

Особливості Валідації Комплексних Глобальних Моделей

Микола Густі, Інна Охремчук
Кафедра міжнародної інформації
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
kgusti@yahoo.com, ohremchukia@gmail.com

Specifics of Validation of Complex Global Models

Mykola Gusti, Inna Okhremchuk
Department of International Information
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
kgusti@yahoo.com, ohremchukia@gmail.com

Анотація—Розглянуто особливості валідації складних комп'ютерних моделей, які використовують для інтегральної оцінки. Основні кроки валідації: валідація концептуальної моделі, валідація даних, валідація поведінки моделі (порівняння результатів моделювання з вимірюваннями, результатами інших моделей, аналіз чутливості моделі та ін.) та верифікація комп'ютерного коду моделі. Наведено приклад валідації глобальної моделі лісу. Продемонстровано як розглянута модель пройшла всі зазначені етапи валідації.

Abstract—Specifics of validation of complex computer models that are used for integrated assessment is considered. The main steps of validation are: validation of conceptual model, validation of data, validation of model behavior (comparison of the modelling results with measurements, model intercomparison, model sensitivity analysis etc.) and verification of the model software code. An example of verification of the global forest model is considered. It is shown how the model has passed all considered stages of validation.

Ключові слова—*моделі інтегральної оцінки; комп'ютерне моделювання; валідація моделей; глобальна модель лісу*

Keywords—*integrated assessment models; simulation; model validation; global forest model*

I. Вступ

Згідно визначення Товариства інтегральної оцінки (TIAS) інтегральна оцінка – це наукова мета-дисципліна, яка інтегрує знання про проблемну сферу і робить ці знання доступними для суспільного навчання і процесів прийняття рішень [1]. Інтегральна оцінка є важливим елементом аналізу складних соціально-економічно-екологічних систем для підтримки прийняття рішень на

міжнародних переговорах. Зокрема, інтегральна оцінка широко використовується при розв'язанні глобальних проблем навколишнього середовища. Для інтегральної оцінки використовують певний клас комп'ютерних моделей, або комплекси моделей – моделі інтегральної оцінки. Особливістю таких моделей є моделювання взаємопов'язаних процесів у таких сферах як економіка, навколишнє середовище, енергетика та інших важливих сферах для розв'язання конкретної проблеми. Крім того, важливим компонентом моделей інтегральної оцінки є можливість симуляції впровадження заходів для розв'язання проблеми (наприклад, оподаткування емісії парникових газів) та оцінки ефективності цих заходів.

Валідація моделей інтегральної оцінки є необхідною для довіри учасників переговорів до запропонованих варіантів розв'язку проблем, оцінки затрат на впровадження можливих заходів та відповідних ризиків. З іншого боку, не існує, або практично не можливо отримати безпосередні вимірювання параметрів складних соціально-економічно-екологічних систем. В якості вхідних даних та даних для порівняння з результатами моделювання часто виступають статистичні дані, дані отримані на основі дистанційного зондування землі та обмеженої кількості наземних досліджень, експертні оцінки, результати інших обчислень, або моделювання. Крім того, моделі інтегральної оцінки включають моделювання суспільних процесів, які є погано структурованими.

В цій роботі проведено огляд можливих шляхів валідації глобальних моделей інтегральної оцінки, а також наведено приклад валідації глобальної геопросторової моделі лісу G4M, яка застосовується для інтегральної оцінки в рамках комплексу взаємопов'язаних моделей Міжнародного інституту прикладного системного аналізу.

II. ОСОБЛИВОСТІ ВАЛІДАЦІ МОДЕЛЕЙ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ

Моделі інтегральної оцінки є складними комп'ютерними моделями, які включають в себе компоненти моделювання біофізичних та економічних процесів, а також поведінки людей. Ці компоненти можуть бути об'єднані в одній моделі (менш детально, наприклад, AIM/CGE (Asia-Pacific Integrated Assessment/Computable General Equilibrium) [2], International Futures (<http://pardee.du.edu/node/484>)), або у вигляді комплексу зв'язаних між собою більш детальних моделей (наприклад, комплекс моделей інтегральної оцінки Міжнародного інституту прикладного системного аналізу [3]). Враховуючи те, що компоненти моделей об'єднані і виникають зворотні зв'язки, валідація окремих компонентів моделей не буде гарантувати валідації моделі (чи комплексу моделей) в цілому.

Загальноприйнятим є твердження, що валідація моделі тісно пов'язана з призначенням моделі. Nguyen (2005) [4] аналізуючи праці, в яких розглядають валідацію моделей інтегральної оцінки, виділяє такі проблеми валідації моделей цього типу:

- Відсутність загальноприйнятих визначень таких понять як валідність моделі, валідація моделі і критеріїв валідності моделі (філософська проблема);
- складність моделей інтегральної оцінки (методологічна проблема);
- участь людей (психологічна проблема);
- нестача і відсутність даних спостережень (проблема даних);
- високий рівень агрегації (проблема відкритості системи).

