

*О.Я. Данило<sup>1</sup>, Ксу Ксіангян<sup>2</sup>, професор,  
Р.А. Бунь<sup>1,3</sup>, д-р техн. наук, професор, М.Ю. Лесів<sup>1,4</sup>, канд. техн. наук  
(<sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка";  
<sup>2</sup>Китайський університет гірництва та технологій, Пекін, Китай,  
<sup>3</sup>Академія бізнесу в Домброві Гурнічій, <sup>4</sup>Інститут системного аналізу, Варшава, Польща)*

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ У ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Розроблено математичну модель для територіальної інвентаризації та просторового аналізу процесів емісії парникових газів у житловому секторі. Модель базується на оцінюванні енергетичних потреб населення, методиках інвентаризації Міжурядової групи експертів зі зміни клімату і враховує рівень доступності джерел енергії для населення. Як приклад, на основі статистичних даних здійснено просторову інвентаризацію емісій парникових газів у житловому секторі областей Західної України. Дослідження емісійних процесів проведено на рівні населених пунктів.

**Ключові слова:** парникові гази, житловий сектор, математична модель, кадастр емісій, просторове моделювання, Західна Україна.

**Вступ.** Парниковий ефект – одна з найгостріших сьогодні екологічних проблем, які є загрозою для людства. Незважаючи на те, що наслідки цього процесу безпосередньо не зачіпають повсякденного життя населення, як, наприклад, забруднення довкілля, в довгостроковій перспективі збільшення емісій парникових газів може призвести до незворотньої зміни клімату. На міжнародному рівні зусилля спрямовані на сповільнення процесу глобального потепління та його наслідків будуть ефективними тільки за умови досягнення домовленостей між країнами та взяття ними необхідних зобов'язань щодо скорочення емісій парникових газів.

В межах кожної окремо взятої країни зниження емісій в енергетичному, промисловому, житловому та інших секторах залежить від пріоритетів державної політики стосовно контролю за емісіями парникових газів. Саме тому розроблення просторових підходів для інвентаризації парникових газів в усіх секторах є актуальним науковим завданням, а його розв'язання надасть владним структурам додатковий програмний інструментарій для аналізу потенціалу окремих регіонів для скорочення емісій парникових газів та стратегічного планування політики держави щодо цього питання.

Житловий сектор, у порівнянні з іншими секторами, має великий потенціал для зменшення емісій парникових газів, особливо в країнах, що розвиваються [1]. Характерною рисою цього сектора є те, що він складається з великого числа джерел емісії, а тому отримання статистичної інформації на рівні окремих домогосподарств чи навіть населених пунктів, щодо споживання палива є складним і ресурсозатратним завданням для держави. Однак, при плануванні природоохоронних заходів, спрямуванні інвестицій у цей сектор, модернізації та підвищенні енергоефективності житлового фонду, важливо вміти визначати окремі регіони, для яких ці дії будуть найрезультативнішими. Саме тому метою представленого в цій статті дослідження є розроблення підходів для просторового моделювання та аналізу емісій парникових газів у житловому секторі з врахуванням регіональних особливостей окремих областей та здійснення обчислювальних експериментів, використовуючи доступні статистичні дані для Західної України.

**Особливості емісійних процесів у житловому секторі.** Вся енергія, що споживається у житловому секторі, може бути класифікована за чотирма основними категоріями, відповідно до кінцевого використання: опалення приміщень, приготування їжі, підігрів води та використання електроприладів. Частка кожної категорії в сумарному споживанні енергії відрізняється для різних регіонів країни та залежить від кліматичних особливостей території, фізичних характеристик житла і поведінкових звичок окремих домогосподарств. Найбільше енергії у житловому секторі в усіх областях України використовується для опалення житлової площі.

