

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА РОЗБІЖНОСТЕЙ У ВИЗНАЧЕННІ ЕМІСІЙ ТА СТОКУ (АБСОРБЦІЇ РОСЛИНАМИ) CO_2 ДЛЯ УКРАЇНИ, ВИКОНАНИХ ЗА МЕТОДИКОЮ НАЦІОНАЛЬНОГО КАДАСТРУ, В ПОРІВНЯННІ З ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРІВ**3. 1 Загальна інформація про інвентаризацію парникових газів в Україні згідно з міжнародними угодами та розробленими національними методиками**

В Україні інвентаризацію антропогенних викидів/поглинань ПГ проводило Державне агентство екологічних інвестицій (ліквідовано в 2014 р.) з порядковою йому Бюджетною установою “Національний центр обліку викидів парникових газів” (НЦОВПГ), яке у взаємодії з іншими суб’єктами системи на національному рівні щорічно готувало Національний кадастр антропогенних викидів та абсорбції ПГ і подавало його до Секретаріату Рамкової конвенції Організації Об’єднаних Націй зі змін клімату за погодженням з Міністром екології та природних ресурсів України [39].

Інвентаризація охоплює викиди шести ПГ прямої дії: діоксиду вуглецю (CO_2), метану (CH_4), закису азоту (N_2O), гідрофторвуглеводнів (ГФВ), перфторвуглеводнів (ПФВ), гексафториду сірки (SF_6). А також чотирьох ПГ непрямої дії: оксиду вуглецю (СО), оксиду азоту (NO_x), неметанових летких органічних сполук (НМЛОС), діоксиду сірки (SO_2).

Відповідно до основних джерел емісій та поглиначів ПГ кількісна оцінка їх викидів і поглинань проводиться за секторами (енергетика; промислові процеси; використання розчинників та інших продуктів; сільське господарство; землекористування, зміни в землекористуванні та лісове господарство (ЗЗЗЛГ); відходи), які, в свою чергу, об’єднують категорії та підкатегорії [36, 37, 39].

Основними джерелами викидів/поглинань CO_2 є спалювання вуглецевмісних видів палива, його видобування, обробка, зберігання, транспортування та споживання, зміни в землекористуванні, а також промисловість; метану CH_4 — виробування

рису, видобування вугілля, транспортування та переробка нафти й природного газу, внутрішня ферментація і відходи тваринництва, полігони твердих побутових відходів та спалювання біомаси; закису азоту N_2O — сільське господарство [39].

Дані про сумарні антропогенні емісії/поглинання ПГ в Україні з 1990 по 2012 р. представлені на рис. 3. 1, 3. 2. На рис. 3. 2 сумарні емісії подані з розподілом за видами ПГ: діоксиду вуглецю, метану, закису азоту. Сумарні викиди ПГ в Україні (з урахуванням поглинання CO_2 в секторі “ЗЗЗЛГ” в 1990 р. становили 866.1 млн. т в CO_2 -екв., в 2012 г. — 375.4 млн. т в CO_2 -екв. За період 1990–2012 рр. викиди скоротилися на 56.7% [39].

Найбільша частка викидів ПГ припадає на діоксид вуглецю — 74.6% від сумарних викидів (з урахуванням ЗЗЗЛГ) і 76.5% без урахування сектора ЗЗЗЛГ в 1990 р. Викиди метану в 1990 р. сягали 18.7%, а закису азоту — 6.7% (відповідно 17.3% і 6.2% без урахування ЗЗЗЛГ). У 2012 р. пропорція практично збереглася — 73.7; 17.7 і 8.4% для діоксиду вуглецю, метану і закису азоту, відповідно.

Динаміка викидів ПГ дозволяє виділити три етапи за період 1990–2012 рр. Протягом першого етапу (1991–1999 рр.) спостерігалось катастрофічне зниження ВВП та зменшення споживання енергії, що призвело до скорочення викидів ПГ. На другому етапі (2000–2008 рр.) відбулося поступове незначне збільшення обсягу викидів, що пов’язано з економічним зростанням (у тому числі ростом ВВП), але прямої кореляції між темпами росту обсягу викидів і ВВП немає. Передусім це пояснюється струк-

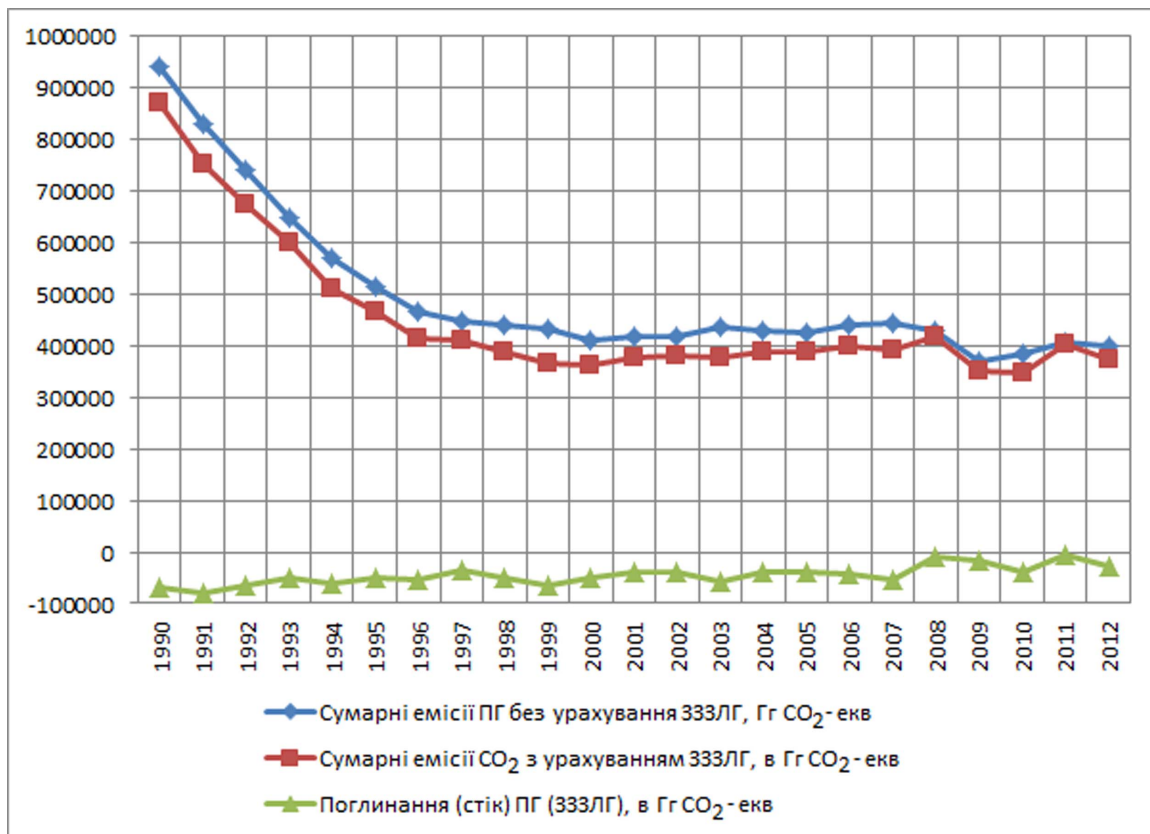


Рис. 3. 1. Сумарна величина викидів/поглинань ПГ та динаміка їх змін для України за 1990–2012 рр. [39]

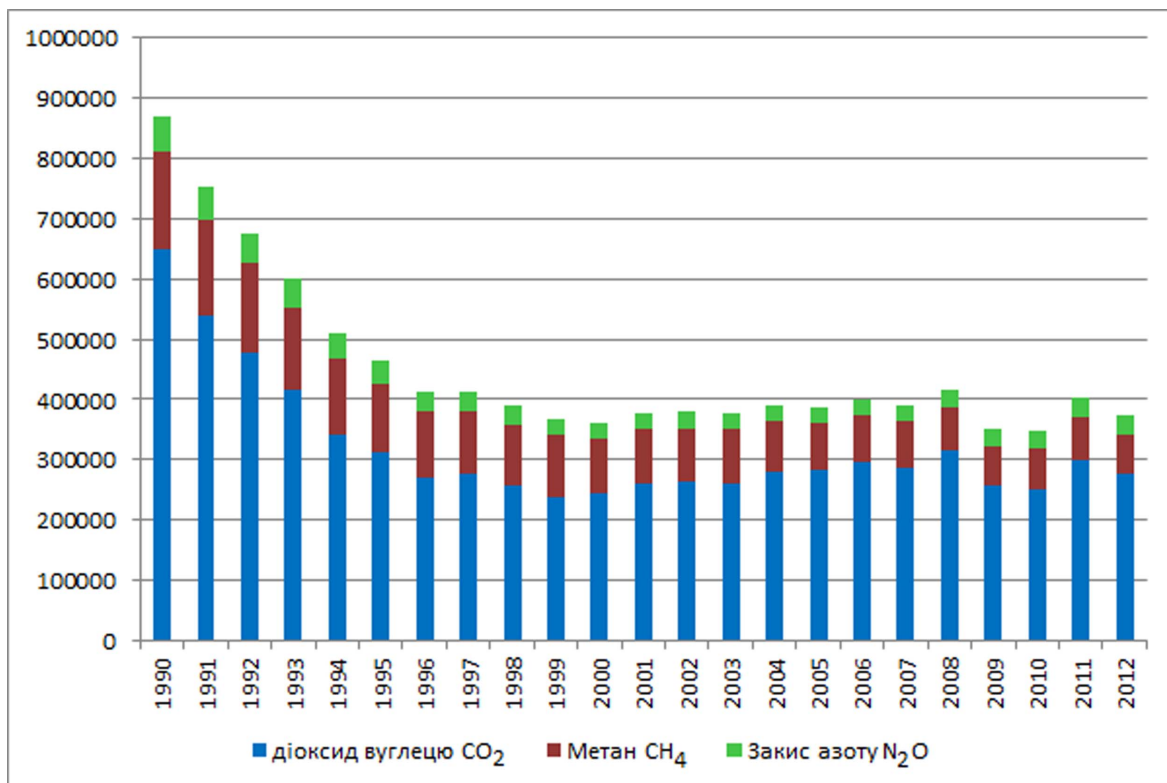


Рис. 3. 2. Сумарна величина емісій ПГ (Гг CO₂-екв.) прямої дії для України за 1990–2012 рр. [39]

турними змінами в економіці, збільшенням ролі торгівлі, послуг та фінансової сфери в порівнянні з промисловим виробництвом. Протягом третього етапу (2009–2012 рр.) обсяги викидів ПГ залежали від фактора світової фінансової кризи (2008–2009 рр.), який значною мірою вплинув на обсяги виробництва в основних галузях, орієнтованих на експорт — металургійної, хімічної, машинобудівної, що, в свою чергу, позначилося на інших галузях — електроенергетиці і гірничодобувній [39].

Найбільший внесок у викиди ПГ робить сектор “Енергетика” (рис. 3. 3). Його частка в сумарних викидах за період 1990–2012 рр. змінювалася в межах 77.6–92.6% з урахуванням сектора “ЗЗЗЛГ” і 76.0–79.4% без урахування цього сектора. Скорочення викидів у секторі в 2012 р. в порівнянні з 1990 р. становило 58% — з 741.8 до 309.1 7. CO₂-екв [39].

зменшенням поголів'я худоби та обсягів внесених у ґрунт добрив, а також із зміною практики поводження з гноєм.

