

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

**ТУРКОВСЬКА ОЛЬГА ВОЛОДИМИРІВНА**

**УДК 004.94+630**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ  
ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМІСІЇ  
ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ**

**05.13.06 – Інформаційні технології**

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук**

**Львів – 2017**

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Густі Микола Іванович**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
докторант кафедри міжнародної інформації  
Інституту прикладної математики та фундаментальних наук

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Тимченко Олександр Володимирович**  
Українська академія друкарства  
професор кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій

кандидат технічних наук, доцент  
**Говорущенко Тетяна Олександрівна**  
Хмельницький національний університет  
в.о. завідувача кафедри комп'ютерної інженерії та системного  
програмування

Захист відбудеться «17» березня 2017 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованою вченою ради Д 35.052.14 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 28а, аудиторія 807, V навчальний корпус.

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

Автореферат розісланий «\_\_\_» лютого 2017 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради

А.Є. Батюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з секторів, на які спрямовані значні зусилля задля скорочення емісій парникових газів, є землекористування. Процеси землекористування та зміни типів землекористування є доволі складними для імплементації заходів щодо пом'якшення та адаптації до зміни клімату. У будь-яких рішеннях для цього сектору потрібно враховувати необхідність підтримання балансу між його економічними та природоохоронними властивостями. Це в свою чергу вимагає детального аналізу та прогнозування процесів землекористування, а також скрупульозного тестування можливих управлінських рішень та їх наслідків.

Застосування інформаційних технологій для представлення та аналізу процесів землекористування дає змогу оцінити стан сектору, а також вплив управлінських рішень на процеси землекористування.

Значний внесок у розробку інформаційних технологій, а також методів та математичних моделей аналізу процесів землекористування внесли вчені: J. Buongiorno, P. Verburg., B. Sohngen, G. Kindermann, M. Obersteiner, U. A. Schneider, P. Havlik, O. Thahvonon, M. J. Schelhaas, R. Mendelsohn, R. Sedjo, J. E. McDill, G. Amcher, R. Schaldach, J. Alcamo, V. Bellassen, F. Lecocq, S. Caurila, E. F Lambin та інші. В Україні можна виділити вклад у аналіз процесів лісокористування в контексті моделювання та дослідження зміни клімату Букші М. І., Соловія І. П., Буня Р. А., Густі М. І., Нижник М. С. та інших.

Серед відомих розробок у даній галузі виділяють інформаційну технологію аналізу процесів землекористування, яка базується на використанні рекурсивної моделі часткової рівноваги GLOBIOM (Global Biosphere Management Model – глобальна модель управління біосферою) та імітаційної моделі G4M (Global Forest Model – глобальна модель лісу), що є взаємопов'язаними. Ця інформаційна технологія застосовується для оцінювання емісій вуглекислого газу, які виникають у секторі землекористування, зокрема, вона застосовується в рамках виконання проєктів Європейського Союзу щодо боротьби зі зміною клімату, а також її результати використовувались у звіті «Огляд Еліаша», проєкті Всесвітнього фонду дикої природи «Живі ліси», дослідженнях Світового Банку та інших.

Особливістю інформаційної технології є багатопараметричне представлення процесів землекористування та зміни типів землекористування, оскільки враховуються як економічні, так і біофізичні характеристики досліджуваних процесів, а також взаємодія між ними. Такий підхід дає змогу комплексно оцінити вплив певного управлінського рішення на досліджувані процеси і, відповідно, точніше обчислити емісії вуглекислого газу. Проте, постає питання чи необхідності покращення ефективності роботи інформаційної технології, зокрема шляхом вдосконалення методів аналізу та забезпечення використання нових доступних даних.

Розробка та застосування методів та засобів для інформаційної технології аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування дозволить підвищити ефективність циклічного опрацювання даних, а також точність результатів і дасть змогу покращити адекватність представлення досліджуваного об'єкта. Отже, удосконалення інформаційної технології аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування для моніторингу емісій вуглекислого газу є актуальною науковою задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основу дисертаційної роботи складають результати теоретичних та практичних досліджень, виконаних автором в рамках робіт кафедри міжнародної інформації Національного університету «Львівська політехніка» (2013-2014 рр.; номер державної реєстрації 0113U003181 “Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень”), а саме удосконалення методу опрацювання вхідних даних з використанням прогнозу зміни параметрів землекористування; під час навчання у Міжнародному інституті прикладного системного аналізу за програмою Міністерства освіти і науки України удосконалено метод моделювання процесів заготівлі лісоматеріалів на базі динамічної моделі G4M; під час стажувань в рамках грантів від служби академічного обміну Австрії (2014 р.; номер реєстрації ICM-2013-04161) та Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (2014; м. Лаксенбург, Австрія) встановлено динаміку зміни вартості лісу з врахуванням терміну рубки та розроблено метод аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги.

**Мета і задачі дослідження.** Підвищення ефективності аналізу викидів вуглекислого газу в сфері землекористування та проектування зміни типів землекористування шляхом удосконалення існуючих систем обробки даних, побудованих з використанням імітаційної та рекурсивної моделей.

Відповідно до поставленої мети в дисертаційній роботі виконано такі завдання:

- дослідити відомі інформаційні технології для аналізу процесів землекористування та контролювання відповідних емісій;
- розробити метод аналізу процесів лісокористування для рекурсивної моделі часткової рівноваги з представленням лісу як динамічної системи;
- розробити метод формалізації процесів заготівлі лісоматеріалів у моделі G4M, враховуючи параметри, які характеризують якість деревини;
- удосконалити обмін даними між моделями-складовими інформаційної технології аналізу процесів землекористування;
- удосконалити метод опрацювання вхідних даних для інформаційної технології аналізу землекористування.

*Об'єктом дослідження* є процеси лісокористування та зміни типів землекористування.

*Предметом дослідження* є методи та засоби інформаційної технології аналізу процесів лісокористування та зміни типів землекористування.

**Методи дослідження.** При виконанні досліджень дисертаційної роботи та розробці методу для аналізу процесів лісокористування із застосуванням рекурсивної моделі часткової рівноваги використано симплекс-метод для розв'язання задачі лінійного програмування; для удосконалення моделювання процесів заготівлі лісоматеріалів на базі імітаційної моделі G4M – метод імітаційного моделювання; для удосконалення методу опрацювання даних, які представляють параметри управлінських рішень у секторі землекористування, застосовано методи побудови сценаріїв та лінійної екстраполяції; методи геоінформатики, процедурного та об'єктно-орієнтованого програмування використано для програмної реалізації методів та представлення результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

*Вперше:*

- розроблено метод визначення зміни вартості лісу з врахуванням віку рубки, у якому на відміну від відомих методів враховано втрату вартості у наступному періоді моделювання і класі віку, що дало можливість розробити метод аналізу процесів лісокористування для рекурсивної моделі;

- розроблено метод аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги шляхом врахування зміни вартості лісу, що забезпечило обмін доступними даними про динаміку вікової структури у інформаційній технології аналізу землекористування.

