

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

Турковська Ольга Володимирівна

УДК 004.94+630

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

05.13.06 – інформаційні технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник – Густі Микола Іванович,
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*

Батюк А.Є.

Львів – 2017

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Розділ. Огляд відомих підходів до аналізу процесів землекористування та відповідних емісій вуглекислого газу	14
1.1 Міжнародні ініціативи стосовно зміни клімату та сектор землекористування .	14
1.2 Роль інформаційних технологій у дослідженні емісій вуглекислого газу.....	16
1.3 Характеристика інформаційних технологій аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування.....	18
1.3.1 Інформаційна технологія на основі моделі EFISCEN	19
1.3.2 Інформаційна технологія на основі моделі GTM	21
1.3.3 Інформаційна технологія на основі об'єднаних моделей G4M та GLOBIOM	23
1.3.3.1 Інформаційна технологія на основі моделі GLOBIOM	24
1.3.3.2 Інформаційна технологія на основі моделі G4M	27
1.4 Переваги та недоліки існуючих інформаційних технологій аналізу процесів землекористування.....	31
1.5 Висновки до Розділу 1	36
2 розділ. Розроблення методів та засобів моделювання процесів лісокористування для інформаційної технології аналізу землекористування.....	37
2.1 Представлення лісокористування в інформаційних технологіях для оцінки емісій вуглекислого газу	37
2.2 Моделювання лісокористування з рекурсивними обмеженнями у інформаційній технології аналізу землекористування.....	39
2.2.1 Представлення лісокористування у рекурсивній моделі GLOBIOM	39
2.2.2 Метод моделювання лісокористування з врахуванням вікової структури та вартості лісу при рекурсивних обмеженнях.....	41
2.2.3 Структура та параметри розробленого методу моделювання лісокористування при рекурсивних обмеженнях	46
2.3 Моделювання процесу лісозаготівлі з врахуванням якості деревини.....	48

2.3.1 Представлення лісокористування у моделі G4M	48
2.3.2 Математична модель процесу лісозаготівлі з врахуванням якості деревини	54
2.3.3 Структура та параметри розробленого методу	55
2.4 Параметри управлінських рішень у інформаційній технології для аналізу землекористування.....	58
2.5 Висновки до Розділу 2	65
3 розділ. Дослідження зміни емісій вуглекислого газу для інформаційної технології аналізу землекористування	66
3.1 Тестування та валідація методу моделювання лісокористування при рекурсивних обмеженнях.....	66
3.1.1 Перевірка методу моделювання лісокористування при рекурсивних обмеженнях.....	66
3.1.2 Тестування функцій втрат лісу при зміні параметрів	70
3.1.3 Валідація результатів обчислень методу з результатами G4M.....	74
3.2 Тестування та валідація методу моделювання лісозаготівлі з врахуванням якості деревини.....	77
3.3 Аналіз емісій вуглекислого газу з використанням інформаційної технології ...	84
3.4 Висновки до Розділу 3	91
4 розділ. Інформаційна технологія аналізу процесів землекористування для моніторингу емісій вуглекислого газу у еколого-економічних системах.....	93
4.1 Структура даних досліджуваної інформаційної технології	93
4.1.1 Структура даних моделі G4M.....	93
4.1.2 Структура даних моделі GLOBIOM	96
4.2 Обмін даними між моделями.....	99
4.2.1 Зв'язок між моделями в межах інформаційної технології аналізу процесів землекористування.....	99
4.2.2 Удосконалення обміну даними між моделями-складовими інформаційної технології	100

4.3 Програмна реалізація інформаційної технології	104
4.3.1 Програмна реалізація удосконаленої моделі G4M	104
4.3.2 Огляд мови програмування GAMS та середовища GAMS IDE	111
4.3.3 Програмна реалізація методу моделювання лісокористування з рекурсивними обмеженнями.....	114
4.4 Висновки до Розділу 4	122
Висновки	124
Список використаних джерел	126
Додатки	138

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

EFISCEN – European Forest Information Scenario Model

G4M – Global Forest Model

GAMS – General Algebraic Modelling System

GEO-5 – 5th Global Environmental Outlook

GLOBIOM – Global Biosphere Management Model

GTM – Global Timber Model

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

ВВП – валовий внутрішній продукт

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії

Гт - гігатони

ЗЗЗЛГ – землекористування, зміни землекористування та лісового господарства

ЛК – лісокористування

ЛП – лінійне програмування

ООН – Організація Об'єднаних Націй

ПГ – парникові гази

ПФК – пиловник та фанерний кряж

РК ЗК ООН – Рамкова конвенція ООН про зміни клімату

CO₂ – двоокис вуглецю (вуглекислий газ)

т у.п. – тони умовного палива

ФАО – Продовольча та сільськогосподарська організація ООН

ЧПВ – чиста поточна вартість

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з секторів, на які спрямовані значні зусилля по скороченню емісій парникових газів, є землекористування. Процеси землекористування та зміни типів землекористування є доволі складними для імплементації заходів щодо боротьби зі зміною 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. Проектування процесів землекористування в рамках інформаційних технологій – це один з можливих інструментів для проведення комплексної оцінки наслідків управлінських рішень для досліджуваного об'єкта.

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. Thahvonen, M. J. Schelhaas, R. Mendelsohn, R. Sedjo, J. E. McDill, G. Amcher, R. Schaldach, J. Alcamo, V. Bellassen, F. Lecocq, S. Cauria, 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 та зміни типів землекористування. Інформаційна технологія 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), які є взаємопов'язаними. Ця інформаційна технологія є інструментом для оцінювання

емісій вуглекислого газу, які виникають внаслідок землекористування, зокрема, вона застосовується в рамках виконання проектів Європейського Союзу щодо боротьби зі зміною клімату, а також її результати використовувались у звіті «Огляд Еліаша», проекті 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 можливо покращити ефективність роботи інформаційної технології, зокрема вдосконаливши методи аналізу та забезпечивши використання нових доступних даних. Розробка та застосування нових методів для інформаційної технології аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування дозволить підвищити ефективність циклічного опрацювання даних, а також точність результатів інформаційної технології 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 роботами, програмами, 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 Між-народному 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 [1] опублікована одноосібно. У наукових працях, автору належать:

[2–4] – дослідження зміни емісії вуглекислого газу внаслідок процесів зміни землекористування з використанням інформаційних технологій; [1,5–7] – аналіз відомих інформаційних технологій та їхніх компонентів для аналізу процесів землекористування та контролювання відповідних емісій; [8,9] – дослідження процесів обміну даними між моделями-складовими інформаційної технології аналізу землекористування та удосконалення зв'язків між ними; [10,11] – розроблення методу аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги, враховуючи динаміку вікової структури та втрат вартості лісу; [12,13] – удосконалення методу моделювання процесів заготівлі лісоматеріалів з використанням базової моделі G4M, враховуючи сортиментну структуру деревостану; [14–16] – 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 ІМФН (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.

В 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.

В 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.

В третьому розділі представлено валідацію та результати розроблених та удосконалених методів для інформаційної технології аналізу процесів землекористування.

В четвертому розділі проаналізовано результати інформаційної технології аналізу землекористування для моніторингу емісій вуглекислого газу з врахуванням розроблених та удосконалених методів, а також представлено програмну реалізацію досліджуваної інформаційної технології.

1 РОЗДІЛ. ОГЛЯД ВІДОМИХ ПІДХОДІВ ДО АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ ТА ВІДПОВІДНИХ ЕМІСІЙ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

1.1 Міжнародні ініціативи стосовно зміни клімату та сектор землекористування

У 2000-му році 193 держави-члени Організації об'єднаних націй (ООН) підписали «Декларацію тисячоліття», в якій визначили вісім цілей розвитку тисячоліття, Однією з яких є забезпечення сталого розвитку навколишнього середовища [17]. Серед причин, які винесли цю проблему на ключові позиції – зникнення лісів у світі з тривожною швидкістю, необхідність збереження захищених територій, зростання викидів парникових газів тощо. Окрім «Декларації тисячоліття», необхідність охорони навколишнього середовища та боротьби зі зміною клімату було неодноразово підтверджено в низці міжнародних ініціатив, таких як: Монреальський протокол про речовини, що виснажують озоновий шар [18], Рамкова конвенція ООН про зміну клімату [19], Кіотський протокол [20], Паризька угода [21] тощо.

Одним з секторів, на які спрямовані значні зусилля для скорочення емісій парникових газів, є землекористування. Сектор землекористування, зміна землекористування та лісове господарство (ЗЗЛГ) є джерелом приблизно 4.3-5.5 Гт CO₂ек глобальних емісій парникових газів [22]. Основну частку емісій з сектору ЗЗЛГ викидається внаслідок процесів знеліснення, а також деградації лісів та згорання біомаси [22]. Знеліснення – це зміна типу землекористування з лісових земель на не лісові землі (наприклад: землі сільськогосподарського призначення) внаслідок діяльності людини [23]. Починаючи з 1850 року, більш ніж 600 мільйонів га лісів та лісових земель по всьому світу перетворено на сільськогосподарські угіддя [24]. Площа лісів на планеті та запаси біомаси постійно зменшуються. За даними звіту

ФАО, площа лісів у 2015 році зменшилась на 129 мільйонів га, при цьому запас біомаси у лісах скоротився на 11 Гт у порівнянні з 1990 роком [25].

Такі тривожні тенденції спричинилися до виникнення низки міжнародних ініціатив, які в тій чи іншій мірі передбачають заходи для вирішення проблем у секторі ЗЗЗЛГ. Зокрема, в рамках підготовки до Паризької угоди (2015) країни-підписанти Рамкової конвенції ООН про зміни клімату (РК ЗК ООН) брали на себе певні зобов'язання стосовно скорочення емісій парникових газів за рахунок різноманітних заходів щодо пом'якшення та адаптації до змін клімату. Кожна країна також визначала, у яких секторах такі заходи будуть проводитись та наскільки потенційно можуть скоротитися емісії. Орієнтовно 136 країн в тій чи іншій мірі зобов'язалися скоротити емісії у секторі ЗЗЗЛГ [2]. За різними оцінками, повне виконання зобов'язань скоротить емісії у 2030 році на 1.1-1.6 Гт CO₂ек у порівнянні з 2010 роком [2].

Україна є учасницею ряду міжнародних ініціатив, які стосуються охорони навколишнього середовища. Це, зокрема, Рамкова Конвенція ООН зі Зміни Клімату, Кіотський Протокол, Рамкова конвенція про охорону та сталий розвиток Карпат, Європейська Ландшафтна Конвенція тощо [3].

У 2010 році була прийнята «Стратегія державної екологічної політики України на період до 2020 року»[26], де затверджено основні цілі та задачі щодо покращення стану навколишнього середовища. Ця стратегія передбачає ряд заходів, що стосуються охорони лісів. Більшість задач, які необхідно вирішити для виконання зобов'язань, пов'язані з лісовою екосистемою і успішність їх виконання залежатиме від рівня оптимальності вибраної політики щодо лісокористування [3].

У програмних документах та законодавчих ініціативах значна увага приділяється енергетичному сектору держави, зокрема розвитку відновлювальної енергетики та використанню альтернативних джерел. Це також відображено у наукових дослідженнях, достатньо велика кількість наукових праць присвячена

дослідженню ролі деревини та деревних відходів як енергоресурсу [27–30] та альтернативі традиційному паливу [29–31].

Низка праць стосовно процесів землекористування та, зокрема, лісокористування присвячена питанням поточного стану галузі, проблемам та перспективам [17–21], також у глобальному контексті розвитку галузі [37,38] проблеми моделювання та дослідження можливих сценаріїв розвитку лісокористування розглядається у [39,40].

Інформаційні технології для інвентаризації емісій парникових газів у всіх економічних секторах України, серед них і землекористування, досліджувалися та розроблялися у працях [41,42].

1.2 Роль інформаційних технологій у дослідженні емісій вуглекислого газу

Скорочення емісій парникових газів є результатом розроблених та відповідно реалізованих стратегій, планів, програм та інших державних ініціатив стосовно цільового сектору. Розробка та реалізація таких ініціатив потребує системного підходу, зокрема у такому секторі як ЗЗЗЛГ, де важливим є баланс між економічними та природоохоронними властивостями.

Задача прийняття рішень стосовно системи, яка пов'язує навколишнє середовище, економіку та соціальні процеси, належить до слабо структурованих проблем. Для вирішення таких проблем застосовується системний аналіз [24, 25]. До методології системного аналізу відносять як якісні, так і кількісні методи. Зокрема до якісних зараховують методи Дельфі, експертних оцінок, побудови сценаріїв, тощо. До кількісних належать методи математичного моделювання, теорії ігор, оптимізації, імітаційного моделювання, тощо [45].

Одним з перших, хто використав системний підхід для прогнозування поведінки складних систем був Дж. Форрестер. Він розробив новий підхід до моделювання складних систем, а саме метод системної динаміки, що об'єднує низку

концептуальних та чисельних методів, які застосовуються для поглиблення розуміння структури та поведінки комплексних систем [46]. У 60-х роках ХХ століття, використовуючи принципи системної динаміки, він розробив так звану модель «світу» [47], яка досліджувала як зміняться темпи зростання населення землі залежно від рівня забрудненості навколишнього середовища, перенаселення планети, наявності продуктів харчування та природних ресурсів [47].