Енергетичні потреби населення можуть забезпечуватися централізовано або індивідуально. Тому емісії парникових газів у житловому секторі поділяють на прямі, тобто ті, які пов'язані з використанням власних джерел енергії, та непрямі, які виникають при виробництві енергії, що постачається населенню централізовано. Рівень благоустрою житлової площі в різних областях України суттєво відрізняється, так само як і кліматичні умови, потреби населення та рівень доступності джерел енергії. Саме тому частка енергії, що покривається з централізованих та власних джерел енергії, є різною залежно від регіону. До власних джерел енергії можна віднести викопне паливо (природний та скраплений газ, торф'яні брикети та напівбрикети, дрова та кам'яне вугілля) та біомасу. Саме використання цих видів палива і спричиняє емісію парникових газів, які при підготовці національних звітів, відповідно до методик IPCC [2], відносять до житлового сектора. У цій статті проаналізовано прямі емісії парникових газів, оскільки непрямі враховуються в секторі виробництва тепло- та електроенергії.

**Математична модель.** Оцінювання обсягу парникових газів, який емітується у житловому секторі, здійснено у декілька етапів. На першому етапі оцінено енергетичні потреби населення як суму енергії, що необхідна для опалення житлової площі, підігріву води та приготування їжі як для самих мешканців, так і для свійських тварин, яких утримують у домогосподарствах. Для кожного населеного пункту кількість необхідної енергії оцінено 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.

Теплову енергію, що витрачається на приготування їжі, визначено як суму енергії, необхідної для приготування їжі в сім'ях, та енергії, необхідної для приготування кормів для худоби, а також підігріву води для санітарних потреб. При цьому використано усереднені показники потреби в тепловій енергії [3], цифрові карти населених пунктів з даними про кількість населення та статистичні дані про кількість свійських тварин.

Енергію, яка необхідна для підігріву води, обчислено як суму енергії для підігріву води протягом теплого і холодного (опалювального) періодів року. Протягом холодного періоду кількість енергії, необхідної для підігріву води є вищою, оскільки середні показники температури водопровідної води є нижчими, ніж протягом теплого періоду року. Кількість енергії необхідної для підігріву води, оцінено ґрунтуючись на усередненій температурі водопровідної води, та показниках споживання гарячої води в розрахунку на людину, визначених Міністерством регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України.

Загальна кількість енергії, необхідної для опалення одного квадратного метра житлової площі, залежить від характеристик житла, таких як: кількість поверхів у будинку, рік зведення, кліматичні особливості регіону, інтенсивність використання приміщення та втрати теплової енергії внаслідок ряду чинників. При опаленні житлової площі в будинках тепла енергія витрачається на компенсацію тепловтрат через стіни та будівельні елементи, підігрів повітря, тепло якого втрачається через нещільність будівельних з'єднань, вікна і двері, що періодично відчиняються. При розрахунках планової річної норми витрати теплової енергії на опалення, що постачається централізовано, також обчислюють кількість тепла, яке в силу технічних особливостей системи опалення втрачається в режимі перегріву будівель, а також втрати теплової енергії у внутрішньо будинкових системах. При індивідуальному опаленні домогосподарство внаслідок ощадливого користування енергією для мінімізації своїх витрат на купівлю палива, зводить ці втрати до мінімуму.

В загальному випадку, сумарна тепла енергія, що необхідна для опалення житлової площі в елементарному об'єкті (невеликій ділянці території, в межах якої здійснюємо аналіз і якою може бути, наприклад, територія населеного пункту), визначається як сума теплової енергії для всіх житлових будинків, що знаходяться в населеному пункті, з використанням усереднених показників про кількість енергії для опалення 1 м<sup>2</sup> житлової площі в цьому населеному пункті.