V.Hughes [5], один з розробників моделі International Futures, використовує концепцію верифікації-валідації та акредитації (VVA). Розрізняють валідацію концептуальної моделі (або валідацію структури моделі – перевірка того, що теорії та припущення, які використано у концептуальній моделі, є раціональними, враховуючи призначення моделі), валідацію поведінки моделі (або операційну валідацію – перевірка того, що поведінка результатів моделювання має достатню точність відповідно до призначення моделі), валідацію даних (перевірка того, що дані, необхідні для розробки моделі та проведення модельних експериментів є адекватними та коректними) та верифікацію (перевірка того, що концептуальна модель переведена у комп'ютерну модель коректно, без помилок) [6] (рис. 1).

Враховуючи вищенаведені проблеми валідації складних моделей, такі моделі, практично, не валідують. В тому числі це стосується моделей інтегральної оцінки в сільському господарстві [7] та лісовому господарстві. Натомість, визначають, чи модель підходить для певних цілей, - «акредитація» згідно [6] і чого притримується V.Hughes [5] при валідації моделі International Futures. Така «акредитація», в тому числі, може відбуватись через процес використання моделі у різних проектах із

залученням до рецензування моделі та результатів моделювання незалежних експертів, замовників результатів аналізу з використанням моделі та зацікавлених осіб (тих, кого можуть стосуватись результати моделювання, чи політичні рішення, на які можуть вплинути ці результати моделювання) [5, 7, 8]. При наявності відповідних даних «спостережень» порівнюють результати моделювання з цими даними. При наявності інших моделей проводять порівняння результатів різних моделей як для історичного періоду так і майбутнього періоду (наприклад, [9, 10]). Також важливо проводити дослідження чутливості моделі до зміни окремих параметрів (для визначення тих параметрів, які мають суттєвий вплив на результат моделювання, а також вимірювання цього впливу), а також, при можливості, аналіз поширення похибок в моделі (наприклад, методом Монте-Карло).

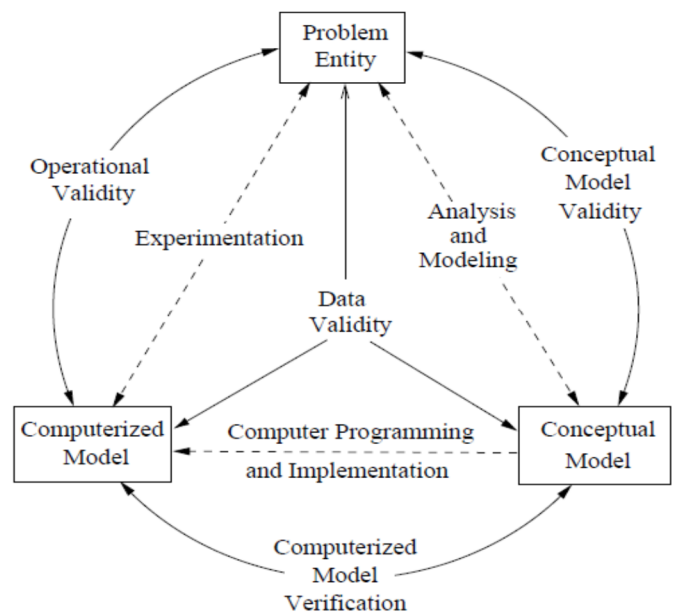


Рис. 1. Схематичне зображення процесу моделювання за [6].

Валідація складної моделі – це тривалий процес, а будь-які вдосконалення моделі вимагають повторення процедур валідації (окремих, чи всіх, в залежності від суттєвості змін).

III. ПРИКЛАД ВАЛІДАЦІ ГЛОБАЛЬНОЇ ГЕОПРОСТОРОВОЇ МОДЕЛІ ЛІСУ G4M

Глобальна модель лісу G4M є геопросторовою моделлю з роздільною здатністю 0.5 градуса. В кожній клітинці моделі симулюється прийняття рішення про зміну землекористування (заліснення, знеліснення, чи без змін) та параметри лісокористування залежно від економічної вигоди ведення сільського та лісового господарства, попиту на деревину, політик зменшення емісії парникових газів, а також обчислюються відповідні емісії (чи поглинання) CO₂ з біомаси, мертвої органічної речовини та ґрунту [11]. Обчислення проводяться для кожного року моделювання (у версії для Європейських країн), або для 5

років (у глобальній версії) клітинка за клітинкою. У поєднанні з глобальною економічною моделлю GLOBIOM її використовують у задачах інтегральної оцінки для зменшення емісії парникових газів у секторі землекористування, зміни землекористування та лісового господарства.

Концептуальна модель G4M була рецензована, при використанні G4M у міжнародних науково-дослідних проєктах, включаючи проєкти, спрямовані на підтримку прийняття рішень щодо зменшення емісії парникових газів (наприклад, PASHIMA [12]; EUCLIMIT [13], [14]), а також при публікації результатів моделювання у рецензованих журналах (наприклад, [3, 9,10,15,16]).

У G4M використовують дані міжнародних організацій, які складені на основі звітів, надісланих країнами, Food and Agriculture Organisation (FAO) [17], United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) [18] та Forest Europe [19], а також дані, які опубліковані у рецензованих журналах (наприклад, [20-22]).

