні сприятливих умов для переходу населення на альтернативні джерела енергії. Для ефективного планування державної політики щодо зменшення емісії парникових

газів, важливо вміти виділяти ті регіони, в яких впровадження нових технологій та модернізація житлового фонду принесуть найвагоміші результати. Саме тому розроблення підходів для просторового моделювання емісій парникових газів у житловому секторі на рівні невеликих ділянок досліджуваної території відкриває нові можливості пошуку шляхів для зменшення емісій.

Мета

Методики, які розробила Міжурядова група експертів зі змін клімату (МГЗЕК) для здійснення інвентаризації парникових газів, є універсальними та можуть бути застосовані для оцінювання емісій на рівні країни чи регіону [IPCC Guidelines for National GHG Inventories, 2006]. Для побудови детальніших наборів геопросторових розподілів емісій парникових газів науковці розробляють підходи, які враховують регіональну специфіку територій, для яких здійснюється просторове моделювання [Ghosh T., 2010; Oda T., 2011]. Зокрема, у роботах Гамаль [Гамаль Х. В., 2009, 2010] розроблено математичні моделі для оцінювання емісій парникових газів у житловому секторі областей Західної України. Використано припущення про те, що спалювання кам'яного вугілля, торф'яних брикетів та дров населенням здійснюється тільки у сільській місцевості як основне або додаткове джерело теплової енергії для опалювання житлової площі чи інших побутових потреб. Саме тому підхід передбачає розподіл загальнообласних обсягів продажу цих видів палива лише у селах, пропорційно до кількості населення, та не відображає реальне споживання цих видів палива.

У роботі [Лесів М. Ю., 2011] розроблено та реалізовано підхід для просторового оцінювання емісій парникових газів в енергетичному секторі прикордонних регіонів Західної України, а також Люблінського та Підкарпатського воєводства Польщі. Оскільки розташування джерел споживання палива у житловому секторі важко виявити, у роботі використано припущення, що споживання палива домашніми господарствами здійснюється пропорційно до кількості населення, що проживає на території відповідного елементарного об'єкта

області чи воєводства. Крім того, для воєводств Польщі емісії у житловому секторі оцінено на рівні гмін, а не окремих населених пунктів. Проте, навіть у межах території гміни населення розподілено нерівномірно, а тому під час просторового оцінювання емісій парникових газів у житловому секторі важливо оцінювати геопросторовий розподіл емісій тільки для тієї території, де проживає населення.

У низці досліджень [Лесів М. Ю., 2012; Данило О.Я., 2012] використано детальніші дані про територіальне розміщення населення, однак в них не враховано відмінність в енергетичних потребах домогосподарств у різних регіонах, а тому ці підходи можуть бути модифіковані з метою отримання точніших результатів.

Тому метою цього дослідження є геопросторове моделювання емісії парникових газів у житловому секторі з урахуванням регіональної специфіки для Південно-Східної Польщі і Західної України та програмна реалізація розробленого підходу засобами геоінформаційної системи.

Методика

У житловому секторі емісії парникових газів виникають унаслідок спалювання населенням викопного палива та біомаси для забезпечення власних енергетичних потреб. Найбільше теплової енергії споживається для опалення житлової площі. До інших побутових потреб населення зараховуємо підігрів води та приготування їжі, для забезпечення яких використовується значно менше енергії. У тих регіонах, де доступ до централізованого постачання тепла та гарячої води є низьким, викопне паливо є основним джерелом енергії, а тому емісії парникових газів, які зараховують до житлового сектору, відповідно до методик МГЗЕК [IPCC Guidelines for National GHG Inventories, 2006], є більшими.

Одне з ключових завдань геопросторового моделювання емісії парникових газів у житловому секторі полягає у просторовій локалізації використаного населенням палива та обчисленні відповідних емісій. Оцінювання величини емісії протягом певного проміжку часу здійснюється на рівні елементарних об'єктів з використанням розроблених матема-

тичних моделей та геоінформаційних технологій. Для житлового сектору елементарним об'єктом вважаємо площинний географічний об'єкт (поселення), у межах якого зосереджена велика кількість точкових джерел – домогосподарств.

Дані про спожите населенням паливо для більшості країн доступні тільки на рівні країни чи окремих регіонів, тому для просторового оцінювання емісій парникових газів обсяги палива необхідно дезагрегувати до рівня елементарних об'єктів. Розроблений у цій роботі підхід передбачає розподіл палива пропорційно до величини енергетичних потреб населення з урахуванням доступу до централізованих джерел енергії.

Енергетичні потреби населення у межах кожного населеного пункту визначаємо як суму енергії, що необхідна для опалення житла, підігрівання води та приготування їжі за формулою:

$$Q = Q_c + Q_w + Q_h,$$

де Q_c , Q_w , Q_h – енергія, необхідна для приготування їжі, підігріву води та опалення житла, відповідно.

Кількість енергії, що необхідна для приготування їжі, обчислюємо як суму енергії, яка необхідна для приготування їжі для членів домогосподарств, підігрівання води і приготування кормів для худоби, що знаходиться у їх власності.

