

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

ГУСТІ МИКОЛА ІВАНОВИЧ

УДК 004.942:519.876.5

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ ТА СТОКУ ВУГЛЕКИСЛОГО
ГАЗУ В ЛІСОВОМУ ГОСПОДАРСТВІ ТА ПРИ ЗМІНАХ
ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів –2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Бунь Ростислав Адамович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри прикладної математики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Виклюк Ярослав Ігорович,
ПВНЗ «Буковинський університет», проректор з
наукової роботи та міжнародних відносин;

доктор технічних наук, професор
Гера Богдан Васильович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту ім. В. Лазаряна, завідувач
кафедри транспортних технологій;

доктор технічних наук, доцент
Мартинюк Петро Миколайович,
Національний університет водного господарства і
природокористування, завідувач кафедри
прикладної математики.

Захист дисертації відбудеться 16 березня 2018 р. о 13 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “ ___ ” лютого 2018 р.

В.о. ученого секретаря спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор

Н.Б.Шаховська

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Господарська діяльність змінює навколишнє середовище і спричиняє вивільнення великої кількості вуглецю, який тисячі років зберігався у надрах, чи знаходився у органічній речовині ґрунту та в біомасі дерев. Сполуки вуглецю, в основному, вуглекислий газ та метан, а також сполуки азоту є парниковими газами, які, потрапляючи в атмосферу в результаті антропогенної діяльності, змінюють радіаційний баланс Землі. Парникові гази затримують довгохвильове випромінювання з поверхні землі, додатково розігріваючи атмосферу. За даними CDIAC (Центр аналізу інформації про вуглекислий газ) концентрація вуглекислого газу в атмосфері зросла з 0.28 ‰ у передіндустріальний період до майже 0.4 ‰ у 2015 р. (за останніми даними концентрація перевищила 0.4 ‰ у 2016-2017 рр.). Швидкість зростання концентрації парникових газів корелює з економічною активністю, зокрема вона сповільнюється під час економічних криз. За даними, наведеними у 5 Оціночному звіті IPCC (Міжурядової групи експертів зі зміни клімату), емісії парникових газів від сільського господарства, зміни землекористування (в основному знеліснення), та лісокористування становлять приблизно 25% усіх емісій (другі після спалювання викопного палива). В той же час наземні екосистеми, в основному ліси, поглинають біля 25% антропогенних емісій вуглекислого газу. Ймовірно, що без спільних скоординованих дій країн концентрація парникових газів буде більше 1 ‰ до 2100 року, а зростання глобальної температури перевершить 4°C. Таке підвищення температури може суттєво змінити клімат Землі і спричинити великі збитки. Ще у 1982 році була прийнята Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (РКЗК), яку згодом доповнили Кіотським протоколом, у якому розвинені країни зобов'язувались обмежити та зменшити емісії парникових газів, а віднедавна також доповнили Паризькою угодою, в якій зобов'язання вже стосуються майже всіх країн.

Для підтримки прийняття рішень на міжнародних переговорах, а також на національному та локальному рівнях використовують математичне моделювання. Під час моделювання необхідно враховувати взаємодію економічної, кліматичної та біофізичної підсистем. Використовують, так звану, інтегральну оцінку та інтегральне моделювання. Оскільки об'єктом моделювання є складна (відкрита) система, вхідні дані характеризуються значною невизначеністю і йдеться про моделювання майбутнього, тому неможливо оцінити, в класичному значенні, точність моделювання і вибрати одну найкращу модель. Існує велика кількість математичних моделей, які описують кліматичну, економічну та біофізичну підсистеми з різною деталізацією, а також моделі, які з меншою деталізацією включають всі три підсистеми. Значною невизначеністю характеризується сфера лісокористування та зміни землекористування, що спонукає розроблювати нові математичні моделі процесів емісії вуглекислого газу в цій сфері, методи обчислення емісій для великих територій, методи аналізу невизначеностей та впливу невизначеностей на прийняття рішень. Зокрема, такі вчені отримали вагомні результати в галузі розроблення моделей для інтегральної оцінки з врахуванням процесів лісокористування та зміни землекористування: M.Obersteiner, P.Navlik, A.Popp, S.Fujimori, K.Riahi, D. van Vuuren, E.Stehfest, B.Bodirsky та ін.; в галузі розроблення математичних моделей процесів, пов'язаних із вуглецевим балансом лісових екосистем: A.Shvidenko, D.Schepaschenko, P.Verkerk, S.Pitch, G.Kindermann, П.Лакида, О.Турковська та ін.; галузі розроблення методів обчислення емісій для

великих територій: Р.Бунь, М.Лесів, G.Marland, T.Oda, R.Houghton, A.Baccini, E.Mitchard, S.Saatchi., N.Harris, A.Shvidenko, I.Kurganova, V.Stolbovoi, О.Токар, О.Данило, М.Галушак, Н.Чарковська, О.Стрямець та ін.; галузі розроблення методів аналізу невизначеностей та їх впливу на прийняття рішень щодо навколишнього середовища: M.Jonas, Z.Nahorski, S.Fuss, Z.Chladna, H.Laurikka, T.Koljonen E.Kiriyama, A.Suzuki, L.Reedman, P.Graham та ін.

Важливо знайти компроміс між наявними даними, відображенням важливих процесів, важливих взаємодій між процесами різних підсистем для задач, які потрібно вирішувати, а також обчислювальною потужністю. Існуючі моделі не враховують у повній мірі взаємодії процесів заліснення, знеліснення та лісозаготівлі, торгівлі між країнами, а також залежності інтенсивності процесів кругообігу вуглецю та віку деревостану. В багатьох випадках кількість наземних вимірювань потоків вуглецю є недостатньою, тому важливо розробити методи обчислення середніх потоків вуглецю з великих територій та оцінювання невизначеності цих потоків. Значна невизначеність є характерною ознакою проблем навколишнього середовища, тому необхідно розробити методи аналізу невизначеностей та впливу невизначеностей на прийняття природоохоронних рішень.

Нагальна необхідність розв'язання проблеми зміни клімату, а також те, що наявні сучасні прикладні методи та математичні моделі не в повній мірі враховують аспекти взаємодії економічних, біофізичних та кліматичних процесів, дає можливість сформулювати актуальну науково-прикладну проблему математичного моделювання процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування для підвищення ефективності прийняття природоохоронних управлінських рішень щодо пом'якшення зміни клімату на глобальному, регіональному та національному рівнях.

Зв'язок роботи з науковими роботами, програмами, темами. Основу дисертаційної роботи складають результати теоретичних та практичних досліджень, виконаних автором у рамках планових науково-дослідних робіт та міжнародних проектів Національного університету «Львівська політехніка», зокрема:

- гранту 7РП ЄС “Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів” (2011-2014 рр.; грант 7РП ЄС – Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES);
- держбюджетних НДР “Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень” (2013-2014 рр.; номер держ. реєстр. 0113U003181) та “Геоінформаційні технології побудови регіональних кадастрів емісії парникових газів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень” (2011-2012 рр.; номер держ. реєстр. 0111U001210);
- українсько-австрійських проектів „Просторово-часове оцінювання невизначеності кадастрів емісії парникових газів: ретроспективний аналіз для Австрії та України та ефективне прогнозування” (2015-2016 рр.; номери держ. реєстр. 0115U006500 та 0116U005309), "Регіональний просторовий кадастр емісій парникових газів з врахуванням невизначеностей вхідних даних" (2011-2012 рр.; номери держ. реєстр. 0111U008510 та 0112U003944) та "Методи просторової

інвентаризації емісій парникових газів Кіотського протоколу з врахуванням їх невизначеностей" (2009-2010 рр.; номер держ. реєстр. 0109U003461);

- українсько-китайського проекту "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень" (2013-2014 рр.; номери держ. реєстр. 0113U001997 та 0114U003703);

ряду проектів Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (м.Лаксенбург, Австрія), зокрема:

- Оцінка фактору невизначеності у повному обліку вуглецю методом "знизу-вгору" для Росії (Австрійський наук. фонд - FWF; Проект № P17569-N04, 2005-2007 рр.);
- Застосування моделей для глобальних політик та дій ЄС-27 в умовах режиму після 2012р. (Post 2012 Project) (Європейська комісія, 2008-2009 рр.);
- Адаптація суходолу та пом'якшення наслідків в Європі (CC TAME) (ЄС FP7, Грантова угода № 212535, 2008-2011 рр.);
- Загальна вартість зміни клімату: Зміна Клімату (ЄС FP7, Грантова угода № 212774, 2008-2011 рр.);
- Спостереження за Землею з метою моніторингу та оцінювання впливу на навколишнє середовище внаслідок використання енергії: EnergGEO (ЄС FP7, Грантова угода № 226364, 2009-2013 рр.);
- Управління парниковими газами в європейських системах землекористування - ПГ-Європа (ЄС FP7, Грантова угода № 244122, 2010-2014 рр.);
- Аналіз потенціалу та витрат у землекористуванні, змінах в землекористуванні та лісовому господарстві в країнах-членах ЄС (ЄС, Генеральна дирекція з питань екології та Генеральна дирекція з питань зміни клімату, Угода № 07.0307/2009/541003/SER/C5, 2011 р.);
- EUCLIMIT - Розробка та застосування можливостей моделювання пом'якшення зміни клімату економічними засобами у ЄС (Всі емісії та поглинання парникових газів) (Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013 рр.);
- Пом'якшення наслідків зміни клімату: Постійні можливості моделей підтримувати цілі міжнародної політики (Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013 рр.);
- Скорочення емісій внаслідок знеліснення та деградації лісу: Постійні можливості моделей підтримувати підготовку міжнародної політики ЄС (Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013 рр.);
- Розробка та застосування можливостей моделювання пом'якшення зміни клімату економічними засобами у глобальному масштабі для підготовки міжнародної політики ЄС (Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2012-2014 рр.);
- Діюча глобальна система спостереження за вуглецем (GEOGarbon) (ЄС FP7, Грантова угода № 283080, 2011-2014 рр.);

міжнародного проекту Державного НДІ інформаційної інфраструктури НАН України (проект НТЦУ № 1700 „Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України”; 2002-2004 рр.).

У рамках цих робіт автор розробив низку математичних моделей, алгоритмів та програмних засобів математичного моделювання процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності прийняття природоохоронних управлінських рішень щодо пом'якшення зміни клімату на глобальному, регіональному та національному рівнях у секторі лісового господарства та при змінах землекористування шляхом розроблення методів моделювання та математичних моделей вуглецевого балансу лісових екосистем, методів моделювання процесів лісокористування та змін землекористування, методів моделювання прийняття рішень, методів детектування зміни рівня емісій парникових газів, методів аналізу різноманітних стратегій зменшення емісії вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін у землекористуванні, а також методів оцінювання емісій вуглекислого газу екосистемами.

Для досягнення мети в межах дисертаційних досліджень розв'язано такі завдання:

1. Аналіз відомих підходів до моделювання та математичних моделей вуглецевого балансу лісових екосистем, процесів лісокористування та змін землекористування, а також визначення похибок.
2. Розроблення математичної моделі вуглецевого балансу лісової екосистеми з врахуванням наявних даних про лісові екосистеми та кліматичних умов в Україні.
3. Розроблення методів геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні із врахуванням взаємного впливу процесів лісокористування та зміни типів землекористування, а також процесів торгівлі та переміщення заготовленої деревини та відповідних емісій вуглекислого газу, впливу заходів щодо зменшення емісій парникових газів на ці процеси.
4. Удосконалення методу ідентифікації параметрів геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування з врахуванням існуючих даних про заліснення, знеліснення та тренд зміни площі лісу на національному рівні.
5. Створення схем обміну даними між геопросторовою моделлю процесів лісокористування та зміни землекористування та іншими моделями для комплексного оцінювання емісій вуглекислого газу та потенціалу зменшення емісій для сценаріїв соціально-економічного розвитку та зміни концентрацій парникових газів в атмосфері.
6. Розроблення методів обчислення емісій вуглекислого газу екосистем суходолу та невизначеності результатів обчислень у випадку недостатньої кількості вимірювань.
7. Аналіз невизначеностей вхідних даних та результатів моделювання, а також оцінювання впливу невизначеностей на прийняття природоохоронних рішень.
8. Аналіз лісокористування та зміни землекористування, емісій вуглекислого газу та потенціалу зменшення емісій з використанням розробленої геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування.

Об'єктом дослідження є процеси емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування.

Предметом дослідження є методи моделювання та аналізу процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування, методи аналізу невизначеності емісій вуглекислого газу та результатів моделювання.

Методи дослідження. У процесі досліджень використано методи математичної статистики для аналізу вхідних даних, побудови математичних моделей та оцінювання їх похибок; метод імітаційного моделювання для моделювання прийняття рішень; методи геоінформатики, процедурного та об'єктно-орієнтованого програмування для програмної реалізації математичних моделей та представлення результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі розв'язано комплекс задач, які у сукупності вирішили науково-прикладну проблему математичного моделювання процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування, що дало можливість підвищити ефективність прийняття природоохоронних управлінських рішень щодо пом'якшення зміни клімату на глобальному, регіональному та національному рівнях, а саме: моделювання вуглецевого балансу лісових екосистем, моделювання процесів лісокористування та змін землекористування, розроблення методів детектування зміни рівня емісій парникових газів, розроблення методів аналізу різноманітних стратегій зменшення емісії вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін у землекористуванні, розроблення методів визначення емісій вуглекислого газу екосистемами та похибок.

Новими є такі наукові результати:

- Вперше розроблено метод моделювання вуглецевого балансу лісової екосистеми, який поєднує процеси кругообігу вуглецю та таксаційні параметри деревостану, що дає можливість відобразити вікову динаміку деревостану при моделюванні процесів кругообігу вуглецю.
- Вперше розроблено математичну модель фенологічних процесів у букових та дубових лісах Карпатського регіону України, яка базується на даних спостережень, враховує часовий зсув цих процесів при зміні клімату та дає можливість точніше відтворити сезонну динаміку процесів кругообігу вуглецю.
- Вперше розроблено метод геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні, який, на відміну від відомих, враховує взаємний вплив цих процесів, а також процесів торгівлі та переміщення заготовленої деревини, процесів заліснення та знеліснення, що дає можливість сумісно аналізувати і прогнозувати ці процеси у залежності від економічної ситуації та встановлених обмежень на емісію парникових газів.
- Вперше розроблено метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини та зменшення емісій CO_2 від лісокористування при збереженні заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни чи регіону, для геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування (моделі G4M), який ґрунтується на принципі максимізації чистої приведеної вартості, поєднанні інформації про заготівлю деревини на різних геопросторових рівнях (регіони, країни та окремі клітинки растру) та дає можливість проводити імітаційне моделювання процесів лісозаготівлі та впровадження природоохоронних стратегій.
- Удосконалено метод геопросторового математичного моделювання процесів знеліснення у моделі G4M, зокрема, просторового поширення знеліснення для глобальної геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування, шляхом врахування інтенсивності знеліснення на локальному рівні, а також транспортної мережі, що дає можливість точніше відтворити просторову структуру знеліснення.
- Удосконалено структуру математичної моделі вуглецевого балансу лісової екосистеми з врахуванням наявних даних про лісові екосистеми та кліматичні умови в Україні шляхом введення додаткових резервуарів та потоків вуглецю, а також процесів накопичення та танення снігу, що дало можливість враховувати таксаційні параметри деревостанів і залежності інтенсивності процесів кругообігу

вуглецю від віку деревостану, а також точніше відтворити вікову та сезонну динаміку процесів кругообігу вуглецю.

- Удосконалено метод ідентифікації параметрів геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування, що відображають процеси заліснення та знеліснення на локальному рівні, який, на відміну від відомих, враховує дані про заліснення, знеліснення та тренд зміни площі лісу (за даними ФАО та звітів країн до РКЗК ООН) на національному рівні, що дало можливість відтворити історичні емісії вуглекислого газу у країнах у секторі лісового господарства та зміни землекористування, а також прогнозувати емісії за різних сценаріїв соціально-економічного розвитку та ціни на емісії парникових газів.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблений метод моделювання вуглецевого балансу лісових екосистем, який поєднує процеси кругообігу вуглецю та таксаційні параметри деревостану, застосовано при створенні математичних моделей деревостанів, які використано для аналізу динаміки запасів вуглецю у компонентах лісової екосистеми при залісненні.

Розроблений метод геопросторового моделювання взаємопов'язаних процесів лісокористування та зміни типів землекористування з врахуванням торгівлі між країнами на глобальному рівні, метод моделювання просторового поширення знеліснення, метод ідентифікації параметрів моделі, метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини та скорочення емісій вуглекислого газу, та алгоритм моделювання процесу емісії CO₂ з біомаси, підстилки, ґрунту та боліт при зміні землекористування використано для вдосконалення глобальної геопросторової математичної моделі процесів лісокористування та зміни землекористування G4M. Модель G4M застосовується для аналізу стратегій зменшення емісій вуглекислого газу як на глобальному, так і на регіональному і національному рівнях. Зокрема, модель G4M використано для оцінювання ефективності політики зменшення емісій CO₂ лісами України при різних соціально-економічних сценаріях; при чисельному оцінюванні сценаріїв спільних соціально-економічних шляхів (SSP) разом із сценаріями репрезентативних концентрацій парникових газів (RCP); для аналізу потенціалу та коштів використання земельних та лісових ресурсів країнами Європейського Союзу; створення референтного сценарію емісій парникових газів у секторі землекористування, змін землекористування та лісового господарства до 2050 р. для країн Європейського Союзу; при підготовці Європейською Комісією оцінки впливу сталого використання біоенергії у країнах ЄС; для підтримки прийняття рішень Європейської Комісії щодо зменшення емісій парникових газів у секторі землекористування, зміни землекористування та лісового господарства; підготовки референтних рівнів емісії вуглекислого газу від лісокористування для країн ЄС; підготовки сценаріїв посиленних заходів зменшення емісій для країн, які емітують більшу частину парникових газів; при підготовленні інтегральної оцінки послаблення та адаптації до зміни клімату у країнах, що розвиваються, для секторів сільського та лісового господарства для Світового банку; підготовленні Огляду Еліаша (Eliasch Review), який був науковою основою для прийняття рішення у межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату про заходи для зменшення емісій парникових газів від знеліснення та деградації лісів (REDD); для аналізу синергії заходів щодо зменшення емісій CO₂ від знеліснення та зменшення ризику зникнення видів тварин у країнах, що розвиваються; аналізу

переваг вдосконалення системи моніторингу емісій вуглекислого газу від знеліснення; аналізу впливу невизначеностей на прийняття рішень щодо зменшення емісій вуглекислого газу від лісокористування.