На другому етапі здійснення інвентаризації парникових газів статистичні дані про спожите паливо деагредовано з рівня областей до рівня населених пунктів з врахуванням енергетичних потреб населення, доступності джерел енергії та рівня забезпеченості житлового фонду централізованим постачанням тепла та гарячої води. Зокрема, кількість спожитого палива  $i$ -го типу в  $n$ -му населеному пункті обчислено за формулою:

$$M_i(\delta_n) = M_i(R) \cdot F_i^{type}(\delta_n), \quad n = \overline{1, N}, \quad \delta_n \in R,$$

де  $M_i$  - кількість спожитого палива  $i$ -го типу,  $\delta_n$  -  $n$ -й елементарний об'єкт - населений пункт (географічний об'єкт),  $N$  - кількість елементарних об'єктів у  $R$ -й адміністративній області,  $R \in \tilde{R}$ ,  $\tilde{R} = \{R_1, R_2, \dots\}$  - множина адміністративних одиниць (областей), для яких здійснюємо обчислювальні експерименти,  $\delta_n \in R$  - запис, який означає, що географічний об'єкт  $\delta_n$  повністю розміщений в межах об'єкта  $R$ ,  $type \in \{Urb, Rur\}$  - індекс, який характеризує приналежність населеного пункту до міської ( $Urb$ ) чи сільської ( $Rur$ ) місцевості,  $F_i^{type}(\delta_n)$  - коефіцієнт дезагрегації. Цей коефіцієнт обчислюємо за формулою:

$$F_i^{type}(\delta_n) = \frac{k_{n,i}^{type} \cdot (a_d^{type} Q_{c,n} + b_d^{type} Q_{w,n} + c_d^{type} Q_{h,n})}{\sum_{ter \in \{Urb, Rur\}} \sum_{j=\overline{1, N}; \delta_j \in \{\tilde{S}^{ter} \cap R\}} [k_{i,j}^{ter} \cdot \sum_{D \in \{\tilde{D} \cap R\}} (a_D^{ter} Q_{c,j} + b_D^{ter} Q_{w,j} + c_D^{ter} Q_{h,j})]}, \quad \delta_n \in d, \quad d \in R,$$

де  $\tilde{S}^{Urb}$  та  $\tilde{S}^{Rur}$  - множини елементарних об'єктів у міській та сільській місцевостях, відповідно;  $a_d^{type}$ ,  $b_d^{type}$ ,  $c_d^{type}$  - відсотки теплової енергії для приготування їжі, підігріву води та опалення житла, відповідно, що не забезпечується з централізованих джерел енергії в  $d$ -му районі, що належить  $R$ -й адміністративній області;  $\tilde{D}$  - множина адміністративних одиниць (районів);  $D \in \{\tilde{D} \cap R\}$  - географічний об'єкт, з множини районів, які знаходяться в межах області  $R$ ,  $k_{i,n}^{type}$  - коефіцієнт, що характеризує доступність  $i$ -го енергетичного джерела ( $i$ -го типу палива) в  $n$ -му елементарному об'єкті;  $Q_{c,n}$ ,  $Q_{w,n}$ ,  $Q_{h,n}$  - теплові енергії, необхідні для приготування їжі, підігріву води та опалення житла, відповідно, в  $n$ -му елементарному об'єкті, операція  $A \cap B$  визначає множину географічних об'єктів, територія яких є спільною для множин  $A$  і  $B$  (перетин множин). Коефіцієнти дезагрегації задовольняють рівність:

$$\sum_{type \in \{Urb, Rur\}} \sum_{n=\overline{1, N}; \delta_n \in \{\tilde{S}^{type} \cap R\}} F_i^{type}(\delta_n) = 1, \quad \forall R \in \tilde{R}.$$

На останньому етапі, використовуючи коефіцієнти емісії та теплотворні значення палив, для кожного населеного пункту визначено обсяг вуглекислого газу, метану та закису азоту, що емітуються в атмосферу при спалюванні викопних видів палива населенням, та отримано сумарні емісії парникових газів в  $CO_2$ -еквіваленті на рівні елементарних об'єктів.