Обсяг енергії для підігрівання води населенням оцінюємо за формулою:

$$Q_w = Q_w^{summ} + Q_w^{wint},$$

де Q_w^{summ} та Q_w^{wint} – кількості енергії для підігрівання води в теплий і холодний періоди року, відповідно, та може бути обчислена з таких виразів:

$$Q_w^{wint} = N_{av}^{wint} \cdot n_0 \cdot p,$$

$$Q_w^{summ} = N_{av}^{summ} \cdot (n - n_0) \cdot p,$$

де p – кількість населення в елементарному об'єкті, n_0 – тривалість опалювального періоду, n – кількість днів року, коли споживається гаряча вода, N_{av}^{summ} і N_{av}^{wint} – обсяги теплової енергії для підігрівання води на потреби однієї людини протягом дня у теплий і холодний періоди року, відповідно, які можна обчислити як:

$$N_{av}^{wint} = g_{norm} \cdot (t_{hot} - t_{wint}) \cdot C,$$

$$N_{av}^{summ} = g_{norm} \cdot (t_{hot} - t_{summ}) \cdot C \cdot \beta,$$

де C – теплосмність води, g_{norm} – норма споживання гарячої води; t_{hot} – температура гарячої води, t_{summ} та t_{wint} – середня температура водопровідної води протягом теплого та холодного періодів року, відповідно, β – коефіцієнт, який враховує зменшення кількості споживання гарячої води протягом теплого періоду року.

Оцінювання теплової енергії для обігрівання житла здійснюємо за такою формулою:

$$Q_h = k_{HDD} \cdot f(Q_{h, sqm}, LA, \varepsilon),$$

де k_{HDD} – відносна зміна кількості опалювальних градусо-днів у році, для якого здійснюється дослідження щодо усередненого значення цього параметра за багато років; $f(Q_{h, sqm}, LA, \varepsilon)$ – функція, яка, використовуючи усереднені показники про кількість енергії, необхідної для опалювання 1 м^2 житлової площі ($Q_{h, sqm}$), дані про сумарну житлову площу в межах аналізованого елементарного об'єкта (LA) та коефіцієнт ефективності використання теплової енергії (ε), оцінює кількість енергії, що необхідна для опалення житла населенням, без врахування температурних особливостей досліджуваного періоду.

Кількість палива i -го типу, спожитого в n -му елементарному об'єкті, обчислюємо як:

$$M_{i,n} = M_{i,R} \cdot F_{type,i}^n, n = \overline{1, N},$$

де $M_{i,R}$ – кількість палива i -го типу, спожитого в R -му регіоні; n – номер елементарного об'єкта $type \in \{Urb, Rur\}$ – характеристика елементарного об'єкта, яка вказує на його належність до міської чи сільської місцевості; N – кількість елементарних об'єктів; $F_{type,i}^n$ – коефіцієнт дезагрегації.

Коефіцієнт дезагрегації визначає відсоток палива, що спалюється в елементарному об'єкті, від загально регіонального обсягу спожитого палива, та залежить від енергетичних потреб населенням для приготування їжі,

підігрівання води та опалення, що не забезпечуються з централізованих джерел енергії.

Оцінювання емісії парникових газів для кожного елементарного об'єкта здійснюємо з використанням такої математичної моделі:

$$E_n^G = M_{i,n} \cdot A_{i,n}^G, n = \overline{1, N},$$

де $M_{i,n}$ – кількість спожитого i -го виду палива для n -ї елементарної ділянки, $A_{i,n}^G$ – коефіцієнт емісії G -го парникового газу; N – загальна кількість таких ділянок.

Результати: реалізація моделі для Польщі та України

Загальний підхід до оцінювання обсягу парникових газів, які емітуються населенням, складається з декількох етапів.

На першому етапі збираємо вхідні дані, необхідні для реалізації моделі (статистична інформація про кількість спожитого палива у житловому секторі, стан житлового фонду, коефіцієнти емісії метану, двоокису вуглецю і закису азоту).

На другому етапі підбираємо необхідні цифрові карти та здійснюємо їх підготовче оброблення. Для здійснення обчислювальних експериментів для Західної України використано карти кліматичних зон та населених пунктів [Данило О. Я., 2012]. Остання була побудована з використанням карти центрів населених пунктів, цифрової карти адміністративного устрою та доступних статистичних даних про кількість населення України за 2010 рік.

Цифрова карта населених пунктів для території Польщі недоступна, тому за основу для створення наборів геопросторових розподілів емісій парникових газів у роботі взято растрові карти з даними про густоту населення [Gallego F. J., 2010], з яких виділено територію дослідження. На основі растрової карти побудовано векторну модель геопросторових об'єктів, що містить векторне подання їхніх меж і таблицю атрибутів. Дані про густоту населення у 2010 році оновлено, використовуючи дані з електронної статистичної бази

даних [Department of Statistics in Poland]. Крім того, додано характеристику належності об'єктів карти до міської чи сільської місцевості. Для територій, для яких здійснюємо просторовий аналіз емісії парникових газів, також використано наявні карти адміністративних меж.