*Удосконалено:*

- імітаційну модель заготівлі лісоматеріалів, у якій враховано якість деревини, що забезпечило обмін додатковими даними про попит на деревину у інформаційній технології аналізу землекористування, а також дало можливість уточнити результати обчислень даної інформаційної технології;

- метод опрацювання вхідних даних для інформаційної технології аналізу землекористування шляхом прогнозування значень додаткових параметрів, які характеризують досліджувані управлінські рішення України, що забезпечило можливість аналізу процесів майбутніх періодів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Удосконалена інформаційна технологія аналізу процесів землекористування може бути використана для дослідження впливу управлінських рішень у секторі землекористування на навколишнє середовище та рівень відповідних емісій вуглекислого газу на території України.

Розроблений метод аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги за допомогою врахованих нових параметрів дає змогу представити ліс як динамічну систему.

Удосконалений метод моделювання процесів заготівлі лісоматеріалів з використанням базової моделі G4M, враховуючи додаткові параметри, які характеризують якість деревини, дає змогу підвищити адекватність представлення досліджуваних процесів та підвищити точність результатів на 38-43%.

Удосконалення процесів обміну даними між моделями-складовими інформаційної технології аналізу процесів землекористування шляхом доповнення зв'язків між моделями, дало змогу застосувати розроблені та вдосконалені методи у досліджуваній інформаційній технології;

Удосконалений метод опрацювання вхідних даних для інформаційної технології аналізу землекористування шляхом прогнозування значень додаткових параметрів, дозволяє обґрунтувати управлінські рішення України щодо боротьби зі зміною клімату.

**Реалізація результатів та впровадження.** Результати дисертаційного дослідження використано у Національному університеті «Львівська політехніка» (удосконалення методу опрацювання вхідних даних з використанням прогнозу зміни параметрів землекористування теми «Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень»), у Міжнародному інституті прикладного системного аналізу, Австрія (метод аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги при виконанні проекту «Forest management in recursive partial equilibrium model»).

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. Праця [4] опублікована одноосібно. У наукових працях, автору належать: [7, 12, 13] – дослідження зміни емісії вуглекислого газу внаслідок процесів зміни землекористування з використанням інформаційних технологій; [4, 10, 14, 15] – аналіз відомих інформаційних технологій та їхніх компонентів для аналізу процесів землекористування та контролювання відповідних емісій; [3, 5] – дослідження процесів обміну даними між моделями-складовими інформаційної технології аналізу землекористування та удосконалення зв'язків між ними; [1, 16] – розроблення методу аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги, враховуючи динаміку вікової структури та втрат вартості лісу; [2, 9] – удосконалення методу моделювання процесів заготівлі лісоматеріалів з використанням базової моделі G4M, враховуючи сортиментну структуру деревостану; [6, 8, 11] – метод опрацювання вхідних даних шляхом прогнозування значень додаткових параметрів, які характеризують досліджувані управлінські рішення України.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях і школах-семінарах, а саме: міжнр. наук.-практ. конф. «Україна в процесах глобального інформаційного обміну» (Львів, 2016); Четвертій міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки 2015» (Чернівці, 2015); Final workshop of Young Scientists Summer Program 2014 (Laxenburg, Austria, 2014); IV міжнр. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія 2014» (Вінниця, 2014); VI міжнародна конференція молодих вчених «Computer Science and Engineering 2013» (Львів, 2013); 2-му міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2012); III всеукр. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (Львів, 2012); X та XI відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук (Львів, 2010, 2011), а також на наукових семінарах кафедри міжнародної інформації Національного університету «Львівська політехніка» (2012-2015 рр.).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 16 наукових праць, серед яких 1 статтю у міжнародному науковому виданні, 5 статей у фахових наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 9 публікацій – у матеріалах наукових конференцій та 1 технічний звіт.

**Структура роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, сформульовано мету та основні задачі дослідження, визначено основні методи вирішення сформульованих задач, представлено наукову новизну роботи і практичну цінність одержаних результатів.

**У першому розділі** проаналізовано сучасні підходи та інформаційні технології аналізу процесів землекористування та відповідних емісій вуглекислого газу. Охарактеризовано важливість проблеми зміни клімату та місце, яке займають процеси землекористування та емісії вуглекислого газу, спричинені цими процесами, у міжнародних ініціативах, спрямованих на планування та проведення заходів щодо пом'якшення та адаптації до змін клімату.

Підкреслено, що процеси землекористування та зміни типів землекористування є доволі складними для впровадження заходів щодо боротьби зі зміною клімату, які є передбаченими у міжнародних угодах. Комплексний аналіз та оцінка впливу можливих управлінських рішень, чи заходів на рівень емісій вуглекислого

газу внаслідок процесів землекористування, з огляду на їхні економічні та природоохоронні властивості, є необхідним етапом, який повинен передувати реалізації управлінських рішень чи заходів. Інформаційні технології є тим інструментом, який вже має успішні приклади застосування для такого роду задач.

Проведено огляд відомих інформаційних технологій аналізу процесів землекористування. Представлено структурні схеми, описано структуру даних та взаємозв'язки між ними, а також досліджувані процеси землекористування та принцип роботи розглянутих інформаційних технологій. Акцент зроблено на інформаційних технологіях, які застосовуються як інструмент для аналізу впливу можливих управлінських рішень, чи заходів у сфері землекористування на рівень емісій вуглекислого газу.

На підставі аналізу наукових публікацій встановлено, що інформаційна технологія аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування, яка базується на використанні рекурсивної моделі часткової рівноваги GLOBIOM (Global Biosphere Management Model – глобальна модель управління біосферою) та імітаційної моделі G4M (Global Forest Model – глобальна модель лісу), найповніше дозволяє оцінити вплив управлінських заходів на емісію вуглекислого газу внаслідок процесів землекористування. Послідовність роботи моделей-складових досліджуваної інформаційної технології та обміну даними між ними, наведено на рисунку 1.

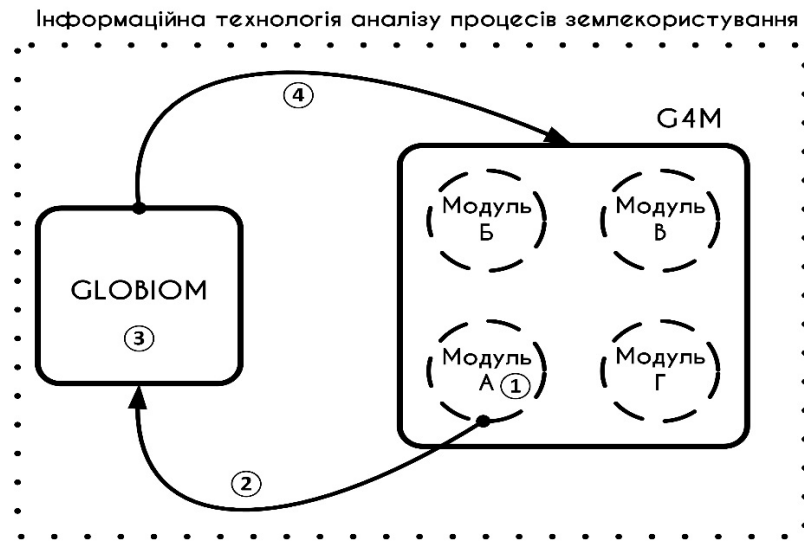


Рисунок 1 – Спрощена схема взаємодії моделей-складових досліджуваної інформаційної технології та обміну даними між ними

Встановлено, що існуюча структура даних цієї інформаційної технології не повністю використовує дані, продукovanі моделями-складовими даної технології. Саме тому існує потреба удосконалення інформаційної технології аналізу процесів землекористування для моніторингу емісій вуглекислого газу шляхом розробки та удосконалення методів та засобів даної інформаційної технології.