Розроблений метод обчислення критичної відносної похибки оцінки емісії парникових газів доцільно використовувати при розробці міжнародних договорів щодо зменшення емісій парникових газів. Крім того, зазначений метод використано для розроблення більш складних діагностичних методів та для оцінювання вигоди вдосконалення системи моніторингу емісій вуглекислого газу від знеліснення.

Розроблений метод обчислення емісій вуглекислого газу з екосистем суходолу (на великих територіях, де недостатньо вимірювань) та оцінки похибок при неповних даних доцільно застосовувати для оцінки запасів та потоків вуглецю на національному та регіональному рівнях. Зокрема, цей метод використано для оцінки похибок вуглецевого балансу наземних екосистем північної Азії.

Реалізація результатів та впровадження. На основі розроблених математичних моделей вуглецевого балансу лісових екосистем, а також геопросторової математичної моделі процесів лісокористування та зміни землекористування створено засоби комп'ютерного моделювання. Результати дисертаційних досліджень використано:

в Міжнародному інституті прикладного системного аналізу, м.Лаксенбург, Австрія: метод обчислення потоків CO₂ екосистем суходолів та оцінки похибок при неповних даних (при виконанні проекту «Оцінка фактору невизначеності у повному обліку вуглецю методом “знизу-вгору” для Росії», Австрійський науковий фонд – FWF, Проект № P17569-N04, 2005-2007); розроблену геопросторову математичну модель процесів лісокористування та зміни землекористування G4M, розроблені методи зв'язку моделі G4M з іншими моделями, розроблені криві граничних витрат на зменшення емісій CO₂, аналіз невизначеності вхідних даних та результатів моделювання, а також метод аналізу переваг вдосконалення системи моніторингу емісій CO₂ (при виконанні проектів «Застосування моделей для глобальних політик та дій ЄС-27 в умовах режиму після 2012р.», Post 2012 Project, Європейська комісія, 2008-2009; «Зміна клімату - Адаптація суходолу та пом'якшення наслідків в Європі», СС TAME, ЄС FP7, Грантова угода № 212535, 2008-2011; «Загальна вартість зміни клімату: Зміна Клімату», ЄС FP7, Грантова угода № 212774, 2008-2011; «Спостереження за Землею з метою моніторингу та оцінки впливу на навколишнє середовище внаслідок використання енергії: EnergGEO», ЄС FP7, Грантова угода № 226364, 2009-2013; «Управління парниковими газами в європейських системах землекористування-ПГ-Європа», ЄС FP7, Грантова угода № 244122, 2010-2014; «Аналіз потенціалу та витрат у землекористуванні, змінах в землекористуванні та лісовому господарстві в країнах-членах ЄС», ЄК, Генеральна дирекція з питань екології та Генеральна дирекція з питань зміни клімату, Угода № 07.0307/2009/541003/SER/C5, 2011; «EUCLIMIT - Розробка та застосування можливостей моделювання пом'якшення зміни клімату економічними засобами у ЄС (Всі емісії та поглинання парникових газів)», Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013; «Пом'якшення наслідків зміни клімату: Постійні можливості моделей підтримувати цілі міжнародної політики», Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013; «Скорочення емісій внаслідок знеліснення та деградації лісу: Постійні можливості моделей підтримувати підготовку міжнародної політики ЄС», Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013; «Розробка та застосування

можливостей моделювання пом'якшення зміни клімату економічними засобами у глобальному масштабі для підготовки міжнародної політики ЄС», Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2012-2014; «Діюча глобальна система спостереження за вуглецем», GEOCarbon, ЄС FP7, Грант. угода № 283080, 2011-2014);

в Національному університеті „Львівська політехніка”: геопросторова математична модель процесів лісокористування та зміни землекористування G4M (при виконанні держбюджетної НДР “Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень”, 2013-2014); методи обчислення емісій парникових газів у лісовому господарстві та їх невизначеностей, методи просторової інвентаризації парникових газів, методи детектування зміни емісій парникових газів на рівні країни з врахуванням невизначеності (проект “Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів”, 2011-2014, грант 7РП ЄС – Marie Curie Project n°247645; держбюджетна НДР “Геоінформаційні технології побудови регіональних кадастрів емісії парникових газів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень”, 2011-2012; українсько-австрійський проект „Просторово-часове оцінювання невизначеності кадастрів емісії парникових газів: ретроспективний аналіз для Австрії та України та ефективне прогнозування”, 2015-2016; українсько-китайський проект "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень", 2013-2014; українсько-австрійський проект "Регіональний просторовий кадастр емісій парникових газів з врахуванням невизначеностей вхідних даних", 2011-2012; українсько-австрійський проект "Методи просторової інвентаризації емісій парникових газів Кіотського протоколу з врахуванням їх невизначеностей", 2009-2010);

в Державному НДІ інформаційної інфраструктури НАН України: програмні засоби моделювання процесів стоку вуглецю в лісах України та математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем (при виконанні проекту Науково-технологічного центру України № 1700 “Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України”, 2002-2004);

в Природному заповіднику «Розточчя»: методи та програмні засоби математичного моделювання фенологічних змін у букових та дубових лісах, а також удосконалені математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем для аналізу основних потоків вуглецю в лісових екосистемах з врахуванням сезонних змін та оцінювання впливу кліматичних змін; зокрема при обґрунтуванні внесення ділянки квазі-пралісових букових лісів Розточчя до об'єкту природної спадщини ЮНЕСКО «Букові праліси і давні букові ліси Карпат та інших регіонів Європи»;

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі в Національному університеті “Львівська політехніка” в лекційних курсах „Просторове моделювання екологічних процесів” та „Математичні моделі екологічних процесів” освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр" (спеціальність 113 – „Прикладна математика”, спеціалізація 0102 – „Математичне та комп'ютерне моделювання”). Акти про використання результатів дисертаційних досліджень наведено в додатку.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: у роботах [2, 3, 20, 21, 38, 50] – розроблення геопросторової математичної

моделі лісокористування та зміни землекористування G4M (версія для ЄС); [56, 57, 62] – метод геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні; [70, 71] – розроблення схем обміну даними між моделями; [2, 3, 7, 17, 20, 25, 26, 43, 45, 50, 52, 61, 72, 74, 83, 92] – розроблення схем обміну даними між моделями, розроблення та проведення обчислювальних експериментів із геопросторовою математичною моделлю лісокористування та зміни землекористування G4M, аналіз та інтерпретація результатів моделювання; [21, 24, 37, 47, 48, 49, 51, 54, 55, 67, 68, 70, 73] – проведення обчислювальних експериментів та аналіз результатів моделювання; [45, 51, 52, 54, 61, 67] – створення та аналіз кривих граничних витрат на зменшення емісій CO₂ від лісокористування та змін землекористування; [66] – метод аналізу переваг вдосконалення системи моніторингу емісій CO₂ шляхом зменшення невизначеності, аналіз вхідних даних; [65, 89] – аналіз похибок геопросторової математичної моделі лісокористування та зміни землекористування G4M; [28, 29] – проведення обчислювального експерименту, аналіз та інтерпретація результатів; [19] – аналіз результатів моделювання; [69, 88] – аналіз та інтерпретація параметрів геопросторової математичної моделі лісокористування та зміни землекористування G4M; [18] – аналіз зобов'язань країн щодо зменшення емісій вуглекислого газу від лісокористування та зміни землекористування; [4] – загальна ідея методу моделювання лісокористування з врахуванням вікової структури деревостану за допомогою рекурсивної математичної моделі з оптимізацією методом лінійного програмування; [5, 93] – загальний метод моделювання прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини; [6, 32, 93, 100, 102] – аналіз вхідних даних та параметрів геопросторової математичної моделі лісокористування та зміни землекористування G4M щодо адаптації моделі для України; [22, 27, 75, 76, 77] – аналіз потоків вуглекислого газу екосистем суходолу та їх невизначеностей; [27; 76; 77] – метод обчислення потоків вуглецю екосистем суходолу та їх невизначеностей (для великих територій з недостатньою кількістю вимірювань); [44, 58, 59, 60, 78] – методи детектування зміни емісій парникових газів на рівні країн; [1, 13, 14, 46] – математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем, обчислювальні експерименти та аналіз результатів; [10, 11, 12, 16, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 63, 64, 79, 80, 82, 95] – загальний підхід до просторової інвентаризації парникових газів, методи обчислення емісій вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін землекористування; [11, 14, 23, 36, 80] – аналіз невизначеностей інвентаризацій парникових газів; [9, 14, 15, 33, 46, 94] – методи моделювання потоків вуглецю у лісових екосистемах; [31] – аналіз вертикального розподілу концентрації вуглекислого газу в атмосфері; [97] – аналіз лісових екосистем України та визначення параметрів для моделювання вуглецевого балансу; [96, 98] – огляд математичних моделей, які використовують для підтримки прийняття рішень щодо зменшення емісій CO₂ у секторі землекористування та зміни землекористування. Результати спільних наукових праць було використано у дисертаційних роботах таких співавторів, як Токар О.Є. (при розробленні інформаційних технологій дослідження стоку вуглецю в лісових екосистемах) та Турковської О.В. (при розробці методів та засобів аналізу процесів землекористування для дослідження емісій CO₂).

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення дисертації представлені та обговорені на 43 міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах, зокрема: European Geosciences Union General Assembly Conference (Vienna, Austria, 2008, 2012, 2017); XIV World

Forestry Congress (Durban, *South Africa*, 2015); 9th Intern. Carbon Dioxide Conf. (ICDC-2013) (Beijing, *China*, 2013); 1st Intern. Conf. on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011) (Noordwijkerhout, *Netherlands*, 2011); IASA 40th Anniversary Conf. “Worlds Within Reach: From Science To Policy“ (Vienna and Laxenburg, *Austria*, 2012); A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015” (Laxenburg, *Austria*, 2015); Intern. Conf. of the International Boreal Forest Research Association (IBFRA) “Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action” (Krasnoyarsk, *Russia*, 2011); Intern. Congress on Environmental Modelling and Software “Managing Resources of a Limited Planet”, Sixth Biennial Meeting (Leipzig, *Germany*, 2012); Intern. Energy Workshop - IEW 2012 (Cape Town, *South Africa*, 2012); 2nd Intern. Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories (Laxenburg, *Austria*, 2007); Intern. Conf. on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006) (Yamaguchi, *Japan*, 2006); Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems “ENVIROMIS’2006” (Tomsk, *Russia*, 2006); 4th Intern. Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions (Cracow, *Poland*, 2015); 8th Intern. Carbon Dioxide Conf. (ICDC-2009) (Jena, *Germany*, 2009); 17th Intern. Conf. of the International Boreal Forest Research Association (IBFRA) “Our Boreal Our Future” (Rovaniemi, *Finland*, 2015); ITEE 2007 - Third Intern. ICSC Symposium (Oldenburg, *Germany*, 2007); Intern. Conf. “Climate Changes and their Impact on Boreal and Temperate Forests” (Ekaterinburg, *Russia*, 2006); Second Intern. ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering (Magdeburg, *Germany*, 2005); Intern. Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories: Verification, Compliance and Trading (Warsaw, *Poland*, 2004); The Information Society and Enlargement of the European Union: 17th Intern. Conf. “Informatics for Environmental Protection” (Cottbus, *Germany*, 2003); 6th Intern. Academic Conf. of Young Scientists “Computer Science and Engineering 2013“ (*Lviv*, 2013); 3rd Intern. Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories (*Lviv*, 2010); Second Intern. Congress “Informatization of Recreation and Tourist Activity: Perspectives of Cultural and Economic Development” (*Truskavets*, 2003); Дванадцятій міжнар. наук.-практ. конф. „Математичне та імітаційне моделювання систем - МОДС 2017” (*Чернігів*, 2017); IV наук.-техн. конф. „Обчислювальні методи і системи перетворення інформації“ (*Львів*, 2016); IV та V Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп’ютерної техніки» (*Чернівці*, 2015, 2016); Міжнар. наук.-практ. конф. “Україна в процесах глобального інформаційного обміну” (*Львів*, 2016); П’ятій міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія" (*Івано-Франківськ*, 2015); IV міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія“ (*Вінниця*, 2014); 2-му міжнар. конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (*Львів*, 2012); Міжнар. наук.-практ. конф. “Сталий розвиток лісового господарства в контексті реалізації Кіотського протоколу в країнах Центральної та Східної Європи” (*Київ*, 2008); Міжнар. конф. „Комп’ютерні науки та інформаційні технології” CSIT’2007 (*Львів*, 2007); 12 міжнар. конф. з автоматичного управління (*Харків*, 2005); Всеукр. наук.-практ. конф. “Україна в процесах глобального інформаційного обміну” (*Львів*, 2013); Всеукр. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (*Львів*, 2010, 2011, 2012); Наукових конф. ІМФН НУ «Львівська політехніка» (*Львів*, 2012, 2017); Міжвузівській наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (*Львів*, 2008).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 102 наукові праці, серед них 3 монографії, 19 статей у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 15 статей у виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), 13 статей у наукових фахових виданнях України (1 стаття у виданні, яке входить до міжнародної наукометричної бази Scopus), 7 розділів у книгах та збірках наукових праць, виданих за кордоном (з них 2 включено в наукометричну базу Scopus), 4 статті в інших виданнях (з них 2 включено в наукометричну базу Scopus), 14 публікацій в інформаційних виданнях інших держав, 42 публікації у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій (з них 4 індексовано у наукометричній базі Scopus). Загалом, 24 публікації, які відображають основні результати дисертації, включено в наукометричну базу Scopus (загальний індекс цитування $h=9$).

Структура та обсяг роботи. Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 438 сторінок, із них 322 сторінки основного тексту, 171 рисунок, 55 таблиць, список використаних джерел із 395 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і визначено основні завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, подано наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, наведено відомості про впровадження результатів роботи, вказано особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи та публікації за темою роботи.

У першому розділі наведено огляд літературних джерел за темою дисертації – проаналізовано глобальний баланс вуглекислого газу, основні процеси кругообігу вуглецю у лісових екосистемах та основні математичні моделі, які використовують для моделювання відповідних процесів, пов'язаних із балансом вуглекислого газу. Показано, що наземні екосистеми є важливим компонентом глобального вуглецевого балансу. Біля 10% антропогенних емісій вуглекислого газу є результатом зміни землекористування (в основному знеліснення), а поглинають наземні екосистеми біля 30% емісій. Потенціал зменшення емісій вуглекислого газу від зміни землекористування та лісокористування складає 0.2-13.8 ГтCO₂/рік у 2050р. Оскільки скорочення емісій від зміни землекористування та лісокористування (ЗЗЛГ) не потребує розроблення нових технологій і великих коштів, ця сфера діяльності є важливою для стабілізації концентрації вуглекислого газу в атмосфері. Проаналізовано основні потоки та резервуари вуглецю у лісовій екосистемі, а також процеси зміни землекористування та лісокористування. Показано динаміку вуглецевого балансу лісової екосистеми при залісненні, знелісненні та лісокористуванні. Проаналізовано існуючі математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем, математичні моделі процесів лісокористування та зміни землекористування. Показано, що існуючі моделі не враховують у повній мірі важливі залежності, взаємозв'язки між процесами зміни землекористування та лісокористування, а також наявні дані.

Другий розділ присвячено розробленню математичних моделей та методів аналізу вуглецевого балансу лісових екосистем. Зокрема, розроблено метод моделювання вуглецевого балансу лісової екосистеми, який поєднує процеси кругообігу вуглецю та таксаційні параметри деревостану. Вдосконалено структуру математичної моделі вуглецевого балансу лісової екосистеми, зокрема враховано зміну запасів вуглецю у

компонентах лісових екосистем із віком деревостану, введено додаткові резервуари та потоки вуглецю. Розроблено математичну модель фенологічних процесів у букових та дубових лісах, які базуються на даних спостережень. Розроблено математичні моделі вуглецевого балансу букового, дубового та ялинового лісу, які параметризовано для Полісся, Лісостепу, Степу та Українських Карпат. Сформовано сценарії зміни клімату (мінімальних змін, середніх змін, максимальних змін та нестационарний) для регіонів України. Досліджено динаміку вуглецевого балансу лісових екосистем у регіонах України за теперішнього клімату та за різних сценаріїв зміни клімату, а також при залісненні та знелісненні. Проаналізовано вплив невизначеностей параметрів моделі на результат моделювання.