Оскільки потреба в тепловій енергії для опалювання житла залежить від кількості опалювальних градусо-днів, використовуючи інтерпольовані значення щоденних температурних спостережень за методом найближчого сусіда з використанням алгоритму діаграм Вороного на множині координат метеостанцій як центрів локусів Вороного [Haylock M. R., 2008], побудовано карту з даними про кількість опалювальних градусо-днів. Вхідною інформацією для алгоритму були координати тих метеостанцій, що розташовані на території України та Польщі або недалеко від їхніх кордонів, та для яких доступні дані про кількість опалювальних градусо-днів.

На третьому етапі оцінювання емісії парникових газів визначено енергетичні потреби населення, відповідно до яких спожите паливо дезагреговано з рівня області чи воєводства до рівня елементарних об'єктів. Необхідні дані отримано від статистичних управлінь Польщі [Department of Statistics in Poland] та України [Паливно-енергетичні ресурси Львівщини].

На останньому етапі для кожного елементарного об'єкта оцінено величину емісії двоокису вуглецю, метану та закису азоту. На основі отриманих результатів здійснено аналіз та порівняння процесів емісії парникових газів у житловому секторі Західної України та Східної Польщі, а також побудовано тематичні карти, які дають змогу візуально порівняти окремі регіони, та виділити населені пункти з найбільшими питомими емісіями.

Кожен етап реалізовано програмно. Структура створеного програмного засобу містить чотири програмні модулі, реалізовані в середовищі MapBasic 8.0: Mod₁preparation, Mod₂energydemand, Mod₃disaggregation і Mod₄GHGemissions (рис. 1).

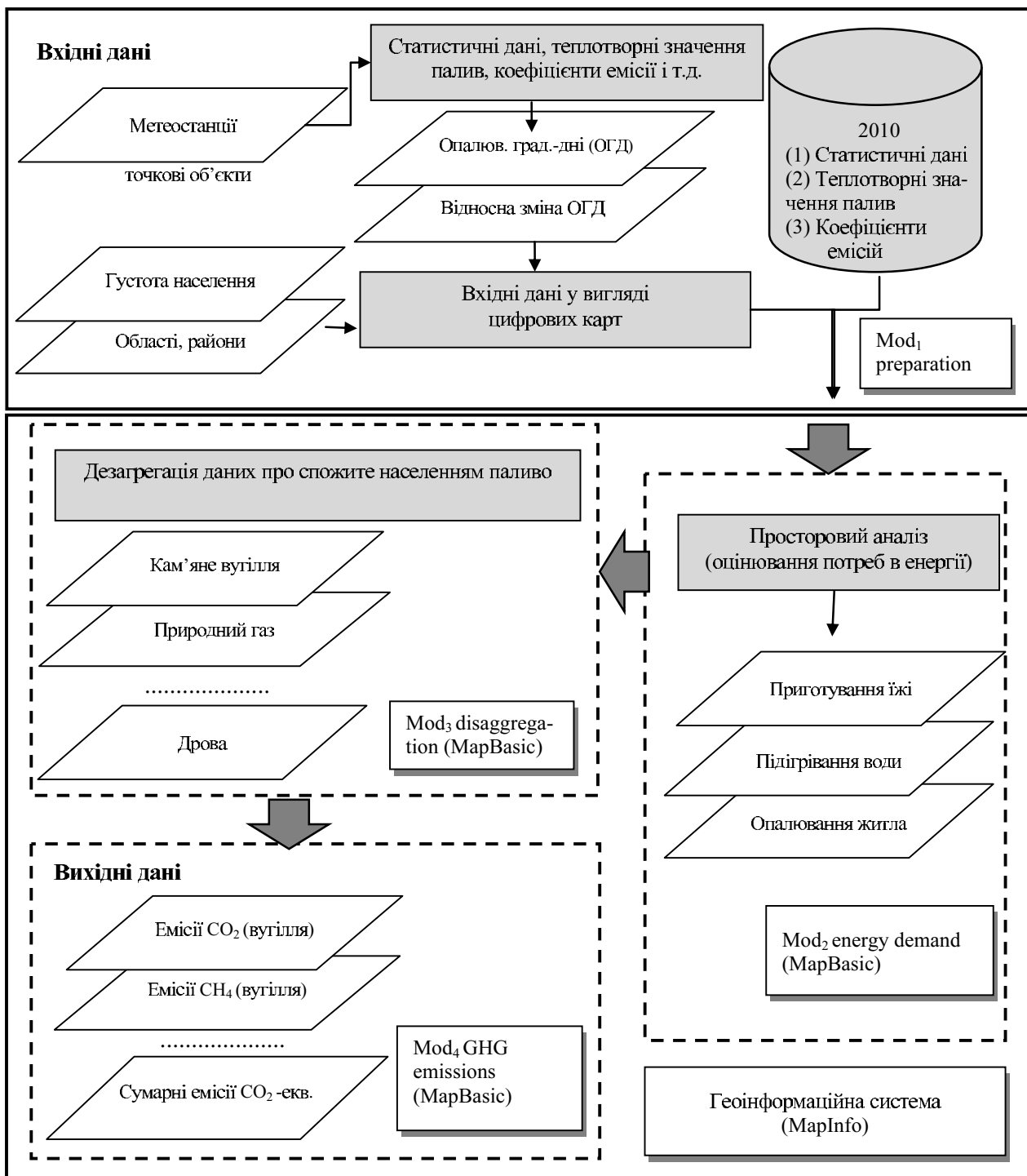


Рис. 1. Логічна структура програмної реалізації просторового моделювання емісії парникових газів у житловому секторі

Fig. 1. The logical structure of program implementation spatial modeling of greenhouse gas emissions in the residential sector

Усю необхідну для моделювання статистичну інформацію організовано у вигляді таблиці Excel, у якій на окремих листах міститься інформація для різних рівнів агрегації (країна, області, райони). Для того, щоб пов'язати

статистичні дані з просторовими об'єктами цифрової карти, реалізовано модуль Mod₁preparation, який переносить вхідні дані з полів Excel у відповідні стовпці таблиці атрибутів. На виході модуль передає шари цифрової карти,

а також дані про теплотворні значення палива та коефіцієнти емісій.