Отже, потреба системно аналізувати та прогнозувати стан навколишнього середовища, питання сталого розвитку та обмеженості природних ресурсів у глобальному масштабі, сприяла широкому застосуванню методів моделювання для вирішення цих проблем [1].

Використовуючи різні методології, дослідники аналізують різні компоненти навколишнього середовища під впливом соціальних, економічних та політичних факторів [48]. Стало можливим спостерігати як досліджувана система реагуватиме на ті чи інші управлінські рішення.

Яким чином можна підвищити шанси на успіх того чи іншого заходу чи стратегії? Важливим етапом для цього є період планування заходу та аналіз його впливу на цільову систему.

Процеси землекористування та зміни типів землекористування є доволі складними для впровадження заходів щодо боротьби зі зміною клімату, що 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 вирішення такого роду задач.

Було розроблено низку інформаційних технологій, які розглядають різні аспекти процесів землекористування та обчислюють відповідні емісії. Одна група таких інформаційних технологій базується на використанні математичних моделей, що відображають процеси росту різних видів рослинності та обчислюють відповідні запасів вуглецю [49–51]; ще одна група інформаційних технологій, базуючись на використанні геоінформаційних систем, акцентує увагу на ландшафтному моделюванні, зокрема як саме змінюється тип землекористування в часі і які чинники на це впливають [52–55], також можна виділити групу інформаційних технологій, які об'єднують використання економетричних моделей для дослідження сектору ЗЗЗЛГ [56–60]. Огляди існуючих інформаційних технологій для аналізу зміни землекористування, приклади їх застосування та основні технічні характеристики також наведено у працях [61–65]. У дисертаційній роботі розглядаються ті інформаційні технології, які розроблені для аналізу можливих результатів управлінських рішень у секторі землекористування та їх впливу на емісії вуглекислого газу.

1.3 Характеристика інформаційних технологій аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування

Проведено огляд інформаційних технологій, які застосовуються як інструмент для аналізу впливу можливих управлінських рішень, чи заходів у сфері землекористування на рівень емісій вуглекислого газу, а також досліджено моделі, які є компонентами досліджуваних інформаційних технологій [1]. Наприклад, EFISCEN та G4M застосовували в рамках проектів Європейської комісії щодо оцінювання можливих управлінських рішень в рамках боротьби зі зміною клімату [66], GLOBIOM та GTM використовували в рамках оцінки заходів програми REDD (Скорочення емісій внаслідок знеліснення та деградації лісів) [67,68].

У деяких розглянутих інформаційних технологіях, лісокористування є одним з модулів, тобто лише одним з компонентів системи, що моделюється, наприклад у GLOBIOM [69], тоді як у інших інформаційних технологіях, для яких лісова екосистема є основним об'єктом моделювання, як наприклад EFISCEN[70] чи GTM [71]. Проте спільним для цих моделей є те, що вони демонструють зміни, які відбуваються з об'єктом моделювання внаслідок реалізації певних управлінських рішень. Таким чином, за допомогою даних інформаційних технологій можна досліджувати, які управлінські заходи будуть ефективними для досягнення поставленої мети.

1.3.1 Інформаційна технологія на основі моделі EFISCEN

EFISCEN (European Forest Information Scenario Model) – це матрична модель, яка відтворює розвиток лісових ресурсів, починаючи від рівня провінції і до загальноєвропейського рівня [26, 28]. Робота над цією моделлю розпочалася у 1992 році в Шведському сільськогосподарському університеті і на теперішній час продовжується у Європейському лісовому інституті у Фінляндії [72].

EFISCEN застосовували для оцінювання стоків вуглецю в лісовій біомасі в рамках проекту Європейської комісії [66].

Властивості досліджуваної моделі наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Основні властивості EFISCEN [1]

Характеристики	EFISCEN
Мета і призначення моделі	Інструмент для оцінки та порівняння розвитку лісових ресурсів під впливом різних соціально-економічних сценаріїв
Рівень моделювання	Від регіонального до загальноєвропейського
Крок моделювання	5 років

Вхідні дані	Попит на деревину, режим лісокористування, площа лісу (га), середня наземна біомаса ($\text{м}^3/\text{га}$), чистий поточний приріст ($\text{м}^3/\text{га}$)
Вихідні дані	Розподіл за віковими класами, розподіл за породами деревини, запас стовбурної деревини, накопичення вуглецю в біомасі та ґрунті
Засоби реалізації	C++

Користувач на основі даних з інших моделей або експертної оцінки визначає режим лісокористування, попит на деревину, рівень заліснення/зnelіснення та ін., і таким чином формує сценарій. Також визначається, так званий, «тип лісу», на основі регіону, типу власності, класу продуктивності і/або породи деревини. Кожен тип лісу та віковий клас представлені площею лісу (га), середньою наземною біомасою ($\text{м}^3/\text{га}$) та поточним приростом ($\text{м}^3/\text{га}$) [1]. Ліс кожного типу розподілений між класами віку та об'єму біомаси. На основі цього створюються початкові матриці програмою P96 (генератор матриць). Після цього, у матричному симуляторі EFISCEN відбуваються переходи між елементами матриці, кожен з яких представляє клас віку лісу або об'єму біомаси. Переходи представляють собою процеси, які відбуваються з лісом: ріст, прорідження, суцільні рубки, природне відмирання і відтворення. Яким чином відбувається перехід, залежить від сценарію, що визначений користувачем. Після проведення переходів, матричний симулятор повертає прогноз щодо об'єму стовбурної біомаси, чистого щорічного приросту біомаси, рубок, розподілу площі між віковими класами, площі лісу та рівня природного відмирання [1]. На основі цих даних можна оцінити стоки вуглецю для деревостану. Для отримання результатів щодо стоків вуглецю в ґрунті, модуль ґрунту використовує дані щодо лісової підстилки, відходів після проведення рубок та природного відмирання [26, 28].

Загальну структуру моделі EFISCEN представлено на рисунку 1.1.

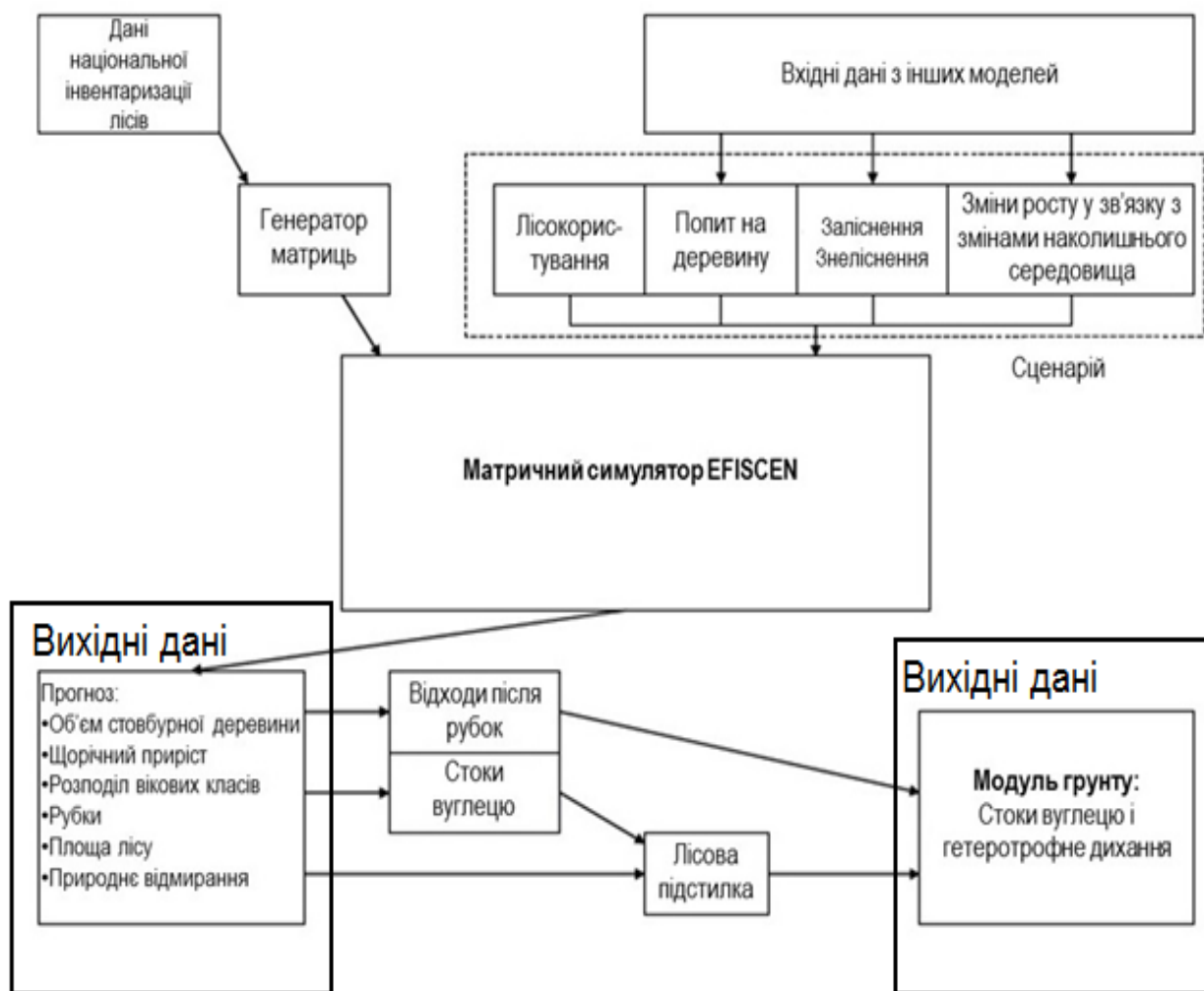


Рисунок 1.1 – Структура моделі EFISCEN [1, 26]

1.3.2 Інформаційна технологія на основі моделі GTM

GTM (Global Timber Model) – глобальна модель динамічної оптимізації, яка максимізує чисту поточну вартість чистого прибутку глобального ринку лісоматеріалів [71]. На початку 90-х, GTM розроблялась як глобальна модель пропозиції лісоматеріалів, але в 1999 була оновлена і адаптована для врахування змін клімату [27, 29].

GTM використовували як одну з економічних моделей щоб оцінити значення скорочення емісій внаслідок знеліснення та деградації лісів у країнах, що

розвиваються [23, 24]. Отже GTM максимізує чистий поточний прибуток глобального ринку лісоматеріалів серед 46 видів екосистем та типів землекористування (Таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 Основні властивості GTM [1]

Характеристики	GTM
Мета і призначення моделі	Економічна модель для аналізу заходів адаптації та пом'якшення зміни клімату, зокрема політики консервації, накопичення вуглецю та оцінки обмінних курсів
Рівень моделювання	Регіональний (13 регіонів)
Крок моделювання	10 років
Вхідні дані	Початкова площа лісів, таксаційні дані лісів
Вихідні дані	Режим рубок, інтенсивність лісокористування, рівень відновлення лісів, площа лісів кожного типу, глобальні ціни на лісоматеріали
Засоби реалізації	GAMS, MINOS solver

Щорічний чистий прибуток ринку визначається як прибуток споживача від продажу лісоматеріалів мінус витрати на їх виробництво та утримання землі [71]. Формально проблема оптимізації визначається таким чином [71]:

$$\text{Max}_{H_i(t), Q_i(t), N_i(t), m_i(t)} \int_0^{\infty} \left\{ \int_0^{Q_i(t)} \{D[Q(H_1(t) \dots H_I(t)), Z(t)] - C_H(Q(\bullet))\} dQ(t) - \sum_i C_i^G [G_i, m_i(t)] - \sum_{i \in \text{emerg}} C_i^N (N_i(t)) - \sum_i R_i(X_i(t)) \right\} e^{-rt} dt$$

де $D[Q(H_1(t) \dots H_I(t)), Z(t)]$ – глобальна функція попиту на лісоматеріали з $H_i(t)$

– вирубаній площі лісу i -ї породи деревостану, що дає прибуток $Z(t)$;

$C_H(Q(\bullet))$ – витрати на доступ, вирубку та транспортування деревини до ринків збуту;

$C_i^G[G_i(t) m_i(t)]$ – кошти необхідні, щоб засадити $G_i(t)$ гектарів землі для кожної i -ї породи деревини, що також залежать від інтенсивності лісокористування $m_i(t)$;

$C_i^N(N_i(t))$ – витрати на створення $N_i(t)$ нових насаджень в високопродуктивних плантаціях у субтропічних регіонах. Позначення *emerg* використано, щоб виокремити типи деревних порід в аналізованому регіоні;

$R_i(x_i(t))$ – витрати на оренду землі, пов'язані з утриманням землі для кожної породи деревини.

GTM на десятирічному інтервалі t прогнозує рівень рубок $H_i(t)$, площу відновлення лісу $G_i(t)$ або площу нового насадження $N_i(t)$, а також інтенсивність лісокористування $m_i(t)$ для кожного типу деревини [27, 29].

1.3.3 Інформаційна технологія на основі об'єднаних моделей G4M та GLOBIOM

Глобальна модель лісу G4M (Global Forest Model – глобальна модель лісу) [4], об'єднана з глобальною економічною моделлю біосфери GLOBIOM (Global Biosphere Management Model – глобальна модель управління біосферою) [3], використовуються для підтримки прийняття рішень щодо зменшення емісій ПГ на міждержавному рівні (наприклад, [1], [8], [2]) (рисунок 1.2).