**Вхідні дані для здійснення обчислювальних експериментів.** Вхідними даними для програмної реалізації математичної моделі емісії парникових газів є статистичні дані, цифрові карти, теплотворні значення палива та коефіцієнти емісій. Статистична інформація про кількість спожитого палива у житловому секторі Західної України доступна на рівні областей для кам'яного вугілля, торфу, природного та скрапленого газу [3]. Дані про спалювання біомаси населенням для забезпечення власних побутових потреб доступні на рівні районів для Рівненської, Волинської та Івано-Франківської областей. Для інших регіонів Західної України дані про споживання цього виду палива доступні тільки на рівні областей. Дані про благоустрій житла отримано від обласних державних статистичних управлінь.

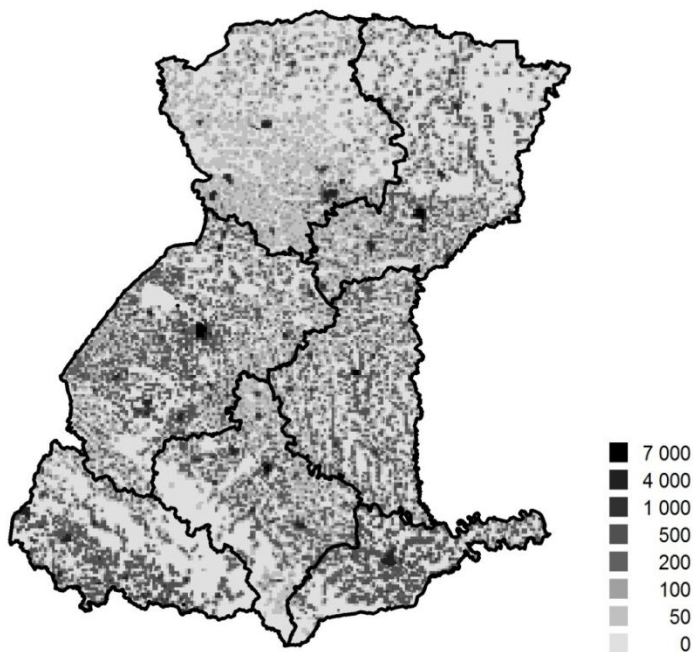
Незважаючи на рівень деталізації статистичних даних, у житловому секторі в Україні доцільно використовувати агреговані обласні дані про спожите паливо. Причиною є те, що в Україні статистична інформація про використання палива населенням збирається за місцем

його реалізації/продажу, а не за місцем використання. Так для деяких областей Західної України дані про споживання палива населенням доступні на рівні районів, проте вони не відображають фактичного використання паливних ресурсів у житловому секторі в межах цих районів та вносять суттєві збурення в кінцеві результати досліджень. Тому ці дані було використано лише з метою аналізу отриманих результатів дезагрегації палива.

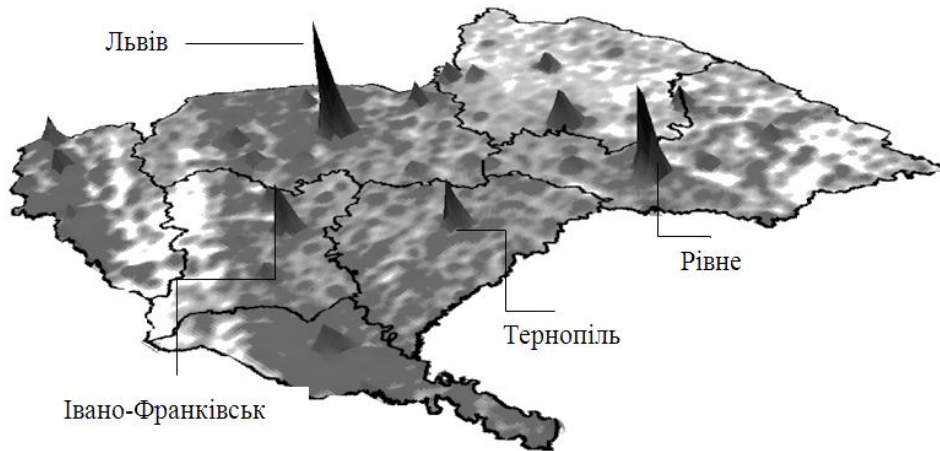
Важливими вхідними даними для здійснення просторового аналізу емісій парникових газів у житловому секторі є цифрові карти, які будуть основою для побудови кадастру емісій. Особливістю просторового моделювання емісії парникових газів є те, що результати отримуємо на рівні елементарних об'єктів, якими при дослідженні житлового сектора доцільно вважати населені пункти. Саме тому, для здійснення обчислювальних експериментів для Західної України використано цифрові карти населених пунктів України [4], адміністративних меж [5], кліматичних зон та карта з даними про кількість опалювальних градусо-днів. Останню побудовано за алгоритмом Вороного з використанням даних зібраних метеостанціями, що знаходяться на території України або недалеко від її кордонів та для яких доступні дані про кількість опалювальних градусо-днів за період дослідження [7]. Представлену математичну модель реалізовано з використанням геоінфор-маційних технологій, які дають можливість поєднувати просторові дані з даними табличного типу, здійснювати математичні операції з цими даними та представляти результати у вигляді тематичних карт.