У секторі “ЗЗЗЛГ” спостерігається чисте поглинання ПГ, величина якого відносно сумарних викидів за період 1990–2012 рр. коливалася в межах від 1.6 до 14.8%. У 1990 р. чисте поглинання складало 69.7 млн. т, а потім зменшилося до 27.2 млн. т в 2012 р. (рис. 3. 3). Така динаміка пов'язана насамперед з динамікою обсягів викидів ПГ з резервуару мінеральних ґрунтів у категорії землекористування “Рілля” (в 1990 р. у мінеральних ґрунтах відбувалося поглинання близько 7 млн. т вуглецю, в період 1993–2000 рр. значення коливається навколо осі x, в наступний період спостерігаються викиди вуглецю на рівні 2–3 млн. т, а в 2012 р. їх обсяг збільшився до 32.6 млн. т, що пов'язано з великим об'ємом врожаю сільськогос-

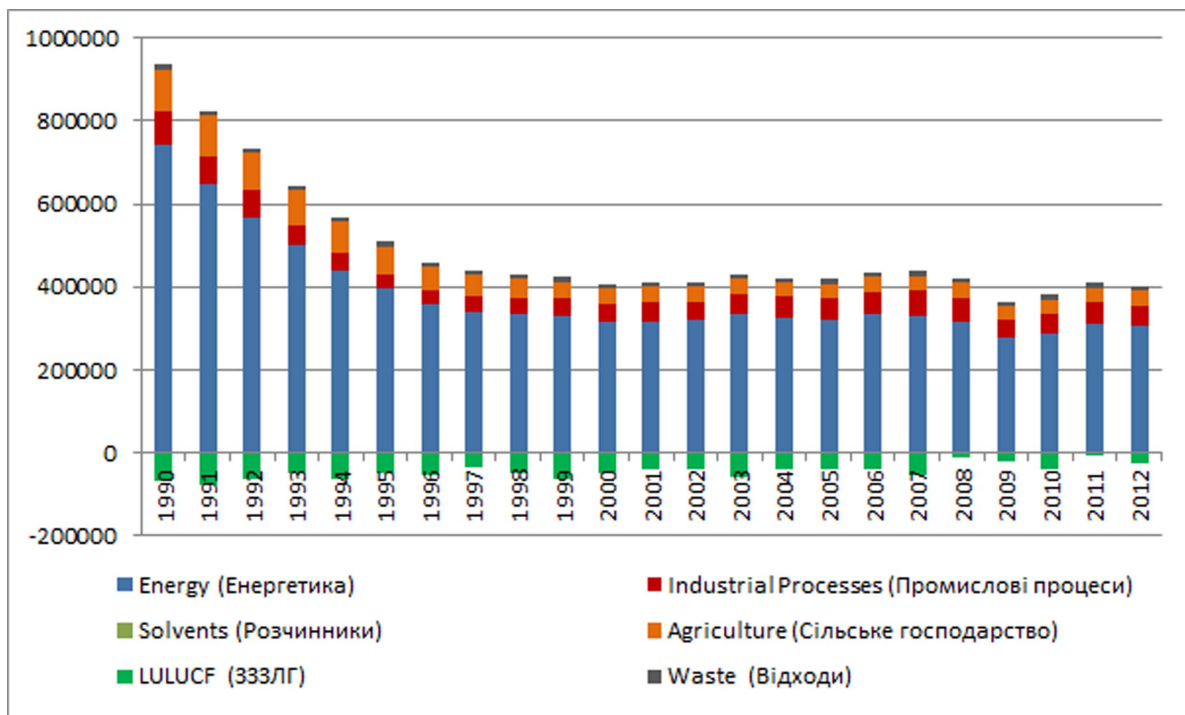


Рис. 3. 3. Викиди/поглинання ПГ в Україні за секторами у 1990–2012 рр., Гг CO₂-екв. [39]

Частка викидів в секторі “Промислові процеси” в період 1990–2012 рр. сягала від 7.7 до 16.0% загальних національних викидів ПГ з урахуванням “ЗЗЗЛГ” (або 6.9–4.1% без урахування ЗЗЗЛГ) (рис. 3. 3), причому максимальні значення досягнуто в 2001–2007 рр., коли відбувалося швидке відновлення гірничо-металургійної галузі. Найбільшим джерелом викидів вуглекислого газу в цьому секторі є виробництво чавуну, сталі та феросплавів.

Частка сектора “Сільське господарство” в сумарному обсязі викидів за період 1990–2012 рр. змінювалася від 8.4 до 14.6% (або 7.4–12.9% без урахування сектора “ЗЗЗЛГ”) (рис. 3. 3). Скорочення викидів у цьому секторі перш за все пов'язано з істотним

подарських культур і малим об'ємом внесення добрив, особливо органічних, в останні роки). Динаміка викидів у цій категорії прямо пропорційна обсягам надходження органічного матеріалу в ґрунт і врожайності культур. Крім того, вплив мають масштаби лісових пожеж, осушення органічних ґрунтів, як в лісах, так і в категоріях землекористування “Рілля” і меншою мірою в категорії “Пасовища”.

Частка сектора “Відходи” незначна, але вона досить стійко зростає. З 1990 по 2012 р. викиди в цьому секторі збільшилися на 7.7% — з 10.6 до 11.4 млн. т CO₂-екв. [39].

Детальну інформацію про вплив галузей економіки та промисловості на регулювання обсягів ви-

кидів ПГ можна знайти в ряді національних повідомлень України з питань зміни клімату [41, 42, 43]. На даний час готується Шосте національне повідомлення України з питань зміни клімату.

Детальну інформацію про попередні та нові відомості про зміни клімату, що ґрунтуються на численних незалежних наукових аналізах даних спостере-

жень за кліматичною системою, палеокліматичних архівів, теоретичних досліджень кліматичних процесів і результатах моделювання за допомогою кліматичних моделей можна дізнатися з ряду доповідей про оцінку МГЕЗК (кожна доповідь публікується в трьох томах, які відповідають трьом робочим групам) [25, 35, 44].

3. 2. Базові принципи та особливості методології розрахунку (оцінки) емісій/стоку парникових газів країнами, зокрема Україною, відповідно до рекомендацій МГЕЗК (ІРСС)

Визначення емісій/стоку ПГ проводиться за методологією, розробленою МГЕЗК (ІРСС — *Intergovernmental Panel on Climate Change*) відповідно до Переглянутих керівних принципів національних інвентаризацій ПГ (1996 р.) [36] і Керівних вказівок МГЕЗК з ефективної практики та обліку факторів невизначеності в національних кадастрах ПГ (2000 р.) [37]. Інвентаризація в секторі “ЗЗЗЛГ” проводиться згідно з Керівними вказівками з ефективної практики для “ЗЗЗЛГ” (2003 р.) [38].

Дана методологія є базовою (відправною точкою) для розрахунку емісій ПГ і націлена на надання країнам найбільш простих і реалістичних процедур для проведення інвентаризації. Вона також передбачає рекомендовані значення величин для коефіцієнтів емісій та ряду параметрів, необхідних для оцінки. Оскільки рекомендована інформація часто є узагальненою, адаптованою для застосування усіма країнами світу, вона не враховує особливості діяльності на регіональному чи національному рівнях, що, в свою чергу, призводить до великих діапазонів невизначе-

ностей. Тому завжди вітається вихід за цей мінімум — використання більш складних і удосконалених методик і надання більш детальних даних про діяльність та національні коефіцієнти емісій. Для реалізації деталізації національних статистичних даних та вихід на національні коефіцієнти до роботи над Національним Кадастром було залучено ряд державних науково-дослідних інститутів, центрів та організацій — УкрНДГМІ, Інститут технічної теплофізики НАН України, Український НДІ лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Вінницький державний аграрний університет, Інститут землеробства УААН, Черкаський НІТЕХІМ, Державний НТЦ охорони родючості ґрунтів, ДержавотрансНДІпроект, а також Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, Державне агентство земельних ресурсів України, Державне агентство лісових ресурсів України, Державну службу статистики України, Нафтогаз і Укртрансгаз та ін. [39, 40].

3. 3. Особливості оцінки, проблематика та неточності, а також тенденції емісій/стоку парникових газів за секторами, відповідно до методик МГЕЗК та національних досліджень, поданих у національному кадастрі

Розрахунки емісій/стоку ПГ згідно з методологією МГЕЗК проводяться на основі статистичних даних про діяльність (різного рівня деталізації), яка спричиняє емісії/поглинання ПГ, коефіцієнтів емісій, перевідних коефіцієнтів та ряду інших параметрів, необхідних для оцінки в тій чи іншій категорії. В узагальненому вигляді формула для розрахунку кількості викидів ПГ можна представити так:

$$\text{Емісії / поглинання ПГ} = \text{ДД} \times \text{КВ} \quad (3. 1)$$

де *ДД* — дані про діяльність (об’єми видобутого (експорт, імпорт) чи використаного палива; кількість виготовленої чи спожитої промислової продукції; площі, зайняті під тим чи іншим типом рослинного покриву тощо); *КВ* — коефіцієнти емісій/поглинання, які дають фактичний вміст вуглецю при тому чи іншому виду діяльності (спалюванні палива; виробництві/споживанні промпродукції; темпи накопичення біомаси);

Традиційний підхід [5]

Узагальнений підхід до визначення антропогенних емісій вуглецю, зокрема в секторі “Енергетика” Як правило, задача визначення емісій зводиться до оцінки кількості викидів вуглецю за коефіцієнтами емісій.

Облік емісії можна вести як за видами палива (вугілля, природний газ, нафта (бензин, дизельне паливо) і біомаса (деревина, відходи деревини, деревне паливо)) для всіх секторів економіки, так і за секторами для певного виду палива. Зазвичай найбільше уваги приділяється викидам двоокису вуглецю та метану. Масу вуглецю у використаному паливі m_c можна розрахувати за формулою:

$$m_c = mT k_c, \quad (3. 2)$$

де m — маса використаного палива; T — теплотворне значення палива, що є критерієм його теплової

цінності, тобто переводить масу спаленого палива у кількість теплоти, виділеної при його згорянні; k_c — коефіцієнт емісії вуглецю, який дає фактичний вміст вуглецю у спаленому паливі. Зазначимо, що при згорянні палива окислюється не весь вуглець. Це залежить від ефективності роботи устаткування, тому у математичних моделях слід робити поправку на неповне окиснення вуглецю. Для цього використовується коефіцієнт фракції окисненого вуглецю f_c — відношення кількості вуглецю, що згорів, до загальної його кількості в паливі:

$$E_{CO_2} = 44m_c f_c / 12 \quad (3.3)$$

При цьому слід враховувати, що значна частина енергетичної сировини не перетворюється на енергію. Певна частина палива буде використана як сировина для виробництва інших видів продукції (наприклад, пластмаси) або в неенергетичних цілях (виробництво бітуму для дорожнього будівництва). В цих процесах відсутнє окиснення вуглецю (а отже — пряма емісія). Такий вуглець називається нагромадженим і виключається з розрахунків загальної емісії вуглекислого газу. При згорянні деяких видів палива методологія IPCC рекомендує вносити поправку на оцінку нагромадженого вуглецю m_{sc} , що рекомендовано робити в рамках підходу:

$$m_{sc} = f_{sc} m_c \quad (3.4)$$

де f_{sc} — фракція нагромадженого вуглецю.

Таким чином, загальну емісію вуглекислого газу з внесенням поправки на масу нагромадженого вуглецю і з використанням рівнянь (3.2) і (3.3), знаходимо з виразу

$$E_{CO_2} = 44(m_c - m_{sc})f_c / 12. \quad (3.5)$$

У такий спосіб ми отримуємо можливість визначити антропогенні емісії двоокису вуглецю.

Величина емісій CH_4 , пов'язаних з відповідними витоками (наприклад у гірничодобувній промисловості), дорівнює

$$E_{CH_4} = 0,67mk_{CH_4} \quad (3.6)$$

де m — маса видобутого продукту (наприклад, вугілля в 8 млн. тонн), — коефіцієнт емісії, що дорівнює об'єму метану (m^3) при видобуванні 1 т продукту (вугілля) і залежить від способу видобування. Для перетворення об'єму метану в його масу (Γm) використовується значення густини метану при тиску в 1 атмосфері і температурі 20°C, яка становить $0,7 \cdot 10^{-6} \Gamma / m^3$. Для розрахунку загальної антропогенної емісії в такому випадку можна застосувати відносно простий алгоритм:

$$E_{tot} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M k_{nm} \Delta x_{nm}, \quad (3.7)$$

де M — сектори економіки, N — ділянки території, за якими проводиться розгляд, x — статистичні дані, що використовуються для опису впливів. За наведеним алгоритмом можна розрахувати викиди парникових газів від кінцевого спалювання кожного виду палива. Крім того, зважаючи на те, що дані x (зокрема m , що описує масу видобутого продукту, або спалюваного палива) можуть в загальному випадку розглядатися як функції часу, які описують технологічний і соціально-економічний розвиток регіонів.

В залежності від якості та деталізації наявних вхідних статистичних даних, а також від достовірності коефіцієнтів емісій розрахунки проводяться за різними рівнями деталізації (3.1)–(3.3), що відповідають різним стадіям верифікації. Перший рівень найпростіший — для розрахунку використовуються коефіцієнти емісій за замовчуванням та узагальнені статистичні дані. Розрахунки за другим рівнем деталізації проводяться при наявності уточнених коефіцієнтів емісій та деталізованих статистичних даних про діяльність. Третій рівень вимагає проведення наукових досліджень для визначення національних коефіцієнтів емісій, додаткової деталізації вхідних статистичних даних та більш дрібної класифікації за категоріями.

