

МЕТОДИ ОЦІНКИ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

© Бунь А., 2008

Наведено методи оцінювання невизначеностей результатів інвентаризації парникових газів. Найбільше можливостей для аналізу надає використання методу Монте-Карло. Описано розроблене на його основі програмне забезпечення для оцінки невизначеностей результатів інвентаризації парникових газів. Також наведено результати числових експериментів з оцінки невизначеності оцінок емісій парникових газів в Україні.

This paper provides a review of methods for estimation of greenhouse gas emissions uncertainty. The most detailed analysis can be carried based on the Monte-Carlo method. Developed software for estimation of GHG emissions uncertainty which is based on the Monte-Carlo method is presented. This software was used for analysis of uncertainty of GHG emissions inventory in Ukraine. The results of corresponding numerical experiments are presented.

Вступ

Сьогодні спостерігається підвищення середньої температури на Землі. За ХХ ст. середня приземна температура зросла на $0,6 \pm 0,2^\circ \text{C}$ [1]. Переважна більшість вчених вважає це наслідком зміни клімату та глобального потепління, спричинених парниковим ефектом. Підвищення концентрацій парникових газів (CO_2 , CH_4 , N_2O та ін.) підсилює парниковий ефект.

Обмеження наслідків зміни клімату вимагає значного зниження викидів парникових газів. Згідно з Кіотським протоколом до Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату, промислово розвинуті країни повинні знизити сумарні викиди парникових газів. Для цього для кожної з країн-учасниць протоколу встановлено квоти на емісії. Кожна така країна повинна налагодити регулярні інвентаризації парникових газів і слідкувати за дотриманням їх викидів на встановленому протоколом рівні.

Для уніфікації підходів до інвентаризації Міжурядова група експертів зі зміни клімату розробила основні принципи національних інвентаризацій парникових газів [2,3] та відповідне програмне забезпечення (методики IPCC) [4], які повинні використовуватися учасниками Кіотського протоколу при підготовці національних повідомлень про емісії парникових газів.

Усім оцінкам викидів парникових газів властива невизначеність. У найпростішому випадку вона виникає внаслідок неточних вимірювань емісій парникових газів. Тоді оцінка невизначеності може ґрунтуватись на рівні точності вимірювального приладу. Однак, пряме вимірювання викидів зустрічається дуже рідко, тому емісії оцінюють за допомогою коефіцієнтів емісій та статистичних даних про діяльність чи моделювання джерела викидів. У такому випадку виникають невизначеності, пов'язані з недостатніми знаннями процесів, коефіцієнтів, похибками отримання статистичних даних та неточностями моделей. Ще однією причиною появи невизначеностей можуть бути природні коливання деяких процесів [2]. Крім того, методики IPCC є надто загальними і слабо враховують особливості окремих регіонів планети, що збільшує невизначеність інвентаризації [5,6]. Загальна невизначеність є сумою (об'єднанням) всіх вищезгаданих невизначеностей, і для її оцінки необхідно правильно оцінити всі складові та їх поєднання. Метою досліджень, результати яких наведено у статті, є створення ефективного інструментарію для аналізу невизначеностей результатів інвентаризації парникових газів.

Невизначеність результатів інвентаризації парникових газів

Невизначеність вимірювання – це параметр, пов'язаний з результатом вимірювання, який описує розкиданість значень, які могла б (відповідно до проведених вимірювань) набувати вимірювана величина [7]. Невизначеність стосовно інвентаризації парникових газів – це величина, яка вказує на відсутність визначеності в компонентах кадастру в результаті довільних випадкових факторів, таких як невизначеність джерел емісій, відсутність прозорості інвентаризаційного процесу, тощо [2].

Згідно з рекомендаціями IPCC [2] для вираження невизначеності використовують 95% довірчий інтервал, тобто, відрізок між 2,5 і 97,5 квантилями у співвідношенні із середнім значенням (математичним сподіванням). Для нормального чи будь-якого іншого симетричного розподілу такий підхід виглядає очевидним, і його застосування не викликає жодних труднощів. Однак, у випадку інших розподілів виникають проблеми при визначенні параметрів розподілу, що відповідає заданому довірчому інтервалу.

Оцінка невизначеності результатів національної інвентаризації є вкрай важливим питанням, оскільки вона може значно вплинути на процеси торгівлі квотами на емісії [8]. Нижче представлено математичний апарат для оцінки та аналізу загальної невизначеності національної інвентаризації, який ґрунтується на методі Монте–Карло.