Використовуючи модуль Mod₂energy_demand, здійснено обчислювальні експерименти для оцінювання енергетичних потреб населення. Результати такого оцінювання, а також статистична інформація про доступ населення до

централізованих джерел енергії у вигляді цифрових карт використано в модулі Mod₃disaggregation для дезагрегації даних про спожите населенням паливо. На останньому етапі в модулі Mod₄GHGemissions реалізовано ітеративний процес оцінювання емісій парникових газів для кожного елементарного об'єкта.

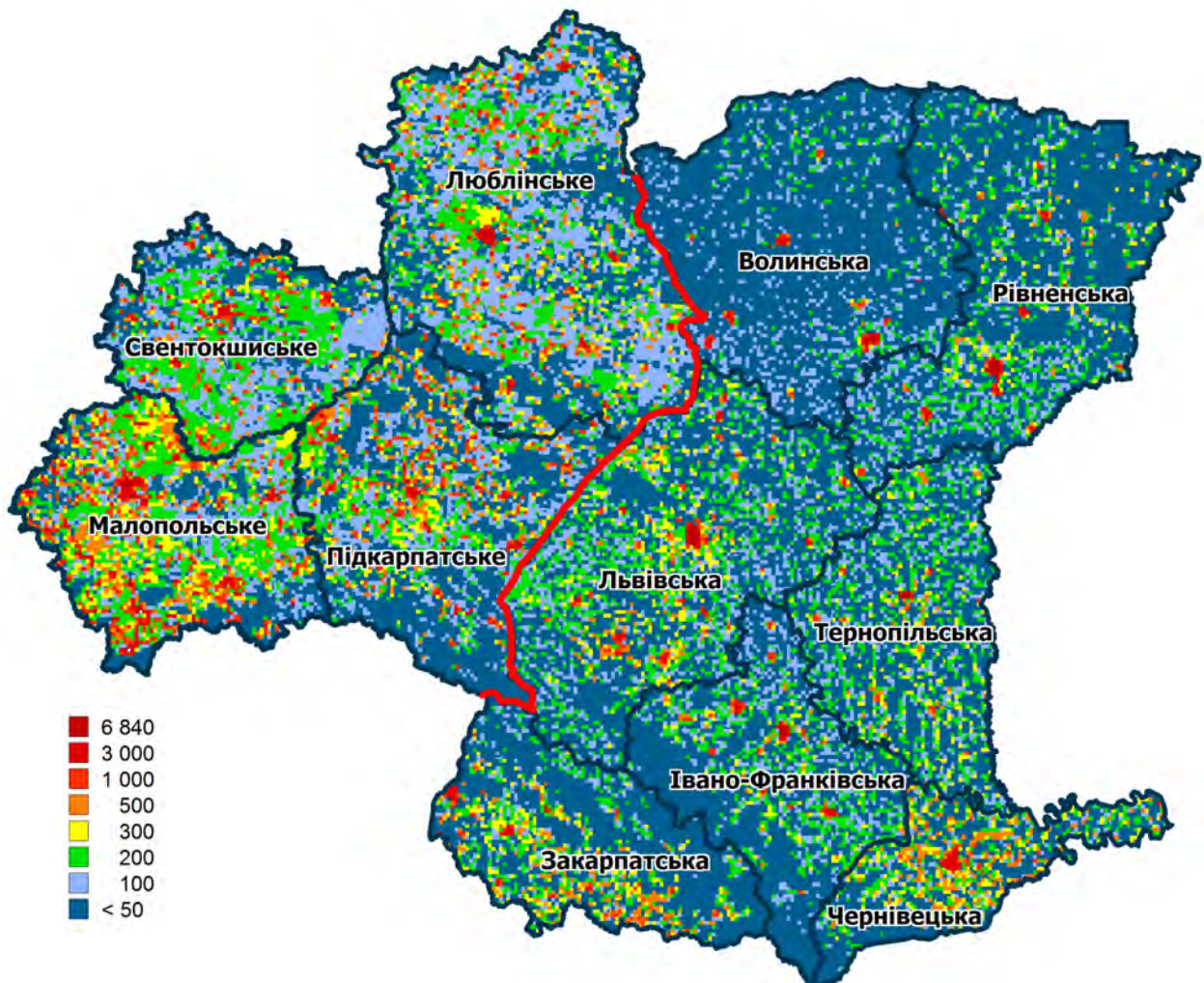


Рис. 2. Сумарні питомі емісії парникових газів у житловому секторі Західної України та Південно-Східної Польщі (t/km^2 , CO_2 -еквівалент, 2×2 км, 2010 рік)
 Fig. 2. The total volume of greenhouse gas emissions in the residential sector in Western Ukraine and Southeast Poland (t/km^2 , CO_2 -ekvivalent, 2×2 км, 2010)