На сьогодні з метою удосконалення Національного кадастру, підвищення достовірності оцінок емісій та стоків ПГ, тобто зменшення діапазону невизначеностей, проведено ряд науково-дослідних робіт насамперед для ключових категорій. Це дало змогу отримати й уточнити національні коефіцієнти емісій та деталізувати вхідні статистичні дані для ряду категорій.

Сектор “Енергетика”

Для розрахунку викидів CO_2 при спалюванні вугілля на ТЕС (метод другого, третього рівнів) використовуються, як дані оперативної звітності ТЕС, так і узагальнені дані, отримані ДП “УкрНДІвуглезабагачення” на основі лабораторних досліджень енергетичного вугілля. Визначаються індивідуальні для кожної ТЕС коефіцієнти вмісту вуглецю, коефіцієнти окиснення і національний коефіцієнт питомого вмісту вуглецю у вугіллі. Для розрахунку викидів CO_2 від використання палива у промисловості і будівництві застосовуються вхідні статистичні дані про об'єми продукції із форм статистичної звітності 4 — *мтп.* й 11 — *мтп.*, національні коефіцієнти емісій для вугілля й природного газу та коефіцієнти за замовчуванням для інших видів палива. Використання національних коефіцієнтів емісій для CO_2 дозволило зменшити невизначеність на рівні 5–2%. Невизначеність в категорії “Енергетичні галузі” становила 3,4%, при цьому невизначеність даних про діяльність будь-якого виду палива сягає 2–10%, коефіцієнтів емісій для CO_2 — 2–5%, CH_4 — 150%, N_2O — 500%. [39, 40].

Інвентаризація викидів метану на шахтах України виконана за результатами вимірів фактичних витрат метану у вихідних вентиляційних струмках газових шахт і дебіту метану, що каптується вакуум-насосними станціями (ВНС) на поверхні, що, в свою чергу, відповідає третьому рівню з МГЕЗК-2000. З 1990 р. виділення метану вугільних шахт скоротилося на 61.8%. В 2012 р. утилізація метану проводилась на 18 вугледобувних підприємствах. З 2008 р., крім “корисної” утилізації метану з отриманням теплової та електричної енергії, на деяких шахтах використовується спалювання метану на факелі. В Україні не здійснюється контроль і не розраховується обсяг виділення метану з вугілля в період після його видобутку. Невизначеність результатів оцінки викидів метану з діючих шахт з урахуванням похибки, що вноситься вимірювальною технікою, становить не більше 15%, а невизначеність значень викидів метану на етапі після видобування становить 30%.

Невизначеність викидів вуглекислого газу в категорії “Нафта і природний газ” (викиди пов’язані з витокami при розвідці, видобуванні, транспортуванні, переробці, зберіганні та споживанні нафти і природного газу) становить 5.76% і пов’язана з невизначеністю коефіцієнтів викидів вуглекислого газу від факельного спалювання при видобуванні нафти і природного газу. Невизначеність викидів метану становить 20.87% і викликана перш за все невизначеністю коефіцієнтів викидів метану при споживанні природного газу промисловими споживачами та електростанціями [39].

Сектор “Промислові процеси”

Викиди CO_2 в секторі “Промислові процеси” пов’язані з виробництвом цементу, вапна, чавуну й сталі, феросплавів, аміаку, скла, а також з виробництвом і використанням соди, вапняку й доломіту. Практично для усіх категорій джерел викидів CO_2 було проведено науково-дослідні роботи, в результаті яких уточнено національні коефіцієнти емісій та дані про об’єми виробництва і використання промислової продукції. Це, в свою чергу дозволяє оцінити невизначеність даних про діяльність на рівні 2–5%, а національних коефіцієнтів емісій — 1–3%, невизначеність коефіцієнтів за замовчуванням приймається на рівні 7–10% (при виробництві й використанні соди та карбиду) [39].

Викиди CH_4 в промисловому секторі пов’язані в основному з виробництвом чавуну і коксу, а викиди N_2O — з виробництвом азотної кислоти.

Сектор “ЗЗЗЛГ”

Значення лісів у регуляції вмісту ПГ атмосфери міжнародними угодами зі збереження глобального клімату визнано одним із ключових [1, 40]. Країни,

що ратифікували ці угоди, взяли зобов’язання щодо проведення інвентаризації бюджету ПГ у керованих лісах і здійснення заходів, що сприяють посиленню стоків і скороченню емісій лісового вуглецю.

З кліматичних угод впливають базові принципи, які слід брати до уваги при створенні систем оцінки вуглецю лісів. По-перше, обліку та управлінню підлягає не величина запасів вуглецю лісами в початковий момент управління, а саме стоки і джерела ПГ у лісах. Іншими словами, важливі лише зміни запасів вуглецю лісів у бік зростання або скорочення, що відбуваються в період управління. По-друге, слід враховувати тільки ті стоки і джерела ПГ, які є результатом діяльності людини, тобто мають антропогенний характер.

Методологія підрахунку балансу вуглецю в секторі “ЗЗЗЛГ”, рекомендована МГЕЗК, передбачає оцінку змін запасів вуглецю в таких резервуарах: жива біомаса (фітомаса) з поділом на надземну й підземну; мертва органіка (підстилка, повалена деревина); ґрунти. (мінеральні, органічні) (рис. 3. 4).

Вуглекислий газ атмосфери перетворюється в органічну речовину в процесі фотосинтезу. Сумарну величину, що утворилася при фотосинтезі органічної речовини, називають валовою первинною продукцією (GPP). Частина цієї речовини розкладається при метаболізмі самих рослин, при цьому вуглекислий газ вивільняється в атмосферу. Цей потік називається диханням автотрофів (Ra) і варіює в межах 40–70% від GPP. Різниця між GPP і Ra характеризує кількість органічної речовини, що поповнює резервуар фітомаси, і називається чистою первинною продукцією (NPP) [1, 2, 6, 13, 14, 20, 22, 45, 46].

Потоки вуглецю, пов’язані з кожним з резервуарів, формують підсумкову балансову величину. Найбільш очевидний баланс вуглецю за фітомасою. Кожен може спостерігати збільшення запасів фітомаси при рості молодого насадження. Збільшення кількості фітомаси на певній території за одиницю часу і буде приростом фітомаси. Як правило, при рості лісових насаджень відбувається й зростання інших резервуарів вуглецю. Ліси можуть зазнавати різного роду порушень, а саме: рубання лісу, лісові пожежі, спалахи шкідників, вітровали тощо. Це призводить до загибелі або до деградації лісів, втрат запасів вуглецю та емісій вуглекислого газу в атмосферу. Оцінивши величину втрат і віднявши її від величини приросту, отримаємо підсумкову оцінку вуглецевого балансу лісової території. Саме такий підхід рекомендується до використання МГЕЗК [38] під назвою “метод балансу потоків”. Так, в Україні, за результатами підрахунку спеціалістів НЦОВПГ, протягом усього звітного періоду з 1990 по 2012 р. включно в секторі “ЗЗЗЛГ” спостерігалось результуюче поглинання CO_2 , величина якого змінюється в межах від 69.7 млн. т в 1990 р. до 27.2 млн. т в 2012 р. Щорічно лісовою біомасою поглинається 57.2–61.9 млн. т CO_2 (табл. 3. 3, 3. 4).

Визначення резервуарів вуглецю в секторі “ЗЗЗЛГ” відповідно до МГЕЗК:

- жива біомаса: надземна — вся жива біомаса на поверхні, включаючи стовбури, пеньки, гілки, кору, насіння і листя; підземна — вся біомаса живого коріння; мертва органіка: повалена деревина (“валежна деревина”) — включає дерева, що лежать на поверхні, мертва коріння і пеньки діаметром, що дорівнює чи перевищує 10 см; підстилка — вся нежива біомаса діаметром менше мінімального (10 см), що лежить в мертвому стані на різних етапах розкладу вище мінерального чи органічного ґрунту;
- ґрунти — включає органічний вуглець в мінеральних і органічних ґрунтах (торф в тому числі) до певної глибини, що визначається країною.

Методологія підрахунку балансу вуглецю в секторі “ЗЗЗЛГ”, рекомендована IPCC, передбачає оцінку змін запасів вуглецю за такими категоріями землекористування: “Лісові площі”, “Рілля”, “Пасовища”, “Заболочені землі”, “Поселення”, “Інші землі” [38, 39, 40].

Категорія “Лісові площі”

Оцінка зміни запасів вуглецю в категорії “Лісові площі” проводиться для всіх типів резервуарів. Зміни запасів вуглецю у живій біомасі в даній категорії розраховуються як сума річного збільшення запасів вуглецю в результаті росту біомаси та річного зниження запасів вуглецю за рахунок втрати біомаси. Збільшення запасу вуглецю в результаті приросту біомаси обчислюється на основі статистичної інформації про деревний склад лісових насаджень з врахуванням природних зон, застосуванням національних коефіцієнтів середньорічного приросту біомаси та врахуванням вмісту вуглецю у сухій речовині (значення за замовчуванням). Втрати біомаси розраховуються на основі даних про щорічні втрати вуглецю під час рубання лісу та даних про щорічні інші втрати. Втрати вуглецю під час рубання лісу визначаються на основі статистичних відомостей про заготівлю деревини з урахуванням базової щільності деревини надземної біомаси. Невизначеність даних про приріст біомаси оцінюється в 25% [39, 40].

Методологія підрахунку річних стоків/емісій CO₂ в категорії “Лісові площі” [38, 39, 40].

Розрахунки величини стоку/емісії CO₂ (C) в категорії “Лісові площі” для резервуару живої біомаси проводяться за формулою:

$$\Delta C_{FFB} = \Delta C_{FFB} + \Delta C_{FFdom} + \Delta C_{FFsoils}, \quad (3.8)$$

де ΔC_{FFB} — річні зміни запасів вуглецю в живій біомасі, включаючи підземну і надземну, на лісових площах, т С/рік; ΔC_{FFdom} — річні зміни запасів вуглецю в мертвій органіці на лісових площах, т С/рік; $\Delta C_{FFsoils}$ — річні зміни запасів вуглецю в ґрунтах, т С/рік.

Річні запаси вуглецю в живій біомасі на заліснених територіях обчислюються за формулою:

$$\Delta C_{FFB} = \Delta C_{FFg} + \Delta C_{FFl}, \quad (3.9)$$

де ΔC_{FFg} — річне збільшення запасів вуглецю в результаті росту біомаси, т С/рік; ΔC_{FFl} — річне зниження запасів вуглецю в результаті втрати біомаси, т С/рік

Річне збільшення запасів вуглецю в живій біомасі лісів у розрізі основних деревних порід і природно-кліматичних зон:

$$C_{total} = \sum_{ij} (A_{ij} \times G_{wij} \times (1 + R_{ij})) \times C_F. \quad (3.10)$$

де C_{total} — загальний приріст вуглецю в живій біомасі, т С/рік; A_{ij} — площі лісових земель з урахуванням деревних порід ($i = 1$ до n) і природних зон ($j = 1$ до n), га; G_{wij} — середньорічний приріст рослинності в одиницях сухої речовини (с. р.) з урахуванням деревних порід ($i = 1$ до n) і природних зон ($j = 1$ до n), т с.в./га/рік; R_{ij} — відношення приросту підземної біомаси до надземної, безрозмірна величина; C_F — доля вуглецю в сухій речовині (за замовченням приймається 0.5), т С/т с. р.

Втрати запасів вуглецю розраховуються як сума втрат від вирубок та інших втрат (пожеж, стихійних лих, хвороб, шкідників).

Зміни запасів вуглецю в резервуарі мертвої органічної речовини визначаються за формулою:

$$\Delta C_{DOM} = \Delta C_{DW} + \Delta C_{LT} \quad (3.11)$$

де ΔC_{DW} — зміни запасів вуглецю в резервуарі пова-



Рис. 3. 4. Схема поділу резервуарів вуглецю в екосистемі лісів згідно з МГЕЗК [38];

леної деревини і, m C/рік; ΔC_{LT} — зміни запасів вуглецю у підстилці, m C/рік.

В даній категорії спостерігається достатньо стабільний результуючий рівень поглинання (стоку) — на рівні 57.2–61.9 *млн. т* CO₂ протягом всього часового ряду (рис. 3.5).

Зміни в об'ємах запасів вуглецю в резервуарах живої рослинності пояснюються динамікою декількох факторів: зміною площ територій; об'ємами вирубок; кількістю виникнення, інтенсивністю і характером пожеж на території лісів України.