Моделі емісій парникових газів

За результатами інвентаризації в Україні у 2005 році на сектори „Енергетика” та „Промислові процеси” загалом припадало близько 90% сумарних емісій (сумарні емісії без врахування сектора „Землекористування, зміни в землекористуванні та лісове господарство”) в еквіваленті CO₂ [9]. Тому в цій статті розглянуто загальну модель емісій саме для цих двох секторів та для трьох основних парникових газів (CO₂, CH₄, N₂O).

Для визначення емісій у цих секторах для окремих видів палива чи категорій діяльності та для кожного парникового газу зокрема використовують формулу:

$$E_{ij} = f_{ij} \cdot m_{ij}, \quad i = \overline{1,3}, \quad j = \overline{1,J}, \quad (1)$$

де E_{ij} – емісії i -го парникового газу від спалювання j -го виду палива (сектор „Енергетика”) чи для j -ї категорії діяльності (сектор „Промислові процеси”), f_{ij} – відповідний коефіцієнт емісії, m_{ij} – статистичні дані про діяльність. Для знаходження сумарних емісій в еквіваленті CO₂ обчислюють суму:

$$E = \sum_{i=1}^3 \left[GWP_i \cdot \sum_{j=1}^J E_{ij} \right], \quad (2)$$

де GWP_i – потенціал глобального потепління для парникового газу i (для CO₂ – 1, CH₄ – 21, N₂O – 310).

Проте, всі вхідні дані при інвентаризації мають певну невизначеність, тобто сама процедура інвентаризації згідно з формулами (1) та (2), яка використовує операції множення та сумування, веде до поширення (об'єднання) невизначеностей відповідно до формул [2]:

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot x_1)^2 + (U_2 \cdot x_2)^2 + \dots + (U_k \cdot x_k)^2}}{x_1 + x_2 + \dots + x_k} \quad (3)$$

для невизначеності суми величин $\sum_{i=1}^k x_i$ і

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2} \quad (4)$$

для невизначеності добутку величин, де x_i – математичне сподівання випадкової величини X_i , U_i – відносна невизначеність величини X_i ; U_{total} – результуюча відносна невизначеність.

Метод об'єднання невизначеностей за допомогою формул (3) та (4) називають методом першого рівня (від англ. Tier 1). Однак, його можна використовувати лише у випадках, коли всі випадкові величини X_i мають нормальний розподіл, незалежні, а їх відносні невизначеності U_i не

перевищують 30 %. На практиці такі умови виконуються рідко, тому цей метод не гарантує правильного результату. В таких ситуаціях можна додатково використовувати спеціальні методи для корекції оціненої невизначеності, якщо при інвентаризації використано величини з великою невизначеністю, і/або логнормальним розподілом [2]. Натомість недоліками останнього підходу є те, що він значно підвищує складність обчислень, а також його можна застосовувати лише для логнормального розподілу. Тому у випадках, коли зустрічаються значні, несиметричні невизначеності чи існує кореляція між величинами, експерти рекомендують використовувати метод другого рівня (метод Монте-Карло). Він є дуже гнучким, тому дає можливість використовувати будь-які розподіли та проводити детальний стохастичний аналіз емісій та їх невизначеностей.

Суть методу Монте-Карло полягає у багаторазовому проведенні інвентаризації емісій парникових газів. При цьому кожного разу вхідними даними є можливі значення випадкових величин з відповідними розподілами, які відповідають статистичним даним та коефіцієнтам. У результаті отримують вибірку можливих значень емісій. Внаслідок аналізу цієї вибірки можна отримати дані про емісії та їх розподіл, а також оцінити невизначеність.

Нехай коефіцієнти та статистичні дані, що входять до формули (1), – випадкові величини з відомими розподілами та математичними сподіваннями, відповідно, f_{ij} і m_{ij} ($i = \overline{1,3}, j = \overline{1,J}$) та заданими 95% довірчими інтервалами. Тоді алгоритм застосування методу Монте-Карло до інвентаризації з використанням формул (1) та (2) є таким:

- 1) моделювання одного можливого n -го набору значень $f_{ij,n}$ і $m_{ij,n}$, відповідно, для кожного з коефіцієнтів та статистичних даних;
- 2) проведення обчислень аналогічно до формули (1); результатом обчислень є одне можливе значення емісії $E_{ij,n}$ i -го парникового газу в j -й категорії;
- 3) проведення обчислень аналогічно до формули (2); результатом обчислень є одне можливе значення сумарних викидів парникових газів E_n ;
- 4) проведення обчислень з п. 1–3 для кожного значення $n \in [1, N]$, де N – кількість реалізацій;
- 5) аналіз отриманої вибірки та оцінка невизначеності результату інвентаризації.