**Результати просторового аналізу емісій у житловому секторі.** Відповідно до результатів просторового моделювання, емісії парникових газів від спалювання палива населенням на території Західної України розподілені вкрай нерівномірно. Найбільші питомі емісії, як видно з рис. 1, зосереджені у Львівській, Чернівецькій та Південно-Західній частині Закарпатської області. Найменші питомі емісії характерні для Волинської області.

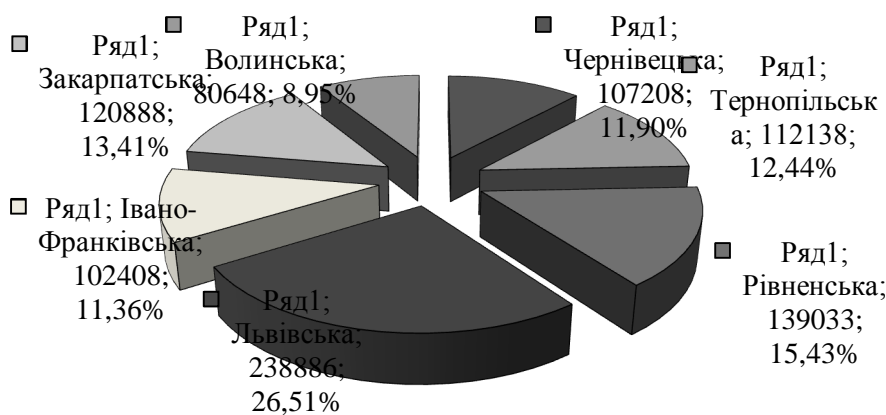
Абсолютним лідером за величиною питомих емісій парникових газів у цьому регіоні є м. Львів (рис. 2). Найбільшими сумарними емісіями характеризується Львівська область – 26,51% від емісій у регіоні, емісії в Рівненській та Закарпатській областях становлять 15,43% і 13,41% відповідно, найменші емісії мають місце у Волинській області – 8,95% (рис. 3).



*Рис. 1. Питомі емісії парникових газів у житловому секторі Західної України (т/км<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub>-еквівалент, 2010 рік)*



**Рис. 2.** 3D-представлення питомих емісій парникових газів у житловому секторі Західної України (IDW-інтерполяція, т/км<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub>-еквівалент, 2010 рік)