Розглянуто наступні резервуари вуглецю: фітомаса (листя/хвою виділено за допомогою регресійного рівняння), підстилка (п'ять резервуарів: листя, стовбури дерев, гілки, великі корені, дрібні корені), органічна речовина ґрунту, а також такі потоки вуглецю: атмосфера – фітомаса, фітомаса – підстилка (опад, який сортується у п'ять типів за допомогою регресійних рівнянь), підстилка – атмосфера, підстилка – ґрунт, ґрунт – атмосфера, ґрунт – водна система та фітомаса – межі екосистеми (фітомаса, яку вирубують). Потік атмосфера – фітомаса (позначаємо v_{ap}) відповідає процесу фотосинтезу. Потоки фітомаса – підстилка відповідають процесам відмирання листя (v_{plf}), стовбурів дерев (v_{pls}), гілок (v_{plb}), великих коренів (v_{plcr}) і дрібних коренів (v_{plfr}). Потік підстилка – атмосфера відповідає процесам мінералізації відповідних компонентів підстилки (листя - v_{lfa} , стовбурів - v_{lsa} , гілок v_{lba} , товстих коренів v_{lcr} і тонких коренів - v_{lfr}). Потік підстилка – ґрунт відповідає процесам гуміфікації відповідних компонентів підстилки (листя - v_{lfs} , стовбурів - v_{lss} , гілок v_{lbs} , товстих коренів v_{lcrs} і тонких коренів - v_{lfrs}). Потік ґрунт – атмосфера (v_{sa}) відповідає процесу мінералізації гумусу. Потік ґрунт – водна система (v_{aq}) відповідає процесу змивання і вимивання органічної речовини ґрунту водою. Потік фітомаса – межі екосистеми (v_{ph}) відповідає процесу заготівлі деревини. Крім того, позначимо літерою X з нижніми індексами резервуари вуглецю (ph – фітомаса, lf – підстилка з листя, ls – підстилка зі стовбурів дерев і гілок діаметром більшим ніж 10 см, lb – підстилка з гілок діаметром меншим ніж 10 см, lcr – підстилка з товстих коренів, lfr – підстилка з тонких коренів). Враховуючи введені позначення математичну модель вуглецевого балансу запишемо у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\frac{dX_{ph}}{dt} = v_{ap} - (v_{plf} + v_{pls} + v_{plb} + v_{plcr} + v_{plfr} + v_{ph}),$$

$$\frac{dX_{lf}}{dt} = v_{plf} + v_{hlf} - (v_{lfa} + v_{lfs}),$$

$$\frac{dX_{ls}}{dt} = v_{pls} + v_{hls} - (v_{lsa} + v_{lss}),$$

$$\frac{dX_{lb}}{dt} = v_{plb} + v_{hlb} - (v_{lba} + v_{lbs}),$$

$$\frac{dX_{lcr}}{dt} = v_{plcr} + v_{hlcr} - (v_{lcr} + v_{lcrs}),$$

$$\frac{dX_{lfr}}{dt} = v_{plfr} + v_{hlfr} - (v_{lfr} + v_{lfrs}),$$

$$\frac{dX_s}{dt} = v_{lfs} + v_{lss} + v_{lbs} + v_{lcrs} + v_{lfrs} - (v_{sa} + v_{saq}).$$

Потоки вуглецю задаються складними нелінійними функціями, аргументами яких є кількість вуглецю у відповідному резервуарі вуглецю, фактори навколишнього середовища (доступна вода, температура повітря, концентрація атмосферного CO₂) та час. Наприклад, інтенсивність фотосинтезу (потік v_{ap}) представлено складеною функцією (за принципом лімітуючих факторів Лібіха): $v_{ap} = \alpha_{ap} F_l \min\{F_T, F_c, F_w\}$, де α_{ap} – калібрувальний коефіцієнт, F_l – функція кількості листя, яка, в свою чергу, залежить від середнього віку насадження (A), F_T – залежність інтенсивності фотосинтезу від середньомісячної температури повітря (T), F_c – залежність інтенсивності фотосинтезу від середньомісячної концентрації вуглекислого газу в атмосфері (C) і F_w – залежність інтенсивності фотосинтезу від середньомісячної кількості доступної води (w) в екосистемі. Всі вказані залежності, які описують інтенсивність фотосинтезу, відмирання та розкладу, є функціями часу. Масу листя (позначено літерою F) визначаємо за допомогою регресійного виразу (див. далі вираз (1)), а час появи листя у букових та дубових лісах задається температурою повітря (T_{lg}):

$$F_l = \frac{1}{1 + \exp(0.9(-T + T_{lg}))} \frac{R_f \cdot X_{ph}}{R_{tot}}$$

Потік фітомаса-опад з листя (v_{plf}). Час опадання листя у букових лісах задається температурою повітря, яка зменшується (T_{lfb} – температура масового опадання, T_{lfe} – температура, при якій закінчується опадання листя), а інтенсивність – кількістю листя, яке не опало:

$$v_{plf} = \begin{cases} 15 \left(\frac{1}{1 + \exp(1.2(T - T_{lfe}))} - \frac{1}{1 + \exp(1.2(T - T_{lfb}))} \right) \frac{R_f X_{ph}}{R_{tot}}, & \text{якщо } \frac{dT}{dt} < 0, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Середньомісячні температури повітря, при яких відбувались основні фенологічні зміни (T_{lg} , T_{lfb} , T_{lfe}) в екосистемах букових та дубових лісів, визначено за даними спостережень в заповіднику “Розточчя”.

Потоки вуглецю з фітомаси, включаючи хвою, у відповідні резервуари підстилки визначаємо за допомогою виразу:

$$v_{pli} = \alpha_{pli} \left(dM \cdot R_i \frac{X_{ph}}{GS \cdot R_{tot}} + \frac{X_{ph} R_i}{Turn_i} \right), \quad i = \{s, b, cr, fr\},$$

де α_i – калібрувальний коефіцієнт, dM – природний відпад деревостанів, а GS – запас стовбурної деревини (dM та GS є функціями віку деревостану та умов навколишнього середовища), визначені у роботі проф. А.З.Швіденка. Величина $Turn$ означає тривалість життя частин дерев.

Фітомасу розділяємо на складові (листя – позначено літерою f , стовбури і гілки діаметром більшим ніж 10 см – s , гілки діаметром меншим ніж 10 см – b , товсті корені – cr , тонкі корені – fr ; а також введено такі позначення: надземна частина деревостану – ab , підземна частина – bl , крона – kr , сума надземної і підземної частин – tot) за допомогою регресійних виразів та співвідношень між ними

$$R_i = a_0^i A^{a_1^i}, \quad (1)$$

де a_0 та a_1 – регресійні коефіцієнти (проф. П.І.Лакида, 1996). Таким чином побудовано математичні моделі потоків вуглецю між заданими резервуарами.

Розроблено математичні моделі вуглецевого балансу букового, дубового та ялинового лісу. Параметри моделей підібрано для кліматичних умов Полісся,

Лісостепу, Степу та Українських Карпат. Сформовано сценарії зміни клімату (мінімальних змін, середніх змін, максимальних змін та нестационарний) для регіонів України. Досліджено динаміку вуглецевого балансу лісових екосистем у регіонах України за теперішнього клімату та за різних сценаріїв зміни клімату (рис.1). Показано, що у Карпатському регіоні України сумарний вуглецевий баланс екосистем ялинових лісів є більш чутливий до зміни клімату у порівнянні з буковими та дубовими лісами; екосистеми дубових лісів є найбільш вразливими у лісостепу при всіх сценаріях зміни клімату.

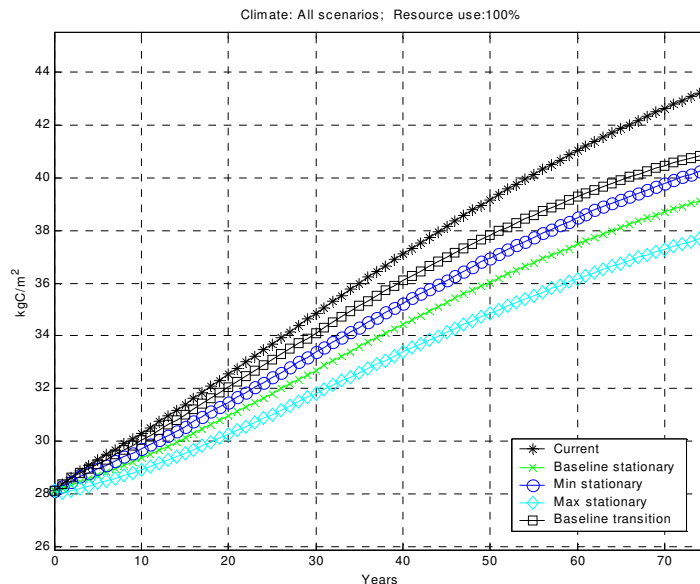


Рис. 1. Зміна запасу вуглецю в екосистемі ялинового лісу при різних сценаріях зміни клімату

Проаналізовано динаміку вуглецевого балансу лісових екосистем при залісненні та знелісненні, а також вплив невизначеностей параметрів моделі, включаючи параметри, які характеризують навколишнє середовище (температура повітря, кількість опадів і концентрація CO_2 в атмосфері) на результат моделювання. Показано, що реалізація проекту заліснення характеризується високою невизначеністю майбутніх результатів проекту – кількості накопиченого вуглецю в екосистемі. Накопичення вуглецю підстилки характеризується найбільшою невизначеністю, оскільки відносне стандартне відхилення зростає від 20% на початку експерименту до 83% в кінці. Підстилка, однак, становить невелику частину в загальному запасі вуглецю в екосистемі і, таким чином, не має істотного впливу на загальну невизначеність. Відносне стандартне відхилення кількості вуглецю фітомаси змінюється з 20% на початку експерименту до 37% в кінці; відносне стандартне відхилення вуглецю ґрунту є найменшим і навіть зменшується від початкового 20 до 15%. Відносне стандартне відхилення кількості загального вуглецю, накопиченого в екосистемі, зростає від початкових 9% до 21% протягом 20 років. Невизначеність температури повітря, кількості опадів і концентрації атмосферного CO_2 істотно впливають на загальну невизначеність накопиченої кількості вуглецю. За 10 років моделювання відносне стандартне відхилення фітомаси зростає у два рази, невизначеність кількості вуглецю ґрунту і загальне збільшення вуглецю зростає майже в 1.4 рази, а невизначеність кількості вуглецю підстилки залишається майже на тому ж рівні. Кількість аномальних значень також збільшується. Таким чином, мінливість клімату і зростання CO_2 в атмосфері необхідно враховувати при прогнозуванні ефективності проекту заліснення.

Третій розділ присвячено математичному моделюванню процесів ЗЗЛГ та розробленню геопросторової математичної моделі G4M. Зокрема, розроблено метод геопросторового моделювання процесів ЗЗЛГ на глобальному рівні, який враховує взаємний вплив цих процесів, а також процесів торгівлі та переміщення заготовленої деревини. Розроблено метод моделювання процесу просторового поширення знеліснення для моделі G4M та метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни чи регіону. Обґрунтовано метод моделювання процесу прийняття рішень щодо зменшення емісій CO₂ від лісокористування при збереженні заготівлі заданої кількості деревини. Розроблено метод ідентифікації параметрів моделі G4M, які відповідають за моделювання процесів зміни землекористування, за даними ФАО та РКЗК ООН на національному рівні. Запропоновано алгоритм моделювання процесу емісії CO₂ з біомаси, підстилки, ґрунту та боліт при зміні землекористування. Розроблено версію моделі G4M для території ЄС, у якій додатково використано геопросторові дані про переважаючі деревні породи, геопросторові дані про заготівлю деревини у 2000-2010рр., а також дані про вікову структуру лісу, зміну землекористування та емісії CO₂ з біомаси лісів. Запропоновано параметри та дані, які необхідні для адаптації геопросторової моделі процесів ЗЗЛГ для України.

Геопросторова математична модель процесів ЗЗЛГ (у публікаціях відома як Global Forest Model - G4M) тематично складається з чотирьох частин: екологічна (природні умови і параметри лісу), економічна (оцінка локальних – в межах клітинки растру – цін на деревину і сільськогосподарську (сг) землю, чистих приведених вартостей (ЧПВ) сільського та лісового господарств, обсягу заготівлі деревини і витрати на посадку дерев на місці зрубаних), прийняття рішень (рішення про параметри заготівлі деревини та зміни землекористування) і обчислення емісій CO₂, спричинених зміною землекористування та заготівлею деревини. Блок-схему моделі показано на рис. 2. У цій моделі процеси прийняття рішень щодо зміни землекористування та параметрів лісокористування розглядаються з точки зору власників ділянок землі, у межах клітин растру розміром 0.5x0.5 градуса шляхом порівняння ЧПВ лісового та сільського господарства в цих клітинках. У кожній клітинці растру розглядають лісові землі (покриті лісом, який існував до 2000р. – «старий ліс», та лісом, посадженим після 2000р. – «новий ліс»), сільськогосподарські землі та землі під забудовою та інфраструктурою. Чотири основні змінні моделі визначають стан кожної *i*-ї клітинки растру у поточному році (*year*): *F_s* – відносна площа «старого» лісу, *F_{sn}* – відносна площа «нового» лісу, *abB_m* – надземна біомаса на одиниці площі (гектарі) старого лісу, *abB_{mAff}* – надземна біомаса на одиниці площі нового лісу, *B_m* – повна біомаса на одиниці площі старого лісу. Динаміку відносних площ старого і нового лісу представляємо системою таких рівнянь і нерівностей:

$$F_{s_i, year} = F_{s_i, year-1} - fd \left(\begin{array}{l} F_{s_i, year-1}, dF_{s_i, year-1}, F_{s_j, year-1}, AgS_i, Pd_{i, year}, \\ GDP_{i, year}, RD_i, MAI_i, r_c, AGB_{reg}, pwGB_{reg}, pc_c, leak_c \end{array} \right),$$

$$F_{sn_i, year} = F_{sn_i, year-1} + fa(AgS_i, Pd_{i, year}, GDP_{i, year}, MAI_i, r_c, AGB_{reg}, pwGB_{reg}, pc_c, leak_c),$$

$$dF_{s_i, year-1} = fd_{year-1},$$

$$F_{s_i, year} + F_{sn_i, year} + \tau \leq 1,$$

$$F_{s_i, year} \geq 0, \quad F_{sn_i, year} \geq 0,$$

$$0 \leq fd \leq 0.05, \quad 0 \leq fa \leq 0.02,$$

де $\tau \geq 0$ – параметр із заданим значенням, який відображає частку землі, зарезервовану для будівель, доріг та/або с/г земель, $j=1..4$, $j \neq i$ – чотири клітинки растру, які прилягають до клітинки растру i , AgS_i , $Pd_{i,year}$, $GDP_{i,year}$, RD_i , MAI_i , r_c , AGB_{reg} , $pwGB_{reg}$, pc_c , $leak_c$ – вхідні дані, описані нижче, $fd(\cdot)$ та $fa(\cdot)$ – нелінійні функції, які визначають швидкість знеліснення та заліснення, відповідно, $dFs_{i,year-1}$ – швидкість знеліснення у попередньому році (значення функції $fd(\cdot)$ на попередньому кроці моделювання), c – індекс країни, reg – індекс регіону (група країн).

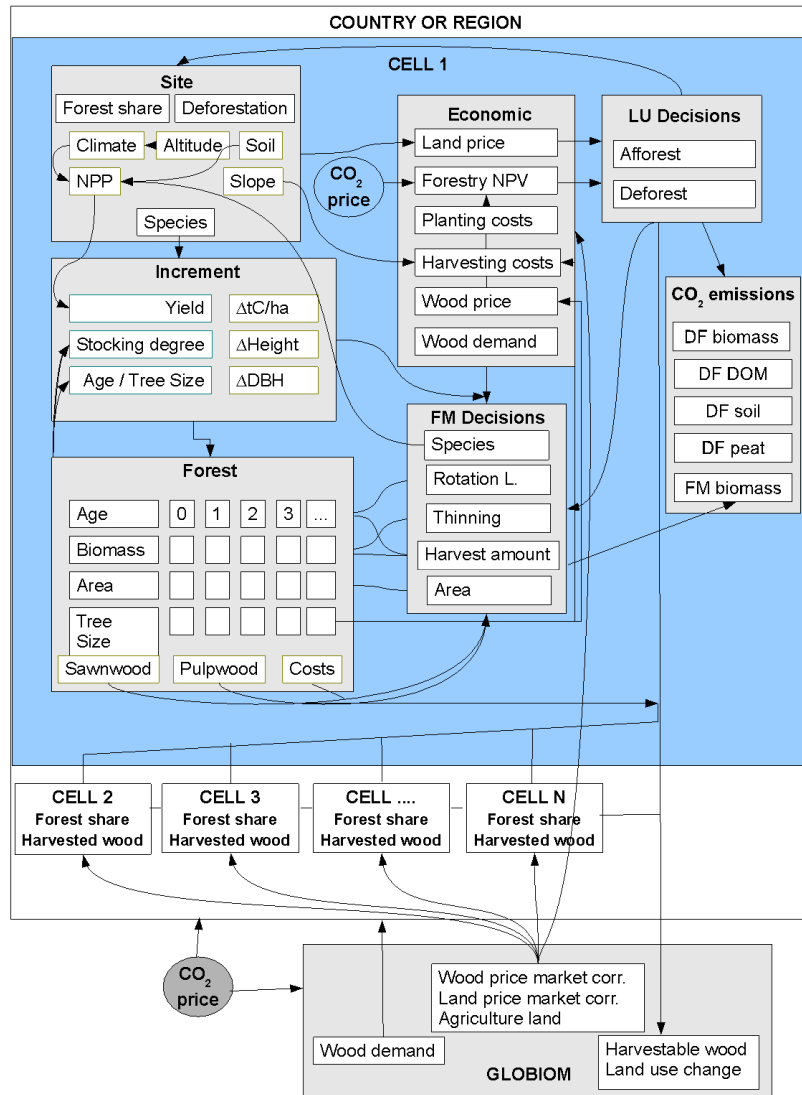


Рис. 2. Структура моделі G4M

Динаміку біомаси старого і нового лісу на одиниці площі записуємо системою таких рівнянь і нерівностей:

$$abBm_{i,year} = abBm_{i,year-1} + fbm(RL_{i,year}, MAI_i, \overline{MAI}_{reg}, wd_{reg,year}),$$

$$abBmAff_{i,year} = \sum_{\substack{k=1 \\ Fsn_i > 0}}^{CA} abBmAff_{i,k},$$

$$abBmAff_{i,k} = abBmAff_{i,k-1} + fbmn(k, RL_{i,year}, MAI_i, \overline{MAI}_{reg}, wd_{reg,year}),$$

$$abBm_{i,year} \geq 0, \quad abBmAff_{i,k} \geq 0,$$

$$RLmai_i \leq RL_{i,year} \leq RLmaxbm_i,$$

$$RLmai_i > 0, \quad RLmaxbm_i > 0,$$

де $MAI_i, \overline{MAI}_{reg}, wd_{reg,year}$ – вхідні дані; $fbm(\cdot)$ та $fbmn(\cdot)$ – нелінійні функції, які визначають зміну біомаси у старому та новому лісі, відповідно; RL – оборот рубки, який визначається згідно алгоритму, описаному нижче.