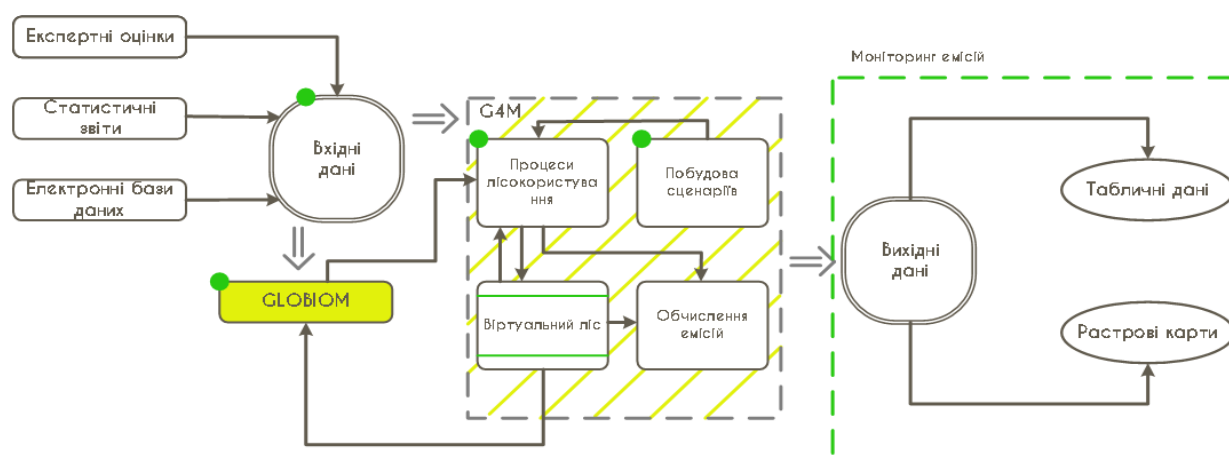


Рисунок 1.2 – Інформаційна модель досліджуваної технології

1.3.3.1 Інформаційна технологія на основі моделі GLOBIOM

GLOBIOM (Global Biosphere Management Model) – глобальна рекурсивна модель часткової рівноваги, яка відображає конкуренцію за землю між різними типами землекористування під впливом зміни цін та продуктивності (Таблиця 1.3) [69]. Модель була розроблена і використовується у Міжнародному інституті прикладного системного аналізу (Австрія) [25, 35].

Таблиця 1.3 Основні характеристики GLOBIOM [1]

Властивості	Характеристика властивостей GLOBIOM
Мета і призначення моделі	Модель об'єднує лісове та сільське господарство, а також біоенергетику, щоб забезпечити аналіз глобальних питань стосовно конкуренції за землю між основними економічними секторами, чиє виробництво залежить від землі
Рівень моделювання	Від географічної сітки розміром $0.5 \times 0.5^\circ$ до регіонального
Крок моделювання	10 років
Вхідні дані	Геопросторові дані щодо ґрунту, погодних умов, топографії, початкова площа земель кожного типу, середній приріст біомаси, обсяг стовбурної деревини, населення та ВВП
Вихідні дані	Виробництво та споживання по кожному типу землекористування, а також водойми, торгівельні потоки, ціни на товари
Засоби реалізації	GAMS

GLOBIOM використовували як одну з моделей при оцінюванні ефективності заходів для скорочення емісій внаслідок знеліснення та деградації лісів у країнах, що розвиваються [23, 24], а також у огляді існуючих заходів щодо боротьби зі зміною клімату Нідерландського агентства оцінки навколишнього середовища [75].

Рівновага глобальних ринків лісоматеріалів та сільськогосподарської продукції визначається вибором землекористування та проведенням заходів, які максимізують суму прибутків користувача та споживача [69]. Світ поділено на 30 регіонів, які можуть виробляти, споживати і торгувати кінцевими продуктами сільськогосподарського та лісогосподарського секторів на ідеальних конкурентних ринках [74].

У моделі виділяють шість типів землекористування:

- ліси, які не перебувають в експлуатації;
- експлуатаційні ліси;
- плантації швидкоростучих деревних порід;
- орні землі;
- пасовища;
- інша природна рослинність.

Зміна землекористування відбувається на кожному кроці моделювання. На рисунку 1.3 показано, як може змінитися тип землекористування у межах одного кроку моделювання. Наприклад, експлуатаційні ліси можуть перейти в категорію лісів, що не експлуатуються. Проте, експлуатаційні ліси не можуть протягом одного періоду стати орними землями, для цього вони повинні спочатку вийти з експлуатації. GLOBIOM моделює виробництво продуктів тваринництва, енергоресурсів з біомаси і лісоматеріалів, а також вирощування сільськогосподарських продуктів. Враховуючи при цьому забезпечення водними ресурсами, а також обмеження щодо наявності первинних ресурсів та можливості міжрегіональних торгових потоків [69].

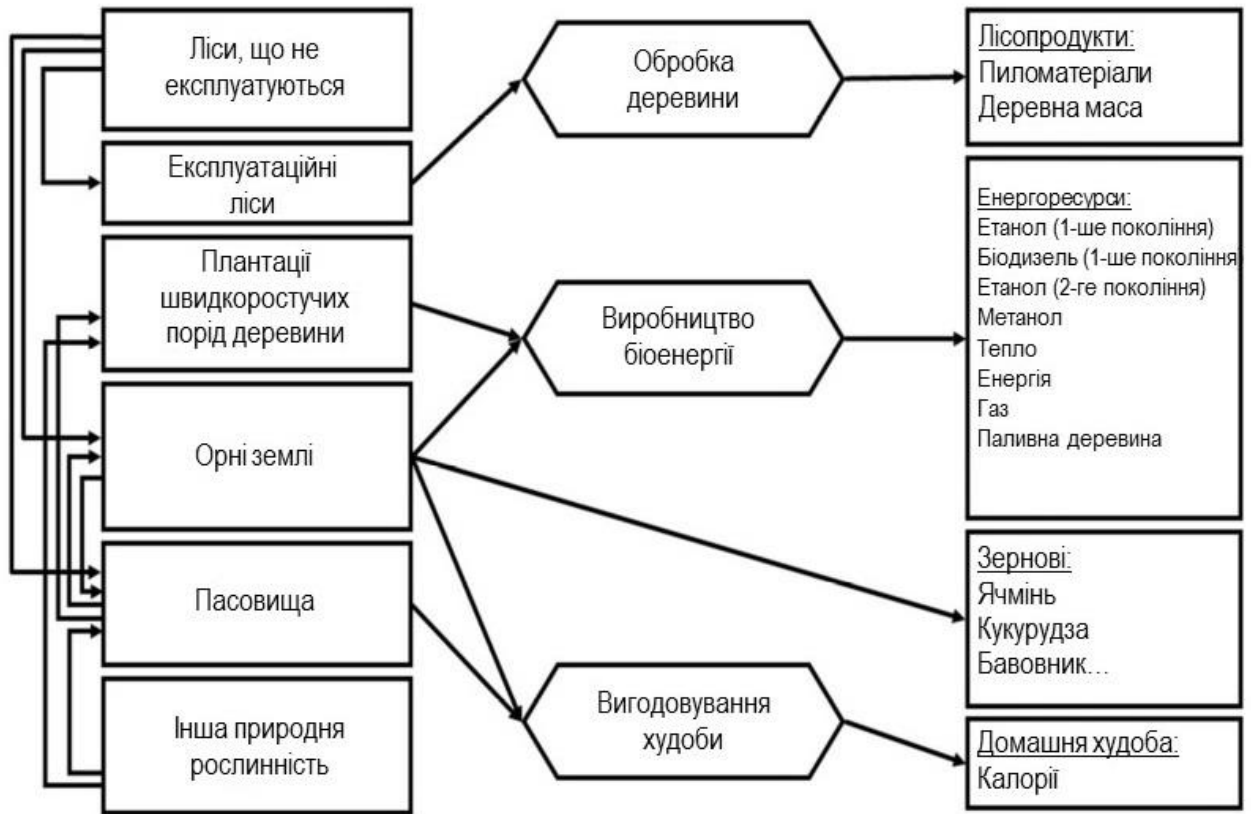


Рисунок 1.3 – Типи землекористування та структура товарів у GLOBIOM [1, 25]

У випадку зернових культур, щоб отримати кінцевий продукт не потрібно моделювати процес отримання проміжного продукту, на відміну від сектору лісового господарства чи виробництва біоенергії. У цих секторах, спочатку моделюються рубки лісу, а після цього отримані первинні продукти вже переробляються у кінцеві, з урахуванням витрат на переробку [74].

Для представлення лісогосподарського сектору GLOBIOM тісно взаємодіє з G4M [76], використовуючи оцінку середнього річного приросту біомаси та обсяги стовбурної деревини на рівні елемента сітки (розмір елемента сітки – $0.5 \times 0.5^\circ$). Ліси поділено на такі, що експлуатуються та не експлуатуються. Рубки проводяться тільки в експлуатаційних лісах. Обсяг та місце вирубок визначаються так щоб мінімізувати витрати на проведення рубок та лісовідновлення, при цьому враховуючи умови сталого лісокористування. Припускається, що площа лісу є нормально розподілена

між класами віку, це означає що приріст деревини залишатиметься сталим протягом всього часу моделювання і власник лісу може розраховувати на стабільний об'єм деревини доступної для рубок [74].

1.3.3.2 Інформаційна технологія на основі моделі G4M

G4M (Global Forest Model) – глобальна географічно розподілена модель, що прогнозує темпи заліснення та знеліснення, режими лісокористування та емісії двоокису вуглецю, а також реакцію цих критеріїв на заходи з адаптації та пом'якшення зміни клімату, у вигляді податку на вуглець чи заохочувальних виплат [76] (Таблиця 1.4).

Таблиця 1.4 Основні характеристики G4M [1]

Характеристики	G4M
Мета і призначення моделі	Модель використовується для оцінювання заходів у рамках існуючих переговорів стосовно секторів сільського та лісового господарства й інших типів землекористування, у рамках заходів REDD та пост-Кіотської кліматичної угоди
Рівень моделювання	Від географічної сітки розміром 50 × 50 км до регіонального
Крок моделювання	1 рік
Вхідні дані	Чиста поточна продукція, площа лісу та інших типів землекористування, вартість землі, ціна деревини та вуглецю, попит на деревину
Вихідні дані	Режим лісокористування, емісії вуглецю, рівні заліснення та знеліснення, об'єм біомаси, приріст біомаси

Засоби реалізації	C++
-------------------	-----

Модель було розроблено в Міжнародному інституті прикладного системного аналізу (Австрія), початково як інтегральну динамічну модель лісового господарства та інших типів землекористування [73], але з часом її було оновлено і перейменовано на G4M [73].

G4M застосовували, як інструмент для аналізу стану лісів у декількох кліматичних проектах та аналітичних оглядах, в тому числі Eliasch review [77], проект Всесвітнього фонду дикої природи «Живі ліси» [78], дослідженнях Світового Банку [79] та огляді існуючих заходів щодо боротьби зі зміною клімату Нідерландського агентства оцінки навколишнього середовища [75].

G4M тематично складається з п'яти модулів – «Віртуальний ліс», «Ініціалізація лісу», «Лісокористування», «Зміна землекористування» та «Динаміка лісу».

У модулі «Віртуальний ліс» на основі вхідних параметрів та функції ходу росту лісів, а також враховуючи локальні особливості природних умов, обчислюється повнота деревостану, час рубки, втрати при рубках, інтенсивність прорідження та визначається вікова структура лісу. Частина вхідних даних моделі, а саме попит на деревину, ціни на деревину та вартість землі отримується з моделі GLOBIOM [69]. Ціна на землю, а також вартість деревини є агрегованими для 50-ти регіонів, а попит на деревину визначається на рівні країни [1].

Модуль «Ініціалізація лісу» запускається лише один раз і якщо відповідно до вхідних даних в елементі сітки є ліс, то він ініціалізується у даному елементі сітки. Ініціалізація означає присвоєння біо-фізичних параметрів лісу елемента сітки (середній приріст, повнота деревостану, діаметр, висота та ін.), обчислених за допомогою модуля «Віртуальний ліс». Модуль «Лісокористування» сортує елементи сітки за продуктивністю лісу та густиною населення. Суцільні рубки відбуваються у першу чергу в найпродуктивніших лісах та з високою густиною населення. Таким

чином уникають проведення рубок у важкодоступних місцях та в неексплуатаційних лісах, оскільки у них низька продуктивність і вони ростуть віддалено від населених пунктів. Частина лісу, який вирубується у елементі сітки регулюється віком рубки [80].

Схему ітерації моделі представлено наступним чином (Рисунок 1.4).