Обчислення з використанням описаних модулів реалізовано окремо для українських та польських регіонів у геоінформаційній системі MapInfo. За результатами просторового моделювання отримано набори геопросторових даних розподілів емісій парникових газів від спалювання викопних видів палива у житловому секторі українсько-польських прикор-

донних регіонів. Оскільки для Польщі основою для наборів геопросторових розподілів емісій використано карту густоти населення, а для України – карту населених пунктів, для зручності здійснення порівняння та аналізу емісій, результати було зведено в одну вихідну таблицю даних та подано на рівні елементарних об'єктів розміром 2×2 км (рис. 2). По кожному

стовпцю таблиці атрибутів можна побудувати окремий шар цифрової карти, тобто представити результат просторового моделювання у вигляді окремих шарів тематичної карти, що дає можливість краще сприймати отриману інформацію [Bun R., 2005].

Аналізуючи отримані результати можна чітко виділити територію Карпат у Підкарпатському воєводстві, яка на території України проходить межею Івано-Франківської та Закарпатської областей. У всіх адміністративних областях цієї території емісії парникових газів від спалювання палива у житловому секторі є малими або їх взагалі немає. Невисокими емісіями також характеризується Волинська область, де значні території займають озера, болотисті землі та ліси.

Оскільки саме густина населення є основним визначником величини емісії у житловому секторі, порівняно високі емісії спостерігаються у великих містах як Західної України (Львів, Рівне, Івано-Франківськ), так і Південно-Східної Польщі (Краків, Люблін, Кельце), а також у Малопольському воєводстві, в якому знаходиться частина Верхньосілезької урбанізованої території. Лідерами з питомих емісій у цьому регіоні є Краків та Люблін.

Структури споживання енергії в Україні та Польщі суттєво відрізняються. Основними факторами, які впливають на вибір енергетичного джерела домогосподарством, є його доступність, вартість одиниці енергії та особливості енергетичних потреб населення. Саме тому ос-

новним джерелом енергії у житловому секторі в Україні є природний газ, а у Польщі – кам'яне вугілля (рис. 3). Близько 93 % емісій у житловому секторі Західних областей України виникають внаслідок спалювання природного газу, невелику частину становлять емісії від використання дров. Емісії від спалювання кам'яного вугілля, скрапленого газу та інших видів палива є зовсім незначними.

На відміну від Західної України, у Південно-Східній Польщі в структурі емісій парникових газів переважають емісії від спалювання кам'яного вугілля (59 % сумарних емісій). Емісії від спалювання дров та природного газу становлять 21,2 % та 15,5 %, відповідно. Емісії від спалювання скрапленого газу та інших видів палива є зовсім незначними (близько 4,5 %).

Треба зауважити, що оскільки теплотворне значення природного газу в півтора рази більше за відповідне значення для кам'яного вугілля, для отримання одиниці енергії, природного газу необхідно менше, тобто в загальному випадку кількість спожитого палива для забезпечення енергетичних потреб залежить від вибору джерела енергії, а також від його фізичних характеристик. Саме тому емісії парникових газів у житловому секторі Західної України становили 0,98 т/людину в CO₂-еквіваленті у 2010 році, а для Південно-Східної Польщі – 1,39 т/людину.

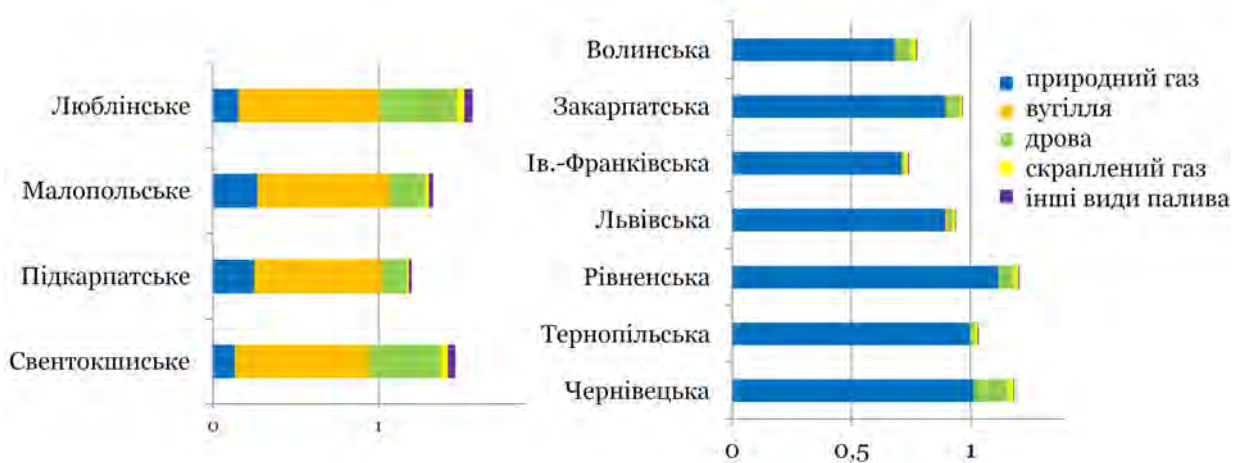


Рис. 3. Структура емісій парникових газів у розрахунку на людину за видами палива: Пд.-Сх. Польща – ліворуч, Західна Україна – праворуч (т/люд., CO₂-еквівалент, 2010)

Fig. 3. Structure of greenhouse gases per person for fuels: South East. left Poland, Western Ukraine the case (thousands / people., CO₂-ekivalent, 2010).