Вхідні дані моделі: AgS_i – придатність землі для ведення сільського господарства у клітинці, $Pd_{i,year}$ – щільність населення у клітинці, $GDP_{i,year}$ – валовий внутрішній продукт (ВВП) у клітинці, RD_i – щільність транспортних шляхів (автомобільні дороги, залізниця, водні шляхи), r_c – коефіцієнт дисконтування з врахуванням ризиків у країні, AGB_{reg} – регіональна корекція ціни сільськогосподарської землі, $pwGB_{reg}$ – регіональна корекція ціни деревини на корені, pc_c – ціна емісій CO_2 в країні, $leak_c$ – міра неефективності державних інститутів (коефіцієнт корупції), MAI_i – середній приріст лісу у клітинці, \overline{MAI}_{reg} – середній приріст лісу у регіоні, $wd_{reg,year}$ – попит на деревину у регіоні, $RLmai_i$ – оборот рубки (кількість років між посадкою лісу і рубкою головного користування), при якому середній річний приріст є максимальним, $RLmaxbm_i$ – оборот рубки, при якому біомаса дерев у лісі є максимальною, k – вік деревостану, CA – кількість років, які минули від посадки лісу.

На основі аналізу наукових публікацій розроблено метод моделювання процесу просторового поширення знеліснення для моделі G4M шляхом врахування інтенсивності знеліснення у даній клітинці растру на попередньому кроці моделювання ($dFs_{i,year-1}$) та мінімальної площі лісу у сусідніх клітинках ($\min_{i,j} Fs_{i,j}, j=1..4, j \neq i$), а також транспортної мережі (щільності доріг - RD_i), що дає можливість точніше відтворити просторову структуру знеліснення. ЧПВ сільського господарства визначається функціями f_1 (Benitez та Obersteiner, 2006) та введеної автором f_2 :

$$NPVagr_i = f_1(AgS_i, SPd_i) \cdot f_2(RD_i, DS_i, dFs_{i,year-1}, \min_{i,j} Fs_{i,j}, AGB_{reg})$$

Для врахування розповсюдження вирубки лісу на сусідні клітинки, DS_i , оцінюємо частку лісу в поточній (Fs_i) та сусідніх клітинах (Fs_{ij}). Найближча відстань до місць знеліснення має більш високий вплив на с/г, а в тропічних лісах знеліснення у попередні роки, $dFs_{i,year-1}$, є одним з найбільш сильних чинників знеліснення у наступні роки (поріг втрати частки лісу 0.00014 визначено на основі аналізу гістограми втрати лісу):

$$DS_i = \begin{cases} 2 \cdot (1 - 0.5 \cdot Fs_{i,year-1}), & Fs_{i,year-1} < \min_{i,j} Fs_{i,j} \wedge potVeg \neq Tropic \\ 2 \cdot (1 - 0.5 \cdot \min_{i,j} Fs_{i,j}), & Fs_{i,year-1} \geq \min_{i,j} Fs_{i,j} \forall potVeg = Tropic' \end{cases}$$

$$Dfprev_i = \begin{cases} 2, & dFs_{i,year-1} > 0.00014 \wedge potVeg = Tropic \\ 1, & Otherwise' \end{cases}$$

Наклавши карту щільності доріг на карту втрати лісового покриву (Hansen та ін., 2010) отримуємо залежність втрати лісового покриву від RD_i . Середня втрата лісового покриву на 20% вища, якщо розглядати лише ті клітинки, де $RD_i > 0$. З аналізу виключаємо клітинки з високою щільністю доріг ($RD_i > 0.15$), оскільки така RD зустрічається у густонаселених районах, або місцях, де проводять лісозаготівлю, а також клітинки з швидкістю втрати лісового покриву більше 0.00103 частки клітинки за період, де відбувається різке зменшення кількості клітинок із втратою лісового покриву. В подальшому швидкість втрати лісового покриву не значно зростає із збільшенням щільності доріг: $RDT_i = 1.2 + 0.0044 \cdot RD_i$.

Фактор AGB_{reg} враховує зміну локальної ціни с/г землі у клітинці, спричинену торгівлею сільськогосподарськими товарами між країнами, чи регіонами:

$$AGB_{reg}(year) = \frac{AGBa_{reg}(year)}{AGBa_{reg}(2000)}$$

де $AGBa_{reg}(year)$ та $AGBa_{reg}(2000)$ – ціна сільськогосподарської землі у регіоні reg , отримана у моделі GLOBIOM, у поточному році та 2000 році, відповідно.

Розроблено метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни чи регіону для моделі G4M, який дає можливість поєднувати інформацію на різних геопросторових рівнях (регіони, країни та окремі клітинки растру). Заготівля деревини в клітинці є сумою рубок головного користування і рубок догляду. Клітинки растру упорядковано відповідно по країнах (або регіонах), а потім по спадаючій по MAI , $abBm$, Fs , Pd і AgS (якщо відсутні геопросторові дані про заготівлю деревини). Таким чином, більш продуктивні ліси, більшої площі і ближче до населених місць обробляються у першу чергу. У початковий момент часу моделювання вважаємо, що ліс у клітинках може бути використаний для заготівлі деревини, якщо клітинка ідентифікована як «змінена людьми» за картою (Kindermann та ін., 2008), а RL визначаємо з умови збереження поточної біомаси за цією ж картою. Якщо змодельована заготівля деревини є меншою, ніж спостережувана, зменшуємо RL в кожній клітинці растру на 5 років ($RL_{mai} \leq RL \leq RL_{max_{bm}}$), починаючи з найбільш продуктивного лісу, поки сума заготовленої деревини у всіх клітинках не буде рівна спостережуваному значенню $\pm 1\%$. Якщо після обробки всіх клітинок у межах країни (регіону), спостережувана кількість заготовленої деревини перевищує змодельовану більше, ніж на 1%, клітинки, в яких ліс не використовували для заготівлі деревини, переводять у стан лісозаготівлі. При цьому, спершу у стан лісозаготівлі переводять клітинки, де $Pd > 0$, тоді ті, в яких $MAI > \overline{MAI}_{reg}$, а далі ті, в яких $ЧПВ_{ліс} > ЧПВ_{сг}$. Якщо змодельована заготівля деревини є більшою, ніж спостережувана, збільшуємо RL в кожній клітинці растру на 5 років, починаючи з найменш продуктивного лісу, поки сума заготовленої деревини у всіх клітинках не буде рівна спостережуваному значенню $\pm 1\%$.

Вважаємо, що кожен власник лісу намагається отримати ЧПВ близьку до максимальної. Тому при запровадженні ціни на CO_2 , який секвеструється або емітується з біомаси лісу у порівнянні з базовим сценарієм лісокористування, власник лісу буде змінювати параметри лісокористування, щоб максимізувати ЧПВ. Якщо при нових параметрах лісокористування CO_2 буде поглинатись, тоді власник отримає додаткові кошти, а якщо ж CO_2 буде емітуватись - тоді власник лісу заплатить за втрачений вуглець. Ці додаткові кошти позначаємо B_i :

$$B_i = pc_c \cdot leak_c \cdot 3.667 \cdot [(Bm_{i,year} - Bm_{i,year-1}) - (Bmbau_{i,year} - Bmbau_{i,year-1})].$$

У випадку постійної ціни на деревину (pw) та витрат на посадку лісу (cp) ЧПВ визначаємо, використовуючи вираз (van Kooten та Folmer, 2004):

$$NPVfor_i = \frac{-cp_i + pw_i \cdot V_i + B_i}{[1+r_c]^{RLi-1}},$$

де V – об'єм заготовленої деревини. Перший параметр, який власник лісу буде змінювати – це RL . Обороти рубки, який максимізує ЧПВ для заданої ціни CO_2 та ціни деревини (RL_{maxNPV}), знаходимо методом золотого поділу. На проміжку $RL_{mai} \leq RL \leq RL_{max_{bm}}$ при збільшенні RL біомаса лісу зростає, відповідно $B_i > 0$, але разом з тим, зменшується обсяг заготовленої деревини. При високій ціні CO_2 і низькій ціні деревини власнику лісу вигідніше проводити заготівлю деревини лише у деревостанах, які з віком перестають накопичувати біомасу, тобто вибрати оборот

рубки RL_{maxBM} . При середніх цінах на CO_2 і деревину оптимальний оборот рубки буде знаходитись між RL_{MAI} та RL_{maxBM} , але буде довшим, ніж при нульовій ціні CO_2 . Такий вибір параметрів лісокористування власниками лісів значно скорочує обсяг заготовленої деревини у країні, чи регіоні, тому ціна деревини має зрости, щоб заготівля деревини задовольнила попит. Щоб скорегувати параметри лісокористування при ненульовій ціні CO_2 , необхідно зробити такі кроки:

1. Для кожної клітинки растру, де є ліс, кожен крок моделювання записати значення ЧПВ лісового господарства (NPV_{bau}) і кількості біомаси (BM_{bau}) при нульовій ціні CO_2 .
2. Для кожної клітинки растру, де є ліс, для заданої ціни деревини та ціни CO_2 знайти RL_{maxNPV} (RL , який максимізує чисту приведену вартість (NPV_{wc})).
3. Обчислити обсяг заготовленої деревини з новим оборотом рубки.
4. Застосувати стандартний алгоритм корегування параметрів лісокористування (описаний вище), додатково вимагаючи, щоб $NPV_{wc} \geq NPV_{bau}$.

Якщо заготівля деревини не задовольняє попит, збільшити ціну деревини (поступово, множник від 1 до 2500) і повторити п.4.

Розроблено метод ідентифікації параметрів моделі G4M, які відповідають за моделювання процесів зміни землекористування, за даними ФАО та звітів країн до РКЗК ООН на національному рівні. Під час калібрування спершу визначають для кожної країни пороговий коефіцієнт H_c (множник до NPV_{for}) шляхом мінімізації різниці між зміною площі лісів, яка спостерігається (опублікована) і змодельованою, з коефіцієнтами знеліснення, $deforCoeff_c$, та заліснення, $afforCoeff_c$, рівними 1. Тоді, коефіцієнти швидкості заліснення та знеліснення визначають шляхом мінімізації спостережуваних і прогнозованих змін площі лісів, вимагаючи, щоб прогнозована швидкість заліснення та знеліснення дорівнювали відповідним (мінімальним, у випадку даних з ФАО) опублікованим швидкостям:

$$\begin{cases} |TrendNetDeforc - TrendNetDeforG4M_c| \rightarrow \min_{H_c, afforCoeff_c = deforCoeff_c} \\ \begin{cases} |NetDeforc - (AfforG4M_c - DeforG4M_c)| \rightarrow \min_{H_c, afforCoeff_c, deforCoeff_c} \\ AfforG4M_c \geq minAfforc \\ DeforG4M_c \geq minDeforc \end{cases} \end{cases}$$

Ідентифікація параметрів на національному рівні дає можливість відтворити історичні емісії CO_2 країн у секторі ЗЗЛГ та прогнозувати емісії за різних сценаріїв соціально-економічного розвитку та податку на емісії парникових газів.

Розроблено версію G4M для території ЄС, у якій додатково використано геопросторові дані про переважаючі деревні породи, геопросторові дані про заготівлю деревини у 2000-2010рр., а також дані про вікову структуру лісу, зміну землекористування та емісії CO_2 з біомаси лісів, що дало можливість вдосконалити метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни та метод калібрування емісій CO_2 з біомаси лісів.

У **четвертому розділі** описано валідацію розробленої геопросторової математичної моделі G4M. Проаналізовано особливості валідації складних комп'ютерних математичних моделей, які використовують для проведення інтегральної оцінки. Проаналізовано неточності вхідних даних моделі G4M. Проведено аналіз чутливості моделі G4M до зміни окремих параметрів. Досліджено чутливості кривих граничних витрат на зменшення емісій CO_2 (МАСС) від ЗЗЛГ до зміни важливих соціально-економічних факторів. Для країн ЄС проведено порівняння результатів моделювання лісозаготівлі з статистичними даними та емісій CO_2 від лісозаготівлі з результатами, які ці країни подають до РКЗК ООН. Проведено

порівняння результатів моделювання з відповідними результатами інших моделей. Наведено приклад обговорення результатів моделі G4M із споживачами результатів.

Математичні моделі, які використовують для проведення інтегральної оцінки, включають компоненти моделювання біофізичних та економічних процесів, а також поведінки людей. Ці компоненти можуть бути представлені в одній моделі (менш детально), або бути у вигляді комплексу зв'язаних між собою більш детальних моделей. Враховуючи те, що компоненти моделей зв'язані між собою і виникають зворотні зв'язки, валідація окремих компонентів моделей не гарантує валідації всього комплексу моделей. Валідація моделі пов'язана з призначенням моделі. Застосовують концепцію «верифікації-валідації та акредитації». Складні моделі практично не валідують, а визначають, чи модель підходить для певних цілей, – «акредитація». «Акредитація» 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. При аналізі неточності вхідних даних моделі G4M виявлено, що дані характеризуються досить високою невизначеністю, особливо на рівні клітинок растру. Наприклад, значення ВВП та розміщення населення для різних сценаріїв можуть відрізнятися у 2050 році більше, ніж на 100% для окремих клітинок растру. Середня різниця між двома глобальними геопросторовими наборами даних про біомасу лісів складає 20%. Ціни на с/г товари у різних сценаріях соціально-економічного розвитку змінюються у межах від -60 до +50% до 2100 року, а заходи по зменшенню емісій парникових газів (ПГ) можуть спричинити збільшення цін на 110-570%. Корупція є загрозою для реалізації заходів по зменшенню емісій ПГ від знеліснення та деградації лісів (REDD) у країнах, що розвиваються. Невизначеність оцінок компонентів коефіцієнта корупції, який використовують у моделі, складає від кількох відсотків до більше 100% для країн, де важко отримати інформацію (наприклад, Північна Корея, Афганістан). Дані про швидкість заліснення та знеліснення, визначені за даними звіту ФАО про лісові ресурси та звітів країн до РКЗК ООН у формі таблиць CRF, для окремих країн відрізняються у декілька разів, в основному, через відмінності у визначеннях понять «ліс», «заліснення» та «знеліснення», а також тому, що різні інститути в країнах використовують різні дані для підготовки звітів для ФАО та РКЗК ООН. Тому важливо узгоджувати із усіма зацікавленими сторонами, які дані використовувати в якості вхідних параметрів моделі.

У результаті аналізу чутливості моделі G4M до зміни окремих параметрів виявлено, що результати моделювання швидкості заліснення та знеліснення без впливу податку на CO₂ найбільш чутливі до зміни ВВП, коефіцієнта перерахунку вуглецю у об'єм деревини, приросту деревини, щільності розміщення населення, ціни на деревину, придатності землі для ведення сільського господарства та вартості заліснення. Для досліджуваних країн та у всьому світі реакція емісій CO₂ на зміну ціни на с/г землю дуже висока при ціні CO₂ 3-10 \$/тCO₂. Для врахування відмінностей у даних ФАО та РКЗК ООН щодо площі лісу, а також швидкості заліснення і знеліснення проведено аналіз чутливості результатів оцінки емісій CO₂ для історичного періоду та прогнозування до 2050 року. Показано, що глобальні емісії CO₂ від заліснення та знеліснення без впливу податку на CO₂ 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 ЗЗЛГ відрізняється максимум на 20 % для заліснення. Разом з тим, для окремих країн різниця перевищує 100%.

Досліджено чутливості МАСС ЗЗЛГ до зміни важливих соціально-економічних факторів – коефіцієнта корупції, ціни на деревину та ціни на с/г землю. Коефіцієнт корупції має найбільший вплив на МАСС при всіх рівнях зміни параметра. Зі збільшенням амплітуди зміни параметра максимальний вплив на МАСС зсувається від 30 \$/тС (при змінах на 10 і 50%) до 119 \$/тС (при 90%; рис. 3). Ціна деревини має відносно рівномірний вплив на МАСС при всіх цінах CO₂, а ціна на с/г землю має два максимуми – більший при низьких цінах CO₂ і менший при високій ціні CO₂. Збільшення амплітуди зміни параметра до 90% знижує ціну CO₂, при якій зміна окремих параметрів викликає максимальне відхилення МАСС.