Незважаючи на те, що дані, які використовуються у G4M, проходять перевірку при їх розміщенні у базах даних міжнародних організацій, чи при публікації у рецензованих журналах, існує велика відмінність у відповідних даних з різних джерел, а також даних, опублікованих у звітах у різні роки. Наприклад, дані щодо площі лісу, а також швидкості заліснення і знеліснення, отримані з FAO та UNFCCC, можуть відрізнятись у декілька разів для окремих країн (наприклад, Австралія – оцінка заліснення та знеліснення для 2005 та 2010 років відрізняється у 2-3 рази; та Туреччина – оцінка заліснення відрізняється приблизно у 2 рази, знеліснення відсутнє за даними UNFCCC, але суттєве за даними FAO). Це зумовлено тим, що у різних країнах часто різні державні організації відповідають за подання звітів у FAO та UNFCCC (до UNFCCC дані подають у вигляді таблиць Excel, Common Reporting Format - CRF), можуть використовуватись різні дані для оцінок, різні визначення понять «ліс», «заліснення» та «знеліснення», а також різні методи оцінювання.

Просторові дані, наприклад карти лісового покриву, кількості вуглецю в біомасі лісів, підстилки та ґрунті, придатності ґрунту до ведення сільського господарства та ін. можуть мати суттєві невизначеності. Такі вхідні дані як ціни на деревину та сільськогосподарські землі, а також коефіцієнт корупції (коефіцієнт корупції є середнім арифметичним з трьох перцентилей «політичної стабільності», «ефективності уряду» та «контролю корупції», отриманими з [22] і у моделі G4M визначає ефективність використання коштів, спрямованих на зменшення емісії CO₂ (змінюється від 0 до 1) [10], тобто, чим вищий коефіцієнт, тим вища ефективність використання коштів) є важливими параметрами для аналізу соціально-економічних сценаріїв зменшення емісії парникових газів. Тому важливо оцінити чутливість моделі до зміни її основних параметрів.

А. Аналіз чутливості моделі

В результаті аналізу чутливості моделі до зміни окремих параметрів (+/- 10% від середнього значення) було виявлено, що результати моделювання швидкості заліснення та знеліснення без впливу податку на вуглець найбільш чутливі до зміни валового внутрішнього продукту, коефіцієнта перерахунку вуглецю у об'єм деревини (комбінація щільності деревини та вмісту вуглецю у деревині), приросту деревини (залежить від чистої первинної продукції), щільності розміщення населення, ціни на деревину, придатності землі для ведення сільського господарства та вартості заліснення [23].

В результаті аналізу чутливості оцінки кількості деревини, яка потенційно може бути заготовлена у країнах ЄС, до вибору карти розміщення лісів, яку використовують у G4M, було виявлено, що вплив є незначним у випадку розгляду агрегованих результатів (на рівні ЄС), але суттєвим у випадку розгляду окремих країн. Якщо результати моделювання будуть використані для аналізу вибору шляху досягнення цілі збільшення біоенергії на 10%, вибір карти розміщення лісів може мати вплив на таке рішення. У цьому випадку суттєва різниця між картами вплинула на різницю у результатах моделювання. [24].

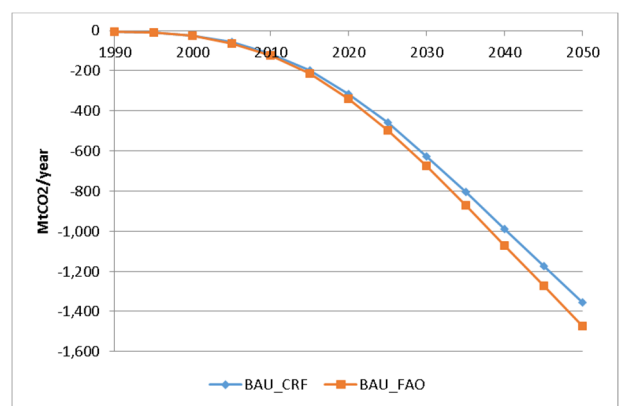


Рис. 2. Глобальні емісії CO₂ від заліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU_FAO) та UNFCCC (BAU_CRF) для калібрування моделі.

Щоб оцінити вплив відмінностей у вхідних даних про площу лісу, а також швидкості заліснення і знеліснення FAO та UNFCCC на результати моделювання, було проведено аналіз чутливості результатів оцінки емісій та стоку вуглекислого газу для історичного періоду та прогнозування до 2050 року, без впливу податку на вуглець та з впливом податку на вуглець (криві граничних витрат на зменшення емісій (MACC)). Результати аналізу наведено на рис. 2 – рис. 4. (рис. 2 – негативні емісії CO₂ від заліснення; рис. 3 – емісії від знеліснення, рис.4).