Наукова новизна і практична значущість

Розроблена геоінформаційна технологія для просторового моделювання емісії парникових газів у житловому секторі Західної України та Південно-Східної Польщі дає змогу, використовуючи доступні статистичні дані, здійснювати обчислювальні експерименти та отримувати набори геопросторових даних розподілу емісій парникових газів, на основі яких можна аналізувати внесок кожного елементарного об'єкта в загальні процеси емісії. Такий підхід дає змогу візуалізувати результати просторового моделювання емісій парникових газів, порівнювати окремі ділянки між собою, а також досліджувати структуру емісій за видами парникових газів та за категоріями джерел. Крім того, розроблений підхід та отримані результати дають можливість оцінити потенціали окремих регіонів для зменшення емісій та приймати зважені рішення щодо спрямування інвестицій для підвищення енергоефективності та впровадження низько-вуглецевих технологій.

Висновки

Розроблено підхід для просторового оцінювання емісій парникових газів у житловому секторі на рівні елементарних об'єктів. Здійснено обчислювальні експерименти, використовуючи доступні статистичні дані для Західної України та Південно-Східної Польщі. Проаналізовано структуру емісій парникових газів в обох регіонах. Встановлено, що основним джерелом енергії для обігріву житла, підігріву води та приготування їжі в Україні є природний газ. У Польщі структура емісій дещо відрізняється для воєводства, проте основним енергетичним джерелом є кам'яне вугілля. Оцінено емісії парникових газів на рівні елементарних об'єктів. Запропоновано використовувати такий підхід для визначення потенціалу окремих регіонів для зменшення емісій.

Оскільки важливо знати не тільки величину емісій парникових газів у певному регіоні, а також і невизначеності результатів такого просторового моделювання, одним з наступних кроків є оцінювання невизначеності отриманих результатів, а також їхня валідація. Враховуючи те, що результати за іншими моделями не

передбачають представлення емісій парникових газів за категоріями енергетичного сектору, а представляють емісії парникових газів сумарно, для порівняння отриманих результатів з результатами інших моделей плануємо здійснити просторове моделювання емісій парникових газів у всіх категоріях сектору «Енергетика» і порівняти їх, наприклад, з геопросторовим набором даних розподілу емісій вуглецю [Oda T., 2011], отриманих авторами статті, з використанням бази даних точкових джерел емісії, а також супутниковими спостереженнями за Землею у нічний час.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 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 : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2009. – С. 197–200.
- 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. Пыльп-чак // Искусственный интеллект. – 2010. – № 4. – С. 342–349.
- Данило О. Я. Цифрова карта населення України адаптована для проведення просторової інвентаризації парникових газів / О. Я. Данило, Р. А. Бунь // Тези доп. Третьої Міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія". – Вінниця : ВНТУ, 2012. – С. 87–8.
- Данило О. Геоінформаційна технологія просторової інвентаризації парникових газів в житловому секторі Східної Польщі / О. Данило, М. Лесів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : зб. наук. пр. Західного геодезичного товариства УТГК. – Львів, 2012. – № 23. – С. 216–219.
- 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 : Нац. ун-т "Львівська політехніка", 2011. – 195 с.
- Паливно-енергетичні ресурси Львівщини : Статистичний збірник. – Львів : Головне управління статистики у Львівській області, 2011. – 78 с.
- Balarasa C. A. European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock,

- energy consumption, emissions and potential energy savings / Constantinos A. Balarasa, Athina G. Gagia, Elena Georgopouloub, Sevastianos Mirasgedisb, Yiannis Sarafidisb, Dimitris P. Lalasb // *Building and Environment*. – Vol. 42, Is. 3. – 2007. – P. 1298–1314.
- Buń R. Technologie informacyjne inwentaryzacji gazów cieplarnianych z wykorzystaniem georozproszonych baz danych / Buń R., Gusti M. // *Nowe Technologie w Komputerowych Systemach Zarządzania*. – Warszawa : Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2005. – S. 37–43.
- Department of Statistics in Poland [Online]. Available <http://www.stat.gov.pl>
- Gallego F. J. A population density grid of the European Union / F. J. Gallego // *Population and Environment*. – 2010. – Vol. 31. – P. 460–473.
- Ghosh T. Creating a global grid of distributed fossil fuel CO₂ emissions from nighttime satellite imagery / T. Ghosh, C. D. Elvidge, P. C. Sutton, K. E. Baugh, D. Ziskin, B. T. Tuttle // *Energies*. – 2010. – Vol. 3 – P. 1895–913.
- Haylock M. R. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006 / M. R. Haylock, N. Hofstra, A. M. Kleinank, et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 008. – Vol. 113, is. D20. – 12 p.
- IPCC Guidelines for National GHG Inventories / H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, eds. // [IPCC]. – Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan. – 2006.
- Lesiv M. Spatial analysis of GHG emissions in eastern polish regions: energy production and residential sector / M. Lesiv, R. Bun, N. Shpak, O. Danylo, P. Topylko // *Econtechmod*. – 2012. – Vol. 1, N 2. – P. 17–23.
- National Inventory Submissions: 2003–2012 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/6598.php
- Oda T. A very high-resolution global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights 1980–2007 / T. Oda, S. Maksyutov // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*. – 2011. – Vol. 11. – P. 543–556.
- Schellnhuber J. S. *Avoiding Dangerous Climate Change* / J. S. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. M. L. Wigley, G. Yohe. – Cambridge Univ. Press, 2006. – 408 p.