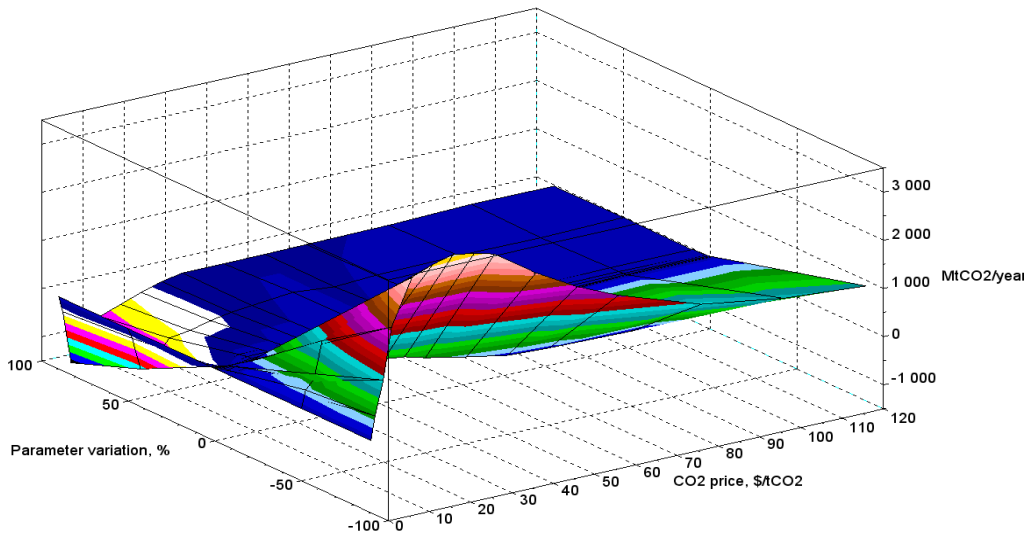


Рис. 3. Чутливість загальних емісій CO₂ від біомаси до коефіцієнта корупції у глобальному масштабі до 2030 року (більший коефіцієнт означає підвищення ефективності та меншу корупцію).

Для країн ЄС проведено порівняння результатів моделювання лісозаготівлі з статистичними даними та емісій CO₂ від лісозаготівлі з результатами, які ці країни подають до РКЗК ООН. У середньому за 1999-2015рр. середньоквадратичне відхилення змодельованих значень заготівлі деревини склало 0.5% для ЄС; для більшості країн відхилення становить біля 1%, але для кількох країн перевищує 7%. В загальному, для ЄС відхилення змодельованих значень емісій CO₂ з біомаси від лісокористування від значень РКЗК ООН становить 17%. Для 7 країн відхилення складає до 30%, для більшості країн відхилення не перевищує 60%. Проведено порівняння результатів моделювання з відповідними результатами інших моделей. Детальне порівняння для країн ЄС здійснено з результатами моделі процесів лісокористування EFISCEN, для Бразилії – з результатами спеціальної версії GLOBIOM для цієї країни та на глобальному рівні у складі комплексу інтегральної оцінки Міжнародного інституту прикладного системного аналізу з результатами моделей AIM, GCAM, IMAGE та REMIND/MAGPIE (рис. 4). У зазначених випадках результати G4M є раціональними, а різниця у результатах моделей пояснюється відмінностями у підходах до моделювання відповідних процесів і вхідних даних.

Порівнявши чутливість МАСС, розроблених з використанням G4M, до вхідних даних моделі, з МАСС, отриманими з використанням моделей GCOMAR, DIMA та GTM, можна зробити висновок, що якість вхідних даних є такою ж важливою, як застосування декількох різних моделей для побудови МАСС. МАСС є більш чутливими до невизначеності вхідних параметрів моделі при низьких цінах емісій CO₂. Результати проведеного дослідження чутливості МАСС до зміни параметрів

моделі G4M та аналізу результатів інших моделей для порівняння мають вагомe значення для розробки заходів щодо зменшення емісій по програмі REDD. Зокрема, середньострокові заходи щодо зменшення емісій, при яких, зазвичай, застосовують низькі ціни емісій CO₂, можуть бути більш вразливі до невизначеності даних про корупцію та якість управління у цільових країнах. Це може мати місце тому, що оцінки потенціалу економічного зменшення емісій є більш чутливими до фінансової ефективності при низьких цінах емісій CO₂. Невизначеність вхідних даних та припущень моделі меншою мірою впливають на МАСС при високих цінах емісій CO₂, які, зазвичай, застосовують при розробці довгострокових заходів зменшення емісій.

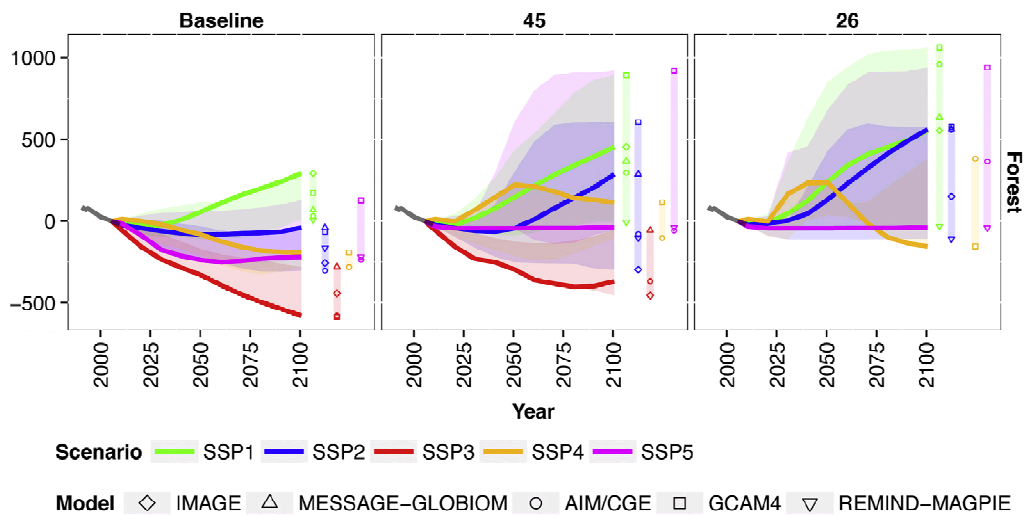


Рис. 4. Прогнозування зміни глобальної площі лісу, Мга, згідно п'яти сценаріїв SSP для базового сценарію зміни клімату (зліва), RCP4.5 (посередині) та RCP2.6 (справа) за допомогою моделей інтегральної оцінки IMAGE, MESSAGE-GLOBIOM (IAM ПАСА), AIM/CGE, GCAM4 та REMIND-MAGPIE. Кольорові лінії позначають результати маркерних моделей для кожного SSP (G4M в складі IAM ПАСА була маркерною моделлю для сценарію SSP2). Кольорові смужки вказують діапазон значень для кожного сценарію у 2100 році для всіх моделей. Сіра лінія (приблизно до 2010р.) показує історичні тенденції на основі даних ФАО.

У п'ятому розділі наведено приклади практичного застосування розробленої геопросторової моделі G4M, описано схеми обміну даними G4M з іншими моделями для формування комплексів моделей для інтегральної оцінки. Розроблено метод отримання МАСС ЗЗЛГ з використанням моделі G4M та проаналізовано вплив взаємозв'язків між цими трьома процесами, а також вплив геопросторових та часових ефектів на МАСС. З використанням розробленої моделі G4M та схем взаємодії з іншими моделями для проведення інтегральної оцінки на глобальному та регіональному рівнях проведено обчислення динаміки заліснення, знеліснення та лісокористування, а також відповідних емісій CO₂ для сценаріїв соціально-економічного розвитку і радіаційного впливу на кліматичну систему, зроблено прогноз базових емісій CO₂ від ЗЗЛГ, а також потенціалу зменшення емісій на глобальному рівні та для окремих країн, проведено аналіз синергії заходів по зменшенню емісій CO₂ від знеліснення та ризику зникнення видів тварин, проведено обчислення референтних рівнів емісій CO₂ для 14 країн-членів ЄС, які подані цими країнами до РКЗК ООН.

Розроблена математична модель G4M призначена для розв'язування широкого класу задач, пов'язаних із прогнозуванням динаміки площі лісу (через процеси заліснення та знеліснення), біомаси лісу, заготівлі деревини, емісій CO₂, спричинених

цими процесами, а також відгуку на заходи по зменшенню емісій CO₂. Властивості моделі дають можливість використовувати результати моделювання для підтримки прийняття рішень щодо референтних сценаріїв емісій CO₂ від лісокористування та змін землекористування у країнах ЄС; референтних рівнів емісій CO₂ від лісокористування у країнах ЄС; синергії заходів щодо зменшення швидкості знеліснення та збереження видів тварин у країнах, що розвиваються; визначення оптимальних місць для впровадження заходів по зменшенню втрати вуглецю лісами; зменшення емісій CO₂ від ЗЗЛГ для всіх країн та різних сценаріїв соціально-економічного розвитку; потенціалу заготівлі деревини та відходів від заготівлі деревини; використання біоенергії та ін.

Для отримання МАСС ЗЗЛГ здійснюють моделювання для набору цін емісій CO₂ від 0 до 2000 \$/тCO₂. Від кожного результату емісій CO₂ віднімають результат з нульовою ціною. Перевагою моделі G4M є те, що процеси ЗЗЛГ моделюються разом, а також те, що модель є геопросторовою, тому можна спостерігати взаємозв'язки між цими процесами та їх вплив на потенціал зменшення емісій ПГ. Зокрема, зменшення швидкості знеліснення, спричинене впровадженням ціни емісій CO₂, збільшує дефіцит землі, і тому може призвести до зменшення заліснення у порівнянні з базовим сценарієм (негативний ефект на МАСС). При зменшенні знеліснення менше деревини, заготовленої при знелісненні, потрапляє на ринок, тому об'єм деревини заготовленої в лісі зростає, що в деяких випадках може привести до зниження біомаси лісу і, відповідно, більших емісій CO₂ від лісокористування у порівнянні з базовим сценарієм. Якщо оборот рубки експлуатаційного лісу був збільшений у результаті впровадження ціни емісій CO₂, то біомаса лісу зростає, і якщо у майбутньому цю ділянку землі буде знеліснено, то втрати біомаси і, відповідно, емісії від знеліснення будуть вищими у порівнянні з базовим сценарієм. Нелінійна швидкість приросту біомаси лісів з віком лісу, а також розкладання ґрунту при знелісненні є причиною того, що емісії від зміни параметрів лісокористування, чи зміни землекористування тривають протягом деякого часу, повільно зменшуючись, а час зміни (наприклад, спричинений введенням певної ціни емісій CO₂) визначає емісії в майбутньому. Геопросторова нерівномірність параметрів лісів визначає те, що емісії, а також потенціал зменшення емісій залежать також від географічних координат.

Розроблено схеми взаємозв'язку моделі G4M з економічною моделлю GLOBIOM для врахування ефектів торгівлі товарами та потреби у с/г землі; моделями енергетичної системи MESSAGE, макроекономіки MACRO, кліматичної системи MAGICC та моделлю GAINS для формування комплексу інтегральної оцінки; економічними моделями GLOBIOM та EU-FASOM, моделлю процесів лісокористування EFISCEN для покращення надійності прогнозів і визначення референтних рівнів емісій CO₂ від лісозаготівлі; економічною моделлю сільського господарства CAPRI, моделлю макроекономіки GEM-E3, моделями енергетичної системи та транспорту PRIMES та PROMETHEUS, моделі забруднень повітря GAINS для розробки референтних сценаріїв розвитку енергетичної та транспортної систем і відповідних емісій ПГ у країнах ЄС. Приклад схеми зв'язку моделі G4M у комплексі моделей для інтегральної оцінки референтних сценаріїв для країн ЄС наведено на рис. 5. G4M отримує дані про попит на деревину, ціни деревини та с/г землі, а повертає дані про ЗЗЛГ і відповідні емісії CO₂.

Використовуючи розроблену математичну модель G4M та схему взаємодії G4M з іншими моделями для проведення інтегральної оцінки на глобальному рівні,

проведено обчислення динаміки ЗЗЛГ, а також відповідних емісій CO₂ для сценаріїв SSP/RCP. Глобальний потенціал зменшення емісій CO₂ від заліснення (збільшення поглинання CO₂) у 2050 році може досягати більше 1000 МтCO₂/рік при невисоких рівнях попиту на біоенергію. При високому попиті на біоенергію потенціал приблизно у 2.5 рази менший. Глобальний потенціал зменшення емісій CO₂ від знеліснення у 2050 році може досягати більше 4000 МтCO₂/рік при невисоких рівнях попиту на біоенергію. При високому попиті на біоенергію потенціал приблизно у 2 рази менший, в основному, через нижчу швидкість знеліснення при нульовій ціні емісій CO₂ та більшій потребі у с/г землі. У сценарії SSP2 загальна площа лісу (враховуючи заліснення та знеліснення) наприкінці століття відновлюється до початкового значення після повільного зниження на початку століття. Відсоток площі лісу, що використовується для лісозаготівлі, збільшиться з 19% у 2010 році до 24% у 2100 році. Загальна площа лісу у сценарії SSP1 – на 2% і у сценарії SSP3 – на 6% менша, ніж у сценарії SSP2. Частка зменшення емісій ПГ від ЗЗЛГ від загального зменшення є невеликою (до 10%) і зменшується від сценарію SSP1 до SSP3, але має важливе значення, оскільки зменшення емісій є дешевшим, а ефект від впровадження заходів є швидким, що дає час та кошти для розгортання інших технологій зменшення емісій (рис. 6).

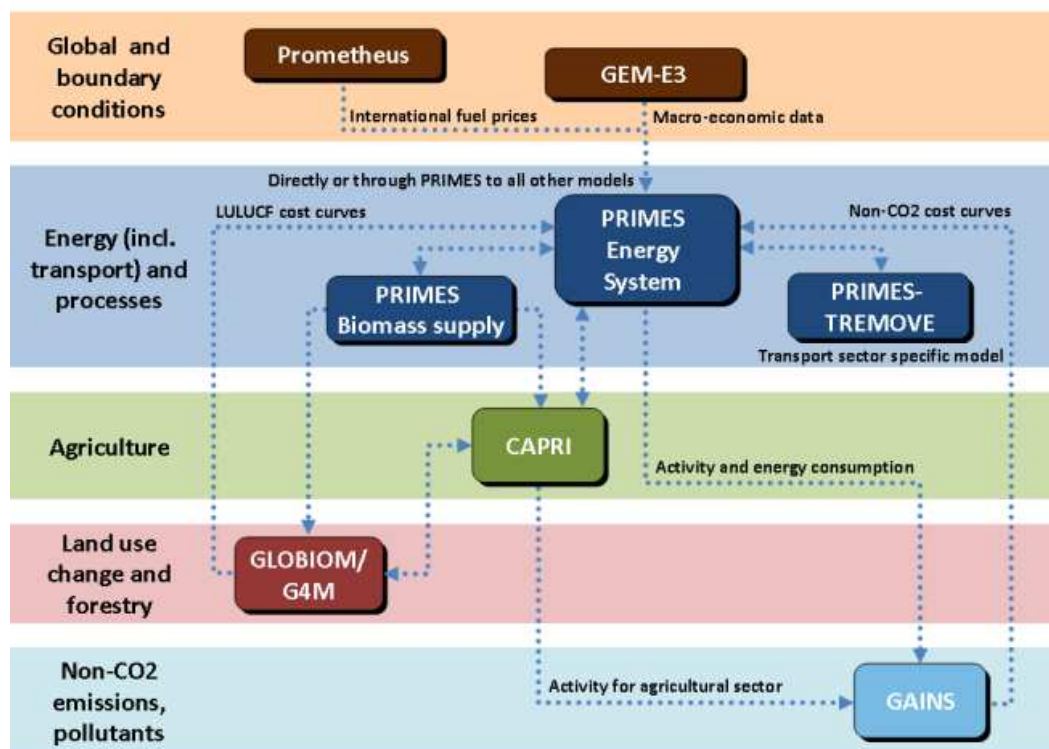


Рис. 5. Схематичне зображення взаємодії моделей у комплексі моделей для інтегральної оцінки референтних сценаріїв для країн Європейського Союзу

У результаті проведеного з використанням моделі G4M аналізу синергії заходів по зменшенню емісій CO₂ від знеліснення та ризику зникнення видів тварин показано, що продовження історичного рівня знеліснення, ймовірно, призведе до дуже високого рівня вимирання видів. Запровадження адекватного фінансового механізму зменшення емісій від знеліснення та деградації лісів (REDD) може суттєво зменшити вимирання видів. Найбільше видів може зникнути, якщо будуть знелісені території з більшою кількістю видів, наприклад, захід басейну Амазонки, південно-східна Азія, атлантичні

ліси Південної Америки. Знеліснення відбувається досить нерівномірно, зокрема Нова Гвінея може втратити біля 82% лісового покриву до 2100 року, Мадагаскар – 77%, Атлантичний Ліс та Тропічні Анди – 74%, гори південно-західного Китаю – 25%, Гімалаї та Філіппіни – 28%. Чим вищий рівень інвестицій у програми REDD, тим менше знеліснення і, відповідно, кількість зниклих видів. Щоб ефективніше запобігати зникненню видів, можна застосувати запропонований підхід, який полягає у тому, щоб створити карти місць, у яких запровадження проектів зменшення знеліснення, матиме найбільший вплив. Зв'язок між ціною емісій CO₂ та кількістю збережених видів є досить надійним – він також зберігається для сімейства сценаріїв, що базуються на більш низьких рівнях базового знеліснення, а також при припущенні, що захищені ліси не зазнають знеліснення.