Обґрунтовано актуальність вирішення наукового завдання розроблення методів та засобів аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування для моніторингу емісії вуглекислого газу в Україні, з врахуванням специфіки національної статистичної інформації та удосконалення існуючої інформаційної технології за допомогою розроблених методів та засобів, а також сформульовано задачі досліджень.

У другому розділі розроблено метод аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги GLOBIOM шляхом введення нових параметрів, які характеризують динаміку вікової структури та втрат вартості лісу, та удосконалено метод моделювання процесів заготівлі лісоматеріалів з використанням базової моделі G4M, шляхом врахування параметрів, які характеризують якість деревини. Метод аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги GLOBIOM базується на математичній моделі вартості лісу, яка більш детально описана у працях McDill та Buonjorno. Дана математична модель, адаптована до структури даних досліджуваної інформаційної технології, має вигляд:

$$FV(t)_{ca} = \frac{B_{ca} \times P - HC}{(1+r)^t} + \frac{LEV_{pc}}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

де  $FV(t)_{ca}$  – функція вартості лісу, яка залежить від часу  $t$  (\$/га),  $c$  – ідентифікатор растру (50×50 км),  $a$  – ідентифікатор класу віку,  $B_{ca}$  – обсяг стовбурної біомаси доступної для лісозаготівлі (м<sup>3</sup>/га),  $P$  – вартість 1 м<sup>3</sup> деревини (\$/м<sup>3</sup>),  $HC$  – витрати на заготівлю 1 га лісу (\$/га),  $r$  – коефіцієнт дисконтування (%),  $LEV_c$  – очікувана вартість землі (\$/га).

На основі (1) визначено функції втрати прибутку від передчасної лісозаготівлі:

$$LE(t)_{pca} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } FV_{pca} \geq FV_{p+1ca+1} \\ FV_{pca} - FV_{p+1ca+1}, & \text{якщо } FV_{pca} < FV_{p+1ca+1} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $LE_{pca}$  – прибуток від продажу деревини, вирубанної на 1 га лісу, який не буде отримано у випадку передчасної лісозаготівлі (\$/га),  $FV_{pca}$  – вартість 1 га лісу (\$/га),  $p$  – ідентифікатор періоду моделювання.

Також, використовуючи математичну модель вартості лісу (1), визначено функцію втрати прибутку від запізненої лісозаготівлі:

$$LL(t)_{pca} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } FV_{pca} < FV_{p+1ca+1} \\ FV_{pca} - FV_{p+1ca+1}, & \text{якщо } FV_{pca} \geq FV_{p+1ca+1} \end{cases}, \quad (3)$$

де  $LL(t)_{pca}$  – прибуток від продажу деревини, вирубанної на 1 га лісу, який буде втрачено у випадку запізненої лісозаготівлі (\$/га),  $FV_{pca}$  – вартість 1 га лісу (\$/га).

Розроблено метод аналізу лісокористування, який представляє ліс як динамічну систему, застосовуючи метод лінійного програмування, враховуючи (1), (2), (3) та масив параметрів, які характеризують вікову структуру лісу. Цільова функція та система обмежень мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 FR_p(SH_{pca}) &= \sum_{c=1}^m \sum_{a=1}^n (SH_{pca} \cdot FV_{pca} - SH_{pca} \cdot LE_{pca} - (SF_{pca} - SH_{pca}) \cdot LL_{pca}) \rightarrow \max \\
 \sum_{c=1}^m \sum_{a=1}^n (SH_{pca} \times B_{ca}) &\geq D_p, \\
 \sum_{c=1}^m \sum_{a=1}^n (SH_{pca} \times B_{ca}) &\leq D_p \times k, \\
 SH_{pca} \times B_{ca} &\leq SF_{pca} \times B_{ca}, \\
 SH_{pca} &\geq 0,
 \end{aligned} \tag{4}$$

де  $FR_p$  – прибуток власника лісу від продажу деревини (\$/га),  $FV_{pca}$  – вартість 1 га лісу (\$/га),  $LE_{pca}$  – прибуток від продажу деревини, вирубаной на 1 га лісу, який не буде отримано у випадку передчасної лісозаготівлі (\$/га),  $LL_{pca}$  – прибуток від продажу деревини, вирубаной на 1 га лісу, який буде втрачено у випадку запізнілої лісозаготівлі (\$/га),  $B_{ca}$  – обсяг стовбурної біомаси доступної для лісозаготівлі (м<sup>3</sup>/га),  $SH_{pca}$  – площа вирубаного лісу (га),  $SF_{pca}$  – площа лісу (га),  $k$  – коефіцієнт обмеження попиту.

Описано існуючий метод моделювання лісозаготівлі у моделі G4M, а також його параметри та функціональні залежності. Метою даного методу є симуляція лісозаготівлі та зміна поточної структури деревостану внаслідок проведеної лісозаготівлі. Функція лісозаготівлі має вигляд:

$$VH_c = f(RT_c, B_c, MAI_c, SF_c, DD) \tag{5}$$

де  $VH_c$  – обсяг вирубаной деревини (м<sup>3</sup>/га), що залежить від  $RT_c$  – віку рубки лісу,  $B_c$  – обсягу стовбурної деревини доступної для заготівлі м<sup>3</sup>/га,  $MAI_c$  – середнього приросту стовбурної деревини (м<sup>3</sup>/рік),  $SF_c$  – площі лісу (га) та  $DD$  – попиту на деревину в країні (м<sup>3</sup>).

Обґрунтовано, що існуючий метод моделювання лісозаготівлі у моделі G4M потребує удосконалення шляхом врахування параметрів, які характеризують сортиментну структуру деревостану. Розподіл сортиментної структури проведено за величиною діаметру та виділено дві групи сортиментів: перша група – пиловник і фанерний кряж, друга група – інші сортименти деревини. Таким чином, моделювання процесу лісозаготівлі складається з трьох етапів. Спочатку визначається обсяг заготівлі пиловника та фанерного кряжу:

$$VH_{s_c} = f(RT_c, B_c, MAI_c, SF_c, D_{ca}, DD_s), \tag{6}$$

де  $VHs_c$  – обсяг вирубанної деревини сортиментів пиловник та фанерний кряж ( $\text{м}^3/\text{га}$ ), що залежить від  $RT_c$  – віку рубки лісу,  $B_c$  – обсягу стовбурної деревини, доступної для заготівлі ( $\text{м}^3/\text{га}$ ),  $MAI_c$  – середнього приросту стовбурної деревини ( $\text{м}^3/\text{рік}$ ),  $SF_c$  – площі лісу (га),  $D_{ca}$  – діаметру стовбура (м) та  $DDs$  – попиту на деревину сортиментів пиловник та фанерний кряж ( $\text{м}^3$ ). Наступним етапом є визначення обсягу заготівлі деревини інших сортиментів:

$$VHr_c = f(RT_c, B_c, MAI_c, SF_c, DDp) \quad (7)$$

де  $VHr_c$  – обсяг вирубанної деревини інших сортиментів ( $\text{м}^3/\text{га}$ ), що залежить від  $RT_c$  – віку рубки лісу,  $B_c$  – обсягу стовбурної деревини доступної для заготівлі ( $\text{м}^3/\text{га}$ ),  $MAI_c$  – середнього приросту стовбурної деревини ( $\text{м}^3/\text{рік}$ ),  $SF_c$  – площі лісу (га) та  $DDp$  – попиту на деревину інших сортиментів ( $\text{м}^3$ ). Останній етап – це знаходження сумарного обсягу лісозаготівлі та перевірка чи достатньо заготовленої деревини для задоволення відповідного попиту:

$$VH_c = VHs_c + VHr_c \quad (8)$$

де  $VH_c$  – обсяг вирубанної деревини ( $\text{м}^3/\text{га}$ ),  $VHs_c$  – обсяг вирубанної деревини сортиментів пиловник та фанерний кряж ( $\text{м}^3/\text{га}$ ),  $VHr_c$  – обсяг вирубанної деревини інших сортиментів ( $\text{м}^3/\text{га}$ ).