Категорія “Рілля”

Категорія землекористування “Рілля” включає землі під усіма однорічними і багаторічними сільськогосподарськими культурами, а також землі, що знаходяться тимчасово під паром (тобто, землі, що залишені на відпочинок на один або декілька років перед подальшою обробкою). До однорічних культур належать зернові, олійні, овочеві, коренеплоди та кормові культури. Багаторічні культури можуть включати дерева та кущі, в поєднанні з трав'яними культурами або фруктові сади, виноградники і плантації. Кількість вуглецю, що накопичується, абсорбується чи випускається даною категорією земель, залежить від виду сільськогосподарської культури, практики управління і змінних параметрів ґрунту і клімату. Так, збір врожаю однорічних культур (наприклад, зернових, овочів) відбувається щороку, тому немає ніякого довгострокового зберігання вуглецю в біомасі. Однак багаторічна деревна рослинність у фруктових садах та виноградниках може зберігати значну кількість в багаторічній біомасі; при цьому кількість вуглецю залежить від видів рослин, їх щільності, швидкості росту і практики обрізання дерев і кущів та збору з них врожаю. Запаси вуглецю в ґрунтах можуть бути значними, а їх зміни залежать від практики управління, включаючи види культур та їх чергування, обробку ґрунту, дренаж, поводження з відходами та використання органічних добрив.

Зміни запасів вуглецю в категорії “Рілля” розраховуються для резервуарів живої біомаси, мінеральних та органічних ґрунтів. Розрахунок змін запасів вуглецю в живій біомасі даної категорії проводиться тільки для багаторічних насаджень (садів). Для однолітніх культур ріст у запасах біомаси за один рік приймається рівним втратам біомаси від заготівлі в цьому ж році — таким чином, результуюча величина накопичення вуглецю дорівнює нулю. Розрахунок емісій вуглецю в мінеральних ґрунтах даної категорії проводився за методом балансових оцінок потоків азоту з наступним перерахунком до вуглецю. Розрахунок змін запасу вуглецю в органічних ґрунтах проведено на основі коефіцієнтів за замовчуванням та даних про площі органічних ґрунтів (перший рівень деталізації). Характер динаміки змін

запасів вуглецю в даній категорії для всього часового ряду розвивається по синусоїді від поглинання — 13.2 *млн. т* CO₂ в 1990 році до викидів 32.6 *млн. т* у 2012 р. (рис. 3. 5). Зміни об'ємів викидів пояснюються накладенням одночасно декількох факторів: об'ємами збору врожаю сільгоспкультур; площами, що знаходяться під оранкою, а також об'ємами внесення органічних добрив. Дані категорія є найбільшим джерелом викидів (емісій) CO₂ в секторі [39, 40].

Категорія “Пасовища”

До категорії “Пасовища” відносять площі сільськогосподарських угідь, які систематично використовуються для заготівлі сіна, випасу худоби, площі, з яких зібрана зелена маса для відгодівлі худоби силосним матеріалом. Крім того, до даної категорії належать сінокоси і пасовища, які розорані для цілей їх корінного поліпшення і використовуються постійно під трав'яними кормовими культурами. На пасовищах переважає підземний вуглець; головним чином у коренях і в органічній речовині ґрунту. Випаси худоби і пожежі є звичайними збуреннями для пасовищ [15]. Оцінка змін запасу вуглецю в категорії “Пасовища” проводиться тільки для резервуарів мінеральних ґрунтів (на основі розробленого балансового методу оцінки динаміки потоків вуглецю) та органічних ґрунтів (на підставі коефіцієнтів за замовчуванням та площ органічних ґрунтів). Для даної категорії спостерігається динаміка від 0.6 *млн. т* CO₂ до 3.3 *млн. т* викидів з 1990 по 2012 роки, а від антропогенної діяльності на органічних ґрунтах — від 0.8 до 0.9 *млн. т* з 1990 по 2012 р. (рис. 3.5). Загальна невизначеність по категорії становить 19% [39, 40].

Категорія “Заболочені землі”

Оцінка змін запасів вуглецю в категорії “Заболочені землі” проводиться за першим рівнем деталізації на основі коефіцієнтів за замовчуванням (невизначеність 91%) та даних про площі земель, з яких відбувається видобування торфу (невизначеність 10%). Викиди CO₂ в даній категорії поступово зменшуються з 23.6 *тис. т* в 1990 р., до 6.1 *тис. т* у 2012 р., що збігається з площею торф'яників, які знаходяться під розробками (рис. 3. 5) [39, 40].

Категорія “Поселення”

Категорія “Поселення” включає всі освоєні землі, в тому числі транспортну інфраструктуру, якщо тільки вони не належать до інших категорій землекористування. У цьому контексті категорія землекористування “Поселення” включає всі класи формацій міських дерев, а саме: дерева, що ростуть уздовж вулиць, в суспільних і приватних садах, і в різного роду парках за умови, що такі дерева на фун-

кціональному або адміністративному рівні асоціюються з містами, селами і т. д. Незважаючи на те, що резервуари органічної речовини і вуглецю в ґрунтах також можуть бути джерелами або поглиначами CO_2 в даній категорії, а викиди CH_4 і N_2O результатом практики управління міськими землями, про роль і величини цих резервуарів у загальних потоках ПГ відомо дуже мало. Тому основна увага в методологічних положеннях МГЕЗК приділяється підкатегорії зміни запасів вуглецю в живій біомасі, де вже проведені деякі дослідження [38]. В Україні розрахунок зміни запасів вуглецю в категорії “Поселення” не проводився у зв’язку з відсутністю національних значень зміни запасів вуглецю для деревної рослинності в межах зелених насаджень забудованих земель [39, 40].

3. 4. Достовірність (величина невизначеностей) оцінок балансу, стоку та емісій вуглецю і парникових газів у національній системі інвентаризації

А. Для перемінних величин, що не корелюються:

$$U_{\text{tot}} = \frac{\sqrt{(U_1 \times x_1)^2 + (U_2 \times x_2)^2 + \dots + (U_n \times x_n)^2}}{x_1 + x_2 + \dots + x_n}, \quad (3.12)$$

де x_i , U_i — відповідно величини і властиві їм невизначеності.

Б. Для всіх випадкових перемінних:

$$U_{\text{tot}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}. \quad (3.13)$$

Дане питання вимагає насамперед оцінок невизначеностей, властивих відповідним методикам.

Оцінка невизначеностей здійснюється відповідно до Керівних вказівок МГЕЗК з ефективної практики та обліку факторів невизначеності в національних кадастрах ПГ (2000 р.) [37].

Для оцінки загальної (об’єднаної) невизначеності окремо для кожної категорії проводяться оцінки невизначеностей, пов’язані з даними про діяльність та коефіцієнтами емісій. Після визначення невизначеностей за категоріями джерел проводиться оцінка узагальненої невизначеності для усього Національного кадастру за видом ПГ. Інструкція по складанню звітності рекомендує два правила для об’єднання невизначеностей, які не корелюються: шляхом підсумовування та множення [37]:

Невизначеність при оцінці викидів CO_2 за категоріями джерел наведена у табл. 3. 1.

Наведений підхід є простим, але має певні обмеження. Він, зокрема, є чутливим до вхідних даних. По-друге, використання методологічно різнорідних масивів даних може призвести до великих похибок і показати занижені оцінки достовірності, особливо на значних часових проміжках. Тому при плануванні стратегічних заходів в галузі екологічної безпеки, економічних заходів з впровадження ме-

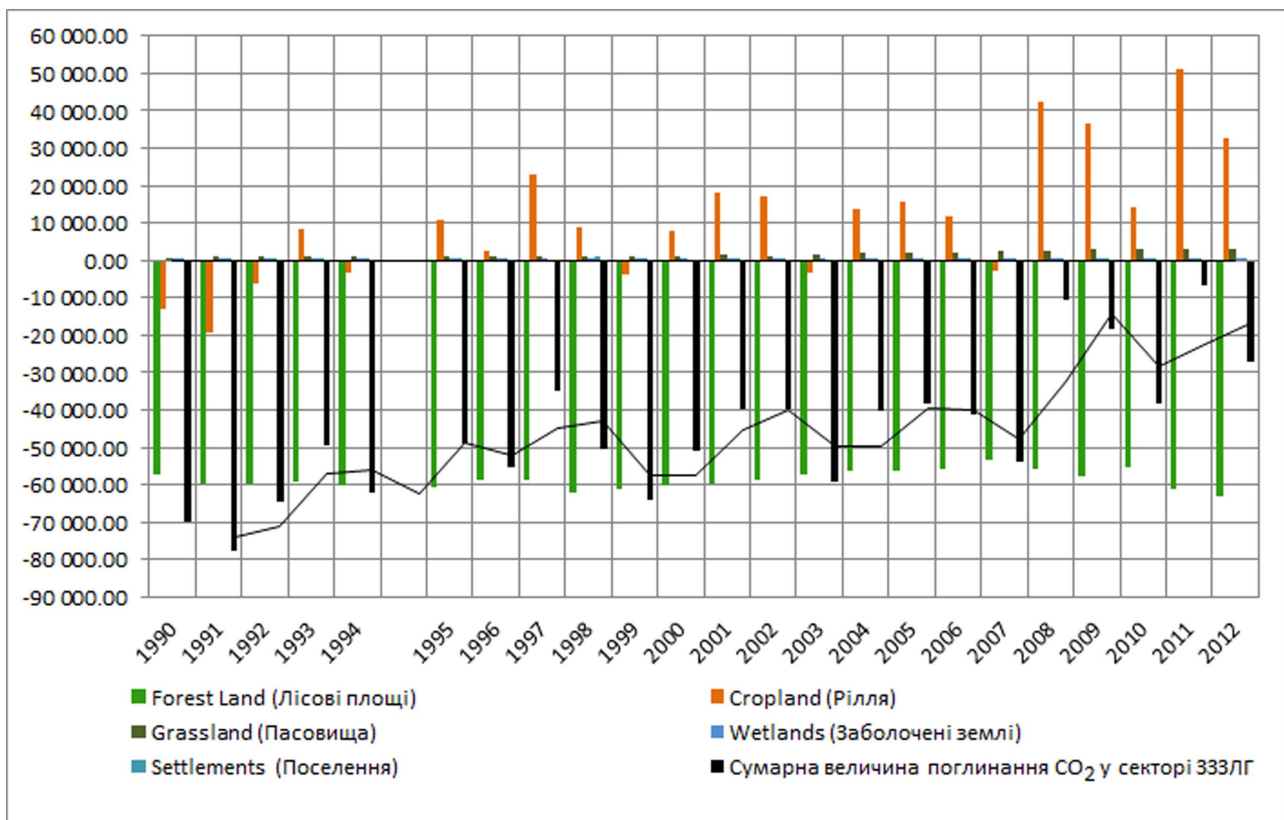


Рис. 3. 5. Стоки та емісії CO_2 (Гг CO_2 -екв.) за категоріями в секторі “333ЛГ” в Україні за 1990–2012 р. [39]

ханізмів відшкодування надлишкових викидів вуглецю тощо слід використовувати більш коректні, хоча і складніші алгоритми оцінки достовірності розрахунків [5].

Методи оцінки невизначеностей при аналізі потоків вуглецю [5]. Слід зазначити, що визначальну роль у зменшенні невизначеності при контролі емісій парникових газів відіграє коректний аналіз кругообігу вуглецю та екологічні моделі, тобто формалізовані представлення процесів накопичення та перетворення вуглецевих сполук в екосистемах. Для визначення похибки при розрахунках потоків вуглецю в моделях повного вуглецевого циклу (і, таким чином, при вивченні достовірності оцінок викидів парникових газів) слід використовувати підхід, що дає можливість оперувати статистично незалежними розподілами випадкових параметрів (отрима-

них, в тому числі за допомогою методів ДЗЗ). В роботі [24] запропоновано алгоритм для визначення стандартної похибки потоку вуглецю, який визначається як функція випадкового розподілу X_i при $i = 1, 2, \dots, k$:

$$m_y^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{dY}{dX_i} m_i \right)^2 + 2 \sum_{i>j} \left(\frac{dY}{dX_i} \right) \left(\frac{dY}{dX_j} \right) r_{ij} m_{X_i} m_{X_j} \tag{3.14}$$

де r_{ij} — коефіцієнти кореляції між розподілами X_i та X_j

Запропонований алгоритм дає змогу визначити похибку оцінки потоків вуглецю в усіх компонентах системи за всіма даними, наявними для аналізу. Найбільш важливим тут є те, що він дозволяє інтегрувати в єдиний підхід дані супутникового спостереження важливих параметрів екосистем.