Програмне забезпечення

Описаний у попередньому розділі алгоритм покладено в основу розробленої програми для аналізу невизначеностей національних інвентаризацій парникових газів. Загальну схему програми зображено на рис. 1.

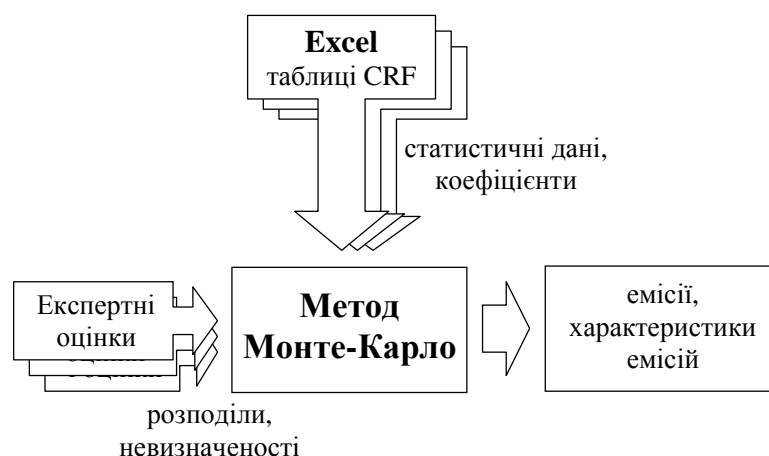


Рис. 1. Загальна схема програмної реалізації

Значення вхідних даних (коефіцієнтів та статистичних даних) програма імпортує з таблиць CRF (common reporting format – загальноприйнятий формат звітування; таблиці Excel, які містять дані про проведену національну інвентаризацію парникових газів). Потім для кожного значення

вхідних даних необхідно задати значення невизначеності та вид розподілу. Деякі з них рекомендовані методиками IPCC [2], однак більшість можна отримати лише після оцінок експертів. Всі ці дані використовує як вхідні модуль, який проводить інвентаризацію з використанням методу Монте-Карло. Результатом роботи модуля є вибірка $\bar{E} = (E_1, E_2, \dots, E_N)$. Приклад гістограми такої вибірки для емісій в секторі „Енергетика” України в 2005 р. для $N = 10^5$ зображено на рис. 2. При подальшому аналізі вибірки можна робити висновки про значення емісій та їх невизначеності. Для знаходження емісій потрібно обчислити середнє арифметичне значень вектора \bar{E} . Квантиль 2,5%, тобто мінімальне значення, яке більше ніж 2,5% від усіх елементів вибірки, відповідає нижній межі 95% довірчого інтервалу. Відповідно – 97,5% квантиль відповідає верхній межі довірчого інтервалу. Крім того, проміжні вибірки \bar{E}_i , $i = 1, 3$ відповідають емісіям по парникових газах, і їх можна аналізувати аналогічно.

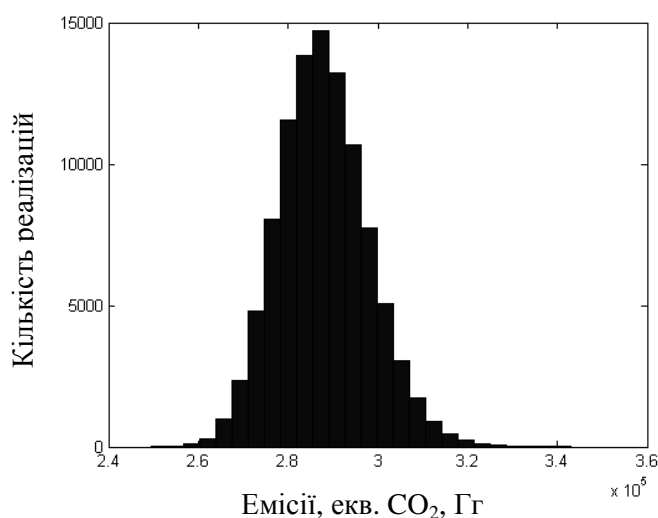


Рис. 2. Гістограма результуючої вибірки для емісій в секторі „Енергетика” України в 2005 р. для $N = 10^5$

Результати числових експериментів

Створене програмне забезпечення для інвентаризації парникових газів дає можливість здійснювати числові експерименти із дослідження невизначеності національних інвентаризацій парникових газів в секторах „Енергетика” та „Промислові процеси” і встановленню залежності цієї невизначеності від невизначеностей окремих складових інвентаризаційного процесу.