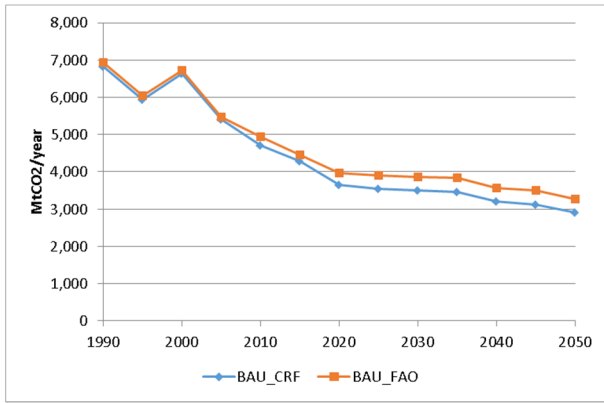


Рис. 3. Глобальні емісії CO₂ від знеліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU_FAO) та UNFCCC (BAU_CRF) для калібрування моделі.

Глобальні (сума для всіх країн) емісії CO₂ від знеліснення та заліснення без впливу податку на вуглець практично не відрізняються протягом історичного періоду, але дещо розходяться з часом (до 9% для заліснення та 12% для знеліснення). Глобальний потенціал зменшення емісії CO₂ від заліснення, знеліснення, лісового господарства та сумарний відрізняється максимум на 20% для заліснення. Разом з тим, для окремих країн різниця перевищує 100%. Тому важливо враховувати призначення результатів моделювання для вибору відповідних даних (FAO, чи UNFCCC) про площу лісу та швидкості заліснення і знеліснення.

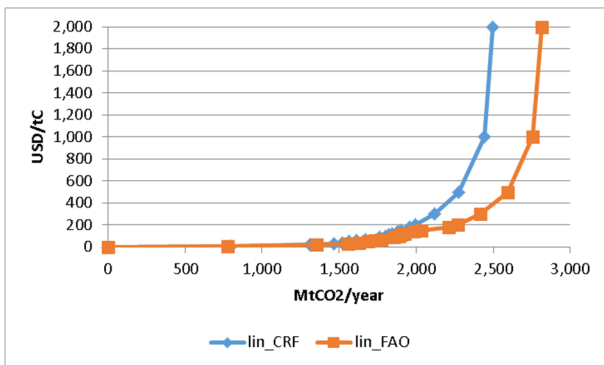


Рис. 4. Глобальний потенціал зменшення емісії CO₂ від знеліснення для різної ціни на вуглець (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р. при використанні даних FAO (lin_FAO) та UNFCCC (lin_CRF) для калібрування моделі.

Також проведено дослідження чутливості кривих граничних витрат на зменшення емісій CO₂ від заліснення, знеліснення та лісового господарства до зміни важливих соціально-економічних факторів – коефіцієнта корупції (відносна невизначеність оцінок компонентів коефіцієнта корупції коливається від декількох відсотків до значно більше 100% для деяких країн, де важко отримати достовірну інформацію (наприклад, Північна Корея, Афганістан), ціни на деревину та ціни на сільськогосподарську землю [25] (у сценаріях, де використовують модель G4M, ціни на

сільськогосподарські товари змінюються від -60% до +50% до 2100 р. порівняно з 2005 р., а заходи по зменшенню емісії парникових газів можуть призвести до збільшення цін на сільськогосподарські товари на 110-570%). Для цього модель розв'язували для різних сценаріїв лінійної зміни ціни на вуглець (від 0 у 2015 році до 0 – 717 \$/tC у 2030 році). Для кожного сценарію зміни ціни вуглецю змінювали кожен з параметрів на +/- 1, 2.5, 5, 10, 50 та 90% відносно середнього значення. Отримали 12 кривих граничних витрат для кожного параметра (позначення: *crpV*, *crmV*, *wpV*, *wmV*, *lpV* та *lmV*; *cr* – коефіцієнт корупції, *w* – ціна деревини, *l* – ціна сільськогосподарської землі, *p* – збільшення параметра, *m* – зменшення параметра, *V* – зміна параметра на 1, 2.5, 5, 10, 50 або 90%; рис.5 – рис.7).

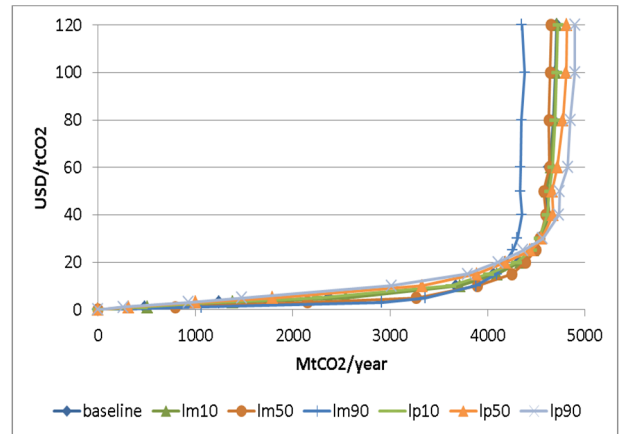


Рис. 5. Глобальний потенціал зменшення сумарних емісій CO₂ для різної ціни на вуглець та відхиленя ціни на сільськогосподарські землі на +/- 10, 50 та 90% (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р.