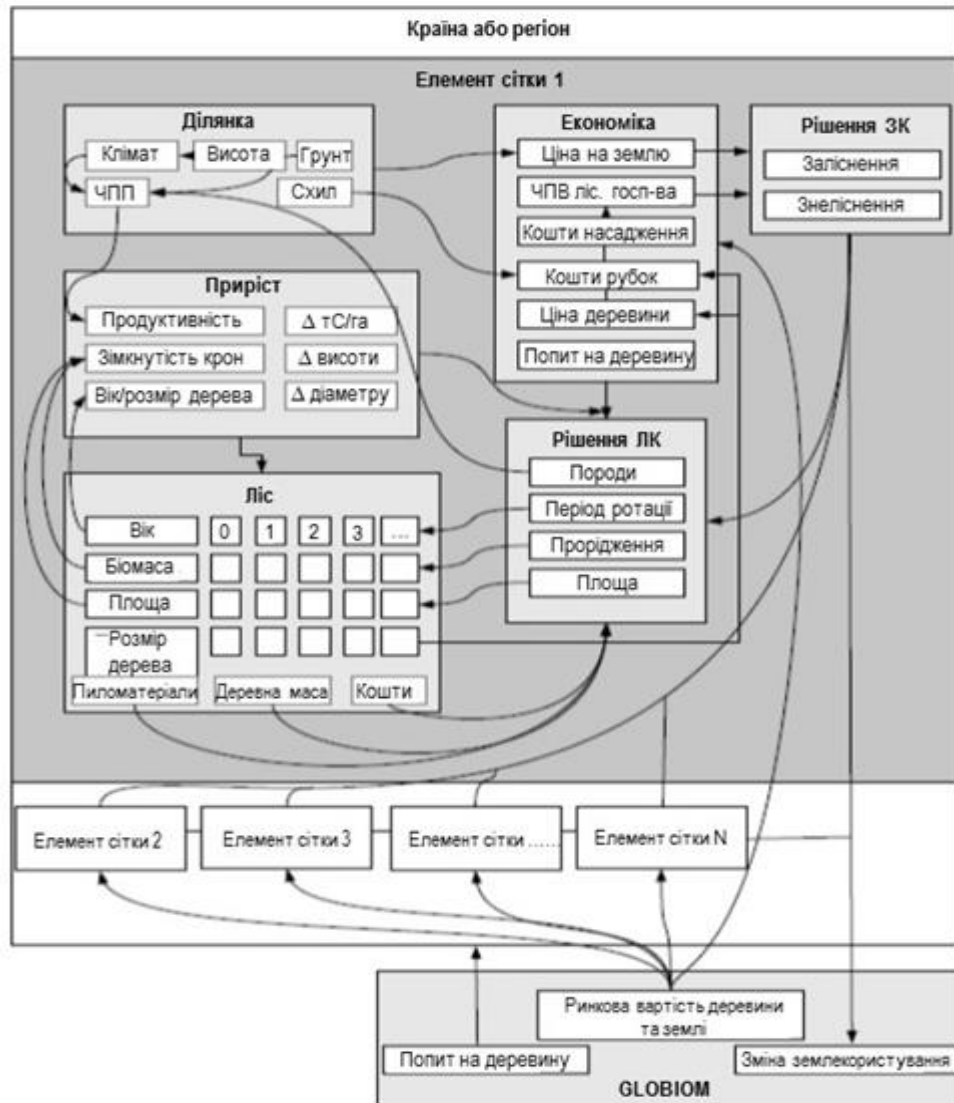


Рисунок 1.4 – Процеси моделювання G4M [1,76]

У модулі «Зміна землекористування» для кожного елемента сітки моделюють прийняття рішення щодо зміни землекористування. Прийняття рішень моделюється через порівняння чистих поточних вартостей лісового та сільського господарств. Коли відомо обсяги рубок, знеліснення та заліснення, обчислюють емісії двоокису вуглецю

для кожного з процесів, а також для ґрунту, лісової підстилки та наземної біомаси. Наступним кроком у модулі «Динаміка лісу», для кожного елемента сітки оновлюється площа лісу, об'єм біомаси, вік, враховуючи зміни, які відбулися. Після оновлення починається наступна ітерація [76].

Встановлено, що інформаційна технологія аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування, яка базується на використанні рекурсивної моделі часткової рівноваги GLOBIOM та імітаційної моделі G4M (рисунок 1.5), найкраще дозволяє оцінити вплив управлінських заходів на емісії вуглекислого газу внаслідок процесів землекористування.

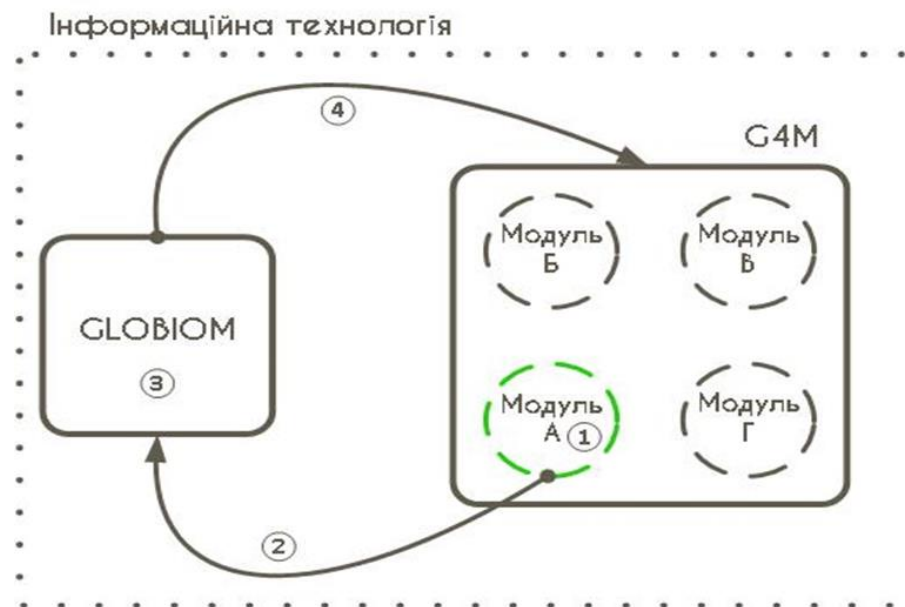


Рисунок 1.5 – Послідовність роботи моделей-складових досліджуваної інформаційної технології та обміну даними між ними

Алгоритм роботи досліджуваної інформаційної технології представлено наступними кроками:

1. Обчислення параметрів у модулі віртуального лісу моделі G4M, необхідних для ініціалізації моделі GLOBIOM;
2. Визначення оптимальних значень для попиту на деревину та ціни у моделі GLOBIOM, враховуючи дані отримані від G4M;

3. Розробка сценаріїв соціально-економічного розвитку та визначення їх чисельних характеристик;
4. Обчислення емісій вуглекислого газу внаслідок процесів землекористування у моделі G4M;
5. Подальший аналіз результатів та моніторинг рівня емісій вуглекислого газу.

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

1.4 Переваги та недоліки існуючих інформаційних технологій аналізу процесів землекористування

Порівняльний аналіз переваг та недоліків моделей наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 Порівняння можливостей розглянутих інформаційних технологій [1]

Переваги	Недоліки
<i>Модель: EFISCEN</i>	
1) якісні вхідні дані та реалістичне відтворення процесів росту, відмирання та відновлення лісу забезпечує високу точність результатів моделювання; 2) моделювання при різних сценаріях дає можливість прослідкувати як різні режими лісокористування впливають на лісові ресурси;	1) вузька спеціалізація моделі (фокусування тільки на лісокористуванні) не дає можливості явно простежити як зміниться ліс та режими лісокористування під впливом економічних механізмів, наприклад, податку на вуглець;

<p>3) матричний підхід є особливо зручним для моделювання одновікових деревостану, які знаходяться в експлуатації;</p> <p>4) результати моделювання біофізичних характеристик лісу можуть використовуватися як вхідні дані іншими інформаційними технологіями для подальшого опрацювання.</p>	<p>2) у процесі моделювання режим лісокористування залишається незмінним, тобто модель не може перевірити чи обораний користувачем режим є оптимальним для даних умов;</p> <p>3) матричний підхід є менш надійним для моделювання різновікового деревостану та лісів, які не експлуатуються.</p>
<p>Модель: GTM</p>	
<p>1) результати моделювання щодо цін на лісоматеріали можуть бути використані іншими інформаційними технологіями;</p> <p>2) модель детально відображає економічні процеси, які відбуваються у лісовому секторі та взаємодію між регіонами.</p>	<p>1) у зв'язку з довгим кроком моделювання (10 років), точність оцінки наявної стовбурної біомаси для рубок знижуватиметься після кожного кроку;</p> <p>2) GTM прогнозує режими лісокористування та ціни на лісоматеріали на 200 років вперед, що коректно для оцінки ефекту кліматичних факторів (який проявляється повільно), але реалістичність прогнозу цін на такому проміжку є сумнівною;</p> <p>3) на основі доступних джерел інформації про GTM, не можливо зробити висновок про</p>

	<p>реалістичність моделювання біофізичних процесів лісу та оцінки стовбурної деревини.</p>
<p>Модель: G4M</p>	
<p>1) моделювання прорідження, суцільних рубок та зміни землекористування з кроком 1 рік, дає можливість точніше відстежити, які зміни площі, об'єму біомаси та вікової структури відбуваються внаслідок цих процесів;</p> <p>2) в залежності від досліджуваних процесів, користувач може задавати крок моделювання від 1 до 10 років;</p> <p>3) обчислення відходів деревини після рубок дає можливість оцінити потенціал використання енергії біомаси з відходів деревини;</p> <p>4) короткий крок моделювання і детальне представлення біофізичних процесів лісу дає можливість оцінити потенціал плантацій швидкоростучих порід</p>	<p>1) існуючий механізм визначення режиму та інтенсивності лісокористування за допомогою сортування по продуктивності та густоті населення визначає не оптимальний режим лісокористування, а лише наближений до нього;</p> <p>2) відсутність диференціації між попитом на основні типи деревини, призводить до зміщення рубок в інші вікові класи, що в свою чергу знижує достовірність даних по розподілу площі між віковими класами;</p> <p>3) теперішня версія моделі не враховує витрат на вирубку та прорідження лісу, що могло б удосконалити алгоритм визначення режиму лісокористування.</p>

<p>для виробництва біоенергії з деревини.</p>	
<p><i>Модель: GLOBIOM</i></p>	
<p>1) сильна економічна складова GLOBIOM дає можливість оцінити, який економічний ефект матимуть певні управлінські рішення у рамках боротьби зі зміною клімату;</p> <p>2) моделювання суміжних економічних секторів дає змогу детально дослідити як зміни в одному з них впливатимуть на інші сектори, що уможлиблює проведення комплексного аналізу наслідків певних управлінських рішень;</p> <p>3) GLOBIOM враховує величезну кількість параметрів, частина з них моделюється у GLOBIOM, а інша частина обчислюється за допомогою більш вузькоспеціалізованих моделей, що дає можливість GLOBIOM сконцентруватись на оптимізації і використовувати для неї достовірні дані.</p>	<p>1) спрощене представлення лісу та лісокористування зменшує точність оцінки наземної біомаси, а разом з тим і оцінки стоків вуглецю;</p> <p>2) процес заліснення не є явно представленим у моделі, не враховано, що пасовища, які не використовуються, та землі з іншою природною рослинністю, якщо знаходяться поруч з лісом, з часом можуть зарости;</p> <p>3) рекурсивна оптимізаційна модель обмежує представлення динаміки лісу, а також врахування майбутнього при поточному плануванні лісокористування.</p>

На основі проведеного аналізу переваг та недоліків розглянутих інформаційних технологій, виділено наступні тези:

- частина інформаційних технологій, у більшій чи меншій мірі, фокусується на представленні лісового сектору, при цьому вони використовують абсолютно різні підходи, як от G4M та EFISCEN;
- інша група інформаційних технологій фокусується на представленні економічної складової лісового сектору, наприклад GTM;
- інформаційні технології з використанням економічних моделей рівноваги чи часткової рівноваги, представляють лісокористування як один з економічних секторів, моделюючи з різною детальністю процеси лісокористування, наприклад GLOBIOM;
- жодна з інформаційних технологій не є повністю самодостатньою, щоб представити всі компоненти навколишнього середовища з однаковою детальністю, інформаційні технології взаємодіють між собою, щоб отримати дані, які вони не можуть обчислити самостійно;
- сценарії задають у інформаційних технологіях різними параметрами, наприклад у EFISCEN це режим лісокористування, а в GLOBIOM це внутрішній валовий продукт та щільність розміщення населення;
- деякі інформаційні технології (GTM, GLOBIOM) є достатньо точними, щоб описати взаємодію між великими регіонами світу, але недостатньо точними, щоб спрогнозувати обсяг стовбурної біомаси через певний проміжок часу, і навпаки;
- чим довшим є часовий проміжок моделювання, тим менш точним стає економічний прогноз моделі.

Отже, для оцінювання наслідків певного рішення щодо пом'якшення чи адаптації до змін клімату використання лише однієї інформаційної технології не дозволяє бути впевненим у точності результатів. Найкращим способом є

використання інформаційної технології, на основі моделей, які представляють різні аспекти сектору ЗЗЗЛГ та можуть взаємодіяти між собою чи обмінюватися даними.

1.5 Висновки до Розділу 1

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.

Проведено огляд відомих інформаційних технологій аналізу процесів землекористування. Представлено структурні схеми, а також описано структури даних та взаємозв'язки між ними, досліджувані процеси землекористування та принцип роботи розглянутих інформаційних технологій.