О. Я. ДАНЬЛО^{1*}, Р. А. БУНЬ¹, П. ТЫМКУВ²

¹ Кафедра прикладной математики, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина, тел. +38 (032) 2582368, эл. почта: olha.danylo@gmail.com.

² Институт геодезии и геоинформатики, Вроцлавский университет, ул. Норвида 24, Вроцлав, 50375, Польша.

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЖИЛИЩНОМ СЕКТОРЕ: СРАВНЕНИЕ ЗАПАДНОЙ УКРАИНЫ И ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ПОЛЬШИ

Цель. Разработать подходы для пространственного моделирования эмиссий парниковых газов в жилищном секторе на уровне элементарных объектов, сформировать наборы геопространственных данных распределения эмиссий и на их основе проанализировать структурные различия в эмиссиях на территории Западной Украины и Юго-Восточной Польши. **Методика.** Исследованы основные источники эмиссии парниковых газов в жилищном секторе. Разработан подход к оцениванию энергетических потребностей населения, результаты которого использованы для дезагрегации данных о потреблении топлива с уровня регионов до уровня элементарных объектов. С использованием возможностей программного обеспечения ГИС, разработанных подходов и методик IPCC, построены наборы геопространственных данных распределения эмиссий парниковых газов для регионов Западной Украины и Юго-Восточной Польши, с использованием регулярной Grid-модели с шагом 2 км по результатам вычислительного эксперимента. **Результаты.** На базе сформированных наборов геопространственных данных проведено сравнение результатов моделирования для регионов Польши и Украины. Установлено, что основным источником энергии для обеспечения бытовых нужд населения в Польше является каменный уголь, а в Украине – природный газ. Отмечено, что эмиссии в расчете на человека в жилищном секторе Западной Украины составляли 0,98 т в CO₂-эквиваленте в 2010 году, а в Юго-Восточной Польше – 1,39 т. Такое существенное отличие объяснено тем, что коэффициенты эмиссии двуоксида углерода, метана и закиси азота для угля значительно выше чем соответствующие коэффициенты для природного газа. **Научная новизна.** На базе разработанной математической модели эмиссионных процессов в жилищном секторе и осуществленных

вычислительных экспериментов получены цифровая карта и соответствующие наборы геопро пространственных данных, которые содержат информацию об источниках эмиссии и их количественных оценках для двуокиси углерода, метана и закиси азота. **Практическая значимость.** Разработанный подход для осуществления пространственного моделирования эмиссии парниковых газов дает возможность оценивать потенциал отдельных регионов для сокращения эмиссий и принимать взвешенные решения относительно направления инвестиций для внедрения низко-углеродных технологий.

Ключевые слова: геоинформационная технология; жилищный сектор; парниковый газ; геопро пространственное моделирование; Западная Украина, Юго-Восточная Польша.

O. Y. DANYLO^{1*}, R. A. BUN¹, P. TYMKÓW²

¹ Department of Applied Mathematics, Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, 79013, Ukraine, tel.: +38 (032) 2582368, email: olha.danylo@gmail.com

² Institute of Geodesy and Geoinformatics, Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Norwida str., 24, Wrocław, 50 375, Poland.

GEOSPATIAL MODELING OF GREENHOUSE GAS EMISSION IN THE RESIDENTIAL SECTOR: A COMPARISON OF WESTERN UKRAINE AND SOUTH-EASTERN POLAND

Purpose. To develop of approaches for spatial inventory of greenhouse gas emissions in the residential sector at the level of elementary objects to form datasets of geospatial distribution of emissions, and to analyze on this base the differences in emission structure for the territories of the Western Ukraine and South-Eastern Poland. **Methodology.** The main sources of greenhouse gas emissions in the residential sector are analyzed. The approach for assessment of energy demand of the households is developed. The results of the assessment are used for disaggregation of fossil fuels, burned in the residential sector, from regional level to the level of elementary objects. The geospatial datasets of greenhouse gas emission distribution is constructed for Western Ukraine and South-Eastern Poland using the tools of GIS software developed approaches and IPCC guidelines. The total results are obtained in the form of regular Grid-model with the resolution of 2 km. **Results.** Based on constructed geospatial datasets of emission distribution in the residential sector, and comparison of the results obtained for Poland and Ukraine, it was identified that the main energy source to meet the household needs in Poland is coal, and in Ukraine – natural gas. Greenhouse gas emissions per capita in the residential sector in South-Eastern Poland were 1,39 t in CO₂-equivalent in 2010, in Western Ukraine – 0,98 t, as the carbon dioxide, methane and nitrous oxide emission coefficients for coal (the main energy source in Poland) are much higher than corresponding coefficients for natural gas. **Originality.** Based on elaborated mathematical model of emission processes in the residential sector, and conducted numerical experiments the digital maps and geospatial datasets with data about emission sources and greenhouse gas emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide are obtained. **Practical significance.** The developed approach for geospatial modeling of greenhouse gas emissions enables to assess the potential of certain regions to reduce emissions and to support the effective decision making concerning implementation of low-carbon technologies.