Таблиця 3. 1.
Оцінка невизначеностей викидів CO₂ [39 NIR]

Сектор	Категорія	Викиди CO ₂ в 2012 р., Гг	Невизначеність даних про діяльність, %	Невизначеність коефіцієнтів викидів чи параметрів оцінки %	Об'єднана невизначеність %
Енергетика	1. А. 2. Промисловість і будівництво	63006.24	2.46	3.02	3.89
	1. А. 3. Транспорт	33047.18	4.37	4.42	6.21
	1. А. 4. Інші сектори	46052.14	8.01	1.91	8.23
	1. А. 5. Республіка	11539.0	4.03	1.98	4.49
	1. В. Емісії, пов'язані з витокami палива	681.77	2.86	5.00	5.76
Промислові процеси	2. А. 1. Виробництво цементу	3217.12	5	1	5.10
	2. А. 2. Виробництво вапняку	2769.36	5	2	5.39
	2. А. 3. Використання вапняку і доломіту	3815.77	6.67	8.05	10.51
	2. А. 4. Виробництво і використання соди	1466.0	5	7	8.6
	1. А. 1. Енергетичні галузі	118410.29	2.10	3.82	4.36
	2. А. 7. Виробництво скла	1459.6	4.18	3.69	5.58
	2. В. 1. Виробництво аміаку	6508.73	2	2	2.83
	2. В. 4. Виробництво і використання карбідів	33.62	42.12	10	43.29
	2. С. 1. Виробництво чавуну і сталі	21743.35	2.44	3.10	3.95
	2. С. 2. Виробництво феросплавів	2016.70	5	6.44	8.15
ЗЗЗП	5. А. Лісові площі	- 63437.94	11.2	4.4	12.03
	5. В. Яля	32147.66	5	50.6	50.85
	5. С. Пасовища	3490.15	5	5.2	5.24
	5. D. Водно-болотні угіддя	6.09	35.6	4.6	58.17
	5. E. 2. Землі перестроєні в поселення	39.31	5	1.5	15.81
	5. F. 2. Землі, що перейшли в інші землі	0.00	5	1.5	15.81
Відходи	б. С. Спалювання відходів	0.32	19.74	0.00	19.74

Окремо слід оцінити сукупну відносну достовірність даних (інтегрованих до геоінформаційної системи результатів проблемно-орієнтованої класифікації земних покривів та результатів аналізу атмосферних концентрацій ПГ за даними супутникового спостереження, результатів геобіофізичного моделювання вуглецевого балансу, з одного боку, та статистичних даних, отриманих традиційними методами: лісове і сільське господарство, інвентаризація, економічний моніторинг тощо — з іншого). Для цього можна використати “індекс придатності”, запропонований в роботі [11], який є кількісним виразом відповідності нормованих розподілів:

$$S_{nm} = \frac{1}{q} \sqrt{\sum_{j=1}^q (x_{nj}^{norm} - x_{mj}^{norm})^2}, \quad x_j^{norm} = \frac{x_j - x_{jmin}}{x_{jmax} - x_{jmin}} \quad (3.15)$$

де q — параметри, за якими проводиться опис; n — ділянки території дослідження; m — набори статистичних даних (наприклад, галузеві статистики); x — зафіксовані значення параметра j .

Цей метод дозволяє оцінити взаємну узгодженість розподілів даних, найбільш коректно поєднати різнорідні дані і у такий спосіб мінімізувати похибки. Отже, застосування загальних моделей

3. 5. Огляд методологій оцінки емісій/стоку парникових газів на основі даних дистанційного зондування Землі

В Україні впродовж 2006–2014 рр. спеціалістами ЦАКДЗ спільно з Міжнародним інститутом прикладного системного аналізу було проведено ряд досліджень за даною тематикою, а саме велися і ведуться роботи над створенням методики моніторингу балансу ПГ з метою уточнення обсягів їхніх викидів та поглинання на основі використання даних супутникових зйомок. Запропоновані супутникові методи дозволяють проводити незалежний моніторинг балансу вуглекислого газу в атмосфері. За даними супутникової зйомки пропонується здійснювати оцінку балансу антропогенних викидів та природного поглинання вуглекислого газу рослинним покривом на значних територіях та забезпечити моніторинг вмісту CO_2 в атмосфері в різних ландшафтно-кліматичних зонах та територіальних одиницях України [2].

Дані космічної зйомки дозволяють проводити прямі вимірювання концентрації ПГ в атмосфері та виконувати розрахунки їхнього поглинання рослинним покривом шляхом визначення кореляції спектральних характеристик космічних знімків з параметрами інтенсивності процесів фотосинтезу. Крім того, використання матеріалів космічних зйомок різних років дозволяє говорити про стан навколишнього середовища у попе-

вуглецевого балансу, регіоналізованих за допомогою використання даних ДЗЗ, дозволяє отримати розрахунки перебігу змін екологічних показників, пов'язаних із змінами клімату, і, в свою чергу, обчислити на цій основі показники безпеки території.

Слід звернути увагу, що методологія, рекомендована МГЕЗК, не передбачає можливості використання даних по концентрації ПГ в атмосфері, отриманих за допомогою супутникової зйомки. В той же час, враховуючи зростання можливостей супутникових зйомок по наданню інформації про концентрації ПГ в атмосфері та накопичення масиву даних про них за певний проміжок часу, останнім часом почали розроблятися методи оцінки емісій за вказаними даними.

Сьогодні на орбітах діють декілька відповідних для задач моніторингу ПГ супутників, оснащених ІЧ-спектрометрами високого розрізнення, такими як ТЕС [8, 47] на супутнику AURA (NASA, США), AIRS [48] на супутнику AQUA (NASA, США), SCIAMACHY [12] на супутнику ENVISAT (ESA), IASI [18] на супутнику METOP-A (ESA), TANSO-FTS на супутнику GOSAT (JAXA, Японія) тощо. Реєстровані ними інфрачервоні спектри атмосфери несуть інформацію про вміст різних ПГ в атмосфері. Ці методи дозволяють підвищити точність оцінки та прогнозу регіональних емісій ПГ завдяки можливостям реальної оцінки їх концентрації в атмосфері над усією досліджуваною територією.

редні роки і про зміни, зокрема в ландшафтах, які відбулися за час, що минув [2].

Зокрема, підхід до визначення емісій, запропонований фахівцями ЦАКДЗ [5], дозволив виявити різницю за період 2003–2009 рр. між розрахунками емісій (для CO_2 та CH_4 (табл. 3. 2, рис. 3. 6, 3.7, 3. 8 за даними супутникових спостережень та офіційними даними Державного агентства екологічних інвестицій України, що веде свої підрахунки за методикою, запропонованою фахівцями IPCC. Також за допомогою указанного підходу було отримано результати, які дозволили стверджувати, що використання регіонально адаптованих за даними ДЗЗ моделей і сценаріїв підвищує точність прогнозування розвитку основних процесів, що призводять до небезпечних змін (зокрема, точність прогнозування регіональних емісій і регіональних змін кліматичних показників).

Окрім незалежної оцінки емісії ПГ, розвиток методів ДЗЗ дозволяє також проводити оцінку швидкості поглинання CO_2 рослинним покривом і відповідно величини вилученого ним вуглецю з атмосфери (табл. 3. 3). В Національному кадастрі дана величина (табл. 3. 3, 3. 4) враховується в секторі “333ЛГ”.

Важливими критеріями використання продукції ДЗЗ є такі:

- адекватна схема класифікації землекористування;
- відповідне просторове розрізнення (найменшою просторово-територіальною одиницею для оцінки змін у землекористуванні відповідно до Кіотського протоколу є територія площею 0.05 га);
- відповідне часове розрізнення для оцінки змін у землекористуванні і накопичені вуглецю;
- наявність оцінки точності;
- узгодженість і наявність в часі.

Метод модифікованих вагових функцій для диференційної оптичної абсорбційної спектроскопії. Даний метод (підхід) ґрунтується на зміні радіаційного балансу Землі під впливом певних факторів. Домінуючий фактор у РВ в індустріальну епоху – це концентрація ПГ в атмосфері, що має тенденцію до підвищення. Внесок кожного ПГ в РВ за конкретний проміжок часу визначається зміною його концентрації в атмосфері за цей період і ефективною роллю газу в порушенні радіаційного балансу. Як уже

було зазначено, існує ряд супутникових місій направлених на оцінку ПГ. Для досліджень обрано дані сенсору SCIAMACHY, встановленого на борту супутника Envisat-1 Європейського космічного агентства. Метод визначення складу атмосфери та алгоритм перерахунку радіаційних характеристик у показники концентрації окремих газів за даними отриманими сенсором SCIAMACHY, розроблено в Університеті Бремена, який є базовою організацією з розробки сенсору та обробки даних з нього. Алгоритм базується на застосуванні методу найменших квадратів для аналізу обраних вертикальних атмосферних профілів. Параметри визначаються за прямими даними спостережень вертикальних характеристик атмосфери. У такий спосіб проводиться перерахунок інтенсивності випромінювання в межах смуги поглинання окремого газу в значення тропосферної концентрації цього газу. Відокремлення тропосфери здійснюється через урахування інших, зокрема температурних, показників та врахування атмосферного тиску через аналіз аерозолів. Більш детальний опис приладу та методика перера-

Таблиця 3. 2.

Порівняння розрахунків емісій за даними офіційної статистики (антропогенні викиди) та супутникових спостережень у період 2003-2010 рр.

Рік	Емісії CO ₂ з урахуванням та без урахування поглинання лісами n × 10 ⁹ г за офіційними даними [39]		Емісії CO ₂ × 10 ⁹ г за даними супутникових спостережень	Різниця, %	Середня річна оцінювана емісія за офіційними даними в еквіваленті CO ₂ , n × 10 ⁹ г (CO ₂ + CH ₄) [39]		Середня річна оцінювана емісія за даними супутникових спостережень в еквіваленті CO ₂ n × 10 ⁹ г (CO ₂ + CH ₄)	Різниця, %
	+333ЛГ	-333ЛГ		+333ЛГ	+333ЛГ	-333ЛГ		+333ЛГ
2003	2513	3105	2.701	+7.5	3.44	4.03	4.72±0.28	+37.2
2004	2714	3.119	3.016	+11.1	3.56	3.96	4.61±0.29	+29.5
2005	2741	3.126	2.947	+7.5	3.54	3.92	4.93±0.21	+39.3
2006	2882	3.296	3.011	+4.5	3.65	4.07	5.12±0.26	+40.3
2007	2791	3.331	3.032	+8.6	3.55	4.09	4.82±0.29	+35.8
2008	3072	3.176	3.412	+11.1	3.80	3.90	4.84±0.28	+27.4
2009	2521	2.704	2.841	+12.7	3.18	3.37	4.84±0.26	+52.2
2010	2475	2.856	3.011	+21.7	3.14	3.52	5.02±0.29	+59.9

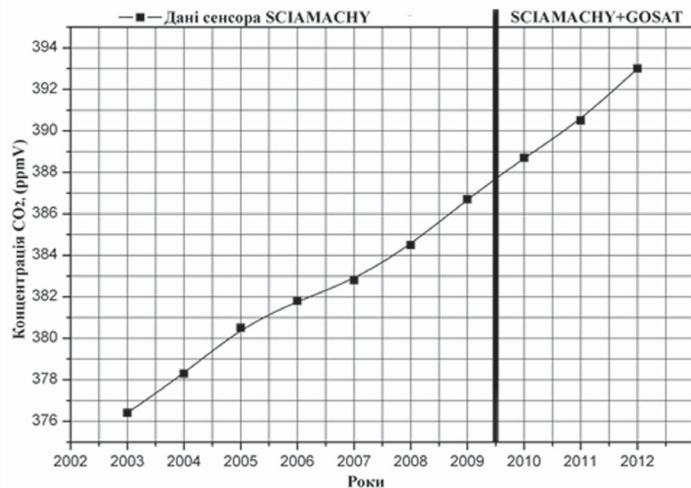


Рис. 3. 6. Динаміка змін концентрації CO₂ над територією України за даними супутникового спостереження



Рис. 3. 7. Величини емісій CO₂ (в еквіваленті CO₂, n × 10⁹) за даними офіційної статистики (дані НЦОВПГ) [39] та супутникових спостережень (дані ЦАКДЗ)

хунку містяться в роботі [9]. Дані, які отримали фахівці, що мали право першочергової обробки даних з сенсору SCIAMACHY, являють собою карти, які демонструють глобальні просторово розподілені дані про концентрацію ПГ, усереднені з періодом в 1 місяць. На підставі цих карт і проводилися розрахунки, що показують щомісячний розподіл вуглекислого газу в атмосфері за певний період. Значення величин емісій ПГ (CO₂, CH₄) для території України за період 2003–2010 рр., отриманих за даними сенсору SCIAMACHY, наведено у табл. 3. 2.