Визначено переваги та недоліки досліджуваних інформаційних технологій аналізу землекористування та встановлено, що інформаційна технологія на основі рекурсивної та імітаційної моделей застосовує системний підхід до представлення сектору землекористування. Проте, дані, які отримується у результаті роботи кожної моделі, можна розширити, що дозволить покращити адекватність представлення землекористування та дасть змогу уточнити деякі результати інформаційної технології.

2 РОЗДІЛ. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛІСОКОРИСТУВАННЯ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ

2.1 Представлення лісокористування в інформаційних технологіях для оцінки емісій вуглекислого газу

У загальному випадку модель лісокористування поєднує в собі економічну модель прийняття рішень стосовно лісокористування та екологічну модель росту лісу. Такі моделі відтворюють дії власника лісу, потенціал зростання лісового господарства та реакцію лісу на різні процеси протягом тривалого часу, використовуючи математичне програмування, евристичні методи та інші методи моделювання [10].

Математичні моделі росту лісу можна розділити на два класи. Традиційні емпіричні (або статистичні) моделі росту ґрунтуються на функціях росту лісу та таблицях ходу росту лісу, які створюються на основі історичних даних інвентаризації лісів [81]. На практиці, дані лісовпорядкування не завжди доступні, оскільки збір даних інвентаризації лісів вимагає багато часу і фінансових затрат. Альтернативним підходом до моделі лісової динаміки є моделювання процесів (або механістичні моделі), де зростання деревної біомаси моделюється в залежності від фізичного процесу, наприклад, фотосинтезу, дихання, випромінювання та концентрації CO₂ [82]. Перевага моделей росту на основі моделювання процесів полягає в тому, що вони базуються на доступних для всіх частин світу даних оцінки чистої первинної продукції. Недоліком підходу моделювання процесів є менша точність у порівнянні з емпіричними моделями [10].

Просторовий масштаб у моделях лісокористування коливається від рівня деревостану і навіть дерева до рівня ландшафту. Моделі лісокористування на рівні деревостану дозволяють визначати оптимальний час для вирубки деревостану чи одного дерева. Зазвичай, передбачається, що деревостан складається з одновікових

дерев (модель оптимального віку рубки). Існують також моделі, які враховують гетерогенні деревостани з змішаними породами або різновіковий ліс (моделі одного дерева). У моделях лісокористування на рівні ландшафту визначають, як певна площа землі розподіляється між декількома деревостанами. Класичним рішенням лісокористування для декількох деревостанів є нормальний ліс [83]. Нормальний ліс – це стан рівноваги, у якому площа лісу розподілена рівномірно серед однорідних насаджень різних вікових класів. У кожному періоді найстаріший деревостан вирубують і садять дерева, які займають наймолодший віковий клас. Нормальний ліс є бажаним станом лісу, оскільки він забезпечує постійний стабільний урожай протягом тривалого часу [10].

Георосторово розподілені моделі лісокористування на рівні ландшафту, як правило оперують великою кількістю даних стосовно площі деревостану у різних вікових класах, тобто є складними моделями. Розмірність динамічних задач оптимізації зростає пропорційно площі країни, тому, як правило, це створює серйозну проблему для знаходження розв'язку задачі [10]. Традиційним способом подолати проблему великої розмірності є використання рекурсивної оптимізації (recursive optimization) замість міжчасової оптимізації (intertemporal optimization). У випадку рекурсивної оптимізації, оптимізуються значення функції для одного часового періоду, враховуючи розв'язок попереднього періоду. Тоді як, у випадку міжчасової оптимізації, значення функції оптимізуються для всіх часових періодів одночасно. Рекурсивна оптимізація встановлює деякі обмеження щодо моделювання, оскільки в рекурсивній моделі, прийняті рішення є недалекоглядними і не враховують майбутніх станів об'єкта моделювання [84]. Тим не менше, при застосуванні рекурсивної оптимізації тривалість обчислення є коротшою ніж при застосуванні міжчасової оптимізації.

Лінійне програмування є найбільш поширеним і традиційним методом пошуку оптимальних рішень для лісового сектора [85]. Лінійне програмування може

ефективно вирішувати складні задачі оптимізації, які могли б бути чисельно нерозв'язуваними у випадку використання інших методів.

Моделювання лісокористування можна охарактеризувати як задачу оптимізації, тому що власник лісу шукає краще рішення для користування ділянкою лісу, забезпечуючи сприятливі умови для вирощування лісу і збору врожаю [10]. Спосіб ЛК залежить від мети, яку власник лісу бажає досягнути. Загалом метою сталого лісокористування можна вважати компроміс між інтенсифікацією лісозаготівель та поглинання вуглекислого газу [10].

Лісокористування значною мірою відрізняється від управління сільським господарством. Загалом у сільському господарстві цикл користування триває один рік. Лісокористування вимагає більш складного планування. Режим рубок повинен враховувати майбутній приріст запасу лісу та екологічні критерії, щоб зберегти ліс в рамках сталого розвитку протягом тривалого часу.

Загалом метод лінійного програмування застосовується для моделювання лісокористування, у випадку коли кількість часових періодів у математичній моделі є відомою і оптимізація є міжчасовою [85]. Цей підхід не застосовують для розв'язку динамічних рекурсивних моделей, де кожен з часових періодів є окремою задачею оптимізації і результати моделювання в поточному періоді враховуються у наступному.

2.2 Моделювання лісокористування з рекурсивними обмеженнями у інформаційній технології аналізу землекористування

2.2.1 Представлення лісокористування у рекурсивній моделі GLOBIOM

Ліс у GLOBIOM представлений у двох типах: експлуатаційні ліси та ліси, що не експлуатуються. Рубки відбуваються тільки в експлуатаційних лісах, а ліси, що не експлуатуються розглядається як резерв. В моделі виділено декілька видів первинних продуктів, які можна отримати після проведення рубок в експлуатаційних лісах, а

саме: пиловник, деревна маса, інша промислова деревина, дрова та деревина для виробництва енергії біомаси. Середній щорічний приріст та запас стовбурної біомаси є сталими в часі, що ігнорує динаміку вікових класів лісу. Початково, модель використовує площу вирубаного лісу для регулювання обсягів лісозаготівель [74].

Лісовий сектор GLOBIOM тісно пов'язаний з глобальною геопросторовою моделлю лісу (G4M). G4M [76,80,86] забезпечує GLOBIOM інформацією про середній приріст, запас стовбурної деревини, частку біомаси, придатної для виробництва пиломатеріалів. У свою чергу деякі результати обчислень GLOBIOM, використовуються у G4M, зокрема дані стосовно прогнозу цін на деревину та землю, вартість продуктів сільського господарства товари цін проєкцій і попиту на лісову біомасу по типу. Сектор лісокористування, хоча він і є одним з об'єктів моделювання у GLOBIOM, представлений спрощено у порівнянні з G4M. Для зручності представлення та розробки нового методу, сектор лісокористування GLOBIOM було виділено як окрему математичну модель. Цільова функція якої виглядає наступним чином:

$$FR_p(SH_{pc}) = \sum_{c=1}^m (SH_{pc} \times (P \times B_c - HC - PC)) \rightarrow \max \quad (2.1)$$

де $FR_p(SH_{pc})$ – функція, що максимізує знаходження прибутку власника лісу в залежності від площі вирубаного лісу (\$/га);

p – період моделювання (роки);

c – ідентифікатор елемента сітки;

SH_{pc} – площа вирубаного лісу (га);

P – ціна деревини на продаж (\$/м³);

B_c – запас стовбурної біомаси (м³/га);

HC – витрати на проведення лісозаготівлі (\$/га);

PC – витрати на посадку нових дерев (\$/га).

Система обмежень виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned}
 \sum_{c=1}^m (SH_{pc} \times B_c) &\geq D_p, \\
 \sum_{c=1}^m (SH_{pc} \times B_c) &\leq D_p \times k, \\
 SH_{pc} \times B_c &\leq SF_{pc} \times B_c, \\
 SH_{pc} &\geq 0.
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

де D_p – попит на деревину протягом певного періоду моделювання (m^3);

k – коефіцієнт обмеження попиту;

SF_{pc} – площа експлуатаційних лісів (га).

Вищенаведені нерівності визначають, що обсяг лісозаготівлі на рівні країни не повинен бути меншим, ніж попит на деревину на рівні країни у відповідному періоді моделювання, при цьому межа перевищення попиту визначається коефіцієнтом k . У кожному періоді моделювання обсяг лісозаготівлі у кожному елементі сітки не може перевищувати наявний обсяг стовбурної біомаси у відповідному елементі сітки. Площа вирубаного деревини у кожному елементі сітки не може бути від'ємною.

2.2.2 Метод моделювання лісокористування з врахуванням вікової структури та вартості лісу при рекурсивних обмеженнях

Метод аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги GLOBIOM базується на математичній моделі вартості лісу, яка більш детально описана у McDill [87] та Buonjorno [85]. Дана математична модель адаптована до структури даних досліджуваної інформаційної технології та має наступний вигляд:

$$FV(t)_{ca} = \frac{B_{ca} \times P - HC}{(1 + r)^t} + \frac{LEV_{pc}}{(1 + r)^t}
 \tag{2.3}$$

де $FV(t)_{ca}$ – функція вартості лісу, яка залежить від часу t (\$/га);

c – ідентифікатор елемента сітки;

a – ідентифікатор класу віку;

B_{ca} – обсяг стовбурної біомаси доступної для лісозаготівлі ($\text{м}^3/\text{га}$);

P – ціна 1 м^3 деревини на продаж ($\$/\text{м}^3$);

HC – витрати на заготівлю 1 га лісу ($\$/\text{га}$);

r – коефіцієнт дисконтування;

LEV_{pc} – очікувана вартість землі ($\$/\text{га}$).

Концепція вартості лісу є зручною для визначення періоду рубки лісу [87]. Порівняння вартостей лісу між поточним періодом та наступним допомагає прийняти рішення стосовно кращого періоду для рубки лісу. Цей підхід є важливим для моделі, тому що дозволяє запобігти рубкам у поточному періоді моделювання для того, щоб зробити це у більш вигідний період. Ми припускаємо, що ціни на деревину і витрати на лісозаготівлю залишаються незмінними протягом тривалого часу. Таким чином, можна оцінити вартість лісу для кожного періоду моделювання до початку оптимізації [10].

Концепція очікуваної вартості землі використовується для визначення вартості землі з певним режимом лісокористування та віку рубок, при якому прибуток від постійних періодичних рубок є максимальним [87]. У моделі це також визначає спосіб лісокористування, який принесе найвищий прибуток в існуючих умовах:

$$LEV_{tc} = -PC + \frac{B_{ca} \times P - HC}{(1 + r)^{RT_c}} \quad (2.4)$$

де LEV_{tc} – очікувана вартість землі у час t (\$/га);

PC – витрати на посадку 1 га лісу (\$/га);

B_{ca} – обсяг стовбурної біомаси доступної для лісозаготівлі у віці a (м^3);

P – ціна 1 м^3 деревини на продаж ($\$/\text{м}^3$);

HC – витрати на заготівлю 1 га лісу (\$/га);

r – коефіцієнт дисконтування;

RT_c – вік рубки в елементі сітки c .

Кожен клас віку розглядається в якості окремого деревостану. Ми припускаємо, що перший період моделювання є початковою точкою часу, коли власник лісу приймає рішення щодо періоду рубки лісу. Деревостан може бути вирубаний в поточному періоді моделювання або рубки можуть бути відкладені. Отже $T = 0$ для першого періоду моделювання і зростає на 10 років для кожного наступного періоду моделювання. Наявність значень вартості лісу для поточного періоду моделювання не достатньо для визначення періоду рубки. Ми вводимо ще два параметри - втрати прибутку від передчасної лісозаготівлі та від запізнилої лісозаготівлі, які впливають на рішення щодо рубок [10].

На основі (2.3) визначено функції втрати прибутку від передчасної лісозаготівлі [10]:

$$LE(t)_{pca} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } FV_{pca} \geq FV_{p+1ca+1} \\ FV_{pca} - FV_{p+1ca+1}, & \text{якщо } FV_{t,c,a} < FV_{p+1ca+1} \end{cases} \quad (2.5)$$

де LE_{pca} – прибуток від продажу деревини, вирубаної на 1 га лісу, який не буде отримано у випадку передчасної лісозаготівлі (\$/га);

FV_{pca} – вартість 1 га лісу у визначеному періоді моделювання (\$/га);

p – період моделювання;

c – ідентифікатор елемента сітки;

a – ідентифікатор класу віку.

Якщо вартість лісу в поточному періоді (p) є вищою ніж в наступному періоді ($p + 1$), то це означає, що власнику лісу вигідно провести рубки зараз. Якщо вартість лісу є вищою у наступному періоді, то при проведенні рубки зараз, власник лісу втратить прибуток, який він може отримати в майбутньому.

Втрати прибутку від запізненої лісозаготівлі розглядають проблему з іншої точки зору. За допомогою них визначають втрати власника лісу, якщо ліс не буде вирубаний в поточному періоді (p). Використовуючи математичну модель вартості лісу (2.3), визначено функцію втрати прибутку від запізненої лісозаготівлі [10]:

$$LL(t)_{pca} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } FV_{pca} < FV_{p+1ca+1} \\ FV_{pca} - FV_{p+1ca+1}, & \text{якщо } FV_{pca} \geq FV_{p+1ca+1} \end{cases}, \quad (2.6)$$

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

FV_{pca} – вартість 1 га лісу у визначеному періоді моделювання (\$/га);

p – період моделювання;

c – ідентифікатор елемента сітки;

a – ідентифікатор класу віку.