У **третьому розділі** представлено валідацію, а також результати обчислень з використанням розроблених та удосконалених методів для інформаційної технології аналізу процесів землекористування. Представлено функції втрати вартостей при передчасних та запізнілих рубках та досліджено їх залежності від коефіцієнта дисконтування та віку рубки (рисунок 2).

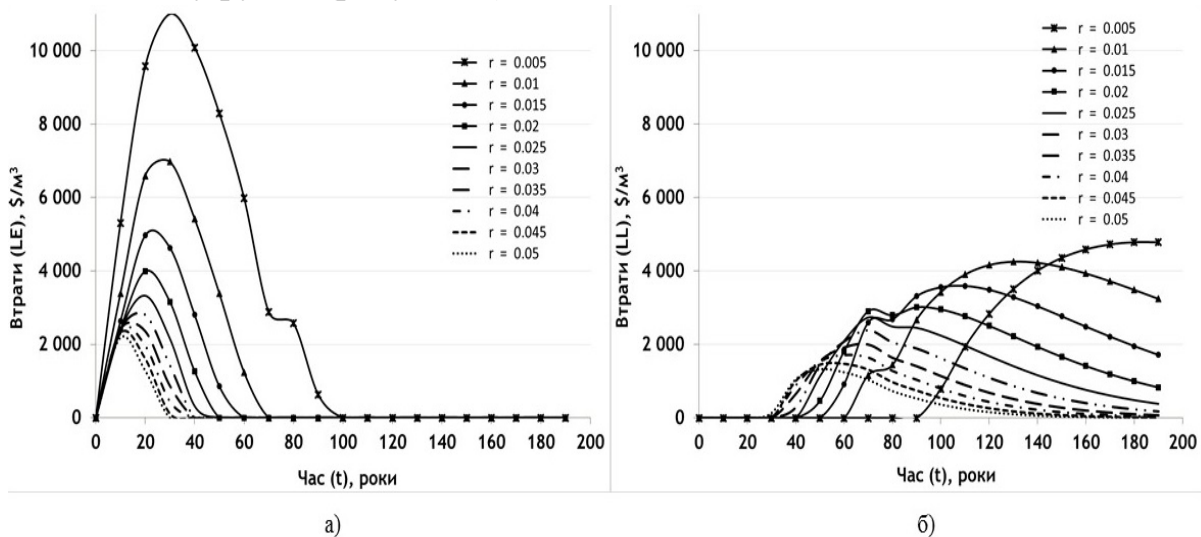


Рисунок 2 – Залежності втрат вартості для різних коефіцієнтів дисконтування ( $r$ ) при а) передчасних рубках та б) запізнілих рубках

Як видно з наведених діаграм, існують конкретні умови, за яких передчасні та запізнілі рубки зумовлюють суттєві втрати вартості лісу.

Проведено порівняльний аналіз розподілу площі лісів у GLOBIOM та розподілу площі лісів у G4M з метою перевірки розробленого методу. Встановлено, що впровадження розробленого методу аналізу процесів лісокористування на основі GLOBIOM забезпечує подібність вихідних даних з G4M, з незначними відхиленнями, що пояснюється способом представлення лісокористування у моделях (рисунок 3).

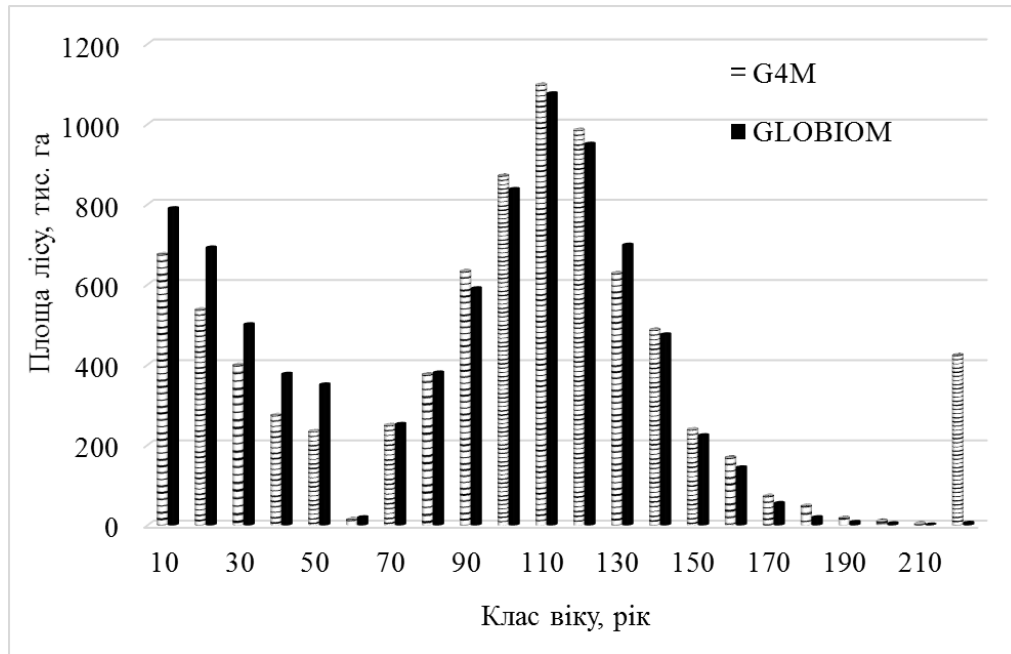


Рисунок 3 – Діаграма розподілу площі лісових насаджень кожного вікового класу у моделях GLOBIOM та G4M

У роботі проведено аналіз результатів, застосовуючи розроблений метод аналізу процесів лісокористування для рекурсивної моделі часткової рівноваги GLOBIOM. Встановлено, що розроблений метод дає змогу впровадити ще один рівень організації даних у цій моделі, а саме розподіл деревостанів за віком. Таким чином, кількість рівнів організації даних у моделях-складових досліджуваної інформаційної технології (G4M та GLOBIOM) стала однаковою. Це дало змогу забезпечити обмін додатковими даними між моделями-складовими, стосовно деяких характеристик деревостану.

Досліджено результати обчислень з використанням удосконаленого методу моделювання лісозаготівлі у базовій моделі G4M та встановлено, що удосконалений метод дає змогу використовувати дані, отримані за допомогою GLOBIOM, які не використовувались у попередньому методі моделювання лісозаготівлі. Визначено, що результати обчислень з застосуванням стандартного методу, а саме значення попиту на такі групи сортиментів як пиловник і фанерний кряж, та інші сортименти деревини протягом періоду 2000-2010 рр., суттєво відрізняються від відповідних статистичних даних (джерело статистичних даних – Міжнародна продовольча та сільськогосподарська організація (ФАО)) (рисунки 4а, 4б та 5а, 5б).