Виходячи з отриманих даних про виміряні атмосферні концентрації, можна розрахувати викиди відповідних ПГ. Найпростіший шлях для оцінки сумарної річної емісії за виміряними концентраціями ПГ у повітрі може бути визначений як (у вигляді, що відповідає підходу, викладеному в [17, 36]):

$$E_i = \sum_i k_i \frac{(C_{current} - C_{previous})M_i}{C_{oi}} / t \quad (3.16)$$

В цьому рівнянні $C_{current}$ — поточна середньорічна атмосферна концентрація ПГ і над певною територією, яка визначається за даними поточних супутникових вимірювань; $C_{previous}$ — попередня середньорічна атмосферна концентрація ПГ і над певною територією, яка була визначена за даними попередніх супутникових вимірювань; C_{oi} — середньорічна атмосферна концентрація оцінюваного ПГ і над певною територією в доіндустріальну еру (визначається за геологічними та історичними даними); M_i — історична маса оцінюваного парникового газу в атмосфері (визначається за геологічними та історичними даними) [26]. Для двоокису вуглецю значення C_o становить відповідно 275 ppmv, а значення M_i — $220.89 \times 10^{10} \text{ т}$ для CO₂ [3] для сукупної земної атмосфери. Коефіцієнт k_i визначається з урахуванням тривалості життя ПГ та його кількості, накопиченої на момент аналізу (для короткострокових прогнозів можна вважати, що для всіх газів $k_i = 1$); t — період осереднення (зазвичай — в роках).

Використання цього алгоритму дозволяє прово-

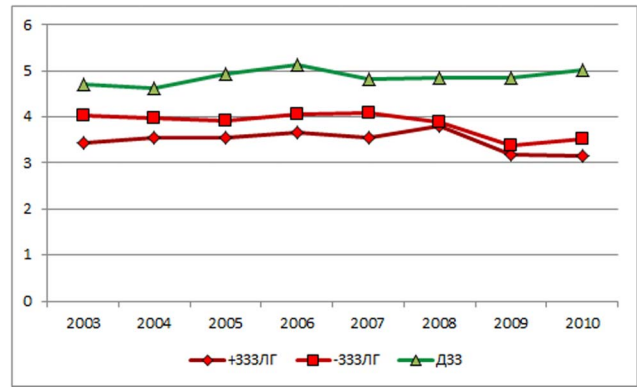


Рис. 3. 8. Величини емісій CO₂ та CH₄ (в еквіваленті CO₂, n × 10⁹) за даними офіційної статистики [39] та супутникових спостережень (дані ЦАКДЗ)

дити поточний контроль національних емісій ПГ незалежними методами.

За допомогою указанного підходу також було отримано результати, які дозволили стверджувати, що використання регіонально адаптованих за даними ДДЗ моделей і сценаріїв підвищує точність прогнозування розвитку основних процесів, що призводять до небезпечних змін (зокрема, точність прогнозування регіональних емісій і регіональних змін кліматичних показників).

Для більш детальної оцінки можливостей застосування даних спеціалізованих космічних зйомок для розрахунку кількісних показників вмісту CO₂ в атмосфері була проведена робота по визначенню концентрації ПГ над територією різних кліматичних зон за даними сенсору SCIAMACHY. На основі порівняння абсолютних значень та тенденції зміни концентрації CO₂ з урахуванням регіональних відмінностей різних кліматичних регіонів, над якими здійснювалися виміри, можна зробити висновок, що відбувається зростання концентрації CO₂ в атмосфері над різними територіями Землі. Проте, як показують результати, збільшення концентрації CO₂ спостерігається навіть над тими територіями, де немає його великих джерел. Дане явище можна пояснити переносом, зокрема, повітряними масами.

Оцінка точності визначення атмосферних концентрацій ПГ, отриманих за даними супутникових вимірів, детально досліджувалася розробниками сенсору SCIAMACHY. Методика зйомки передбачає вплив альbedo поверхні на параметри, що вивчаються (спектральні характеристики в межах смуг поглинання). Також існує залежність точності вимірів компонентного складу атмосфери від стану атмосфери, що визначається широтою. В роботі [30] проведено аналіз розподілу такої похибки за даними трирічних спостережень. Максимальна похибка вимірів атмосферної концентрації CO₂ засобами супутникового спостереження становить 1–2% (не більше 4 ppm) при осередненні за місяць для території 7 × 7° на поверхні, а також 1.5–2.2% (не більше 2.25 ppm) при осередненні за місяць для території

$1 \times 1^\circ$ [10]. Важливим для зменшення невизначеності є використання даних наземних вимірів спектральних характеристик земних покривів, передусім рослинності, а також застосування даних регіональної інвентаризації емісій ПГ для калібрування та верифікації даних супутникових спостережень.

Підхід, що ґрунтується на визначенні фотосинтетичних показників рослинності. Оцінка величини поглинання вуглецю рослинним покривом за допомогою спектральних методів дистанційного зондування може проводитися на основі двох основних підходів. Перший підхід передбачає використання вегетаційних індексів. Зокрема таких як NDVI та PRI [28]. NDVI пов'язаний з частиною фотосинтетично активного випромінювання (fAPAR), що поглинається зеленою рослинністю. Обидва показники є чутливими до площі поверхні листя в зеленому рослинному покриві і відносно нечутливі до змін зенітного кута Сонця. Фотосинтетичний індекс PRI використовується як міра ефективності використання світла рослинністю. А тому швидкість поглинання CO_2 рослинним покривом можна розглядати як функцію комбінації відповідних індексів:

$$\text{Швидкість поглинання } \text{CO}_2 = f(\text{sPRI} \times \text{NDVI}) \quad (3.17)$$

де *sPRI* — масштабоване значення індексу *PRI*:

$$\text{sPRI} = \frac{(\text{PRI} + 1)}{2} \quad (3.18)$$

Залучаючи дані польових вимірів потоків CO_2 і використовуючи регресійний аналіз, ми можемо отримати емпіричну залежність величини поглинання CO_2 різними типами рослинного покриву з цими індексами:

$$\text{CO}_2 = -(a + b \times (\text{NDVI} \times \text{sPRI})) \quad (3.19)$$

Обмеженість цього методу полягає в необхідності накопичення значного обсягу даних польових вимірів для кожного типу рослинного покриву. Оцінка проводиться у визначений момент часу при певних погодних умовах, і при зміні останніх результати будуть не зовсім коректними. Для сумарної оцінки поглинутого CO_2 рослинним покривом за певний період необхідно мати значну кількість супутникових знімків на задану територію, що в умовах України є значною проблемою, оскільки атмосфера над її територією характеризується значною хмарністю протягом всього вегетаційного сезону.

В основі наступного підходу лежить концепція ефективності використання світла рослинним покривом (*light use efficiency* — LUE) [14, 15, 19, 23, 27, 29]. Моделі, що базуються на цьому принципі отримали назву моделей продуктивної ефективності (*Production Efficiency Models* — PEMs). В їх основу покладена теорія LUE, яка передбачає наявність відносно стабільної залежності між фотосинтетич-

ним поглинанням вуглецю та поглинанням частки фотосинтетично-активної радіації рослинністю на рівні покриву [7]. В такому випадку валова первинна продуктивність (GPP) розраховується за такою формулою:

$$\text{GPP} = \varepsilon \times \text{FPAR} \times \text{PAR} \times S_{\text{min}} \times S_{\text{VPD}} \quad (3.20)$$

де *GPP* — валова первинна продуктивність (g C m^{-2}); *PAR* — фотосинтетично-активна радіація (МДж m^{-2}); *FPAR* — частка поглинутої фотосинтетично-активної радіації (%); S_{min} — скаляр добової мінімальної температури (0–1), S_{VPD} — скаляр дефіциту вологості (0–1) [21].

Однією з таких моделей є MOD17 [16, 22]. Модель MOD17A2 містить в собі глобальний розподіл 8-денних сум валової первинної продуктивності з просторовою роздільною здатністю $1 \times 1 \text{ км}$. Вираховуючи з GPP витрати вуглецю на автотрофне дихання, ми можемо оцінити чисту фотосинтетичну продукцію рослинного покриву:

$$\text{PsnNet} = \text{GPP} - R_{\text{ml}} - R_{\text{mr}} \quad (3.21)$$

де R_{ml} і R_{mr} — дихання для підтримки життєдіяльності листя і коренів рослин, відповідно.

Дихання приросту не враховується в 8-денному *PsnNet*.

Річна чиста первинна продуктивність (NPP) визначається так [33]:

$$\text{NPP} = \sum_{i=1}^{365} \text{PsnNet} - (R_{\text{mo}} + R_{\text{g}}) = X_j \quad (3.22)$$

де R_{mo} — дихання для підтримки життєдіяльності всіх живих частин за винятком листя і коренів (наприклад, сирої деревини), R_{g} — дихання приросту; X_j — зареєстроване із спостережень за застосуванням алгоритмом значення продуктивності *NPP* в рік *j*.

Величини стоку вуглецю у фітомасі лісів України, отриманих за допомогою продукту MOD17, представлені у табл. 3. 3.

Модель MOD17 має три джерела вхідних даних. Для кожного пікселя інформація про тип земного покриву отримується з продукту MOD12Q1; добові метеорологічні дані — з моделі DAO (*Data Assimilation Office*); *FPAR* і *LAI* — з продукту MOD15A2. Невизначеності в MOD12Q1, DAO, MOD15A2 і самому алгоритмі моделі можуть впливати на вихідні дані MOD17.

По-перше, достовірність MOD12Q1 знаходиться в межах 70–80%, і найбільші похибки характерні для подібних класів земного покриву [31]. По-друге, набір метеорологічних даних, що містяться в DAO, не є даними, отриманими шляхом безпосередніх вимірювань. Як результат, можуть мати місце систематичні похибки в певних регіонах. Невизначеності в метеорологічних даних роблять головний внесок в нереалістичні негативні значення *NPP* на деяких

невеликих ділянках. Для таких пікселів, що відповідають територіям з суворими кліматичними умовами, переоцінка лише температури, для прикладу, може бути достатньою, щоб отримати негативне значення NPP. Більш висока температура призводить до переоцінки дихання та недооцінки GPP внаслідок більш високих значень дефіциту водяної пари (VPD). Як результат, якщо дихання перевищує GPP, ми можемо отримати негативне значення NPP.

Внаслідок цього алгоритм моделі MOD17 є досить чутливим до вхідних метеорологічних даних. Більш детально ці аспекти були обговорені в [34].

Також попіксельне порівняння даних MOD15A2 з наземними вимірюваннями виявляє досить слабку кореляцію для LAI, який має тренд до переоцінки для більшості умов [32]. В алгоритмі MOD17 FPAR безпосередньо визначає величину поглинання вуглецю, а LAI відповідає за оцінку дихання; тому переоцінений LAI, отриманий з MOD15A2, може впливати на недооцінку NPP навіть при достатньо точній оцінці FPAR.

Аналіз величини невизначеностей даного методу та їх структури було розглянуто в роботі [4], в якій середня невизначеність оцінювання продуктивності рослинного покриву за даними супутникового спостереження була оцінена в межах від 13–15%.

Результати та їх обговорення. Наведені в табл. 3.2 дані показують, що середня різниця визначення емісії CO₂ за даними супутникових спостережень відносно даних інвентаризації становить близько 10.6% за період 2003–2010 рр., а середня різниця визначення загальної емісії ПГ (CO₂+CH₄) сягає близько 40% за період 2003–2010 рр. Різниця пояснюється високими невизначеностями, властивими

методикам, що є основою алгоритмів інвентаризації емісій. Зокрема, якістю використаних вхідних статистичних даних, тобто їх достовірністю, недосконалістю системи збору і методами обробки інформації, а також відсутністю наукових досліджень щодо уточнення значень ряду національних коефіцієнтів емісій та інших параметрів, необхідних у розрахунках. З іншого боку, слід також враховувати, що від 4–6 до 8–10% різниці можуть бути пов'язані із гетерогенністю розподілу атмосферних концентрацій, зумовлених, зокрема, не стаціонарністю явищ атмосферного переносу. Втім, ця похибка і спричинені нею невизначеності є відомими і контрольованими.