Якщо вартість лісу є нижчою в поточному періоді (p) ніж в наступному ($p + 1$), то власник лісу нічого не втратить, якщо відтермінує рубки. Якщо вартість лісу є вищою в наступному періоді, то ми припускаємо, що власник лісу втратить прибуток, якщо відтермінує рубки, оскільки прибуток буде нижчим ніж в поточному періоді.

Розроблений метод аналізу лісокористування, дає змогу представити ліс як динамічну систему, застосовуючи метод лінійного програмування, врахувавши (2.3), (2.5), (2.6) та масив параметрів, які характеризують вікову структуру лісу. Цільова функція та система обмежень мають наступний вигляд [8, 10]:

$$FR_p(SH_{pca}) = \sum_{c=1}^m \sum_{a=1}^n (SH_{pca} \cdot FV_{pca} - SH_{pca} \cdot LE_{pca} - (SF_{pca} - SH_{pca}) \cdot LL_{pca}) \quad (2.7)$$

$\rightarrow \max,$

$$\begin{aligned}
\sum_{c=1}^m \sum_{a=1}^n (SH_{pca} \times B_{ca}) &\geq D_p, \\
\sum_{c=1}^m \sum_{a=1}^n (SH_{pca} \times B_{ca}) &\leq D_p \times k, \\
SH_{pca} \times B_{ca} &\leq SF_{pca} \times B_{ca}, \\
SH_{pca} &\geq 0,
\end{aligned} \tag{2.8}$$

де FR_p – прибуток власника лісу від продажу деревини (\$/га);

FV_{pca} – вартість 1 га лісу (\$/га);

LE_{pca} – прибуток від продажу деревини, вирубаного на 1 га лісу, який не буде отримано у випадку передчасної лісозаготівлі (\$/га);

LL_{pca} – прибуток від продажу деревини, вирубаного на 1 га лісу, який буде втрачено у випадку запізнілої лісозаготівлі (\$/га);

B_{ca} – обсяг стовбурної біомаси доступної для лісозаготівлі (м³);

SH_{pca} – площа вирубаного лісу (га);

SF_{pca} – площа лісу (га);

p – період моделювання;

c – ідентифікатор елемента сітки;

a – ідентифікатор класу віку;

k – коефіцієнт обмеження попиту на деревину.

Площа вирубаного лісу у класі віку та елементі сітки не може перевищувати площу рубок головного користування у цьому елементі сітки і класі віку. Обсяги вирубаного деревини на рівні країни повинні бути рівними або вищими, ніж попит на деревину, але при цьому не перевищувати попит більше ніж на 1%.

2.2.3 Структура та параметри розробленого методу моделювання лісокористування при рекурсивних обмеженнях

Розроблений метод моделювання лісокористування з рекурсивними обмеженнями використовує математичний апарат лінійного програмування для оптимізації лісокористування, що передбачає можливість інтеграції її в складну динамічну рекурсивну модель. Модель є просторово розподіленою і використовує регулярну географічну сітку розміром 0.5x0.5 градусів. Цільова функція максимізує загальний прибуток від вартості лісу за період моделювання і шукає оптимальний час (період) рубки та оптимальне місце (ділянку) для рубок, враховуючи попит на деревину. На даний час модель охоплює 5 періодів моделювання до 2050 року. Вхідні дані, параметри, змінні та вихідні дані показано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Вхідні дані, параметри, змінні та вихідні дані

Характеристики	Значення
Вхідні дані	Попит на деревину, розподіл вікової структури лісу, площа лісу, запас деревини, ціна деревини, витрати на лісозаготівлю, витрати на посадку лісу
Параметри	Вік рубки, площа рубок головного користування, очікувана вартість землі, вартість лісу, втрати при передчасних рубках, втрати при запізнених рубках
Змінні	Вирубана площа лісу
Вихідні дані	Поточний вік рубки, вирубана площа лісу, площа рубок головного користування, площа лісу, обсяг вирубаної деревини

Дані та процеси у моделі представлено на трьох геопросторових рівнях а саме: країна, елемент сітки і клас віку. Ті дані, які не потребують високої деталізації або не можуть бути детально представлені в іншому масштабі, вводяться на рівні країн,

наприклад, попит на деревину, витрати на вирубку та посадку лісу, а також вартість деревини. Враховано вплив природних умов на швидкість росту лісу, використовуючи таблиці ходу росту деревостану для кожного елемента сітки. Вік рубки (час від посадки лісу до рубок) обчислюється з врахуванням продуктивності лісу у певному елементі сітки. Площа лісу в кожному елементі сітки є розподіленою серед деревостанів різного віку, згрупованих по 10 років (класи віку). Вікові класи, у яких можуть відбутися рубки, визначаються через вік рубки; площа лісу у цих вікових класах визначає дозволена площу для рубок головного користування. У поточній версії моделі клас віку становить 10 років; у моделі виділено 22 вікові класи. Перший клас віку містить деревостан від щойно посаженого до 10 років, а останній клас - від 210 років і старший. Структуру методу, що складається з трьох операційних блоків: попередніх обчислень (додаток 2.А), оптимізації (додаток 2.Б) та оновлення представлено на рисунку 2.1.

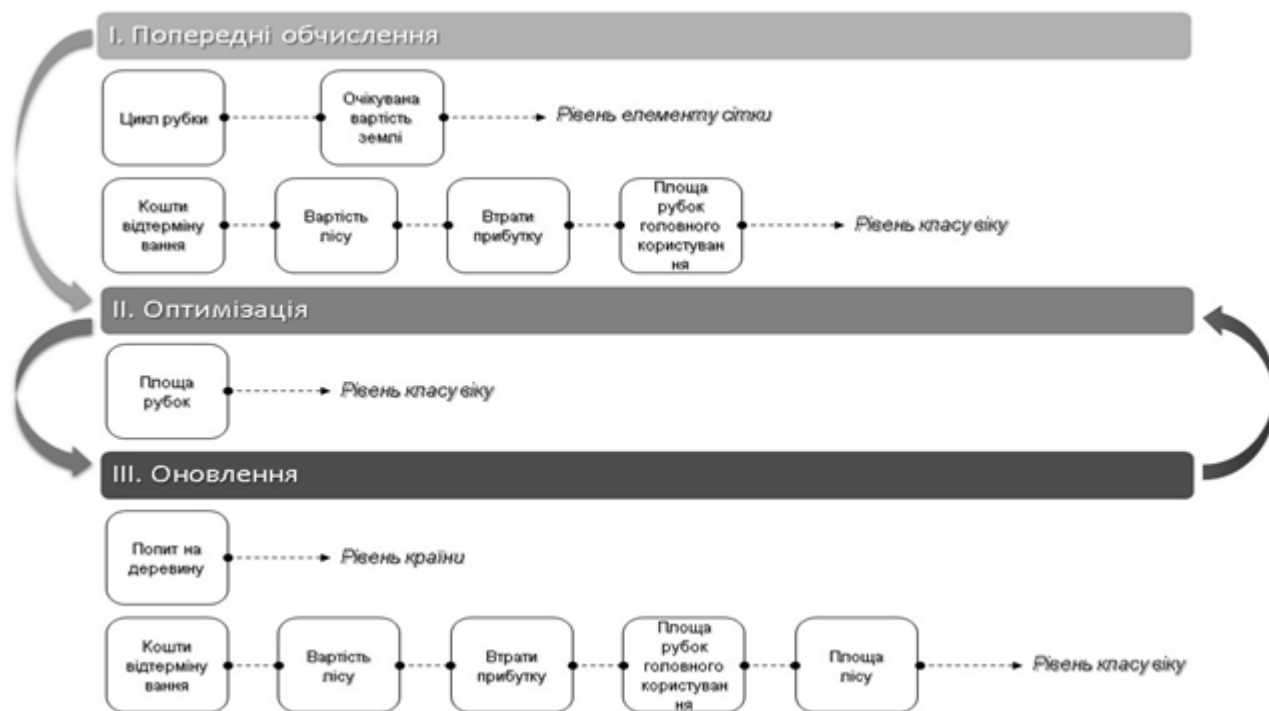


Рисунок 2.1 – Операційні блоки методу моделювання лісокористування

Перший блок – попередніх обчислень, запускається лише один раз. У ньому обчислюють параметри на рівні елемента сітки або класу віку для всіх періодів

моделювання: вік рубки, очікувану вартість землі, вартість лісу, площа рубок головного користування тощо. Деякі параметри обчислюються тільки для першого періоду моделювання, зокрема площа рубок головного користування.

У другому блоці модель оптимізує площу рубок лісу у кожній віковій групі кожного елемента сітки, де площа рубок головного користування більше нуля. При цьому передбачається задоволення внутрішнього попиту на деревину та максимізація загальної вартості лісу.

У третьому блоці змінюється площа лісу у вікових класах і площа рубок головного користування для того, щоб підготувати вхідні дані для наступного періоду моделювання. Попит на деревину, вартість лісу, втрати прибутку та втрати при запізнілих рубках оновлюються відповідно до їх значень у наступному періоді моделювання, що були обчислені у блоці I. В результаті площі лісів і рубок головного користування у вікових класах будуть змінені з врахуванням вирубаних площ у поточному періоді моделювання. Після цього починається наступний період моделювання.

2.3 Моделювання процесу лісозаготівлі з врахуванням якості деревини

2.3.1 Представлення лісокористування у моделі G4M

Описано існуючий метод моделювання лісозаготівлі у моделі G4M, а також його параметри та функціональні залежності. Метою даного методу є моделювання процесів лісозаготівлі, а також змін у структурі деревостану внаслідок проведеної лісозаготівлі.

Обсяг вирубаної деревини обчислюється в залежності від попиту на неї та максимально дозволених кількості деревини, яку можна вирубати. Модель визначає де і скільки можна зрубати деревини, щоб попит на неї був задоволений і при цьому нормальні умови для відтворення лісу були забезпечені [76].

На початковому етапі в кожному елементі сітки, де середній щорічний приріст стовбурної деревини більше нуля, створюється два віртуальні ліси (використовується модуль віртуального лісу) – «існуючий ліс», який відповідає виміряній надземній біомасі та площі, і «новий ліс» з нульовою площею, який буде заповнюватись, якщо в цій клітинці буде посаджений ліс. На базі віртуальних лісів буде проходити моделювання лісокористування.

Важливим компонентом G4M є моделювання динаміки лісу. Для цього в G4M застосовано функцію ходу росту Ассмана, яка на основі продуктивності ділянки та віку оцінює приріст запасу деревини:

$$TBI = c_0 * e^{c_1 * \log^2\left(\frac{age}{c_2}\right)}, \quad (2.9)$$

де TBI – сумарний приріст біомаси ($m^3/га$);

age – вік лісу;

c_0 , c_1 і c_2 – коефіцієнти рівняння.

На основі прогнозу динаміки лісів відбувається моделювання лісокористування та зміни землекористування [87]. Крок моделювання в G4M можна встановлювати від 1 до 10 років, в залежності від потреб дослідження.

Ряд параметрів віртуального лісу визначають ітеративно, використовуючи цифрові карти та статистичну інформацію. Повноту деревостану визначають як відношення наявної біомаси до біомаси в клітинці, яка була визначена на інших етапах проекту. Для кожної клітинки задають один з шести типів лісокористування ($FMtype$) [80]:

$$FM_{type} = \begin{cases} -2, & \text{if } FM_{map} = 0 \wedge MAI \leq MAI \wedge NPV_{for} \leq NPV_{agri} \\ -1, & \text{if } FM_{map} = 0 \wedge MAI \leq MAI \wedge NPV_{for} > NPV_{agri} \\ 0, & \text{if } FM_{map} = 0 \wedge MAI > MAI \\ 1, & \text{if } FM_{map} = 0 \wedge MAI \leq MAI \wedge NPV_{for} \leq NPV_{agri} \\ 2, & \text{if } FM_{map} = 0 \wedge MAI \leq MAI \wedge NPV_{for} > NPV_{agri} \\ 3, & \text{if } FM_{map} = 1 \wedge MAI > MAI \end{cases} \quad (2.10)$$

де FM_{map} – початковий тип землекористування;

MAI – середній щорічний приріст стовбурної деревини ($m^3/рік$);

NPV_{for} – чиста поточна вартість лісової ділянки в окремому елементі сітки (\$/га);

NPV_{agri} – чиста поточна вартість ділянки сільськогосподарського призначення в окремому елементі сітки (\$/га).

Ліс створюється із заданими параметрами навколишнього середовища та лісокористування, включаючи параметри функції росту, найвище значення середнього приросту стовбурної біомаси, в якому всі класи віку мають однакову площу («нормальний ліс»), - MAI , повноту деревостану за таблицями ходу росту – SD , вік рубки – RL , прорідження, витрати на заготівлі, площу лісу та вікову структуру лісу. Ліс представлений набором лісових ділянок N вікових класів ($N = RL + 1$, крок – один рік) різної площі, визначених через вікову структуру лісу. Параметри лісу (біомаса, висота і діаметр дерев) змінюються з віком згідно з функцією росту та масштабуються за допомогою MAI . Модуль віртуального лісу забезпечує прорідження та заготівлю згідно з заданими параметрами, поступово приводячи ліс до «нормального» стану. Модуль визначає такий RL , який є оптимальним для отримання максимального значення щорічного приросту та максимальної сталої заготівлі деревини кожного року ($RLMAI$), отримання максимальної біомаси ($RLmaxBm$) чи збереження поточної біомаси ($RLBm$) для заданих умов росту, що характеризуються найвищими значеннями щорічного приросту (MAI) та

інтенсивністю прорідження, описаної за допомогою повноти деревостану та таблицями ходу росту. Зазвичай $RLMAI$ є найкоротшим, а $RLmaxBm$ – найдовшим, серед можливого віку рубки [76,80].