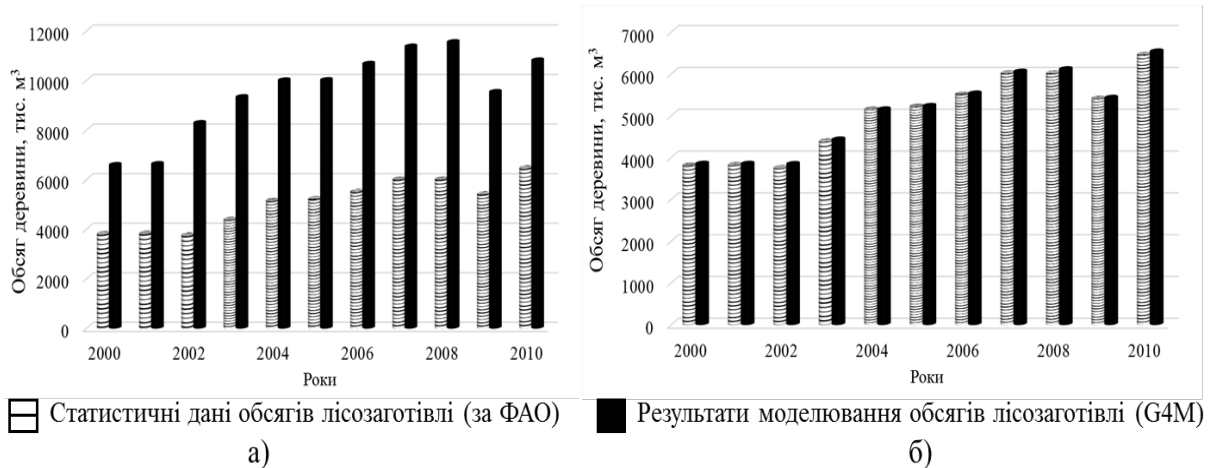


Рисунок 4 – Порівняння статистичних даних та результатів моделювання щодо попиту на пиловник та фанерний кряж з використанням а) стандартної та б) удосконаленої версії моделі

Порівнявши результати обчислень після удосконалення методу та його інтеграції у G4M та статистичні дані за період 2000-2010 рр., встановлено, що різниця між статистичними даними та обчисленнями значно зменшилась, і складає для групи пиловник та фанерний кряж 42-48%.

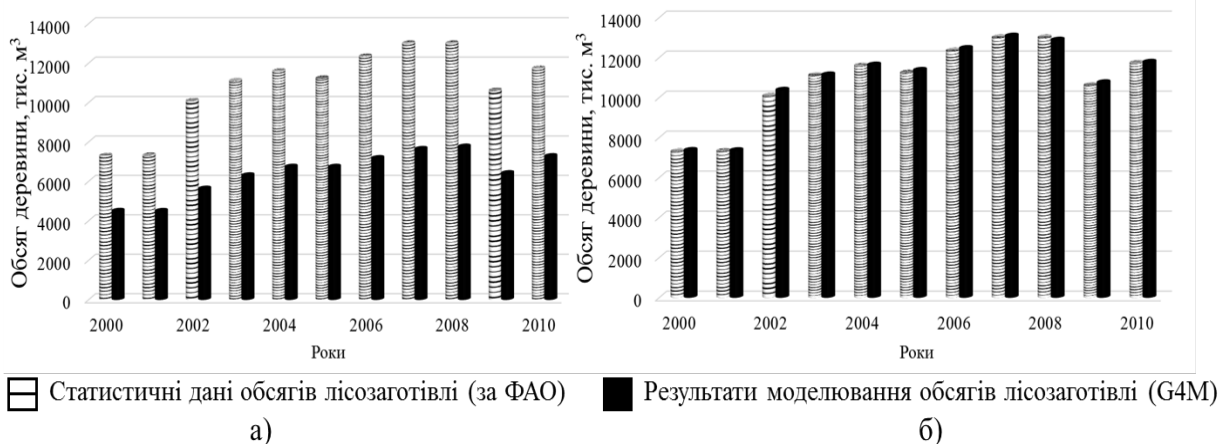


Рисунок 5 – Порівняння статистичних даних та результатів моделювання щодо попиту на інші сортименти деревини з використанням а) стандартної та б) удосконаленої версії моделі

Як видно, розбіжність статистичних даних та результатів моделювання і у цьому випадку значно зменшилась і складає для групи інших сортментів деревини 38-42%. Отже, отримані результати показали, що проведене уточнення моделі дозволяє оперувати під час розрахунків більш достовірними даними.

Удосконалено структуру даних інформаційної технології аналізу процесів землекористування шляхом врахування параметрів для представлення управлінських рішень у секторі землекористування, за допомогою яких відображено особливості України щодо боротьби зі змінами клімату. На основі цих параметрів побудовано

прогноз можливих варіантів розвитку лісгосподарської галузі під впливом чи відсутністю низки управлінських рішень. Прогноз даних параметрів розроблено з використанням методу лінійної екстраполяції. Динаміку зміни параметрів представлено як три різні сценарії – сценарій А, сценарій В та сценарій D, кожен з базується на основі низки припущень щодо можливих рішень України у секторі землекористування та суміжних секторах (рисунок 6).

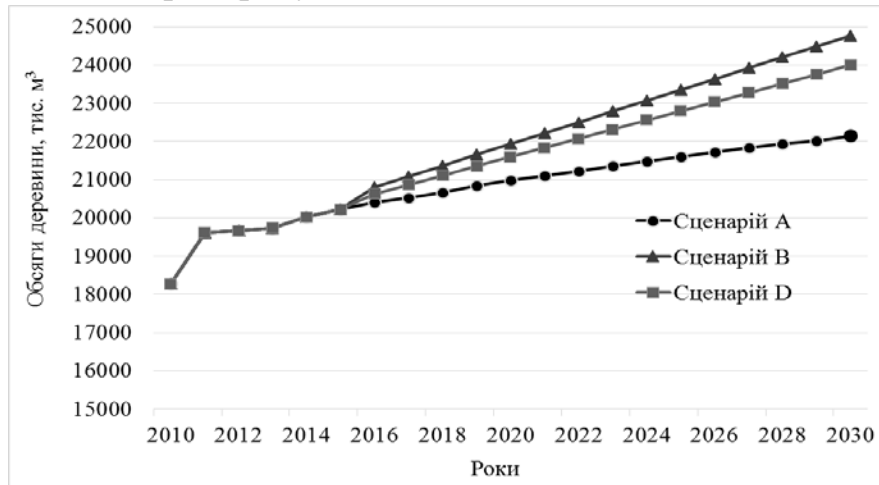


Рисунок 6 – Зміна в часі параметрів для представлення управлінських рішень у секторі за різними сценаріями

Використання побудованих сценаріїв у досліджуваній інформаційній технології дає змогу простежити, як зміняться емісії вуглекислого газу під впливом управлінських рішень. Приклад такого спостереження для сценарію А (а), сценарію В (б) та сценарію D (в) наведено на рисунку 7.