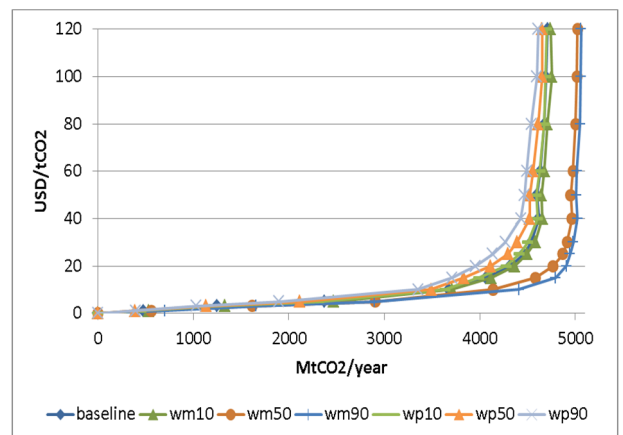


Рис. 6. Глобальний потенціал зменшення сумарних емісій CO₂ для різної ціни на вуглець та відхиленя ціни на деревину на +/- 10, 50 та 90% (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р.

При зміні параметрів на 10% глобальна крива граничних витрат є найбільш чутливою, коли ціна вуглецю становить 18 \$/tC. При такій ціні вуглецю зменшення коефіцієнта корупції має найбільший вплив на МАСС – потенціал зменшення емісій CO₂ знижується на 230

МтCO₂/рік (рис.7). Збільшення коефіцієнта корупції має дещо менший ефект на МАСС – потенціал зменшення емісії CO₂ зростає на 229 МтCO₂/рік. Зміна ціни на сільськогосподарські землі теж суттєво впливає на МАСС – зменшення ціни на землю приводить до збільшення потенціалу зменшення емісії CO₂ на 172 МтCO₂/рік (рис.5), а збільшення ціни на землю приводить до зниження потенціалу зменшення емісії CO₂ на 122 МтCO₂/рік. Зміна коефіцієнта корупції має найбільший вплив на глобальну МАСС у порівнянні з іншими параметрами при цінах вуглецю нижче 180 \$/tC і при ціні 478 \$/tC. Зміна ціни деревини має найбільший вплив на МАСС у порівнянні з іншими параметрами при ціні вуглецю 239–358 і 597–717 \$/tC. Ціна на деревину досягає свого максимального впливу на МАСС при 90 \$/tC.

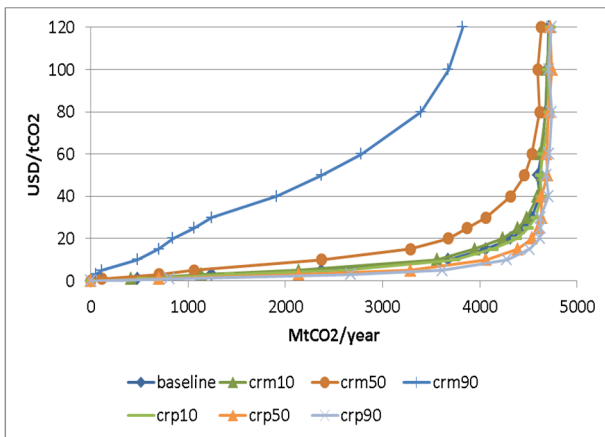


Рис. 7. Глобальний потенціал зменшення сумарних емісії CO₂ для різної ціни на вуглець та відхиленнь коефіцієнта корупції на +/- 10, 50 та 90% (криві граничних витрат на зменшення емісії) у 2030р.

При зміні параметрів на 50% глобальна МАСС є найбільш чутливою, коли ціна на вуглець становить 30 \$/tC. При такій ціні на вуглець зменшення коефіцієнта корупції викликає відхилення МАСС на -1310 МтCO₂/рік (рис.7), а при ціні 717 \$/tC – лише на -75 МтCO₂/рік. Коефіцієнт корупції має найбільший вплив на МАСС у порівнянні з іншими параметрами при ціні на вуглець 6 і 30-179 \$/tC. Ціна деревини має суттєвий вплив на МАСС при всіх цінах вуглецю з максимальним значенням -582 МтCO₂/рік при ціні на вуглець 30 \$/tC (рис.6) і має найбільший ефект у порівнянні з іншими параметрами при ціні вуглецю 239-717 \$/tC. Зміна ціни на сільськогосподарські землі має максимальний вплив на МАСС (903 МтCO₂/рік), а також у порівнянні з іншими параметрами, при ціні на вуглець 18 \$/tC (рис.5).

При зміні параметрів на 90% МАСС є найбільш чутливою при ціні на вуглець 119 \$/tC. При такій ціні на вуглець зменшення коефіцієнта корупції викликає відхилення МАСС на -3477 МтCO₂/рік (рис.7). Вплив зміни коефіцієнта корупції зменшується повільно і має найбільший вплив на МАСС у порівнянні з іншими параметрами при ціні вуглецю 30-717 \$/tC. Зміна ціни сільськогосподарської землі має менший вплив на МАСС, ніж зміна коефіцієнта корупції, з максимумом при ціні вуглецю 30 \$/tC (1699 МтCO₂/рік) (рис.5). У порівнянні з

іншими параметрами, вплив зміни ціни сільськогосподарської землі є найбільшим при ціні вуглецю 6 і 18 \$/tC. Зміна ціни деревини має максимальний вплив на МАСС (733 МтCO₂/рік) при 60 \$/tC (рис.6).