Моделювання лісокористування відбувається на рівні елемента сітки. Основною метою є задоволення попиту на деревину, при цьому сумарний обсяг вирубанної деревини може відрізнятись від заданого попиту на деревину в межах $\pm 1\%$. Відтворено два типи рубок: прорідження та головного користування [13].

Ключовим критерієм для проведення прорідження є повнота деревостану. У кожному елементі сітки, де присутній ліс, наявний запас деревини порівнюється з запасом деревини, передбаченим нормальними таблицями ходу росту для даного типу деревостану. Якщо наявний запас деревини є вищим, то різниця запасів вирубується [87].

Для моделювання рубок головного користування у елементі сітки важливими є наступні критерії: вік рубки, продуктивність деревостану, площа лісу та густота населення.

Функція лісозаготівлі має наступний вигляд:

$$VH_c = f(RT_c, B_c, MAI_c, SF_c, DD) \quad (2.11)$$

де c – ідентифікатор елемента сітки;

VH_c – обсяг вирубанної деревини (m^3);

RT_c – вік рубки лісу;

B_c – обсяг стовбурної деревини доступний для заготівлі (m^3);

MAI_c – середній приріст стовбурної деревини ($m^3/рік$);

SF_c – площа лісу (га);

DD – попит на деревину в країні (m^3).

Для кожного елемента сітки, де присутній ліс, обчислюється вік рубки на основі функції ходу росту. Елементи сітки посортовано відповідно до продуктивності деревостану, біомаси, площі лісу та густоти населення. Це означає, що рубки

головного користування будуть спершу проводитись у великих лісових масивах з найбільшою продуктивністю, які розташовані близько до населених пунктів. Знаючи вік рубки, в елементі сітки визначається обсяг деревини у деревостанах даного віку і старших. Цей обсяг деревини переходить в категорію вирубаной. Така процедура повторюється у всіх елементах сітки, де є ліс [12,13].

Об'єм лісозаготівлі в країні порівнюється з внутрішнім попитом. Якщо попит є вищим ніж пропозиція більш ніж на 2%, час рубки лісу в елементах сітки (один за одним), в межах країни, поступово (раз на 5 років) зменшують до $RLMAI$, поки попит не буде задоволено. Якщо після обробки всіх елементів сітки в країні, попит все ще вищий ніж пропозиція більш ніж на 2%, ліси, які не використовувалися (елементи сітки з населенням >0 , чи з продуктивнішими та прибутковими лісами використовують в першу чергу) переходять у категорію експлуатаційних. Отже, така послідовність операцій повторюється поки попит на деревину не буде задоволено [46, 52].

Якщо заготівля деревини в країні є більшою ніж попит на 2%, час рубки менш продуктивних лісів поступово збільшують (раз на 5 років) до $RLmaxVm$. Якщо після обробки всіх елементів сітки в країні, заготівля все ще більша ніж попит на 3%, RL експлуатаційних в країні, поступово зменшують до $RLmaxVm$, поки буде досягнуто поріг у 3%. Тип лісокористування змінюється на такий, що не використовується, якщо різниця попиту та пропозиції є більшою ніж 5% після попередніх дій [76,80].

Коли вирівнювання попиту та пропозиції буде досягнуто, обсяг рубок вважається остаточною і моделювання лісокористування завершується.

Зміна землекористування моделюється між лісовими землями та землями сільськогосподарського призначення на рівні елемента сітки. Цей процес не моделюється для захищених лісів та для лісів, що знаходяться у важкодоступних місцях [89]. У моделі оцінюється вигідність ведення лісгосподарської чи сільськогосподарської діяльності на ділянці землі за допомогою методу чистої

поточної вартості (ЧПВ). ЧПВ обчислюється для сільського та лісового господарства після чого вони порівнюються:

- якщо в елементі сітки, де є ліс, ЧПВ лісового господарства є нижчою, ніж ЧПВ сільського господарства, то ліс вирубується і на даній території тип землекористування змінюється на сільськогосподарські землі, тобто відбувається знеліснення;
- якщо в елементі сітки, де є сільськогосподарські землі або невизначені землі, ЧПВ лісового господарства є вищою ніж ЧПВ сільського господарства, то новий ліс насаджується на даній території, тобто відбувається заліснення;
- якщо в елементі сітки, де є ліс (сільськогосподарські землі), ЧПВ лісового господарства (сільського господарства) є вищою ніж ЧПВ сільського господарства (лісового господарства), то зміни землекористування не відбувається [76].

Коли відбулися всі зміни пов'язані з лісокористуванням та зміною землекористування, відбувається відповідне оновлення вхідних даних та обчислюються емісії та поглинання вуглецю за такими категоріями:

- знеліснення (біомаса, мертва органічна речовина, мінеральні ґрунти та болота);
- заліснення (біомаса, мертва органічна речовина, ґрунт);
- лісокористування (наземна та підземна біомаса).

Після цього відбувається наступний крок моделювання.

Наявний алгоритм лісокористування у G4M побудовано таким чином, що обсяг рубок, в першу чергу, залежить від попиту на деревину [76,80]. Це цілковито пояснюється економічним характером даного зв'язку. Проте, попит на деревину не враховує розподіл деревини відповідно до сортиментної структури деревостану.

Критерії, на основі яких вирубану деревину можна зарахувати до певного сортименту є стандартизованими. Потреба в тих чи інших сортиментах, визначає дерева якого діаметру, висоти та якісних характеристик вирубуватимуть [12]. Саме

тому, відсутність даних щодо потреби у певних сортиментах означає, що вирубуватиметься деревостан з невідповідними характеристиками. Невідповідне представлення лісозаготівлі зменшує достовірність результатів моделювання щодо обсягу біомаси в лісах, емісії вуглекислого газу та наявної деревини для майбутньої заготівлі [12,13].

Для усунення таких неточностей було змінено існуючий метод лісокористування на такий, що враховує сортиментну структуру деревостану при моделюванні лісозаготівельних операцій у G4M.

2.3.2 Математична модель процесу лісозаготівлі з врахуванням якості деревини

Сортиментну структуру деревостану було агреговано до двох груп. Перша група – пиловник і фанерний кряж (ПФК), друга група – інші сортименти деревини. Частка ПФК у розрахунковій лісосіці є доволі високою – 51% [90], також відповідно до державних стандартів вимоги до ПФК стосовно мінімального діаметру та висоти є доволі строгими, тоді як, наприклад, до балансів чи технічної сировини більш гнучкими. Тобто деревина, яка підходить для ПФК може бути використана і для балансів, але не навпаки [12]. Отже, у вдосконаленому методі, сортимент, який є найбільш затребуваний і не може бути заміщений іншим, виділено в одну групу, а інші сортименти в другу групу.

Моделювання процесу лісозаготівлі складається з трьох етапів. Спочатку визначається обсяг заготівлі пиловника та фанерного кряжу:

$$VHs_c = f(RT_c, B_c, MAI_c, SF_c, D_{ca}, DDs) \quad (2.12)$$

де c – ідентифікатор елемента сітки;

a – ідентифікатор класу віку;

VHs_c – обсяг вирубанної деревини сортиментів пиловник та фанерний кряж (m^3);

RT_c – вік рубки лісу;

B_c – обсяг стовбурної деревини, доступної для заготівлі (m^3);

MAI_c – середній приріст стовбурної деревини ($m^3/рік$);

SF_c – площа лісу (га);

D_{ca} - діаметр стовбура (м);

DDs – попит на деревину сортиментів пиловник та фанерний кряж (m^3).

Наступним етапом є визначення обсягу заготівлі деревини інших сортиментів:

$$VHpc = f(RT_c, B_c, MAI_c, SF_c, DDp) \quad (2.13)$$

де c – ідентифікатор елемента сітки;

$VHpc$ – обсяг вирубанної деревини інших сортиментів (m^3);

RT_c – вік рубки лісу;

B_c – обсяг стовбурної деревини доступної для заготівлі (m^3);

MAI_c – середній приріст стовбурної деревини ($m^3/га$);

SF_c – площа лісу (га);

DDp – попиту на деревину інших сортиментів (m^3).

Останній етап – це знаходження сумарного обсягу лісозаготівлі та перевірка чи достатньо заготованої деревини для задоволення відповідного попиту:

$$VH_c = VHS_c + VHpc \quad (2.14)$$

де, c – ідентифікатор елемента сітки;

VH_c – обсяг вирубанної деревини (m^3);

VHS_c – обсяг вирубанної деревини сортиментів пиловник та фанерний кряж (m^3);

$VHpc$ – обсяг вирубанної деревини інших сортиментів (m^3).

2.3.3 Структура та параметри розробленого методу

Моделювання лісокористування відбувається в окремому модулі G4M. Оскільки дані в G4M є просторово розподіленими (географічна сітка роздільної здатності $0.5 \times 0.5^\circ$), то кожен елемент сітки перевіряється та обробляється відповідно до визначених критеріїв [12,13]. У кожному елементі сітки створюється віртуальний ліс з площею, біомасою та середнім приростом, визначеними за даними дистанційного

зондування землі (ДЗЗ), функція ходу росту ініціалізована для переважаючої породи, а вікова структура - адаптована із усередненої по країні для відповідності вище наведеним параметрам ДЗЗ [76]. Попередньо елементи сітки є посорттованими залежно від середнього щорічного приросту, густоти населення, обсягу біомаси та площі лісу. Також кожному елементу сітки, де площа лісу більше нуля присвоюється один з 6-ти типів лісокористування, який визначається на основі чистої поточної вартості та середнього щорічного приросту [80].

У першу чергу перевіряється чи ліси належать до категорії «захищені» (в Україні - це біосферні заповідники, національні природні парки, природні заповідники, заповідні урочища тощо), якщо так, то обробляється наступний елемент сітки, якщо ж ні, тоді проводиться наступна перевірка. «Незахищені» ліси поділено на експлуатаційні (типи лісокористування 3, 2, 1) та такі, що не експлуатуються (типи лісокористування 0, -1, -2). Спочатку обробляються експлуатаційні ліси [12].

У елементі сітки встановлюють вік рубки. Після цього визначається допустимий обсяг рубок в елементі сітки. Таким чином перевіряються всі елементи сітки, що містять експлуатаційні ліси та обчислюється сумарний допустимий обсяг рубок в межах країни. Якщо кількість зрубаної деревини не задовольняє попит відповідно вік рубки поступово зменшують. Якщо ж досягнуто нижню межу віку рубки (вік деревостану, при якому поточний приріст дорівнює середньому приросту), а попит все ще не задоволено, тоді частина лісів, що не експлуатуються переходить в категорію експлуатаційних лісів [12,13]. За умови коли сумарний допустимий обсяг рубок перевищує попит, то вік рубки зростає, а також ліс переводять у категорію неексплуатаційного доти, доки обсяг рубок і попит не буде врівноважено [66,76]. Модель задовольняє попит, перш за все, використовуючи продуктивні великі лісові масиви, розміщені ближче до населених пунктів. Блок-схеми стандартного та удосконаленого алгоритмів представлено у додатках 1.А та 1.Б. Спрощену

послідовність дій алгоритму виконання лісозаготівельних операцій представлено на рисунку 2.2.

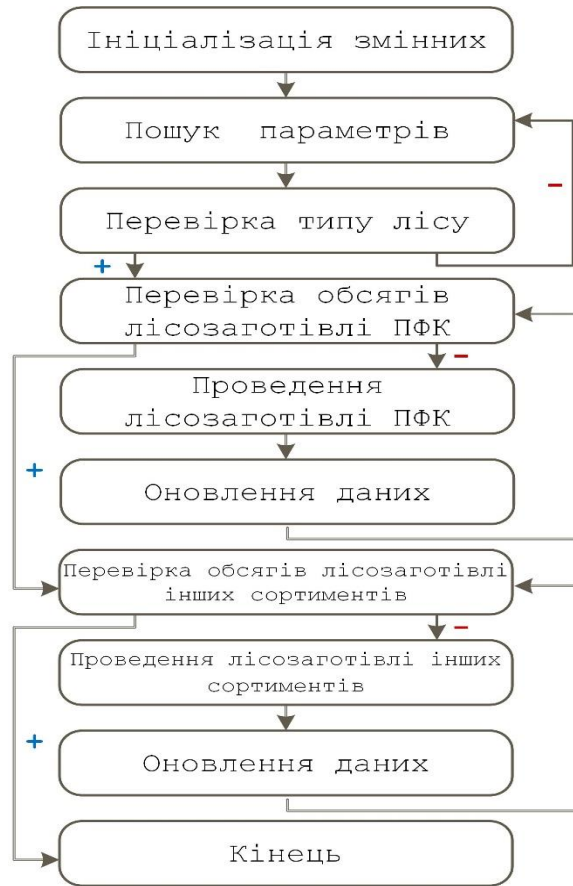


Рисунок 2.2 – Спрощена схема виконання алгоритму лісозаготівельних операцій

У вдосконаленому алгоритмі роботи методу лісокористування процес задоволення попиту на деревину розділено між ПФК та іншими сортиментами деревини. Алгоритм складається з двох блоків. Перший блок відповідає стандартному алгоритму G4M, за винятком того, що тепер визначається не допустимий обсяг рубок деревини, а допустимий обсяг заготівлі ПФК, що в свою чергу порівнюється з попитом в країні на ПФК [12].