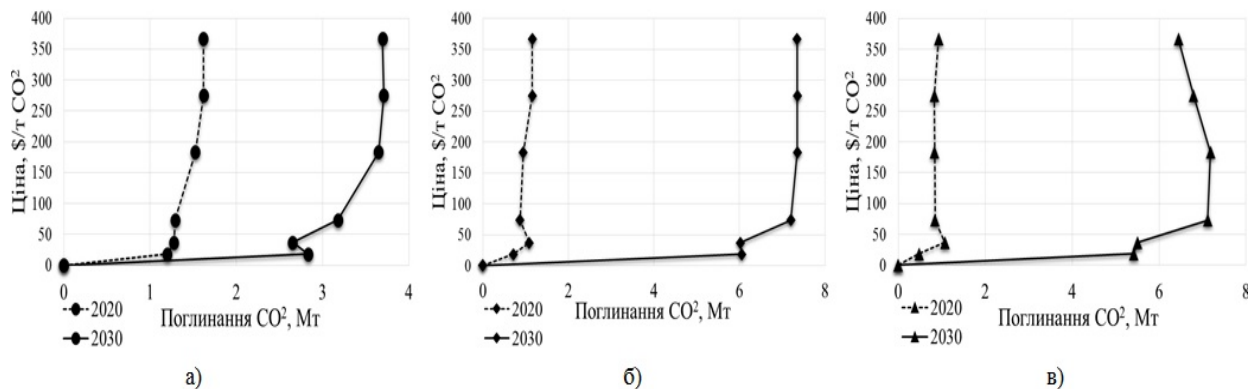


Рисунок 7 – Графіки зміни емісії вуглекислого газу для різних сценаріїв  
а) сценарій А б) сценарій В та в) сценарій D

Розроблений метод аналізу лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги GLOBIOM та удосконалений метод моделювання лісозаготівлі з використанням моделі G4M у поєднанні з прогнозом зміни параметрів землекористування для України дають змогу використовувати дані, що є наявними у досліджуваній інформаційній технології, проте раніше не застосовувались у

зв'язку з невідповідною структурою даних. Проведене удосконалення інформаційної технології аналізу процесів землекористування дозволяє отримати більш точні результати та покращити оцінку емісій вуглекислого газу.

У четвертому розділі проаналізовано структуру та систему обміну даними інформаційної технології аналізу землекористування для моніторингу емісій вуглекислого газу з врахуванням розроблених та удосконалених методів, а також представлено програмну реалізацію досліджуваної інформаційної технології.

У моделях досліджуваної технології вихідними даними є результати моделювання кожної з них, а також інформація з доступних електронних баз даних, статистичних звітів та експертних оцінок. Вхідні дані та операції, що виконуються у інформаційній технології аналізу землекористування, поділено на чотири рівні: глобальний, рівень країни, рівень елемента сітки (растр розміром 50×50 км), рівень вікового класу лісу (рисунок 8). Оскільки дослідження проводяться на прикладі України, то глобальний рівень для вхідних даних та виконуваних операцій не застосовується.

У G4M розглядають процеси росту лісу, землекористування та зміни землекористування, зокрема лісозаготівлі, знеліснення та заліснення, а також обчислюють відповідні емісії вуглекислого газу. G4M є програмним продуктом, реалізованим на мові об'єктно-орієнтованого програмування C++, і включає математичні моделі, методи та алгоритми, за допомогою яких представлено досліджувані процеси.

У GLOBIOM використовується математичний апарат лінійного програмування з метою знаходження балансу між споживачами та виробниками товарів в секторі землекористування та біоенергетики. Модель програмно реалізовано, використовуючи GAMS (General Algebraic Modelling System – загальна система алгебраїчного моделювання).

Удосконалено обмін даними між моделями-складовими інформаційної технології аналізу процесів землекористування для покращення взаємодії між ними для забезпечення обміну та використання доступної інформації. Визначено дві цільові області у досліджуваній технології, де процеси обміну даними підлягали вдосконаленню: попит на деревину та вікова структура лісів. Оновлені зв'язки між даними вибраних цільових областей зображено на рисунку 9 потовщеними лініями.

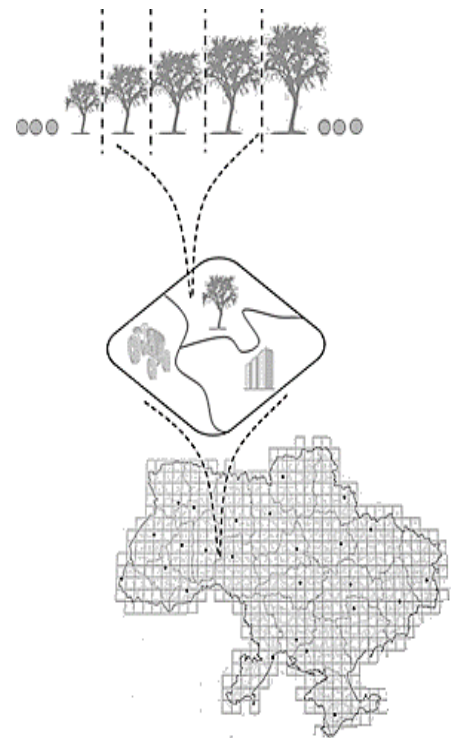


Рисунок 8 – Рівні організації даних технології аналізу процесів землекористування

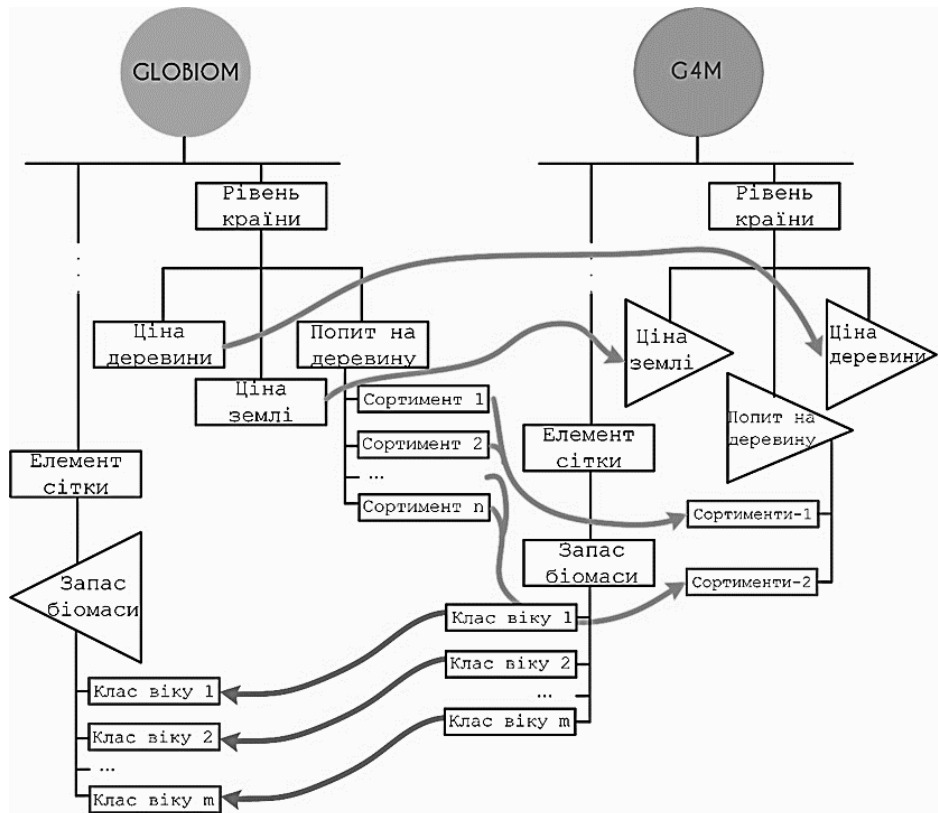


Рисунок 9 – Удосконалена структура зв'язків між моделями-складовими інформаційної технології