У табл. 3.3 представлено величини стоку (поглинання) CO₂ у фітомасі лісів України згідно з методологією МГЕЗК і національних досліджень [39, 40] та розрахунків за даними супутникових спостережень. При порівнянні величин поглинання CO₂ фітосою лісів, отриманих за даними супутникових спостережень, з величинами поглинання CO₂ фітосою лісів без урахування втрат від рубання лісів розбіжності доволі незначні: 0.1–0.6%. Велика різниця (20–37%) спостерігається при зіставленні даних ЦАКДЗ з величинами поглинання CO₂, які враховують втрати (емісії) від рубання лісів та інші втрати. У першому випадку різницю можна пояснити таким чином: методика МГЕЗК передбачає розрахунок поглинання/емісій CO₂ для декількох (трьох типів резервуарів) екосистем лісів; більше того, для резервуару живої біомаси розрахунок проводиться як для надземної, так і підземної її складових. Можливості космічної зйомки не дозволяють виконувати оцінку запасів вуглецю в усіх резервуарах. На даний мо-

Таблиця 3.3. Оцінка стоку вуглецю (Гг CO₂/рік) у фітомасу лісів України за різними джерелами

Роки	Дані Буня Р. А. та ін. [14]	Дані Національного кадастру [39 CRF]		Дані ЦАКДЗ	Розбіжність в оцінках за даними ЦАКДЗ та даними Національного кадастру (С). %	Розбіжність в оцінках за даними ЦАКДЗ та даними Національного кадастру (D). %
		Поглинання CO ₂ біомасою лісів	Поглинання CO ₂ біомасою лісів з урахуванням втрат від рубок та ін.			
A	B	C	D	E	F	I
1990	65406.46	66450.56	51562.28			
1991	66461.25	66772.93	54070.39			
1992	67532.78	66711.63	54207.82			
1993	68269.47	66827.68	53656.17			
1994	70287.70	67081.3	54661.42			
1995	70372.21	67304.56	55025.26			
1996	71837.65	67300.16	53168.65			
1997	72890.44	67420.36	53141.15			
1998	73961.97	67355.71	56245.93			
1999	75033.50	67554.59	55696.3			
2000	76105.03	67847.71	54392.21	67688.40	- 0.23	+ 24.45
2001	77176.57	67939.41	53853.1	67770.30	- 0.25	+ 25.84
2002		68173.38	52702.94	67852.85	- 0.47	+ 28.75
2003		68304.76	51492.14	67973.75	- 0.48	+ 32.01
2004		68377.72	50172.8	68093.35	- 0.42	+ 35.72
2005		68512.69	50463.53	68274.05	- 0.35	+ 35.29
2006		68671.83	49953.24	68509.35	- 0.24	+ 37.15

мент проводиться лише оцінка приросту наземної живої біомаси. З табл. 3. 4 випливає, що 90% стоку CO_2 припадає на резервуар живої біомаси. У другому випадку причина розбіжностей, ймовірно, криється власне у методології розрахунку поглинання CO_2 супутниковими методами, а саме в точності класифікації типів земних покривів, а отже, в достовірності визначення площі лісових масивів. Адже продукт MOD17 одним із вхідних даних передбачає інформацію про тип земного покриву (MOD12Q1). А також очевидним є той факт, що лісові пожежі, вирубки та інші втрати лісового покриву на період зйомки могли бути відсутніми. Підсумовуючи викладене, головними причинами розбіжностей між оцінками потоків CO_2 традиційними та супутниковими методами можна вважати такі:

- методика IPCC оцінює поглинання CO_2 лише лісами, які віднесені до підкатегорії керовані (методи ДЗЗ оцінюють поглинання для усіх лісових площ);
- за методикою IPCC оцінка здійснюється для підземної і надземної живої біомаси (методи ДЗЗ оцінюють лише поглинання CO_2 живою надземною біомасою).

Спільно для обох методик в якості поглинача вуглецю виступають лісові площі. Також поглиначами є й інші види рослинного покриву, зокрема сільськогосподарські угіддя (рілля), луки й пасовища. Проте оцінка зміни запасів вуглецю (баланс), відповідно до методики IPCC, передбачає, що ці зміни в живій біомасі за рік для однолітніх культур будуть дорівнювати нулю. Тобто збір врожаю однорічних культур відбувається щороку, тому немає ніякого довгострокового зберігання вуглецю в біомасі. Таким чином зміна запасів вуглецю в біомасі оцінюється лише для багаторічних культур, а саме для садів. Окрім того, значні запаси вуглецю можуть бути накопичені в ґрунтах, оцінка яких проводиться як для однолітніх так і для багатолітніх культур. Що стосується луків й пасовищ, то для них переважає підземний вуглець, головним чином у коренях і в органічній речовині ґрунту. Відповідно й оцінка змін запасів вуглецю в даній категорії проводиться тільки для резервуара мінеральних і органічних ґрунтів і тільки для луків й пасовищ, які віднесені до керованих, — тобто це ті площі, з яких було зібрано врожай. Можливості космічної зйомки також дозволяють оцінювати величину поглинання вуглецю усіма типами рослинного покриву (лісових площ, сільськогосподарських культур, луків й пасовищ), але лише для резервуара надземної біомаси.

На підставі викладеного можна стверджувати так:

1. В Україні створено національну систему інвентаризації антропогенних викидів/поглинань ПГ, яка передбачає щорічну підготовку Національного кадастру антропогенних викидів та абсорбції ПГ для

подання до Секретаріату Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй зі змін клімату.

2. Визначення емісій/стоку ПГ проводиться за методологією, розробленою МГЕЗК, яка є базовою і містить інформацію та рекомендації, часто узагальнені, адаптовані для застосування усіма країнами світу, що призводить до значних діапазонів невизначеностей. У зв'язку з цим в Україні ведеться ряд науково-дослідних робіт, спрямованих на деталізацію ряду статистичних даних (вхідної інформації) та визначення національних коефіцієнтів емісій. Проте існує ряд категорій, для яких інвентаризація ПГ не проводиться у зв'язку з відсутністю як статистичних даних, так і коефіцієнтів емісій, що, в свою чергу, робить негативний внесок у повноту інвентаризації. Зокрема, в Україні розрахунок зміни запасів вуглецю в категорії "Поселення" не здійснювався через відсутність національних значень зміни запасів вуглецю для деревної рослинності в межах зелених насаджень забудованих земель. А використання коефіцієнтів, які запропоновані в [38], може призвести до істотно завищених результатів оцінки обсягів поглинань, оскільки вони розроблені для деревних порід, характерних для Північної Америки.

3. В Україні паралельно ведуться роботи над створенням методики моніторингу балансу ПГ з метою уточнення обсягів їхніх викидів та поглинання на основі використання даних супутникових зйомок. Запропоновані на теперішній час супутникові методи дозволяють проводити прямі вимірювання концентрації ПГ в атмосфері та виконувати розрахунки їхнього поглинання рослинним покривом шляхом визначення кореляції спектральних характеристик космічних знімків з параметрами інтенсивності процесів фотосинтезу.

4. Зокрема, підхід, запропонований фахівцями ЦАКДЗ, який ґрунтується на перерахунку радіаційних характеристик у показники концентрації окремих газів за даними отриманими сенсором SCIAMACHY, дозволив виявити різницю за період 2003–2009 рр. між розрахунками емісій (CO_2 та CH_4) за даними супутникових спостережень та офіційними даними Державного агентства екологічних інвестицій України. Середня різниця визначення емісії CO_2 за даними супутникових спостережень відносно даних інвентаризації становить 10.6% за період 2003–2009 рр., а загальної емісії ПГ ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4$) сягає 40% за період 2003–2010 рр. Причина такої різниці може критися з однієї сторони, в низькій якості використаних вхідних статистичних даних, недосконалості системи збору і методах обробки інформації національної системи інвентаризації, відсутності значень ряду національних коефіцієнтів емісій та інших параметрів необхідних в розрахунках. З іншого боку, слід також враховувати, що від 4–6 до 8–10% різниці можуть бути пов'язані із гетерогенністю розподілу атмосферних концентрацій,

Таблиця 3. 4.

Розподіл величин стоку/емісій CO₂ за резервуарами для категорії “Лісові площі” [39 CRF]

Рік	Викиди/поглинання CO ₂ у категорії “Лісові площі” тис. т					
	Жива біомаса		Мертва органіка	Ґрунти		Загальний баланс
	Поглинання	Поглинання з урахуванням втрат		Мінеральні	Органічні	
1990	-66450.56	-51562.28	-6160.15	-15.25	42262	-57284.54
1991	-66772.93	-54070.39	-6188.75	-42.64	42262	-59793.90
1992	-66711.63	-54207.82	-6181.63	-39.93	42262	-59926.91
1993	-66827.68	-53656.17	-6197.33	-33.51	44308	-59376.93
1994	-67081.3	-54661.42	-6224.31	-26.33	44433	-60415.07
1995	-67304.56	-55025.26	-6238.91	-20.61	44579	-60797.74
1996	-67300.16	-53168.65	-6241.91	-15.80	44480	-58949.95
1997	-67420.36	-53141.15	-6258.41	-11.18	44605	-58942.31
1998	-67355.71	-56245.93	-6248.33	-5.43	45005	-62038.77
1999	-67554.59	-55696.3	-6272.68	-1.98	45404	-61516.89
2000	-67847.71	-54392.21	-6304.76	-9.97	45804	-60281.92
2001	-67939.41	-53853.1	-6317.01	-17.31	46200	-59725.39
2002	-68173.38	-52702.94	-6344.95	-24.68	46468	-58607.90
2003	-68304.76	-51492.14	-6360.80	-18.00	46845	-57402.60
2004	-68377.72	-50172.8	-6371.75	-20.86	46922	-56096.19
2005	-68512.69	-50463.53	-6239.13	-27.76	46999	-56260.41

зумовлених, зокрема, не стаціонарністю явищ атмосферного переносу.

5. Другий метод (підхід), що ґрунтується на визначенні фотосинтетичних показників рослинності, дозволив виявити різницю у величинах стоку (поглинання) CO₂ фітомасою лісів України. Різниця виявилась доволі незначною (0.1–0.6%), якщо не брати до уваги величину втрати біомаси при рубанні лісу, пожежах, стихійних лихах, що рекомендує враховувати МГЕЗК. Це можна пояснити тим, що на період зйомки такі втрати лісового масиву, як пожежі, вирубка та ін. могли бути відсутніми. Також причина розбіжностей може критися в недостатній точності класифікації типів земних покривів, а отже, в достовірності визначення площ лісових масивів. Адже продукт MOD17 одним із вхідних даних передбачає інформацію про тип земного покриву (MOD12Q1). Окрім цього, можливості космічної зйомки дозволяють проводити оцінку приросту лише наземної живої біомаси, на відміну від методики МГЕЗК, що здійснює її для трьох типів резервуарів (живої біомаси, мертвої органіки, ґрунтів). Проте невизначеність даних про приріст біомаси в Національному кадастрі оцінюється на рівні 25%. В Україні проводиться науково-дослідна робота [49] з метою деталізації системи коефіцієнтів накопичення вуглецю в резервуарах в залежності від природно-кліматичних зон і віку деревних насаджень.

6. Слід зауважити, що дані досліджень ЦАКДЗ з точки зору оцінки поглинання мають доволі попередній характер і потребують подальших уточнень і перерахунків з урахуванням регіональних особливостей, накопичення наземних завіркових даних для більш точних оцінок та ін.

7. Метою впровадження нових технологічно розвинених методів моніторингу та контролю навколишнього середовища є мінімізація похибки при визначенні критично важливих параметрів. Супут-

никові методи оцінки емісій, як такі, що є незалежними, оперативними і економічними, мають стати інструментом контролю достовірності оцінки даних інвентаризації. В ідеальному випадку різниця має бути не більше ніж 5%, що дорівнює інструментальній похибці. При різниці понад 10–15% дані слід визнати такими, що мають низьку достовірність і потребують додаткового уточнення.

Крім того, необхідно відмітити, що застосування підходів, які ґрунтуються на використанні супутникових методів для оцінки емісій ПГ (зокрема, CO₂), та зростання можливостей супутникових технологій в цьому напрямі надає можливості більш коректної оцінки балансу парникових газів в атмосфері та прогнозу їх змін у майбутньому. Це є важливим з точки зору розробки подальших стратегій адаптації та управління ризиками, що пов'язані із кліматичними змінами, і виконання обов'язків, зумовлених підписаним Україною Кіотського протоколу в частині уточнення та верифікації даних, що надавало Державне агентство екологічних інвестицій України до ІРСС.