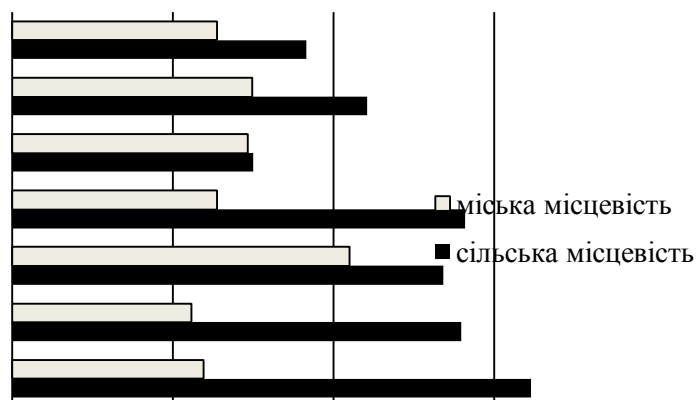


**Рис. 3.** Структура емісій парникових газів у житловому секторі Західної України за областями

Величина емісії парникових газів у житловому секторі в розрахунку на одну людину суттєво відрізняється в залежності від області та типу населеного пункту (рис. 4). Причин такої неоднорідності є декілька. Перш за все, важливим параметром, який впливає на величину емісій, є ступінь обладнання житлової площі доступом до системи централізованого постачання тепла та гарячої води. Чим нижчим є рівень благоустрою житла, тим більшу частку енергетичних потреб населення покриває, спалюючи викопне паливо, що своєю чергою збільшує величину емісій парникових газів, які відносять до житлового сектора. У всіх областях показники благоустрою житла у сільській місцевості є нижчими, ніж відповідні показники для міських населених пунктів. Так, наприклад, для Чернівецької області у міській місцевості 68,6% житлової площі обладнано централізованим тепlopостачанням, і тільки 29,1% – у сільській місцевості. Рівень доступу до централізованого постачання гарячою водою є ще нижчим та становить 55,5% та 3,6% у міських та сільських поселеннях, відповідно.

Іншим фактором, що впливає на величину емісій парникових газів є вибір джерела енергії. У випадку, коли домогосподарство не має доступу до централізованих джерел енергії або якщо теплової енергії, що постачається, є недостатньо для побутових потреб, дефіцит енергії покривається з власних джерел енергії. До таких джерел ми відносимо природний та скрапленний газ, торф'яні брикети та напівбрикети, дрова та кам'яне вугілля. Кожен з цих видів палива має різні теплотворні значення та коефіцієнти емісії. Наприклад, коефіцієнти емісії парникових газів від спалювання дров є майже вдвічі вищими за відповідні коефіцієнти емісій для природного чи скрапленого газу, при цьому нетто теплотворне значення є втричі нижчим. Це

означає, що для отримання одиниці енергії від спалювання дров, відповідні емісії є вдвічі більшими за емісії від спалювання газу для отримання такої ж кількості енергії. Таким чином, для забезпечення тієї самої кількості енергетичних потреб населення, вибір джерела енергії може суттєво впливати на величину емісії для отримання однієї одиниці енергії.



**Рис. 4.** Величина емісій парникових газів у житловому секторі Західної України в розрахунку на людину (кг/людину, CO<sub>2</sub>-еквівалент, 2010 рік)

У житловому секторі найбільший відсоток теплової енергії витрачається на обігрів житлової площі. Тому рівень забезпеченості одного мешканця загальною площею житла також має значний вплив на величину емісій парникових газів і варіюється залежно від області та типу місцевості. Для областей Західної України цей показник коливається в межах від 18,5 до 22,3 м<sup>2</sup> для міст та селищ міського типу, та від 22,6 до 33,2 м<sup>2</sup> - для сіл. Рівень забезпеченості житловою площею у сільській місцевості найвищий у Чернівецькій області, а найнижчий – у Волинській, що пояснює різницю між величинами емісій парникових газів у розрахунку на людину у сільських поселеннях двох областей (рис. 4). Величина емісій у розрахунку на людину в міській місцевості суттєво не відрізняється в областях Західної України.