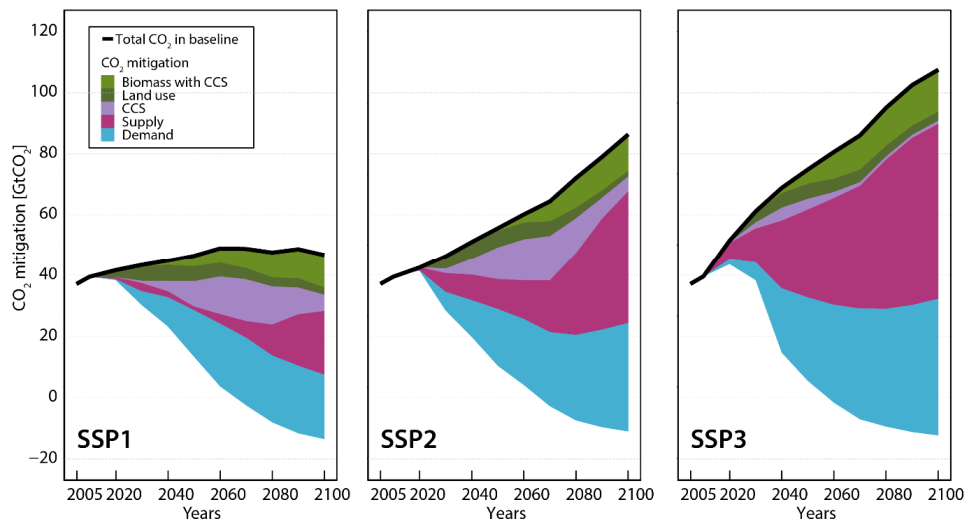


Рис. 6. Глобальний потенціал зменшення емісій від референтного значення для різних секторів у сценаріях соціально-економічного розвитку SSP1, SSP2, SSP3 та сценарію впливу на кліматичну систему RCP2p6, обчислений за допомогою ПАСА ІАМ

Використовуючи модель G4M та схему взаємодії G4M з іншими моделями для країн ЄС, здійснено обчислення динаміки ЗЗЛГ, а також відповідних емісій CO₂ для різних сценаріїв. Швидкість заліснення зменшується, але між 2005 та 2030 роками буде створено 7 Мга насаджень і ще 3 Мга до 2050 року. Акумулявання вуглецю посадженим лісом з часом зростає, оскільки створюються нові насадження, а молоді ліси, які були створені протягом останніх 20 років, входять у фазу високої продуктивності. Заліснені території поглинуть 99 МтCO₂ у 2030р. та 123 МтCO₂ у 2050р. Швидкість знеліснення зменшиться з 160 000 га у 2005р. до 43 000 га у 2030р. та 17 000 га у 2050р., що призведе до зменшення емісій від 63 МтCO₂ у 2005р. до 20 МтCO₂ у 2030р. і 8 МтCO₂ у 2050р. Лісозаготівля зростає з 516 Мм³ у 2005 році до 565 Мм³ у 2030 році, що пов'язано зі зростанням попиту на деревину (зумовлене попитом на біоенергію, кількістю населення та зростанням доходів). Приріст лісу зменшується з 751 Мм³/га в 2005р. до 725 Мм³/га в 2030 р. Як наслідок цих двох процесів стік вуглецю у біомасу лісів знижується на 32% у 2030 році. Загальна площа лісу збільшиться з 155 Мга у 2005 році до 159 Мга у 2030 році і 162 Мга у 2050р. Використовуючи розроблену математичну модель G4M та схему взаємодії моделі G4M з іншими моделями для проведення інтегральної оцінки для країн ЄС, проведено обчислення референтних рівнів емісій парникових газів для 14 країн-членів ЄС, які подані цими країнами до РКЗК ООН (рис. 7).

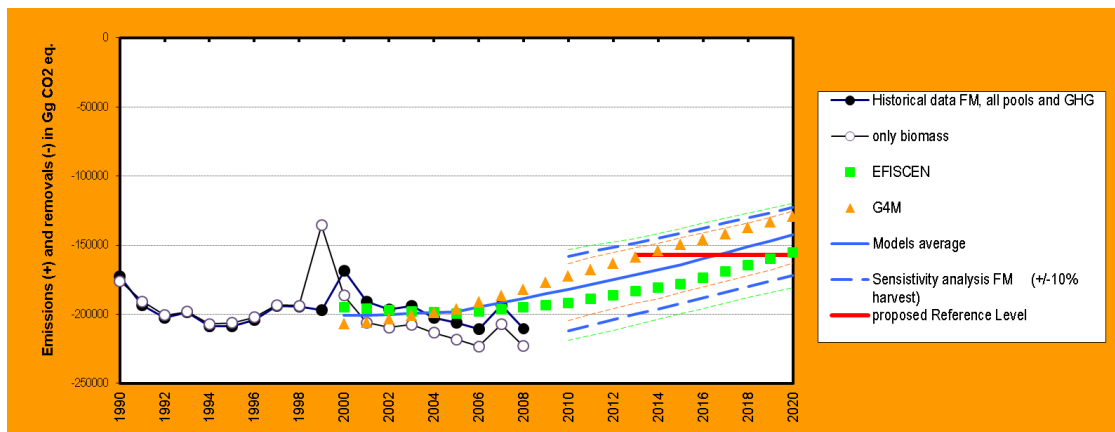


Рис. 7. Скореговані емісії CO₂ з біомаси лісів від лісокористування, отримані за допомогою моделей G4M та EFISCEN для середніх значень попиту на деревину та +/-10% від середнього; емісії з біомаси лісів з інвентаризації ПГ в категорії «лісові землі, які залишаються лісовими землями», емісії ПГ з усіх резервуарів та джерел ПГ; а також визначений референтний рівень емісій (без врахування емісій з продуктів з деревини) для 14 країн ЄС.

Шостий розділ присвячено дослідженню методів оцінювання невизначеностей емісій та впливу невизначеностей на прийняття рішень. Розроблено метод діагностики умов перевірки зміни рівня емісій парникових газів у країнах відповідно до їх міжнародних зобов'язань – метод критичної відносної похибки. Проведено аналіз невизначеностей потоків CO₂ наземних екосистем Євразії для 1988-1992рр. Розроблено математичну модель прийняття рішень про будівництво вугільної електростанції та модуля вловлювання та зберігання вуглекислого газу в умовах невизначеності. Із використанням моделі G4M розроблено метод аналізу переваг вдосконалення системи моніторингу емісій CO₂ для підвищення точності визначення емісій.

Розроблений метод діагностики умов перевірки зміни відносного рівня емісій парникових газів (δ) у країнах ґрунтується на концепції «часу верифікації» і, в свою чергу, є основою для більш складних діагностичних методів. У методі критичної відносної невизначеності (R_{crit}) вважаємо, що час верифікації має бути меншим, ніж період, протягом якого у розглянутій країні зобов'язуються змінити емісії:

$$R_{crit} = \frac{|\delta|}{1-\delta}$$

Проведено аналіз невизначеностей потоків CO₂ наземних екосистем Євразії для 1988-1992рр. із застосуванням опублікованих результатів додаткових досліджень, проведених після 2000р. Зокрема, використано результати моделювання чистої первинної продукції 17 глобальними моделями та спеціальною моделлю лісових екосистем; доповнено базу даних вимірювань повного та автотрофного дихання ґрунтів; у результаті аналізу методів вимірювання дихання ґрунтів визначено та усунуено систематичні похибки вимірювань; розроблено метод аналізу складових потоків дихання ґрунтів для великих територій з використанням матриці «біокліматична зона – відділ ґрунту – рослинність», що дає можливість систематизувати спорадичні вимірювання, обчислити потоки, кореляцію обчислених значень та оцінити невизначеності; з використанням отриманих результатів оновлено баланс атмосферного CO₂ для Північної Азії у звіті IPCC (оновлене значення "знизу

вгору" становить -850 ТгС/рік, проти попереднього значення -360 ТгС/рік, та відповідний інтервал невизначеності $[-1700 - 0]$ проти $[-730-0]$ ТгС/рік), що дасть можливість використовувати у обчисленнях «згори-вниз» більш достовірний інтервал невизначеності.

Із використанням розробленої математичної моделі G4M, схем моделювання та МАСС від ЗЗЛГ розроблено метод аналізу переваг вдосконалення системи моніторингу емісій CO_2 для підвищення точності визначення емісій. Згідно результатів моделювання при зменшенні теперішньої невизначеності нетто емісій CO_2 від знеліснення, 40-50%, до мінімум 30% при впровадженні вдосконаленої системи моніторингу, можна досягнути значного скорочення витрат на зменшення емісій від знеліснення, у порівнянні із витратами на вдосконалення системи моніторингу (рис. 8). Так, для Бразилії, щоб зменшити емісії CO_2 від знеліснення на 40%, необхідна ціна емісій CO_2 від 5 до 9.8 \$/т CO_2 , що призведе до зменшення емісій на 7.9-9.3 Гт CO_2 у 2026-2050 рр., а загальні витрати складуть 39.5-91.1 мільярдів доларів. У той же час, щоб зменшити емісії на 30%, необхідна ціна CO_2 від 3.7 до 9.1 \$/т CO_2 , що призведе до зменшення емісій на 5.92-6.98 Гт CO_2 у 2026-2050 рр., загальні витрати складуть 21.9-63.5 млрд. доларів, економія становитиме 17.6-27.8 млрд. доларів. Враховуючи 5 розглянутих країн, у яких відбувається найбільше знеліснення, економія коштів за період 2026-2050 рр. становитиме 49-70 мільярдів доларів, що значно перевищує витрати на оновлення системи моніторингу біомаси та площі лісів.

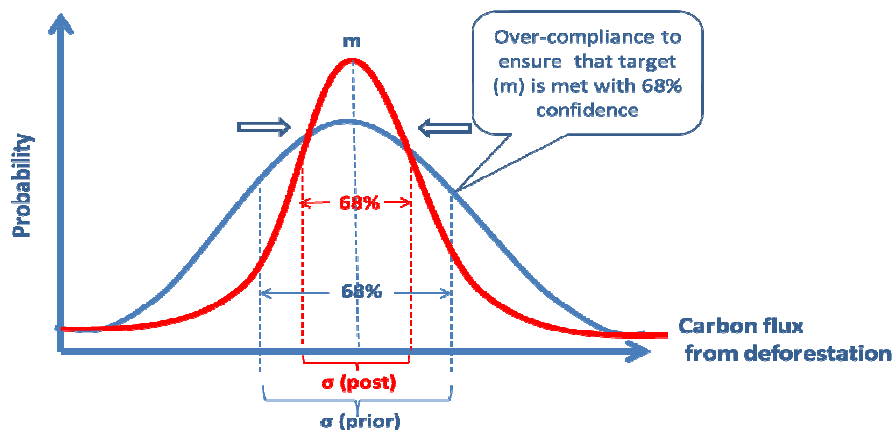


Рис. 8. Схематичне зображення проблеми досягнення цілі зменшення емісій CO_2 , якщо обчислення емісій характеризується суттєвою невизначеністю, а також потенційної користі від зменшення невизначеності

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано комплекс задач, які у сукупності вирішили науково-прикладну проблему математичного моделювання процесів емісії та стоку CO_2 у лісовому господарстві та при змінах землекористування, що дало можливість підвищити ефективність прийняття природоохоронних управлінських рішень щодо пом'якшення зміни клімату на глобальному, регіональному та національному рівнях. За результатами дисертаційної роботи можна зробити такі висновки:

1. Розроблено метод моделювання вуглецевого балансу лісової екосистеми, який поєднує процеси кругообігу вуглецю та таксаційні параметри деревостану. Він включає удосконалену структуру математичної моделі вуглецевого балансу лісової екосистеми з врахуванням наявних даних про лісові екосистеми в

Україні, доповнену математичною моделлю фенологічних процесів у букових та дубових лісах, які базуються на даних спостережень та враховують часовий зсув цих процесів при зміні клімату. Завдяки такому поєднанню можливо врахувати вікову динаміку деревостану при моделюванні його вуглецевого балансу. Запропонований метод використано при розробці математичних моделей вуглецевого балансу букових, дубових та ялинових лісів, які застосовано для аналізу динаміки запасів вуглецю у компонентах лісової екосистеми при залісненні.

2. Розроблено метод геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні, який, на відміну від відомих, враховує взаємний вплив цих процесів, а також процесів торгівлі та переміщення заготовленої деревини, процесів заліснення та знеліснення, що дає можливість сумісно аналізувати і прогнозувати ці процеси у залежності від економічної ситуації та встановлених обмежень на емісію парникових газів.
3. Розроблено метод моделювання процесу просторового поширення знеліснення для глобальної геопросторової моделі G4M шляхом врахування інтенсивності знеліснення в даній клітинці растру на попередньому кроці моделювання та мінімальної площі лісу у сусідніх клітинках, а також транспортної мережі, що дає можливість точніше відтворити просторову структуру знеліснення.
4. Розроблено метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини та зменшення емісій CO₂ від лісокористування при збереженні заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни чи регіону, для геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування (моделі G4M), який ґрунтується на принципі максимізації чистої приведеної вартості, поєднанні інформації про заготівлю деревини на різних геопросторових рівнях (регіони, країни та окремі клітинки растру) та дає можливість проводити імітаційне моделювання процесів лісозаготівлі та впровадження природоохоронних стратегій.
5. З використанням зазначеного у пунктах 2-4 розроблено глобальну геопросторову математичну модель процесів заліснення, знеліснення, заготівлі деревини та відповідних емісій CO₂ (модель G4M). У моделі процеси прийняття рішень щодо зміни землекористування та параметрів лісокористування розглядаються з точки зору власників ділянок землі, які знаходяться у клітинках растру 0.5x0.5 градуса. Також розроблено версію моделі G4M для території Європейського Союзу, у якій додатково використано наявні геопросторові дані, що дало можливість вдосконалити метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни та метод калібрування емісій CO₂ з біомаси лісів. Запропоновано параметри та дані, які необхідні для адаптації геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування для України.
6. Розроблено метод ідентифікації параметрів моделі G4M, які відповідають за моделювання процесів зміни землекористування, за даними ФАО та звітів країн до РКЗК ООН на національному рівні, що дало можливість відтворити історичні емісії CO₂ країн у секторі лісового господарства та зміни землекористування та прогнозувати емісії за різних сценаріїв соціально-економічного розвитку та податку на емісії парникових газів.
7. У результаті аналізу неточностей вхідних даних розробленої моделі G4M виявлено, що дані характеризуються досить високою невизначеністю, особливо на рівні клітинок растру. У результаті аналізу чутливості моделі G4M до зміни

окремих параметрів 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. Реакція емісій CO₂ на зміну ціни на сільськогосподарську землю дуже висока при ціні CO₂ 3-10 \$/тCO₂, причому симетрична на негативні та позитивні відхилення параметра.