Проведено числові експерименти, метою яких було порівняння різних підходів до об’єднання невизначеностей та оцінювання впливу несиметричних розподілів на загальну невизначеність результатів інвентаризації. При цьому зроблено припущення, що всі вхідні дані незалежні. Значення коефіцієнтів та статистичних даних взято з національного звіту про інвентаризацію парникових газів в Україні [9]. У таблиці наведено результати проведеного аналізу невизначеностей інвентаризації парникових газів в секторі „Енергетика” за 2005 р. Значення невизначеностей взято такі, як в [9–11]. Тобто зроблено припущення, що невизначеності статистичних даних, за винятком кількох категорій становлять 3–5%. Також зроблено припущення, що невизначеності коефіцієнтів викидів для CO_2 знаходяться в межах 3–7%, а коефіцієнтів для CH_4 і N_2O коливались в межах 80–500% залежно від категорії та виду палива. У таблиці рядку „Tier 1” відповідають невизначеності отримані за допомогою методів першого рівня, тобто формул (3) та (4). У наступному рядку наведено невизначеності, отримані за допомогою методу Монте-Карло; при цьому вважалося, що всі величини розподілені нормально. Останній рядок містить дані, що відповідають обчисленням відповідно до таких припущень [2, 9–11]:

- значення статистичних даних розподілені за нормальним законом, а їх невизначеність, за винятком кількох категорій, знаходиться в межах 3–5%;

- значення коефіцієнтів викидів для CO₂ розподілені за нормальним законом з невизначеністю у межах 3–7%;
- коефіцієнти для CH₄ і N₂O розподілені логнормально, а величини їх довірчих інтервалів коливаються в межах 80–500% залежно від категорії та виду палива.

		Парниковий газ			Σ
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Емісії, гГ, екв. CO ₂		234531,0	52967,9	514,5	288013,4
Невизначеність, %	Tier 1	± 5,7	± 27,5	± 136,0	± 6,9
	Tier 2, норм. розподіл	± 5,5	± 26,9	± 133,0	± 6,7
	Tier 2, норм., логнорм., розподіли	-5,5 +5,5	-22,9 +32,0	-71,8 +215,0	-6,4 +7,3

Наведені результати свідчать про те, що метод, використаний для об'єднання невизначеностей, може сильно впливати на загальну невизначеність. Як видно з таблиці, використання методів першого рівня дає досить наближену оцінку невизначеності (сумарна невизначеність ±6,9%) порівняно з методом Монте-Карло, якщо припустити, що всі величини розподілені за нормальним законом (сумарна невизначеність ±6,7%). Це пов'язане з тим, що в даному випадку не виконується одне з обмежень, необхідних для використання методів першого рівня, а саме – зустрічаються досить великі відносні невизначеності. Однак, згідно з описаними вище припущеннями, якщо частина вхідних даних розподілена за логнормальним розподілом, її врахування ще більше змінює сумарну невизначеність (-6,4 ... +7,3).

Метою наступного числового експерименту було визначення чутливості загальної невизначеності до врахування особливостей розподілів даних для окремих парникових газів. Обчислення за методом Монте-Карло проводились для кожного з парникових газів, при цьому кожного разу припускали, що всі дані для двох інших газів розподілені нормально. Діапазони невизначеностей для кожного з парникових газів та загальна невизначеність зображені на рис. 3. Цей експеримент показує максимальний вплив вибраних розподілів для метану, при цьому сумарна невизначеність майже не залежить від обраних розподілів для вуглекислого газу і закису азоту. В першому випадку це пов'язане із тим, що майже всі дані розподілені нормально, в другому – практична відсутність впливу пов'язана із дуже малою часткою викидів саме цього газу.