Список літератури до розділу 3

1. Замолодчиков Д. Г. Системы оценки бюджета углерода в лесах: научно-образовательный курс / Д. Г. Замолодчиков. — М.: 2012. — 59 с.
2. Изменения земных систем в Восточной Европе / отв. ред. В. И. Лялько. — К.: Фолиант, 2010. — 582 с.
3. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України / [Бунь Р. А., Густі М. І., Дачук В. С. та ін.]; за ред. Р. А. Буня; Українська академія друкарства. — Львів, 2004. — 376 с.
4. Костюченко Ю. В. Оцінка невизначеностей при визначенні продуктивності рослинного покриву та формуванні вуглецевого балансу території за даними ДЗЗ / Ю. В. Костюченко, Д. М. Мовчан, І. Г. Артеменко,

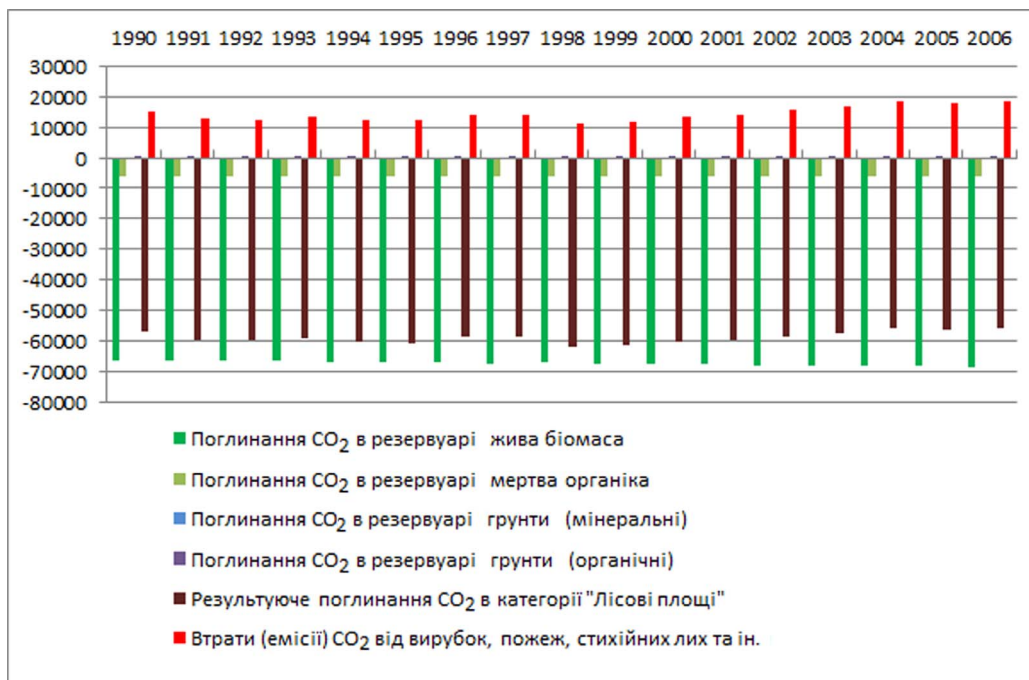


Рис. 3. 9. Стоки та емісії CO₂ (Гг CO₂-екв.) в категорії "Лісові площі" за резервуарами (див. табл. 3.4) [39]

Ю. Г. Білоус // Геоінформатика. — 2013. — №3. — С. 67–75.

5. Лялько В. І. Аналіз невизначеностей в задачах оцінки кліматичних змін на регіональному рівні за даними супутникових спостережень парникових газів / В. І. Лялько, Ю. В. Костюченко, І. Г. Артеменко, Л. М. Попадюк, Р. В. Федина, А. С. Волошаненко // Космічна наука і технологія. — 2013. — Т. 19. — №6.

6. Лялько В. І. Космічний моніторинг балансу парникових газів з метою уточнення їхньої інвентаризації / В. І. Лялько, О. І. Сахацький, Ю. В. Костюченко, І. Г. Артеменко, Г. М. Жолобак, О. І. Левчик, Д. М. Мовчан. // Космічна наука і технологія. — 2012. — Т. 18. — № 2. — С. 3–14.

7. Anderson M. C. An analytical model for estimating canopy transpiration and carbon assimilation fluxes based on canopy light-use efficiency / M. C. Anderson, J. M. Norman, T. P. Meyers, G. R. Diak // Agricultural and Forest Meteorology. — 2000. — Vol. 101. — P. 265–289.

8. Beer R. Tropospheric emission spectrometer for Earth Observing System's Aura satellite / Beer R., Glavich T. A., Rider T. M. // Applied Optics. — 2001. — Vol. 40, № 15. — P. 2356.

9. Buchwitz M. Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: version 0.5 CO and CH₄ and impact of calibration improvements on CO₂ retrieval / Buchwitz M., de Beek R., Noel S., Burrows J. P. et al. // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2006. — № 6. — P. 2727–2751.

10. Buchwitz M. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: Initial comparison with chemistry and transport models / Buchwitz M., de Beek R., Burrows J. P., Bovensmann H., Warneke T., Notholt J., Meirink J., Goede A.P., Bergamaschi H., Korner P., Heimann M., and Schulz A. // Atmos. Chem. Phys. — 2005. — № 5. — P. 94–962.

11. Buchwitz M. Retrieval of CH₄, CO, and CO₂ total column amounts from SCIAMACHY near-infrared nadir spectra: Retrieval algorithm and first results / Michael Buchwitz, John P. Burrows // Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII // Proc. SPIE. — 2005. — Vol. 5235. — P. 375–388.

12. Burrows J. P. SCIAMACHY — Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography / Burrows J. P., Hutzle E., Goede A. P. H., Visser H., Fricke W. // Acta Astronautica. — 1995. — Vol. 35, № 7. — P. 445.

13. Field C. B. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing / C. B. Field, J. T. Randerson, and C. M. Malmstrom // Remote Sensing of the Environment. — 1995. — Vol. 281. — P. 237–240.

14. Field C. B. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing / C. B. Field // Remote Sensing of Environment. — 1995. — Vol. 51. — P. 74–88. doi:10.1016/0034-4257(94)00066-V.

15. Goetz, S. J. Satellite remote sensing of primary production: An improved production efficiency modeling approach / S. J. Goetz, S. D. Prince, S. N. Goward, M. M. Thawley, J. Smal // Ecological Modelling. — 1999. — Vol. 122. — P. 239–255.

16. Heinsch F. A. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm. Version 2.0 / F. A. Heinsch, M. Reeves, P. Votava, S. Kang, C. Milesi et al. — 2003. — P. 57.

17. Houghton J. Climate change and sustainable energy / J. Houghton // Met Office, Hadley Centre. — London, 2005. — 208 p.

18. Javelle P. IASI instrument overview / P. Javelle // Procs. of the 5th Workshop on ASSFTS, Nov. 30th — Dec. 2nd, Tokyo, Japan, 1994. — P. 1–20.

19. Landsberg, J. J. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning / J. J. Landsberg, R. H. Waring // *Forest Ecology and Management*. — 1997. — Vol. 95. — P. 209–228.
20. Lieth H., Whittaker R.-H. (Eds.) *Primary Productivity of the Biosphere*. — Springer; New York, 1975. — 339 p.
21. McCallum I. Satellite-based terrestrial production efficiency modeling / I. McCallum, W. Wagner, C. Schimullius, A. Shvidenko, M. Obersteiner, S. Fritz, S. Nilsson // *Carbon Balance and Management*. — 2009. — P. 4–8.
22. MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17). Algorithm Theoretical Basis Document. Version 3.0 [Steven W. Running, Ramakrishna Nemani, Joseph M. Glassy, Peter E. Thornton], 1999.
23. Monteith J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystem / J. L. Monteith // *Journal of Applied Ecology*. — 1972. — Vol. 9. — P. 747–766.
24. National greenhouse gas inventory data for the period 1990–2009 // FCCC. — 2011. — 26 p.
25. Parry M. L. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, van der Linden P. J. and Hanson C. E. (eds) // Cambridge University Press. — Cambridge, 2007. — 987 pp.
26. Petit J. R. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica / J. R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov [et al] // *International weekly journal of science Nature*. — 1999. — P. 429–436.
27. Prince S. D. Global primary production: A remote sensing approach / S. D. Prince, S. N. Goward // *Journal of Biogeography*. — 1995. — Vol. 22. — P. 815–835.
28. Rahman A. F. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery / A. F. Rahman, J. A. Gamon, D. A. Fuentes, D. A. Roberts, and D. Prentiss // *Journal of Geophysical Research*. — 2001. — Vol. 106. — D24. — 33,579–33,591 pp.
29. Running, S. W. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth observing system // *Methods in Ecosystem Science: book* / S. W. Running, P. E. Thornton, R. Nemani, J. M. Glassy. — New York: Springer, 2000. — P. 44–57.
30. Schneising O. Three years of greenhouse gas column – averaged dry fractions retrieved from satellite – Part 2: Methane / O. Schneising, M. Buchwitz, J. P. Burrows, P. Bovensmann, Bergamaschi and W. Peters // *Atmos. Chem. Phys.* — 2009. — № 9. — P. 443–465.
31. Strahler A. The MODIS Land Cover and Land Cover Dynamics Products / A., H. Strahler, M. Friedl, X. Zhang et al. // Presentation at Remote Sensing of the Earth's Environment from TERRA in LAquila, Italy. — 2002.
32. Wang Y., Woodcock C.E., Buermann W. et al. Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland. *Remote Sensing of Environment*. — 2004. — Vol. 91. — P. 114–127.
33. Zhaoa M. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set / M. Zhaoa, F. A. Heinscha, Ramakrishna, R. R. Nemani, S.W. Running // *Remote Sensing of Environment*. — 2005. — Vol. 95. — P. 164–176
34. Zhaoa M. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses / M. Zhaoa, R. R. Nemani, S. W. Running // *Journal of Geophysical Research*. — 2006. — Vol. 111. — G01002. doi: 10.1029/2004JG000004.
35. IPCC AR4 SYR (2007), Core Writing Team; Pachauri, R.K; and Reisinger, A., ed., *Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, ISBN 92-9169-1224. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
36. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions, Workbook, Reference Manual / J. T. Houghton, L.G. Meira Filho, B. Lim, K. Treanton, I. Mamaty, Y. Bonduki, D. J. Griggs and B. A. Callender (Eds); IPCC; UK Meteorological Office, Bracknell. — 1997. — Vol. 1–3. — Режим доступу: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
37. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme / Penman, D. Kruger, I. Galbally, T. Hiraishi, B. Nyenzi, S. Emmanul, L. Buendia, R Hoppaus, T. Martinsen, J. Meijer, K. Miwa and K. Tanabe (Eds); IPCC. — Наґама: IGES, 2000. — ISBN 4887880006. — Режим доступу: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>
38. Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства: рабочая книга / Межправительственная группа экспертов по изменению климата; под ред. Д. Пенман, М. Гитарского и др. — Швейцария, 2003. — 649 с. — ISBN 92–9169–417–7. — Режим доступу: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_languages.html
39. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990–2012 гг : кадастр / [отв. лицо В. М. Шлихта]; Министерство охраны окружающей природной среды Украины (Государственное агентство экологических инвестиций Украины), К., 2014. — 577 с. (National Inventory Report (NIR) and Common Reporting Format (CRF)). [Электронный ресурс]. — Режим доступу: https://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.php
40. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990–2011 гг: кадастр / [отв. лицо В. М. Шлихта]; Министерство охраны окружающей природной среды Украины (Государственное агентство экологических инвестиций Украины), К.: 2013. —

- 642 с. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.ph Перше Національне повідомлення України з питань зміни клімату. [Електронний ресурс]. ст. 63. — Режим доступу: http://climategroup.org.ua/?page_id=235
41. Друге національне повідомлення України з питань зміни клімату. К.: Інтерпрес ЛТД; УкрНДГМІ, 2006. ст. 80. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://climategroup.org.ua/upl/2-e_Nac_povid_po_zmini_klimatu_ukr.pdf
42. Третье, четвертое и пятое национальные сообщения Украины по вопросам изменения климата. — Киев, 2009. ст. 366. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://climategroup.org.ua/upl/ukr_nc5rev.pdf
43. Official IPCC WGI AR5 website : <http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>
44. <http://modis-250m.nascom.nasa.gov/cgi-bin/browse/browse.cgi> — National Aeronautics and Space Administration (NASA).
45. http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MOD17A2_M_PSN
46. http://www.nasa.gov/mission_pages/aura/main/index.html#VHs_qDGsXg9
47. http://aqua.nasa.gov/about/instrument_airs.php
48. Ходорчук В. Я. Визначення змін запасів вуглецю для категорії землекористування “Ліси” у резервуарах біомаси (живої і відмерлої), підстилки та ґрунтів у розрізі природно-кліматичних зон / В. Я. Ходорчук. Отчёт о научно-исследовательской работе / ИП “Біотехніка”, Київ. — 2012.