Keywords: GIS technology; residential sector; greenhouse gas; geospatial modeling; Western Ukraine; South-Eastern Poland.

REFERENCES

- Hamal Kh. V. Tehlivets V. Prostorova inventaryzatsiia parnykovykh haziv u zhytlovomu sektori Volynskoi oblasti [Spatial inventory of greenhouse gas emissions in the residential sector of Volyn region], Materialy III Mizhnar. konf. molodykh vchenykh “Kompiuterni nauky ta inzheneriia” (CSE-2009) [Proceedings of the Third International Scientific Conference “Information Technologies and Computer Engineering”], Lviv, NU “LP”, 2009, pp. 197–200.
- Hamal Kh. V. Pylypchak O. I. Razrobotka pohoda k modelirovaniyu prostranstvennogo raspredelenija emissij parnikovykh gazov na primere ih inventarizacii v zhilishnom sektore Zakarpatskoj oblasti Ukrainy, *Iskusstvennyj intelekt*, 2010, n. 4, pp. 342–349.
- Danylo O., Lesiv M. Heoinformatsiina tekhnolohiia prostorovoi inventaryzatsii parnykovykh haziv v zhytlovomu sektori Skhidnoi Polshchi [Geoinformation technologies of spatial inventory of greenhouse gases in the residential sector of Southern Poland], *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva* [Advances in Geodetic Science and Industry], Lviv, 2012, n. 23, pp. 216–219.

- Danylo O. Ya., Bun R. A. Tsyfrova karta naselennia Ukrainy adaptovana dlia provedennia prostorovoi inventaryzatsii parnykovykh haziv [Population map for Ukraine adapted for spatial inventory of greenhouse gas emissions], Tezy dop. Tretoi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia" [Proceedings of the Third International Scientific Conference "Information Technologies and Computer Engineering"], Vinnytsia, VNTU, 2012, pp. 87–88.
- Lesiv M. Yu. Matematychno modeliuвання ta prostorovi analiz emisii parnykovykh haziv u prykordonnykh rehionakh Ukrainy [Mathematical modeling and spatial analysis of greenhouse gas emissions in regions bordering Ukraine] : dys. kand. tekhn. nauk [PhD thesis]: 01.05.02, Lviv, NU «LP», 2011, 195 p.
- Palyvno-enerhetychni resursy Lvivshchyny: Statystychnyi zbirnyk [Fuel and energy resources Lviv: Statistical Yearbook], Lviv, Holovne upravlinnia statystyky u Lvivskii oblasti [Main Statistical Department in Lviv region], 2011, 78 p.
- Balarasa C. A., Gagliaa A. G., Georgopouloub E., Mirasgedisb S., Sarafidisb Y., Lalasb D.P. European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings, *Building and Environment*, vol. 42, is. 3, 2007, pp. 1298–1314.
- Buń R., Gusti M. Technologie informacyjne inwentaryzacji gazów cieplarnianych z wykorzystaniem georozproszonych baz danych, *Nowe Technologie w Komputerowych Systemach Zarządzania*, Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2005, pp. 37–43.
- Department of Statistics in Poland [Online resource], Available at: <http://www.stat.gov.pl>
- Gallego F. J. A population density grid of the European Union, *Population and Environment*, vol. 31, 2010, pp. 460–473.
- Ghosh T., Elvidge C. D., Sutton P. C., Baugh K. E., Ziskin D., Tuttle B. T. Creating a global grid of distributed fossil fuel CO₂ emissions from nighttime satellite imagery, *Energies*, vol. 3, 2010, pp. 1895–1913.
- Haylock M. R., Hofstra N., Klein Tank A. M., et al. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,– 2008, vol. 113, is. D20, 12 p.
- IPCC Guidelines for National GHG Inventories, H. S.Eggleston, L.Buendia, K.Miwa, eds., IPCC, Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan, 2006.
- Lesiv M., Bun R., Shpak N., Danylo O., Topylko P. Spatial analysis of GHG emissions in eastern polish regions: energy production and residential sector, *Econtechmod*, 2012, vol. 1, n. 2, pp. 17–23.
- National Inventory Submissions: 2003-2012 [Online resource], Available at: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/6598.php
- Oda T., Maksyutov S. A very high-resolution global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights 1980–2007, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 2011, vol. 11, pp. 543–556.
- Schellnhuber J. S., Cramer W., Nakicenovic N., Wigley T.M.L., Yohe G. *Avoiding Dangerous Climate Change*, Cambridge Univ. Press, 2006, 408 p.

Надійшла 01.12.2014 р.