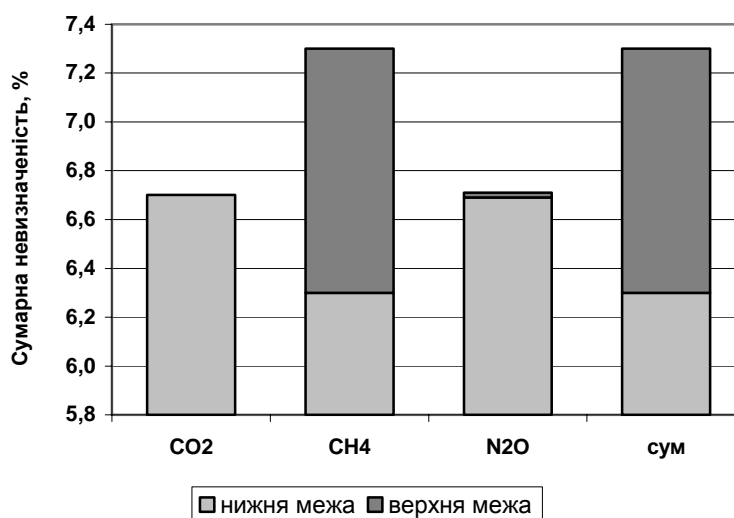


Рис. 3. Чутливість невизначеності в секторі „Енергетика” до асиметрії у розподілах для окремих парникових газів

Результати, зображені на рис. 3, показують незначний вплив врахування відмінних від нормального розподілів для даних, пов'язаних з емісіями метану в Україні. Це можна пояснити значною часткою викидів саме вуглекислого газу, для яких дані здебільшого розподілені за нормальним законом розподілу. Однак, із збільшенням часток CH₄ чи N₂O, для яких багато даних розподілені за логнормальним чи іншими ненормальними розподілами, вплив цих газів на сумарну невизначеність може бути значно більшим.

Висновки

Для аналізу невизначеностей інвентаризації парникових газів на національному рівні створено модель на основі методу Монте–Карло та відповідне програмне забезпечення. Проведений порівняльний аналіз оцінок невизначеностей, отриманих в результаті використання різних підходів, показано, що обраний метод об'єднання невизначеностей та вибір розподілу значно впливають на сумарну невизначеність.

Запропонована модель інвентаризації на основі методу Монте–Карло дає можливість оцінювати невизначеності проведеної інвентаризації на основі національного звіту про інвентаризацію та експертних оцінок щодо невизначеностей вхідних даних. Перевагою такого підходу є його універсальність, оскільки проводити аналіз можна для будь-якої країни та для будь-якого року, для яких доступні звіти про інвентаризацію.

Проведений числовий експеримент з аналізу невизначеностей національної інвентаризації в секторі „Енергетика” України за 2005 р. показав, що найбільший вплив на сумарну невизначеність мають невизначеності, пов'язані з викидами метану. При цьому кінцева невизначеність майже не залежить від врахування чи неврахування відмінних від нормального розподілів, пов'язаних з викидами вуглекислого газу та закису азоту.

1. Austria's National Inventory Report 2006. Submission under the UNFCCC (Resubmission October 2006). – Vienna, 2006. – p. 39-44. 2. IPCC, (2001). Climate Change 2001, Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. – 398 p. 3. IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. 4. Kessel W. ISO/BIPM Guide: Uncertainty in Measurement, English version of a lecture given at the DGQ-VDI/VDE meeting in Langen/Hessen, 1999. – 16 p. 4. National Inventory Report 2006 – Norway. Greenhouse Gas Emissions 1990-2004 Reported According to the UNFCCC Reporting Guidelines. – 2006. – 274 p. 4. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. – Vol. 1: Reporting instructions. – Vol. 2: The Workbook. – Vol. 3: Reference Manual. – IPCC, 1996. – <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm> 5. The IPCC software for estimating GHG emissions. IPCC Version 1.1, 1998. (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/software.htm>). 6. Бунь А.Р., Математичні моделі для інвентаризації парникових газів з урахуванням невизначеності // Моделювання та інформаційні технології. – Вип. 41. – 2007. – С. 151–158. 7. Бунь Р.А. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів: екосистеми Карпатського регіону / Гори і люди: у контексті сталого розвитку: Матеріали Міжнар. конф. – Т.2. – Рахів: КБЗ, 2002. – С. 17–21 8. Национальный отчет: Кадастр выбросов парниковых газов и их поглощение в Украине за 1990–2005 гг. – К.: Министерство охраны окружающей природной среды Украины, 2007. – 315 с. 9. Токар О.Є., Густі М.І. Математичні моделі інвентаризації парникових газів в секторі лісового господарства // Інформаційні технології і системи. – 2003. – Т. 6. – № 1–2. – С. 211–217.