**Верифікація результатів просторового моделювання.** Для верифікації отриманих результатів дезагреговані дані про спалювання біомаси в житловому секторі були агреговані до рівня районів у тих областях, для яких статистична інформація на такому рівні є доступна, а саме для Волинської, Івано-Франківської та Рівненської областей. У процесі порівняння агрегованих даних з даними, отриманими від обласних статистичних управлінь виявлено, що у деяких районах обсяги палива відрізняються в декілька разів. Зокрема, в районах з багатими лісовими ресурсами наш підхід "недооцінює" кількість спаленої населенням деревини. Це можна пояснити тим, що статистичні управління збирають дані про споживання населенням біомаси та інших видів палива за місцем їхньої реалізації, а не за фактичним місцем використання. Саме тому використання розробленого підходу дає змогу отримати результати, що відображають обсяги спожитого палива точніше, ніж навіть використання деталізованих статистичних даних.

**Висновки.** Розроблений підхід до інвентаризації емісій парникових газів у житловому секторі відкриває нові можливості для оцінювання потенціалу окремих регіонів для скорочення викидів. Представлена математична модель може бути застосована для отримання результатів просторового моделювання як для окремих областей, так і для країни загалом. Отримані георозподілені бази даних з результатами інвентаризації дають змогу аналізувати емісії парникових газів за джерелами емісій та видами палив, порівнювати окремі регіони між собою та візуалізувати отримані результати у вигляді тематичних карт. Результати отримано в рамках виконання українсько-китайського проекту за фінансової підтримки Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України.



### Список літератури:

1. **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. Gagliala, Elena Georgopoulou, Sevastianos Mirasgedis, Yiannis Sarafidis, Dimitris P. Lalas // *Building and Environment*. – V. 42, Is. 3. – 2007. – P. 1298–1314.
2. **Інженерне обладнання** будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Газопостачання. ДБН В.2.5-20-2001. Затверджено наказом Держбуду України від 23.04.2001, № 101. – Київ : Держбуд України, 2001.
3. **Паливно-енергетичні ресурси** Львівщини: Статистичний збірник. – Львів: Головне управління статистики у Львівській області, 2011. – 78 с.
4. **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. 87-88.
5. **GeoNetwork** – The portal to spatial data, FAO [Електронний ресурс].- <http://www.fao.org/geonetwork>.
6. **Degree Days.net** – Custom Degree Day Data / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.degree-days.net>.
7. **IPCC Guidelines for National GHG Inventories** / H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, eds. // [IPCC]. – Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan. – 2006.

*О.Я. Даныло, Ксу Ксиангян, Р.А. Бунь, М. Лесив*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЖИЛИЩНОМ СЕКТОРЕ ЗАПАДНОЙ УКРАИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Разработана математическая модель для территориальной инвентаризации и пространственного анализа процессов эмиссии парниковых газов в жилищном секторе. Модель базируется на оценке энергетических потребностей населения, методиках инвентаризации Межправительственной группы экспертов по изменению климата и учитывает уровень доступности источников энергии для населения. Как пример, на основе статистических данных осуществлено пространственную инвентаризацию эмиссий парниковых газов в жилищном секторе областей Западной Украины. Исследование эмиссионных процессов проведено на уровне населенных пунктов.

**Ключевые слова:** парниковые газы, жилищной сектор, математическая модель, кадастр эмиссий, пространственное моделирование, Западная Украина.

*О.У. Danylo, Xu Xiangyang, R.A. Bun, M. Y. Lesiv*

### SIMULATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE RESIDENTIAL SECTOR OF WESTERN UKRAINE USING GIS

A mathematical model for territorial inventory and spatial analysis of greenhouse gas emission processes in the residential sector is developed. The model is based on the assessment of energy demand, methods of inventory recommended by Intergovernmental Panel on Climate Change, and reflects the accessibility of energy sources for the population. As an example, using statistical information the spatial inventory of greenhouse gas emissions in the residential sector in Western Ukraine was conducted. Emission processes analysis is carried out at the level of settlements.

**Key words:** greenhouse gases, residential sector, mathematical model, emissions inventory, spatial modeling, Western Ukraine.