Коефіцієнт корупції має найбільший вплив на МАСС при всіх рівнях зміни параметрів. Зі збільшенням амплітуди зміни параметра максимальний вплив на МАСС зсувається від 30 \$/tC (при змінах на 10 і 50%) до 119 \$/tC (при зміні на 90%). Ціна деревини має відносно рівномірний вплив на МАСС при всіх цінах вуглецю, а ціна на сільськогосподарську землю має два максимуми – більший при низьких цінах вуглецю і менший при високій ціні вуглецю. Збільшення амплітуди зміни параметра до 90% знижує ціну на вуглець, при якій зміна окремих параметрів викликає максимальне відхилення МАСС.

В. Відтворення історичних даних.

Для більшості країн ЄС, де інформація про ліси є більш повною, модель досить точно відтворює емісії CO₂ від лісокористування (у порівнянні з даними, які країни звітують у UNFCCC, наприклад, Фінляндія, рис.8).

В ряді країн ЄС (наприклад, Бельгія, Великобританія, Данія, Франція та Швеція (рис.9) відхилення результатів моделювання від даних, які країни звітують у UNFCCC, в окремі роки є суттєвим. В таких випадках потрібно проводити аналіз вхідних даних та моделі, щоб пояснити причину, або виправити, наприклад, помилки у концептуальній моделі, чи програмній реалізації моделі.

G4M results for countries (Finland, 0)

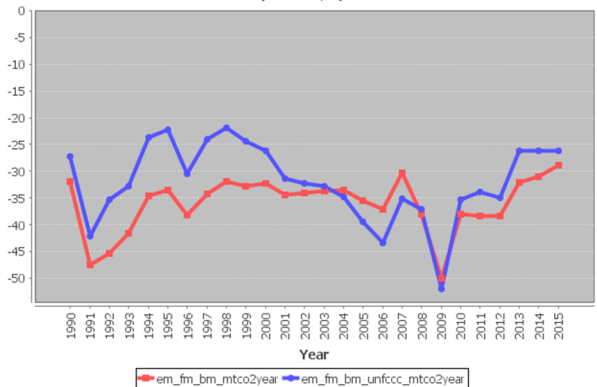


Рис. 8. Емісії CO₂ від лісового господарства (FL-FL) у Фінляндії у 1990-2015рр., подані країною до UNFCCC та змодельовані G4M

У випадку Швеції результати моделювання емісій CO₂ від лісокористування досить добре відповідають даним про лісозаготівлю (рис.10). Це може свідчити про те, що, швидше за все, причину відмінностей потрібно шукати у вхідних даних.

У випадку країн, для яких інформація про ліси є неповною та/або неточною, відтворення емісій вуглекислого газу є менш точним, але і дані «спостережень», з якими проводиться порівняння, також є менш достовірними (наприклад, Індія, рис.11).

Також проводилося порівняння і аналіз результатів моделювання G4M з національними даними країн ЄС [26]. Автори не знайшли єдиний вхідний параметр, який би дозволив пояснити причину відмінностей у результатах моделювання та національних даних країн. Найбільший вплив має метод, який експерти в країнах використовують для обчислення емісій CO₂ від лісового господарства, що може відрізнятися від того, який використано у моделі. Інші впливові причини – це дані про заготівлю деревини, втрати при лісозаготівлі, методи, які використовують у країнах, для корекції відсутніх даних у інвентаризації лісів, а також те, що модель не враховує великомасштабні природні порушення лісів (вітровали, пожежі, хвороби).

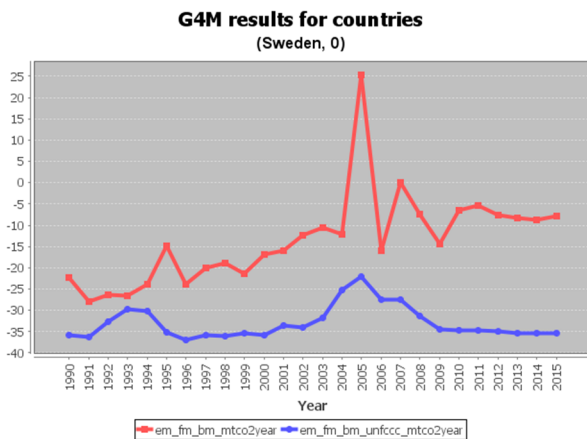


Рис. 9. Емісії CO₂ від лісового господарства (FL-FL) у Швеції у 1990-2015рр., подані країною до UNFCCC та змодельовані G4M

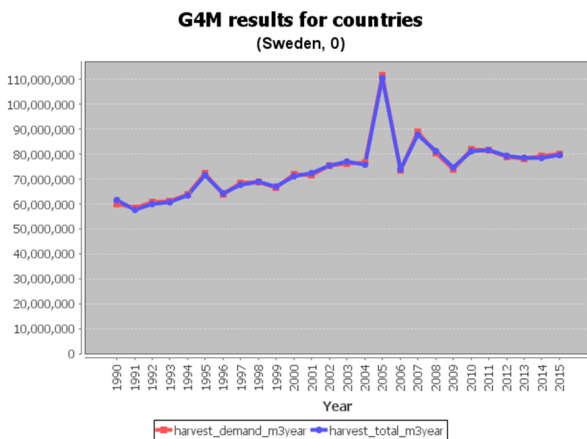


Рис. 10. Заготівля деревини у Швеції за даними FAOSTAT (вхідний параметр моделі) та змодельована G4M