8. При порівнянні результатів моделювання G4M з статистичними даними та результатами інших моделей показано, що у середньому за 1999-2015рр. середньоквадратичне відхилення змодельованих значень заготівлі деревини склало 0.5% для ЄС; для більшості країн відхилення становить біля 1%, але для кількох країн більше 7%. В загальному, для ЄС середньоквадратичне відхилення змодельованих значень емісій CO₂ з біомаси від лісокористування від значень РКЗК ООН становить 17%, а для окремих країн відхилення складає 30-90%. Порівняння результатів моделей показує, що результати G4M є раціональними, а різниця у результатах моделей пояснюється відмінностями у підходах до моделювання відповідних процесів і вхідних даних, а також те, що якість вхідних даних може бути такою ж важливою при створенні кривих граничних витрат на зменшення емісій CO₂ від знеліснення, як і застосування декількох різних моделей для побудови кривих граничних витрат.
9. Розроблена математична модель G4M призначена для розв'язування широкого класу задач, пов'язаних із прогнозуванням динаміки площі лісу (через процеси заліснення та знеліснення), біомаси лісу, заготівлі деревини та емісій CO₂, спричинених цими процесами, а також відгуку на заходи по зменшенню емісій CO₂. Властивості моделі дають можливість використовувати результати моделювання для підтримки прийняття рішень щодо проблеми зменшення емісій CO₂.
10. Розроблено схеми взаємозв'язку моделі G4M з економічною моделлю біоресурсів GLOBIOM для врахування ефектів торгівлі товарами та потреби у сільськогосподарській землі; моделями енергетичної системи MESSAGE, макроекономіки MACRO, кліматичної системи MAGICC та ін. для формування комплексів моделей інтегральної оцінки. Із використанням розроблених схем взаємозв'язку моделей проведено обчислення референтних рівнів емісій парникових газів для 14 країн-членів ЄС, які подані цими країнами до РКЗК ООН; розроблено прогноз базових емісій CO₂ від лісокористування, заліснення та знеліснення, а також потенціалу зменшення емісій на глобальному рівні та для окремих країн; проведено обчислення динаміки заліснення, знеліснення та лісокористування, а також відповідних емісій CO₂ для сценаріїв спільних соціально-економічних шляхів та репрезентативних шляхів концентрацій парникових газів і радіаційного впливу на кліматичну систему (SSP/RCP); проведено аналіз синергії заходів по зменшенню емісій CO₂ від знеліснення та ризику зникнення видів тварин у країнах, що розвиваються; здійснено обчислення динаміки заліснення, знеліснення та лісокористування, а також відповідних емісій CO₂ для країн ЄС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бунь, Р.А., Густі, М.І., Дачук, В.С., Кужій, Л.І., Олексів, Б.Я., Стрямець, Г.В., Стрямець, С.П., Токар, О.Є., Цибрівський, Я.Б.: Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України. Українська академія друкарства, Львів, 376 с. (2004)
2. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Papadopoulos, D., Siskos, P., Apostolaki, E., Zampara, M., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Kouvaritakis, N., Hoeglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Bottcher, H., Frank, S., Havlik, P., Gusti, M., Witzke, H.P.: EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050 - Reference scenario 2013. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 173 p. (2014)
3. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Siskos, P., Kannavou, M., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S., Zampara, M., Papadopoulos, D., Nakos, Ch., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Tsani, S., Karkatsoulis, P., Fragkos, P., Kouvaritakis, N., Höglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Gomez Sanabria, A., Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M., Witzke, H.P., Kesting, M.: EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. European Commission Directorate - General for Energy, Directorate - General for Climate Action and Directorate - General for Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 223 p. (2016)
4. Turkovska, O., Gusti, M., Lauri, P., Forsell, N., Havlik, P., Obersteiner, M.: Linear optimization of forest management for dynamic recursive model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. **5**(4), 12-18 (2015). doi:10.15587/1729-4061.2015.50966
5. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Алгоритм лісокористування для глобальної геопросторової моделі G4M з врахуванням сортиментної структури. Науковий вісник НЛТУ України. **25**(5), 339-345 (2015)
6. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Адаптація глобальної комп'ютерної моделі лісу G4M для України. Вісник Вінницького політехнічного інституту. **5**, 9-15 (2015)
7. Турковська, О.В., Охремчук, І.А., Густі, М.І.: Оцінювання ефективності політики зменшення викидів CO₂ лісами України при різних соціально-економічних сценаріях. Науковий вісник НЛТУ України. **25**(4), 98-104 (2015)
8. Gusti M.: An algorithm for simulation of forest management decisions in the Global Forest Model. Artificial Intelligence. **4**, 45-49 (2010)
9. Токар, О., Густі, М., Король, М.: Автоматизація збору та обробки даних при дослідженні лісових масивів. Вісник НУ "Львівська політехніка", "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". **598**, 171-175 (2007)
10. Бунь, А., Густі, М., Кужій, Л.: Геоінформаційні технології формування кадастрів викидів парникових газів в енергетичній галузі. Вісник Східноукраїнського національного університету. **10**, 87-94 (2005)
11. Бунь, А.Р., Густі, М.І., Кужій, Л.І.: Моделі та алгоритми формування кадастрів викидів парникових газів в енергетичній галузі з врахуванням невизначеностей. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці. **28**, 89-96 (2005)
12. Кужій, Л.І., Густі, М.І., Бунь, А.Р.: Автоматизована система розподіленої інвентаризації парникових газів. Вісник Хмельницького національного університету. **2**(1/4), 22-27 (2005)
13. Густі, М.І., Бунь, Р.А., Дачук, В.С., Шпаківська, І.М.: Математична модель вуглецевого балансу букового лісу. Інформаційні технології та системи. **7**(2), 90-99 (2004)
14. Густі, М.І., Токар, О.Є., Король, М.М.: Порівняльна оцінка стоку вуглецю у фітомасу лісів України при різних рівнях деталізації. Науковий вісник УкрДЛТУ: Збірник науково-технічних праць. **14**(4), 13-18 (2004)

15. Токар, О., Густі, М.: Математичні моделі інвентаризації парникових газів в лісовому господарстві. Інформаційні технології і системи. **6**(1-2), 211-217 (2003)
16. Бунь, Р., Густі, М., Дачук, В., Олексів, Б., Цибрівський, Я.: Спеціалізована комп'ютерна система для багаторівневої інвентаризації парникових газів. Вісник Технологічного університету Поділля. **1**(3), 77-81 (2003)
17. Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schöpp, W., Riahi, K.: The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*. **42**, 251–267 (2017) (*імпакт-фактор* 7,987)
18. Forsell, N., Turkovska, O., Gusti, M., den Elzen, M., Obersteiner, M., Havlik, P.: Assessing the INDCs' land use, land use change, and forest emission projections. *Carbon Balance and Management*. **11**(26), 1-17 (2016). doi:10.1186/s13021-016-0068-3 (*імпакт-фактор* 1,094)
19. Szolgayová, J., Fuss, S., Kaminski, T., Scholze, M., Gusti, M., Heimann, M., Tavoni, M.: The benefits of investing into improved carbon flux monitoring. *Cogent Economics & Finance*, **4**(1), 1239672 (2016). doi:10.1080/23322039.2016.1239672 (*імпакт-фактор* 0,56)
20. Di Fulvio, F., Forsell, N., Lindroos, O., Korosuo, A., Gusti, M.: Spatially explicit assessment of roundwood and logging residues availability and costs for the EU28. *Scandinavian Journal of Forest Research*. **31**(7), 691-707 (2016). doi: 10.1080/02827581.2016.1221128 (*імпакт-фактор* 1,688)
21. Frank, S., Böttcher, H., Gusti, M., Havlík, P., Klaassen, G., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Dynamics of the land use, land use change, and forestry sink in the European Union: the impacts of energy and climate targets for 2030. *Climatic Change*. **138**, 253–266 (2016). doi:10.1007/s10584-016-1729-7 (*імпакт-фактор* 3,496)
22. Kryzhimskiy, A., Rovenskay, E., Shvidenko, A., Gusti, M., Shchepashchenko, D., Veshchinskaya, V.: Towards harmonizing competing models: Russian forests' net primary production case study. *Technological Forecasting and Social Change*. **98**, 245–254 (2015). doi:10.1016/j.techfore.2015.06.003 (*імпакт-фактор* 3,226)
23. Ometto, J.P., Bun, R., Jonas, M., Nahorski, Z., Gusti, M.: Uncertainties in greenhouse gases inventories - Expanding our perspective. *Climatic Change*. **124**(3), 451-458 (2014). doi: 10.1007/s10584-014-1149-5 (*імпакт-фактор* 3,496)
24. Kraxner, F., Nordstroem, E.-M., Havlik, P., Gusti, M., Mosnier, A., Frank, S., Valin, H., Fritz, S., Fuss, S., Kindermann, G., McCallum, I., Khabarov, N., Böttcher, H., See, L., Aoki, K., Schmid, E., Mathe, L., Obersteiner, M.: Global bioenergy scenarios - future forest development, land-use implications, and trade-offs. *Biomass and Bioenergy*. **57**, 86-96 (2013). doi: 10.1016/j.biombioe.2013.02.003 (*імпакт-фактор* 3,219)
25. Böttcher, H., Verkerk, P.J., Gusti, M., Havlik, P., Grassi, G.: Projection of the future EU forest CO₂ sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models. *GCB Bioenergy*. **4**, 773–783 (2012) (*імпакт-фактор* 4,655)
26. Strassburg, B.N.B., Rodrigues, A.S.L., Gusti, M., Balmford, A., Fritz, S., Obersteiner, M., Turner, R.K., Brooks, T.M.: Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. *Nature Climate Change*. **2**, 350–355 (2012). doi:10.1038/nclimate1375 (*імпакт-фактор* 19,304)
27. Gusti, M., Jonas, M.: Terrestrial full carbon account for Russia: revised uncertainty estimates and their role in a bottom-up/top-down accounting exercise. *Climatic Change*. **103**(1-2), 159-174 (2010). doi: 10.1007/s10584-010-9911-9 (*імпакт-фактор* 3,496)

28. Obersteiner, M., Huettner, M., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Rametsteiner, E., Reyers, B.: On fair, effective and efficient REDD mechanism design. *Carbon Balance and Management*. **4**(11), 1-11 (2009). doi:10.1186/1750-0680-4-11 (*імпакт-фактор* 1,094)
29. Fuss, S., Szolgayova, J., Obersteiner, M., Gusti, M.: Investment under market and climate policy uncertainty. *Applied Energy*. **85**, 708-721 (2008). doi: 10.1016/j.apenergy.2008.01.005 (*імпакт-фактор* 7,182)
30. Gusti, M.: Modeling afforestation and the underlying uncertainties. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. **7**(4-5), 475-482 (2007). doi:10.1007/s11267-006-9115-5 (передруковано в монографії Lieberman et al.: *Accounting for Climate Change: Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories – Verification, Compliance, and Trading*, pp.52-62. Springer, The Netherlands (2007)) (*імпакт-фактор* 1,702)
31. Ramonet, M., Ciais, P., Nepomniachii, I., Sidorov, K., Neubert R.E.M., Langendorfer, U., Picard, D., Kazan, V., Biraud, S., Gusti, M., Kolle, O., Schulze, E.-D., Lloyd, J.: Three years of aircraft-based trace gas measurements over the Fyodorovskoye southern taiga forest, 300 km north-west of Moscow. *Tellus B*. **54**(5), 713-735 (2002). doi: 10.1034/j.1600-0889.2002.01358.x (*імпакт-фактор* 3,336)
32. Turkovska, O., Gusti, M.: A conceptual scheme for modelling forestry and LUC CO₂ emissions in Ukraine. *Econtechmod*. **2**(1), 57-62 (2013)
33. Tokar, O., Bun, R., Gusti, M.: Mathematical models for estimation of the carbon sinks in forests of the Carpathian Region of Ukraine. *Information and Telecommunication Systems: Polish Information Processing Society*. **9**, 80-89 (2006)
34. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: quality control and specific characters of inventory sectors. *Information and Telecommunication Systems: Polish Information Processing Society*. **4**, 73-82 (2004)
35. Bun, R., Gusti, M.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: multilevel models. *Information and Telecommunication Systems: Polish Information Processing Society*. **1**, 61-67 (2004)
36. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L., Tokar, O., Tsybrivskyy, Y., Bun, A.: Spatial GHG inventory: analysis of uncertainty sources. A case study for Ukraine. In: Lieberman, D., Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S. (Eds.) *Accounting for Climate Change: Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories – Verification, Compliance, and Trading*, pp. 63-74. Springer, The Netherlands (2007). doi:10.1007/978-1-4020-5930-8_6
37. Obersteiner, M., Rametsteiner, E., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Reyers, B.: Towards a sound REDD: Ensuring globally consistent reference scenarios and safeguarding sustainability co-benefits. In: Bosetti, E., Lubowski, R. (Eds) *Deforestation and Climate Change: Reducing Carbon Emissions from Deforestation and Forest Degradation*, pp.121-136. Edward Elgar, Cheltenham, UK (2010)
38. Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Verkerk, P.J., Hengeveld, G., Packalen, T., Sallnäs, O., Pilli, R., Grassi, G., Forsell, N., Frank, S., Gusti, M., Havlik, P.: Forest resource projection tools at the European level. In: Barreiro, S., Schelhaas, M.-J., McRoberts, R.E., Kändler, G. (Eds.) *Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability. Managing Forest Ecosystems*, vol.29, pp. 49-68. Springer International Publishing, Cham, Switzerland (2017). doi:10.1007/978-3-319-56201-8_4.
39. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Spatial GHG inventory at the regional level: accounting for uncertainty. In: Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S., Whiter, T. (eds.)

- Greenhouse Gas Inventories: Dealing With Uncertainty, pp.227-244. Springer, Dordrecht (2011). doi:10.1007/978-94-007-1670-4_13
40. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Geoinformation technology and greenhouse gas spatial inventory: An analysis of structural changes in energy sector. In: Zeszyty Naukowe: Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Przemysłu. Środowisko i Technologie Informatyczne a Zdrowie Człowieka, vol. 1, 14-34 (2007)
 41. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Savchyn, O.: Information technology for spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: Wieczorek, T. (ed.) Internet in the information society: Application of the information technologies, pp. 154-163. WSB, Dąbrowa Górnicza (2007)
 42. Buń, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Technologie informacyjne inwentaryzacji gazów cieplarnianych z wykorzystaniem georozproszonych baz danych. In: Nowe technologie w komputerowych systemach zarządzania, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, pp. 37-43 (2005)
 43. Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B., Dietrich, J.P., Doelmann, J., Gusti, M., Hasegawa, T., Kyle, P., Obersteiner, M., Tabeau, A., Takahashi, K., Valin, H., Waldhoff, S., Weindl, I., Wise, M., Kriegler, E., Lotze-Campen, H., Fricko, O., Riahi, K., van Vuuren, D.: Land use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*. **42**, 331–34 (2017). doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.10.002 (*імпакт-фактор* 7,987)
 44. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal analysis techniques for consideration in the (post-)Kyoto policy process. *Climatic Change*. **103**(1-2), 175-213 (2010) doi:10.1007/s10584-010-9914-6 (*імпакт-фактор* 3,496)
 45. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: How much additional carbon can be stored in forests if economic measures are used and how much could it cost? *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво*. **135**, 244–253 (2009)
 46. Густі, М., Цибрівський, Я., Токар, О., Дачук, В., Бунь, Р.: Використання сучасних програмних засобів для оцінки та аналізу вуглецевого балансу лісових екосистем. *Вісник Харківського національного аграрного університету ім.В.Докучаєва*. **2**, 129-134 (2003)
 47. Forsell, N., Korosuo, A., Lauri, P., Gusti, M., Havlik, P., Böttcher, H., Hennenberg, K.: Follow-up study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio follow-up). Publications Office of the European Union, Luxembourg, 68 pp. (2016) ISBN 978-92-79-64433-7
 48. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M., Böttcher, H., Hennenberg, K., Hünecke, K., Wiegmann, K., Pekkanen, M., Nuolivirta, P., Bowyer, C., Nanni, S., Allen, B., Poláková, J., Fitzgerald, J., Lindner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio). Final report. Project: ENV.F.1/ETU/2013/0033. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 43 pp. (2016)
 49. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy. Task 3: Modelling of impacts of an increased EU bioenergy demand on biomass production, use and prices. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 109 pp. (2016).
 50. Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlik, P.: Methodology for estimation and modelling of EU LULUCF greenhouse gas emissions and removals until 2050 in GLOBIOM and G4M. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2016)

51. Den Elzen, M., Fekete, H., Admiraal, A., Forsell, N., Höhne, N., Korosuo, A., Roelfsema, M., van Soest, H., Wouters, K., Day, Th., Hagemann, M., Hof, A., Mosnier, A.; Contributing authors: Havlik, P., Gusti, M., Obersteiner, M., Wong, L.: Enhanced policy scenarios for major emitting countries, The Hague, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 134 pp. (2015).
52. Havlik, P., Valin, H., Jean P., Gusti, M., Schmid, E., Forsell, N., Herrero, M., Khabarov, N., Mosnier, A., Cantele, M., Obersteiner, M.: Climate change impacts and mitigation in the developing world: an integrated assessment of the agriculture and forestry sectors. Policy Research working paper; no.WPS7477. Washington, D.C.: World Bank Group, 56 pp. (2015)
53. Gusti, M.: G4M Overview (global version). Research Gate (2015). doi: 10.13140/RG.2.1.4319.8804.
https://www.researchgate.net/publication/284625564_G4M_Overview_global_version
54. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Bottcher, H., Gusti, M., Kraxner, F., Obersteiner, M., Leduc, S.: The Role of ECA's Forest Resources in Climate Change Mitigation. Final Report submitted to The World Bank on Contract #7158909 (September 2011), International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 78 pp. (2011)
55. Deveney, A., Nackoney, J., Purvis, N., Gusti, M., Kopp, R., Myers, E., Stevenson, A., Kindermann, G., Macauley, M., Obersteiner, M.: Forest carbon index: The geography of forests in climate solutions. Joint report by Resources for the Future and Climate Advisers. Washington, DC, USA, 80 pp. (2009).
56. Böttcher, H., Aoki, K., De Cara, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Schneider, U., Obersteiner, M.: GAINS. GHG Mitigation Potentials and Costs from Land-Use, Land-Use Change and Forestry in Annex-I Countries: Methodology. Report. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 39 pp. (2008)
57. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: Technical Description of the IIASA Model Cluster. The Eliasch Review; Office of Climate Change, UK, 12 pp. (2008)
http://www.occ.gov.uk/activities/eliasch/Gusti_IIASA_model_cluster.pdf
58. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for Annex I Countries under the Kyoto Protocol - A Lesson for the Post-Kyoto Policy Process. International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-024, Laxenburg, Austria, 91 pp. (2004)
59. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2001). International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-029, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)
60. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2002). International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-046, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)
61. Gusti, M., Böttcher, H., Kindermann, G., Havlik, P., Obersteiner, M.: Simulation of REDD+ options using IIASA model framework. In: Seppelt, R., Voinov, A.A., Lange, S., Bankamp, D. (Eds.) International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software “Managing Resources of a Limited Planet”, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany (2012).
<http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>
62. Gusti, M., Kindermann, G.: An approach to modeling landuse change and forest management on a global scale. In: Proceedings, 1st International Conference on

- Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011), Noordwijkerhout, Netherlands, 180-185 (2011)
63. Bun, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Greenhouse gas inventory on the base of multilevel model. In: Filho, L.W., Gomez, J.M., Rautenstrauch, C. (Eds.) Second International ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering. Proceedings. Shaker Verlag, Aachen, Germany, 294-308 (2005)
 64. Bun, R., Hamal, K., Gusti, M., Bun, A., Savchyn, O.: Spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: Gómez, J.M., Sonnenschein, M., Müller, M., Welsch, H., Rautenstrauch, C. (Eds) Information Technologies in Environmental Engineering. Book Series “Environmental Science and Engineering”, ITEE 2007, Third International ICSC Symposium (2007). <http://www.springerlink.com/content/j183524664262371/>
 65. Gusti, M., Khabarov, N., Forsell, N.: Sensitivity of marginal abatement cost curves to variation of G4M parameters. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Cracow, Poland, 163-169 (2015)
 66. Fuss, S., Gusti, M., Broquet, G., Ciais, P., Tavoni, M., MacCallum, I.: Assessing the benefit of carbon monitoring systems for REDD+ in Pan-Tropical regions. In: XIV World Forestry Congress, Durban, South Africa, 7-11 (2015)
 67. Frank, S., Havlík, P., Soussana, J.F., Levesque, A., Valin, H., Wollenberg, E., Kleinwechter, U., Fricko, O., Gusti, M., Herrero, M., Smith, P.: Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? In: EGU General Assembly Conference: Abstracts, vol. 19, p. 15384 (2015)
 68. Forsell, N., Havlík, P., Korosuo, A., Kraxner, F., Frank, S., Valin, H., Gusti, M., Zhang, W., Nordin, A., Lundmark, T., Obersteiner, M.: Global harvesting of wood under different socio-economic and climate mitigation scenarios. In: Towards a New Era of Forest Science in the Boreal Region. Abstracts of the 17th IBFRA Conference, Rovaniemi, Finland. p. 79 (2015)
 69. Wehkamp, J., Pietsch, S.A., Kraxner, F., Reuter, W.H., Fuss, S., Gusti, M., Koch, N.: Taking differences in institutional quality into account in global forest modelling. In: Conference Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015”, IIASA, Laxenburg, Austria, p. 67 (2015)
 70. Havlík, P., Valin, H., Mosnier, A., Forsell, N., Frank, S., Leclère, D., Palazzo, A., Ermolieva, T., Gusti, M., Balkovič, J., Skalský, R., Schmid, E., Herrero, M., Kraxner, F., Obersteiner, M.: Integrated multi-scale modeling framework for assessment of land-use related challenges under global change. In: Conference Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015”, IIASA, Laxenburg, Austria, p. 73 (2015)
 71. Krey, V., Riahi, K., Johnson, N., Kolp, P., Lutz, W., KC S., Crespo Cuaresma, J., Havlik, P., Böttcher, H., Gusti, M., Obersteiner, M.: The new scenarios process – the way toward more integrated assessment of climate change. In: Worlds Within Reach: From Science To Policy - IIASA 40th Anniversary Conference, Hofburg Congress Center, Vienna and IIASA, Laxenburg, Austria (2012). <http://pure.iiasa.ac.at/12238/1/krey1.pdf>
 72. Böttcher, H., Gusti, M., Mosnier, A., Havlik, P., Obersteiner, M.: Global forestry emission projections and abatement costs. In.: Geophysical Research Abstracts, vol.14 EGU2012-7062 (2012)
 73. Kraxner, F., Nordström, E.-M., Obersteiner, M., Havlík, P., Gusti, M., Kindermann, G., Fuss, S., Khabarov, N.: Global feedstock scenarios for bioenergy - Land-use change and trade-offs. In: Paper submitted to the International Energy Workshop - IEW 2012 (2012). <http://iew2012.ercblogs.co.za/wp-content/uploads/sites/7/2012/06/Kraxner.pdf>

74. Fuss, S., Gusti, M., Kraxner, F., Aoki, K., Szolgayova, J.: Boreal forests as a carbon sink: A real options perspective. In: *Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action*. Proceedings of the international conference IBFRA, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia, 382-386 (2011)
75. Shvidenko, A., McCallum, I., Nilsson, S., Schepaschenko, D., Schmillius, C., Beer, C., Santoro, M., Baltzer, H., Quegan, S., LeToan, T., Gusti, M.: Regional terrestrial vegetation full greenhouse account for Northern Eurasia: a system approach. In: *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-07835, 2008, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-07835, EGU General Assembly, Vienna, Austria (2008)
76. Gusti, M., Jonas, M.: How well do we know Russia's carbon budget for 1988-1992? Critical look from uncertainty study of IIASA's Full Carbon Account. In: *Geophysical Research Abstracts*, vol. 10, EGU2008-A-09464, (2008)
77. Gusti, M., Jonas, M.: IIASA'S terrestrial full carbon account for Russia: Revised uncertainty estimates and its role in a bottom-up/top-down accounting exercise. In: *Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 69-85 (2007)
78. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal detection techniques for consideration in the (Post-) Kyoto policy process. In: *Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 107-135 (2007)
79. Bun, R., Gusti, M., Bun, A., Hamal, K.: Multilevel model for greenhouse gas inventory and uncertainty analysis concerning the Kyoto Protocol implementation. In: *Proc. of the Intern. Conf. on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006)*. Yamaguchi, Japan, 118-119 (2006)
80. Bun, A., Gusti, M., Hamal, Kh., Bun, R.: Analysis and minimization of uncertainty of results of multilevel greenhouse gases inventory. In: *Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems "ENVIROMIS'2006"*. Tomsk, Russia, p. 45 (2006)
81. Gusti, M.: Modelling the afforestation process and underlying uncertainties. In: *Proceedings of the International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories: Verification, Compliance and Trading*, Warsaw, Poland, 59-66 (2004)
82. Bun, R., Gusti, M., Dachuk, V., Oleksiv, B., Tsybrivskyy, Ya.: Geoinformation system for greenhouse gas inventories as a practical tool for decision-makers. In: *The Information Society and Enlargement of the European Union: 17th International Conference "Informatics for Environmental Protection"*, Cottbus, Germany, Part 2, 765-772 (2003)
83. Turkovska, O., Gusti, M., Ochremchuk, I.: Modeling forest CO₂ emissions for Ukraine affected by bioenergy and carbon sequestration policies. In: *Proceedings of 6th International Academic Conference of Young Scientists "Computer Science and Engineering 2013"*, Lviv, Lviv Polytechnic National University, pp. 146-147 (2013).
84. Gusti, M.: An algorithm for simulation of forest management response to carbon price incentive. In: *Proceedings of the conference 'Modern Information Technologies in Economy, Management and Education'*, Lviv, 94-97 (2010)
85. Gusti, M.: An approach to simulation of deforestation in tropical forests. In: *Proceedings of the conference 'Modern Information Technologies in Economy, Management and Education'*, Lviv, 81-85 (2011)
86. Gusti, M.: Uncertainty of BAU emissions in LULUCF sector: Sensitivity analysis of the Global Forest Model. In: *Proceedings of the 3rd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories*, LPNU, Lviv, 73-80 (2010)

87. Gusti, M.: Mathematical model for making decisions on land-use change. В: Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті: Всеукр. наук.-практ. конф.: зб. матеріалів, Львів, 57-59 (2008)
88. Gusti, M., Okhremchuk, I.: Accounting for social and sociopolitical factors in global integrated assessment models. В: Обчислювальні методи і системи перетворення інформації: збірник праць IV наук.-техн. конф., Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 133–137 (2016)
89. Густі, М.І., Охремчук, І.А.: Валідація глобальних моделей, які використовують для проведення інтегральної оцінки. В: Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2017: тези доп. Дванадцятої міжнар. наук.-практ. конф., Чернігів, ЧНТУ, 116-120 (2017)
90. Густі, М.І.: Вдосконалення модуля прийняття рішень щодо параметрів лісокористування у глобальній моделі лісу G4M (версія для ЄС). В: Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: V міжнр. наук.-практ. конф., праці конференції, Чернівці, 109-110 (2016)
91. Густі, М.І.: Алгоритм оцінки емісії вуглекислого газу при знелісненні болотистих ґрунтів для глобальної геопросторової моделі лісу. В: Матеріали статей П'ятої Міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", Івано-Франківськ, 222-223 (2015)
92. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Прогнозування потенціалу зменшення емісій вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін землекористування. В: Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: IV міжнр. наук.-практ. конф., праці конференції, Чернівці, 126-128 (2015)
93. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Алгоритм лісокористування для моделі «лісового господарства» в Україні. В: Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: IV міжнр. наук.-практ. конф., тези доповідей, Вінниця, 105-107 (2014)
94. Токар, О., Густі, М., Король, М.: Автоматизація збору та обробки даних при дослідженні лісових масивів. В: Праці міжнар. конф. «Комп'ютерні науки та інформаційні технології - 2007», Львів, НУ «Львівська політехніка», 214-218 (2007)
95. Бунь, Р.А., Густі, М.І., Кужій, Л.І., Бунь, А.Р.: Комп'ютерна система формування кадастрів викидів парникових газів та оцінки похибок інвентаризацій в енергетичній галузі. В: Матер. 12 міжнар. конф. з автоматичного управління, Харків, НТУ «ХПІ», т. 2, 202-203 (2005)
96. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Застосування інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень щодо пом'якшення глобальної зміни клімату. В: Україна в процесах глобального інформаційного обміну: міжнр. наук.-практ. конф., зб. матеріалів, Львів, 67-69 (2016)
97. Густі, М., Токар, О.: Регіональні особливості екосистем України як джерел і поглиначів парникових газів. В: Інформатизація рекреаційної та туристичної діяльності: Перспективи культурного та економічного розвитку: Праці Другого міжнар. конгресу, Трускавець-Львів, ДНДШ, 175-179 (2003)
98. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Моделювання опцій для пом'якшення зміни клімату в глобальних моделях землекористування. В: 2-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», збірник матеріалів. «ЗУКЦ», Львів, с.20 (2012)
99. Густі, М.: Математичне моделювання для підтримки прийняття рішень у міжнародних відносинах: досвід застосування глобальної моделі лісу. В: Матеріали II всеукр. наук.

- конф. «Україна в системі глобального інформаційного обміну: теоретико-методологічні аспекти дослідження і підготовки фахівців», Львів, Ліга-Прес, 37-44 (2013)
100. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Географічний підхід до моделювання викидів CO₂ у лісовому господарстві та при зміні землекористування в Україні. В: Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті: III всеукр. наук.-практ. конф., зб. матеріалів, Львів, 79-84 (2012)
101. Густі, М.: Прогнозування базового рівня емісій CO₂ від лісокористування для країн Європейського Союзу. В: Тринадцята відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук (PSC-IMFS-13), Зб. матеріалів конф., Львів, Вид-во Тараса Сороки, 130-132 (2017)
102. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Інформаційні технології для аналізу емісій CO₂ в лісовому господарстві та при зміні землекористування України. В: 10-та наук. конф. ІМФН НУ «Львівська політехніка», зб. матеріалів, Львів, Н3-Н4 (2012)

АНОТАЦІЇ

Густі М.І. Математичні моделі процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – "Математичне моделювання та обчислювальні методи". – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Розв'язано комплекс задач, які у сукупності вирішили науково-прикладну проблему математичного моделювання процесів емісії та стоку CO₂ у лісовому господарстві та при змінах землекористування для підвищення ефективності прийняття природоохоронних управлінських рішень щодо пом'якшення зміни клімату на глобальному, регіональному та національному рівнях. Зокрема, розроблено метод моделювання вуглецевого балансу лісової екосистеми, з врахуванням таксаційних параметрів деревостану; метод геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни землекористування на глобальному рівні із врахуванням взаємного впливу цих процесів; метод моделювання процесу просторового поширення знеліснення для глобальної геопросторової моделі G4M; метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини та зменшення емісій CO₂ від лісокористування при збереженні заготівлі деревини на рівні регіону; метод ідентифікації параметрів G4M (для моделювання процесів зміни землекористування) за даними міжнародних організацій. З використанням розроблених методів створено математичні моделі та проведено аналіз похибок моделей. Розроблено схеми взаємозв'язку G4M з іншими моделями для формування комплексів моделей для інтегральної оцінки.

Ключові слова: математична модель, геопросторове моделювання, вуглецевий баланс, лісова екосистема, моделювання лісокористування, моделювання зміни землекористування.

Густі М.И. Математические модели процессов эмиссии и стока углекислого газа в лесном хозяйстве и при изменениях землепользования. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – "Математическое моделирование и вычислительные методы". – Национальный университет «Львовская политехника», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2018.

Решен комплекс задач, которые в совокупности разрешили научно-прикладную проблему математического моделирования процессов эмиссии и стока CO_2 в лесном хозяйстве и при изменениях землепользования для повышения эффективности принятия природоохранных управленческих решений по смягчению изменения климата на глобальном, региональном и национальном уровнях. В частности, разработан метод моделирования углеродного баланса лесной экосистемы с учетом таксационных параметров древостоя; метод геопространственного моделирования процессов лесопользования и изменения землепользования на глобальном уровне с учетом взаимного влияния этих процессов; метод моделирования процесса пространственного распространения вырубки лесов для глобальной геопространственной модели G4M; метод моделирования процесса принятия решений по заготовке заданного количества древесины и уменьшения эмиссий CO_2 от лесопользования при сохранении заготовки древесины в регионе; метод идентификации параметров G4M (для моделирования процессов изменения землепользования) за данными международных организаций. С использованием разработанных методов созданы математические модели и проведен анализ погрешностей моделей. Разработаны схемы взаимосвязи G4M с другими моделями для формирования комплексов моделей для интегральной оценки.

Ключевые слова: математическая модель, геопространственное моделирование, углеродный баланс, лесная экосистема, моделирование лесопользования, моделирование изменения землепользования.

Gusti M.I. Mathematical models of processes of carbon dioxide emissions and sinks in forestry and land use change. – On the rights of manuscript.

Dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Sciences by specialty 01.05.02 "Mathematical modeling and computational methods". – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to the actual scientific and applied problem of mathematical modeling of CO_2 emissions and sinks in land use change and forestry (LUCF) in order to increase the effectiveness of decisions on climate change mitigation at the global, regional and national levels. The 1st chapter analyzes the global CO_2 budget, the main processes of carbon cycle in forest ecosystems and mathematical models used for studying processes related to CO_2 budget. The 2nd chapter is devoted to development of methods and mathematical models for modeling the carbon budget of forest ecosystems. The 3rd chapter considers the mathematical modeling of forest management (FM) and land use change (LUC) processes and the development of the geospatial mathematical model of FM and LUC - G4M. The 4th chapter describes the validation of the G4M model. In the 5th chapter we give examples of the practical application of the G4M model, describe the schemes of data exchange between G4M and other models for the formation of modelling frameworks for integrated assessments. The 6th chapter considers methods for estimating emission uncertainties and the effect of uncertainties on decision making. Based on the models developed in the 2nd and 3rd chapters computer simulation tools were elaborated.

A method for modeling of carbon budget of a forest ecosystem combining processes of carbon cycle and tree-stand taxation parameters is developed. The structure of the mathematical model of the carbon budget of a forest ecosystem has been improved taking into account the available data on forest ecosystems and climatic conditions in Ukraine by introducing additional reservoirs and flows of carbon that makes it possible to account for the dependence of the intensity of the carbon cycle processes on age of the tree stands, as

well as reproduce the age and seasonal dynamics of the carbon cycle processes more adequately. A mathematical model of phenological processes in beech and oak forests of the Ukrainian Carpathians is developed based on observational data; the model takes into account the time shift of these processes due to climate change and gives an opportunity to reproduce the seasonal dynamics of carbon cycle processes more adequately. These developments are used for creation of mathematical models of tree stands, which are used to analyze the dynamics of carbon stocks in the components of forest ecosystem during afforestation.

A method for geospatial modeling of FM and LUC processes at the global level is developed. The method takes into account the interdependence of these processes, as well as trade in harvested wood, and afforestation and deforestation, making it possible to consistently analyze and project these processes depending on the economic development and CO₂ emission limitations. A method for modeling the process of decision-making on harvesting a given amount of wood and reducing FM CO₂ emissions while preserving the harvest amount at the country or region level is developed for G4M; it is based on the principle of maximizing net present value, combining information on the harvesting of wood at various geospatial levels (regions, countries and individual raster cells) and gives an opportunity to simulate logging process and implementation of environmental policies. A method for identification of the G4M parameters reflecting the processes of afforestation and deforestation at the local level and taking into account data on afforestation, deforestation and the trend of changes in forest area at the national level is developed; the method makes it possible to reproduce historical LUC CO₂ emissions in countries, as well as projecting emissions for different scenarios of socioeconomic development and CO₂ prices. The methods and an algorithm for estimating the CO₂ emissions from biomass, litter, soil and wetlands are used to improve the G4M model.

G4M is used to analyze strategies of CO₂ emission reduction at global, regional and national scales. In particular, G4M was applied to assess the effectiveness of the CO₂ emission reduction policy for Ukrainian forests under various socio-economic scenarios; for numerical assessment of the Shared Socio-economic Pathways together with scenarios of Representative Concentration Pathways; for the analysis of the potential and costs of using land and forest resources by EU countries; creation of a reference scenario for LULUCF greenhouse gas (GHG) emissions by 2050 for EU countries; for preparation of the European Commission (EC) assessment of the impact of sustainable bioenergy use in EU countries; to support the decision of the EC to reduce LULUCF GHG emissions; preparing scenarios for enhanced emission reduction measures for countries that emit most of the GHGs; preparation of an integrated assessment of climate change mitigation and adaptation in developing countries for the World Bank; analysis of synergy measures to reduce CO₂ emissions from deforestation and the risk of species extinction, etc.

Keywords: mathematical model, geospatial modeling, carbon budget, forest ecosystem, modeling of forest management, modeling of land use change.

Підписано до друку 12.02.2018
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий
Умов. друк. арк. 1,9. Фіз. друк. арк. 2,5
Тираж 130 пр.

Надруковано:
ПП Сорока Т. Б.
79026, м. Львів, вул. Володимира Великого, 2
soroka@soroka.lviv.ua