Зміни у структуру даних, зокрема впровадження класів віку та розподілу попиту на деревину, досліджуваної інформаційної технології інтегрувалися у декілька етапів:

- 1) Аналіз існуючої структури даних, та розробка оновленої структури.
- 2) Визначення методів моделей, які необхідно змінити або розробити, щоб уможливити використання нових даних;
- 3) Розроблення та удосконалення методів моделей з врахуванням необхідності використання нових даних;
- 4) Внесення змін у структуру даних кожної моделі, забезпечуючи можливість врахування нових даних іншими компонентами моделі;
- 5) Зміна структури вхідних даних для отримання нових даних.

Встановлено, що доповнення зв'язків між моделям-складовими інформаційної технології аналізу процесів землекористування дало змогу застосувати розроблені та удосконалені методи для досліджуваної інформаційної технології.

Для аналізу результатів обчислень за допомогою інформаційної технології аналізу землекористування використано користувацький інтерфейс nViewer, застосовуючи який можна переглядати результати обчислень у формі діаграм, таблиць та карт на рівні країни, а також експортувати наявні дані як текстовий файл або як графічний файл (рисунок 10).



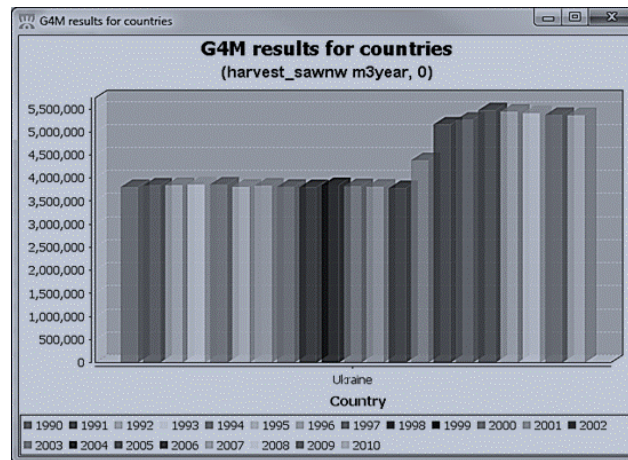


Рисунок 10 – Вигляд діаграми розподілу виробництва деревини по роках у користувацькому інтерфейсі nViewer

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна наукова задача розроблення методів та засобів інформаційної технології аналізу процесів землекористування з використанням імітаційної та рекурсивної моделей для моніторингу емісій вуглекислого газу. В роботі отримано такі наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз відомих інформаційних технологій аналізу землекористування та виділено інформаційні технології, що застосовуються для аналізу впливу можливих управлінських рішень, чи заходів у сфері землекористування на рівень емісій вуглекислого газу.

2. Розроблено метод визначення динаміки зміни вартості лісу з врахуванням віку рубки, у якому на відміну від відомих методів враховано втрату вартості у наступному періоді моделювання і класі віку, що дало можливість розробити метод аналізу процесів лісокористування для рекурсивної моделі;

3. Розроблено метод аналізу процесів лісокористування, використовуючи рекурсивну модель часткової рівноваги GLOBIOM та враховуючи втрати вартості лісу, що забезпечило реалізацію обміну доступними даними про динаміку вікової структури у інформаційній технології аналізу землекористування.

4. Удосконалено метод моделювання процесів заготівлі лісоматеріалів, використовуючи імітаційну модель G4M та враховуючи якість деревини, що забезпечило обмін додатковими даними про попит на деревину у інформаційній технології аналізу землекористування. Застосування удосконаленого методу дозволило уточнити результати на 38-43 %.

5. Удосконалено метод обміну даними між моделями-складовими інформаційної технології аналізу процесів землекористування шляхом доповнення зв'язків між ними, що дозволило застосувати розроблені та удосконалені методи у досліджуваній інформаційній технології. Удосконалено метод опрацювання вхідних даних для

інформаційної технології аналізу землекористування, шляхом прогнозування значень додаткових параметрів, які характеризують управлінські рішення України, що забезпечило можливість аналізу процесів майбутніх періодів.

6. Удосконалена інформаційна технологія аналізу процесів землекористування може бути використана для дослідження впливу управлінських рішень у секторі землекористування на навколишнє середовище та рівень відповідних емісій вуглекислого газу в Україні.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Linear optimization of forest management for dynamic recursive model / Turkovska O., Gusti M., Lauri P. та ін. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – № 5/4(77). –2015. – С. 12-18.
2. Турковська О.В. Алгоритм лісокористування для глобальної геопросторової моделі G4M з врахуванням сортиментної структури / О.В. Турковська, М.І. Густі // Науковий вісник НЛТУ України. – 2015. - №25.5. – С.339-345.
3. Turkovska O.V. A conceptual scheme for modeling forestry and LUC CO2 emissions in Ukraine / Turkovska O.V., Gusti M.I. // Econtechmod. – 2013. – Vol.2, No.1 . – Pp.57-62.
4. Турковська О.В. Подання лісокористування у комп'ютерних моделях еколого-економічних систем / О.В. Турковська // Вісник НУЛП України. Серія «Інформаційні системи та мережі» – 2015. –№814. – С. 156-164.
5. Турковська О.В. Адаптація глобальної комп'ютерної моделі лісу G4M для України / Турковська О.В., Густі М.І. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №5. С. 9-15.
6. Турковська О.В. Оцінювання ефективності політики зменшення викидів CO2 лісами України при різних соціально-економічних сценаріях / О.В. Турковська, І.А. Охремчук, М.І. Густі // Науковий вісник НЛТУ України. – 2015. - №25.4. – С.98-104.
7. Assessing Intended Nationally Determined Contributions to the Paris Climate Agreement – what are the projected global and national emission levels for 2025–2030? / [A. Admiraal, M. den Elzen, N. Forsell, O. Turkovska та ін.]. – The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2015. – 49 с.
8. Turkovska O. Modeling forest CO2 emissions for Ukraine affected by bioenergy and carbon sequestration policies / Turkovska O., Gusti M. Ochremchuk I. // Proceedings of 6th International Academic Conference of Young Scientists “Computer Science and Engineering 2013”. – Lviv: Lviv Polytechnic National University. – 2013. – pp.146-147.