Крім порівнянь з історичними даними, також проводили порівняння з відповідними результатами інших моделей. Детальне порівняння для країн ЄС проводили з моделлю лісу EFISCEN [15], для Бразилії з результатами спеціальної версії GLOBIOM для цієї країни [27] (рис.12) та на глобальному рівні у складі комплексу інтегральної оцінки Міжнародного інституту прикладного системного аналізу з моделями AIM, GCAM, IMAGE та REMIND/MAGPIE [9]. У зазначених випадках результати

G4M є раціональними, а різниця у результатах моделей пояснюється відмінностями у підходах до моделювання відповідних процесів і вхідних даних.

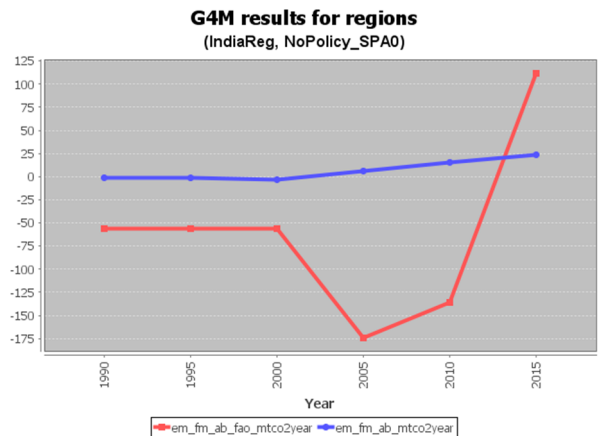


Рис. 11. Емісії CO₂ від лісового господарства (FL-FL) у Індії у 1990-2015рр., за даними FAOSTAT та змодельовані G4M

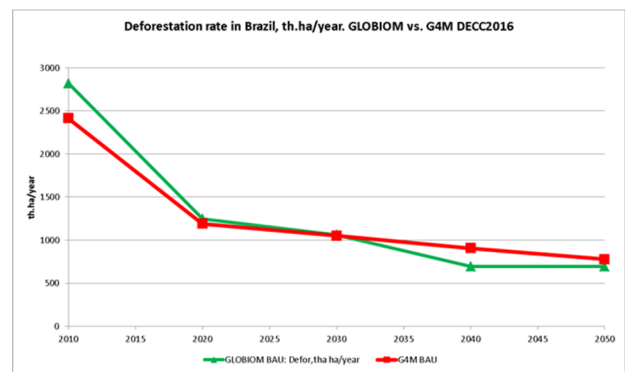


Рис. 12. Швидкість знеліснення, кга/рік, у Бразилії у 2000-2050рр. за результатами спеціальної версії GLOBIOM для Бразилії [27] та G4M

Важливим етапом валідації моделей, які використовують для інтегральної оцінки, є представлення результатів національним експертам, а також тим, кого можуть стосуватись ці результати, та спільний аналіз результатів в режимі питання-відповіді. Ця робота може проводитись віддалено через інтернет та телеконференції, або через організацію спеціальних семінарів [15]. Під час такого аналізу експерти просять пояснити ті, чи інші результати, зазвичай, звертаючи особливу увагу на «аномалії». В результаті такої роботи можуть бути виявлені як проблеми із вхідними даними, так і помилки; обмеження концептуальної моделі, а також помилки програмної реалізації моделі. Розробники моделі і користувачі результатів моделювання можуть узгодити, які вхідні дані краще відповідають для розв'язку поставленої задачі (наприклад, UNFCCC чи FAO). У користувачів результатів моделювання (тих, хто буде приймати рішення, ґрунтуючись на цих результатах, а також ті, кого ці рішення будуть стосуватись) виробляється розуміння роботи моделі, обмеження моделі, невизначеності результатів моделювання і, відповідно,

рівень довіри до результатів моделювання. Приклад обговорення результатів з користувачами наведено в [28], а рекомендації для політиків, на основі результатів моделювання у [29].

ВИСНОВКИ

Моделі, які використовують для проведення інтегральної оцінки, у більшості випадків, є складними комп'ютерними моделями, або комплексами взаємопов'язаних моделей, які, серед іншого, включають моделювання екологічних, економічних та соціально-політичних процесів. У зв'язку з складністю моделей, а також відсутністю достатньої кількості даних вимірювань, такі моделі валідують у процесі їх застосування, у наукових публікаціях і під час багатоетапного рецензування експертами та користувачами як самих моделей так і результатів моделювання. В результаті цього процесу у користувачів виробляється певний рівень довіри до результатів моделювання, що дозволяє використовувати ці результати для підтримки прийняття рішень.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Defining Integrated Assessment. Website of The Integrated Assessment Society. [Online]. Available: http://www.tias.unionsabrueck.de/integrated_assessment.php, accessed 27 April 2017
- [2] S. Fujimori, T. Hasegawa, T. Masui, et al. "SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways", *Global Environmental Change*, Vol 42, pp. 268-283, January 2017
- [3] O. Fricko, P. Havlik, J. Rogelj et al. "The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century", *Global Environmental Change*, no. 42, pp. 251-267, 2017
- [4] T.G. Nguyen "A methodology for validation of integrated assessment models with an application to coastal-zone management in South-West Sulawesi", Dissertation to obtain the doctor's degree at the University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2005
- [5] B. Hughes "Assessing the Credibility of Forecasts using International Futures (IFs): Verification and Validation." Working paper 2006.06.20. Pardee Center for International Futures, Josef Korbel School of International Studies, University of Denver, Denver, CO, 2006
- [6] R. Sargent "Verification, Validation, and Accreditation of Simulation Models," Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, J.A. Joines, R.R. Barton, K. Kang, and P.A. Fishwick, eds., 2000 [online] Available: <http://www.informs-sim.org/wsc00papers/009.PDF>. Accessed 27 April 2017
- [7] W. Britz, M. van Ittersum, A.O. Lansink, T. Heckelee "Tools for Integrated Assessment in Agriculture. State of the Art and Challenges", *Bio-based and Applied Economics*, no. 1(2), pp. 125-150, 2012
- [8] J.P. Van der Sluijs "A way out of the credibility crisis of models used in integrated environmental assessment", *Futures*, no. 34 (2), pp. 133-146, 2002
- [9] A. Popp, K. Calvin, S. Fujimori et al. "Land-use futures in the shared socio-economic pathways", *Global Environmental Change*, no. 42, pp. 331-345, 2017
- [10] G. Kindermann, M. Obersteiner, et al. "Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, no. 105(30), pp. 10302-10307, 2008
- [11] M. Gusti, G. Kindermann "An approach to modeling landuse change and forest management on a global scale". Proceedings, 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011), 29-31 July 2011, Noordwijkerhout, Netherlands, pp.180-185
- [12] PASHIMA Project, [online], Available: <http://www.pashima-project.eu>, Accessed 27 April 2017
- [13] EUCLIMIT Project [Online]. Available: <http://www.euclimit.eu/Models.aspx> Accessed 27 April 2017
- [14] J. Eliasch "Climate change : financing global forests : the Eliasch review", London ; Sterling, VA : Earthscan, 2008
- [15] H. Böttcher, P.J. Verkerk, M. Gusti et al. "Projection of the future EU forest CO₂ sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models", *GCB Bioenergy*, no.4, pp.773-783, 2012
- [16] G. Kindermann, M. Obersteiner, et al. "Predicting the deforestation-trend under different carbon-prices", *Carbon Balance and Management*, no.1(1), 2006
- [17] FAO Forest Resource Assessment [Online]. Available: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/en> Accessed 27 April 2017
- [18] National Inventory Submissions 2016 [Online]. Available: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php Accessed 27 April 2017
- [19] Forest Europe [Online]. Available: <http://foresteurope.org/state-europes-forests-2015-report/> Accessed 27 April 2017
- [20] G. Kindermann, I. McCallum, et al. "A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics", *Silva Fennica*, no. 42(3), pp. 387-396, 2008
- [21] H. Gallaun, G. Zanchi, et al. "EU-wide maps of growing stock and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements", *Forest Ecology and Management*, no. 260(3), pp. 252-261, 2010
- [22] D. Kaufmann, A. Kraay, M. Mastruzzi "Governance Matters IV: Governance Indicators for 1996-2004", World Bank Policy Research Working Paper, Series No. 3630. World Bank, 2005
- [23] M. Gusti "Uncertainty of BAU emissions in LULUCF sector: Sensitivity analysis of the Global Forest Model", Proceedings of the 3rd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, 2010
- [24] L. Seebach, I. McCallum, S. Fritz et al. "Choice of forest map has implications for policy analysis: A case study on the EU biofuel target", *Environmental Science & Polic*, Vol.22, pp. 13-24, 2012
- [25] M. Gusti, N. Khabarov, N. Forsell "Sensitivity of marginal abatement cost curves to variation of G4M parameters", Proceedings of the 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Cracow, Poland 7-9 October 2015, p.163-169
- [26] T. Groen, P. Verkerk, H. Böttcher et al. "What causes differences between national estimates of forest management carbon emissions and removals compared to estimates of large-scale models?", *Environmental Science & Polic*, Vol.33, pp. 222-232, 2013
- [27] G. Camara, A. Soterroni, F. Ramos, et al. (2016) "Modelling Land Use Change in Brazil: 2000-2050" (Dataset), DOI:10.22022/REDD/09-2016.13782.
- [28] ILUC Quantification Study of EU Biofuels. Meeting Notes [Online]. Available: <http://www.globiom-iluc.eu/project-information/stakeholder-consultation/meeting-minutes/> Accessed 27 April 2017
- [29] Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Commission Staff Working Document. Impact Assessment. European Commission. Brussels, 30.11.2016 SWD(2016) 418 final. [Online]. Available: https://www.parlament.gv.at/PAKT/EU/XXV/EU/12/52/EU_125202/imfname_10677059.pdf. Accessed 27 April 2017