9. Густі М.І. Алгоритм лісокористування для моделі «лісового господарства» в Україні/ М.І. Густі, О.В. Турковська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: IV міжнр. наук.-практ. конф., 28-30 травня 2014р.: тези доповідей. – В., 2014. – С.105-107.
10. Густі М.І. Географічний підхід до моделювання викидів CO<sub>2</sub> у лісовому господарстві та при зміні землекористування в Україні / М.І. Густі О.В. Турковська // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті: III всеукр. наук.-практ. конф., 21 листопада 2012р.: зб. матеріалів. – Л., 2012. – С.79-84.
11. Густі М.І. Застосування інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень щодо пом'якшення глобальної зміни клімату/ М.І. Густі О.В. Турковська // Україна в процесах глобального інформаційного обміну: міжнр. наук.-практ. конф., 26-27 травня 2016р.: зб. матеріалів. – Л., 2016. – С.67-69.
12. Густі М.І. Прогнозування потенціалу зменшення емісій вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін землекористування / М.І. Густі О.В. Турковська // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: IV міжнр. наук.-практ. конф., 26-29 травня 2015р.: праці конференції. – Ч., 2015. – С.126-128.
13. Турковська О.В. Вплив міжнародних зобов'язань у сфері охорони довкілля на формування політики України щодо зміни землекористування та лісового господарства / Турковська О.В., Охремчук І. // Збірник матеріалів 11-ї відкритої наукової конференції Інституту прикладної математики та фундаментальних наук. – Львів: НУ «Львівська політехніка». – 2013. – с. 166-168.
14. Турковська О.В. Інформаційні технології для аналізу емісій CO<sub>2</sub> в лісовому господарстві та при зміні землекористування України / О.В. Турковська, М.І. Густі // 10-та наук. конф. ІМФН НУ «Львівська політехніка», 17-18 травня 2012 р.: зб. матеріалів. – Л., 2012. – С. Н3-Н4.
15. Турковська О.В. Моделювання опцій пом'якшення зміни клімату в глобальних моделях землекористування / О.В. Турковська, М.І. Густі // Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: 2-ий міжнр. конгрес, 19-22 вересня 2012 р.: зб. матеріалів. – Л., 2012. – С. 20.
16. Turkovska O. Forest management in recursive dynamic global partial equilibrium model / Turkovska O. // Proceedings of YSSP Late Summer Workshop 2014. – Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis. – 2014. – p. 37.

## АНОТАЦІЇ

**Турковська О.В. Методи та засоби аналізу процесів землекористування для дослідження емісії вуглекислого газу. – На правах рукопису.**

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

У дисертації вирішена актуальна наукова задача розроблення методів та засобів інформаційної технології аналізу процесів землекористування з використанням імітаційної та рекурсивної моделей для моніторингу емісій вуглекислого газу.

Проведено аналіз відомих інформаційних технологій аналізу землекористування та виділені інформаційні технології, що застосовуються для аналізу впливу можливих управлінських рішень, чи заходів у сфері землекористування на рівень емісій вуглекислого газу. Розроблено метод визначення динаміки зміни вартості лісу з врахуванням віку рубки, у якому на відміну від відомих методів враховано втрату вартості у наступному періоді моделювання і класі віку, що дало можливість розробити метод аналізу процесів лісокористування для рекурсивної моделі. Удосконалено метод аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги шляхом врахування втрат вартості лісу, що забезпечило обмін доступними даними про динаміку вікової структури у інформаційній технології аналізу землекористування. Удосконалено метод обміну даними між моделями-складовими інформаційної технології аналізу процесів землекористування шляхом доповнення зв'язків між ними, що дало змогу застосувати розроблені та вдосконалені методи у досліджуваній інформаційній технології. Метод опрацювання вхідних даних для інформаційної технології аналізу землекористування було удосконалено шляхом прогнозування значень додаткових параметрів, які характеризують досліджувані управлінські рішення України, що забезпечило можливість аналізу процесів майбутніх періодів.

Ключові слова: інформаційна технологія, аналіз землекористування, обмін даними, G4M, GLOBIOM

**Турковська О.В. Методы и средства анализа процессов землепользования для исследования эмиссии углекислого газа. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - Информационные технологии. - Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2017.

В диссертации решена актуальная научная задача разработки методов и средств информационной технологии анализа процессов землепользования с использованием имитационной и рекурсивной моделей для мониторинга эмиссий углекислого газа.

Проведен анализ известных информационных технологий анализа землепользования и выделены информационные технологии, применяемые для анализа влияния возможных управленческих решений, или мероприятий в сфере землепользования на уровень эмиссий углекислого газа. Разработан метод определения динамики изменения стоимости леса с учетом возраста рубки, в

котором в отличие от известных методов учтено потерю стоимости в следующем периоде моделирования в классе возраста, что позволило разработать метод анализа процессов лесопользования для рекурсивной модели. Усовершенствован метод анализа процессов лесопользования с использованием рекурсивной модели частичного равновесия путем учета потерь стоимости леса, обеспечило обмен доступными данными о динамике возрастной структуры в информационной технологии анализа землепользования. Метод обработки входных данных для информационной технологии анализа землепользования была усовершенствована путем прогнозирования значений дополнительных параметров, характеризующих исследуемые управленческие решения Украины, что обеспечило возможность анализа процессов будущих периодов.

Ключевые слова: информационная технология, анализ землепользования, обмен данными, G4M, GLOBIOM

**Turkovska O. Methods and tools for analysis of the land use processes for studying carbon dioxide emissions. – On the right of the manuscript.**

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.06 – Information Technology. – Lviv Polytechnic National University, Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

A relevant scientific task on developing methods and tools for the information technology for analysis of the land use processes applying a simulation model and a recursive model for studying carbon dioxide emissions was resolved.

Numerous information technologies used for land use analysis were studied with the emphasis on technologies which investigate national policies and policymakers decisions on land use sector and the impacts on the sector's carbon dioxide emissions and removals. The conducted research focused on two models: the Global Forest Model (G4M) and the Global Biosphere Management Model (GLOBIOM). The G4M model simulates forest management and land use changes in order to predict how certain policies and policymaker decisions will impact global, regional or country level deforestation and forest growth and, therefore, emissions and removals from the land use sector. GLOBIOM is a recursive, dynamic partial-equilibrium economic model of the competition for land among the major users of land, including the forest sector, agriculture and bioenergy. The model considers the relative profitability the goods and commodities produced at local conditions and prices to maximize the welfare of consumers and producers. When combined as an information technology, the two models to provide a robust and complex understanding of the interconnectivity between climate change and land use sector, as well as its future development. The conducted research focused on improving the two way linkage between the two models, increasing the accuracy of results produced by studied information technology.

Improving two data flow of the linked models – wood demand and forest age class structure, has required the structural changes of the methods and algorithms utilized within the information technology.

Developed approach for modeling forest management is based on changes of forest value over time as well as potential losses of forest value for the subsequent modeling period and forest age class. The introduced approach improves a consideration of future state of forest under recursive model and permits the exchange between two models with data related to forest age class.

The modified approach for modeling the forest management operations in G4M takes into account wood quality characteristics and divides the algorithm of tree felling by demand for the different wood assortments. Introducing the new linkages for wood quality, using additional available data on wood demand value, improved the data exchange processes between the modelling components. The application of the modified approach increased the accuracy of modeled results by 38-43% compared to the results estimated with the general approach.

Socio-economic scenarios which represent policymaking decisions in Ukraine towards bioenergy sector, have been incorporated into the modeling framework as input data to provide the possibility of studying a future of the land use sector with consideration of specific-country policies.

The information technology of land use analysis can be applied as a tool for investigating the impacts of state policies and policymakers' decisions on the land use sector of Ukraine and also on the environment, as well as emissions and removals levels from the land use sector.

Keywords: information technology, land use analysis, data exchange, GLOBIOM, G4M.