У другому блоці алгоритму визначається допустимий обсяг заготівлі інших сортиментів деревини. Спочатку перевіряється чи допустимий обсяг заготівлі є достатнім для задоволення попиту. Якщо він не є достатнім, то додатково проводяться

рубки у експлуатаційних лісах. При цьому перевіряється чи попит на ПФК є задоволено. Якщо так, тоді вся деревина, яка потенційно може бути вирубана зараховується як деревина інших сортиментів. Тоді знову проводиться перевірка чи задоволено попит на інші сортименти деревини, якщо ж ні, тоді ліс з неексплуатаційної категорії переводиться в експлуатаційну доти, поки попит на ПФК та інші сортименти деревини не буде задоволено [12].

2.4 Параметри управлінських рішень у інформаційній технології для аналізу землекористування

Метою досліджуваної інформаційної технології є аналіз впливу можливих управлінських рішень у секторі землекористування на пом'якшення зміни клімату. Управлінські рішення, як правило, представляють собою набір якісних знань. Ключовим питанням є перетворення якісних знань у кількісні, тобто перетворення їх у інформацію, яка може бути опрацьована інформаційною технологією.

Для досліджуваної інформаційної технології, параметри для представлення управлінських рішень були визначені з врахуванням глобальних або регіональних особливостей [91–93]. Для України параметри, які б представляли певні управлінські рішення держави, не обчислювались.

Для того щоб продемонструвати застосування досліджуваної інформаційної технології для України було обчислено три групи параметрів, кожна з яких чисельно інтерпретує низку управлінських рішень, які можуть суттєво вплинути на рівень емісії вуглекислого газу у секторі землекористування [3,14,16].

Параметри управлінських рішень потрібно визначити так щоб їх можна було включити інформаційну технологію як вхідні дані. Представлення управлінських рішень як параметрів інформаційної технології здійснювалося з використанням методу побудови сценаріїв.

Визначено, представлення управлінських рішень буде здійснюватися через такі параметр інформаційної технології як попит на деревину. Детальніше дослідження структури виробництва деревини виявило, що основна частка заготованої деревини в Україні використовується як паливна деревина, і в різні роки становила 60-80% [94]. Історичні дані щодо заготівлі деревини в Україні отримано з бази даних Продовольчої та сільськогосподарської організації (ФАО) ООН, що також підтверджується і українськими джерелами [95].

Встановлено, що використання деревної біомаси як палива, уже значною мірою реалізовано в Україні і у майбутньому можна очікувати, що її використання зростатиме [32,95–98]. Також можна вважати, що використання деревної біомаси та, відповідно, попит на неї будуть змінюватися в залежності від рішень держави щодо сектору енергетики, лісокористування та суміжних секторів економіки.

Збільшення чи зменшення використання деревної біомаси як джерела енергії, в першу чергу, впливатиме на попит паливної деревини. Саме тому, основну увагу приділено обчисленню попиту на паливну деревину для кожної групи управлінських рішень [14].

Варто звернути увагу, що у дисертаційній роботі використовується визначення терміну «паливна деревина» за ФАО. Отже, ФАО визначає паливну деревину (fuel wood) як таку, що використовується для приготування їжі, опалення та виробництва енергії [94].

Першу групу управлінських рішень, об'єднано у сценарій А – базовий. Де припускається, що нових управлінських рішень стосовно сектору землекористування чи суміжних секторів не передбачається. Відповідно, динаміка попиту на паливну деревину в Україні залишатиметься незмінною.

Для обчислення параметрів потрібно було знайти як може змінюватись попит на деревину. Досліджено, що зміна попиту на будь-який сортимент деревини є

залежною від ВВП [99,100]. Що було підтверджено обчисленням коефіцієнту кореляції між цими двома параметрами (Таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Значення параметрів для обчислення коефіцієнта кореляції

Рік	Зміна виробництва паливної деревини	Зміна ВВП
2003	1.055	1.094
2004	1.026	1.121
2005	0.981	1.027
2006	1.074	1.073
2007	1.031	1.079
2008	1.000	1.023
2009	0.830	0.852
2010	1.089	1.042
2011	1.064	1.052
2012	1.019	1.001

Для вищенаведених параметрів було обчислено коефіцієнт кореляції. Отже, спостерігається сильна кореляція між даними параметрами – коефіцієнт кореляції становить 0.85 [14]. Також визначено, що між зміною ВВП та попитом на паливну деревину існує лінійна залежність. Застосовуючи метод найменших квадратів визначено коефіцієнти рівняння:

$$FW = 0.14 + 0.85 \times GDP, \quad (2.15)$$

де GDP – зміна параметру ВВП,

FW – зміна попиту на паливну деревину.

Для визначення динаміки зміни експорту усіх сортиментів деревини та їх заготівлі для внутрішнього використання знаходилось середнє значення зміни заготівлі чи експорту певного сортименту деревини на визначеному періоді:

$$P_{mean} = \frac{\sum_{y=1}^n P_y}{n} \quad (2.16)$$

де P_{mean} – середнє значення заготівлі певного сортименту деревини (m^3);

P_y – обсяги заготівлі певного сортименту деревини у році y (m^3);

n – кількість років для пошуку середнього значення.

Друга група управлінських рішень об'єднана у сценарій В – енергетичний. Він був побудований на основі проекту Енергетичної стратегії України до 2035 року [101], який передбачає низку рішень стосовно використання паливної деревини. Зокрема передбачається збільшити частку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у валовому кінцевому енергоспоживанні у 2035 до 20.4% [101].

За розрахунками Біоенергетичної асоціації України, у 2011 році Україна використовувала 80% свого потенціалу у деревній біомасі [102]. Оскільки управлінські рішення стимулюватимуть використання біомаси припускається, що до 2030 року Україна може використати свій потенціал у деревній біомасі на 100% [3]. Вважається, що попит на паливну деревину зростатиме пропорційно до використання потенціалу деревної біомаси. Для визначення динаміки зміну попиту на паливну деревину необхідно визначити його значення у 2030 році:

$$FW_{2030} = 1.25 \times FW_{2011} \quad (2.17)$$

де FW_{2030} – попит на паливну деревину у 2030 році (m^3);

FW_{2011} – попит на паливну деревину у 2011 році (m^3).

Наступним кроком, застосовуючи метод лінійної інтерполяції, визначається попит на паливну деревину для кожного року щоб побачити динаміку зміни даного параметра:

$$FW_k = FW_{2011} + \frac{FW_{2030} - FW_{2011}}{(2030 - 2011)} \times k \quad (2.18)$$

де FW_k - попит на паливну деревину, який знаходиться (m^3);

k – порядковий номер шуканого значення;

FW_{2011} – попит на паливну деревину у 2011 році (m^3);

FW_{2030} – попит на паливну деревину у 2030 році (m^3).

Значення параметрів динаміки зміни експорту усіх сортиментів деревини та їх виробництва для внутрішнього використання залишаються такими як у сценарії А.

Використання лише потенціалу біомаси деревини не є достатнім для досягнення цілі щодо частки біомаси в енергоспоживанні - за допомогою паливної деревини можна отримати близько 2.37 млн. т у.п. Україна має значний невикористаний потенціал біомаси у вигляді соломи зернових, ріпаку, лушпинні соняшника та ін. [102], тому окрім використання деревної біомаси активно використовуватиметься біомаса з інших джерел [14].

Третю групу управлінських рішень об'єднано у сценарій D – аграрний. У даному випадку досліджується яким чином рішення прийняті стосовно сектора сільського господарства можуть змінити ситуацію у секторі землекористування.

Останні дослідження ООН черговий раз підтвердили прогноз щодо зростання населення на планеті — у 2050 році населення може становити 9.6 мільярдів, а у 2100 — 10.9 мільярдів [103]. Закономірним наслідком зростання населення є збільшення виробництва та споживання продуктів харчування [14]. Також спостерігається тенденція, що денний раціон людини ставитиме більш калорійним, зокрема, до 2050 року більш ніж 52% населення землі житиме в країнах, де споживання продуктів харчування на одну особу в день становитиме більш ніж 3000 Ккал [104]. Хоча для України характерним є поступове скорочення населення і за прогнозами Україна є однією з 43 країн, де незважаючи на світову тенденцію, населення надалі продовжуватиме скорочуватись [103].

Ймовірно, що зростання кількості населення планети буде стимулом для розвитку агропромислового комплексу (АПК) України, що дозволить нарощувати обсяг експортних поставок. При цьому скорочення населення країни не буде ключовим фактором, який впливатиме на виробництво сільськогосподарської продукції [3,14].

У зв'язку з розвитком АПК і збільшенням обсягів виробництва продуктів харчування збільшиться об'єм сировини придатної для використання як біопаливо. Збільшення кількості сировини призведе до падіння цін на неї, відповідно її використання буде економічно вигідним; окрім цього біомасу з сільськогосподарських відходів значно простіше отримати та транспортувати [14]. Припускається, що в першу чергу частки біомаси в енергоспоживанні відбудеться за рахунок сільськогосподарських відходів.

Враховуючи дані припущення, вважається що нарощення темпів використання деревної біомаси буде повільним. Відповідно зростання попиту на паливну деревину також сповільниться. Для даної групи управлінських рішень вважається, що досягнення використання потенціалу паливної деревини відбудеться у 2040 році. Оскільки для всіх груп управлінських рішень досліджується їх середньостроковий вплив на виробництво деревини, то для цієї групи необхідно знайти значення попиту на паливну деревину у 2030 році:

$$FW_{2030} = FW_{2011} + \frac{FW_{2040} - FW_{2011}}{(2040 - 2011)} \times (2030 - 2011), \quad (2.19)$$

де FW_{2011} – попит на паливну деревину у 2011 році;

FW_{2030} – попит на паливну деревину у 2030 році;

FW_{2040} – попит на паливну деревину у 2040 році.

Знаходження проміжних значень параметру на проміжку 2011-2030 років відбувається з використанням методу лінійної екстраполяції аналогічно до (2.18).

Паралельне використання як деревної біомаси так і біомаси сільськогосподарських відходів обумовлено декількома причинами: недоцільністю переходу з деревини на відходи сільськогосподарської продукції для населення, яке проживає в лісистих регіонах країни, та зростанням кількості підприємств з виготовлення пелет в умовах збільшення використання біомаси [14]. Більшість підприємств є орієнтованими на виробництво пелет з різних видів сировини. Як правило, в залежності від сезону та наявності сировини, вони переходять з соломи (наприклад) на деревину [105]. Таким чином, підприємства, які з'являтимуться на ринку пелет, потребуватимуть різних видів сировини.

Оскільки, для врахування впливу управлінських рішень у досліджуваній інформаційній технології, потрібно інтерпретувати розглянуті рішення у параметр попиту на деревину, то для кожної групи попит є сумою попиту на паливну деревину, виробництва та експорту решти сортиментів:

$$D^G = FW^G + \sum_s D_s + \sum_s E_s \quad (2.20)$$

де D^G – сумарний попит на деревину у певному році (m^3);

G – індикатор що визначає групу управлінських рішень;

FW^G – попит на паливну деревину у певному році D_s (m^3);

D_s – попит на деревину інших сортиментів у певному році (m^3);

E_s – експорт деревини сортименту s (m^3);

s – ідентифікатор виду сортименту.

Використавши прогноз динаміки росту ВВП для України до 2030 року для базового сценарію з групи сценаріїв GEO-5, змодельованих у International Futures [106], обчислено динаміку попиту на паливну деревину до 2030 року. Отримано, що до 2030 року попит на паливну деревину скоротиться у порівнянні з поточним періодом, і у 2030 році становитиме 9 097 054 m^3 .

Таким чином попит на паливну деревину поступово зростатиме і у 2030 році становитиме 11 727 961 м³. Відсоток деревної біомаси в енергобалансі також збільшуватиметься, але повільнішими темпами ніж у сценарії деревної біомаси і у 2030 році становитиме 10 953 755 м³.

2.5 Висновки до Розділу 2

Представлено математичну модель 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;

Розроблено математичну модель та представлено алгоритм роботи методу 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.

Представлено математичну модель та алгоритм методу 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.

Представлено математичні моделі для удосконаленого методу 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.

3 РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ЕМІСІЙ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ

3.1 Тестування та валідація методу моделювання лісокористування при рекурсивних обмеженнях

3.1.1 Перевірка методу моделювання лісокористування при рекурсивних обмеженнях

Застосований підхід до представлення лісокористування можна використовувати на глобальному рівні та на рівні країни. У дисертаційній роботі валідація та тестування розробленого методу проведено на прикладі України. Поточний метод для рекурсивної моделі фокусується на лісокористуванні і не включає в себе детальне моделювання росту лісу. Розроблений метод є пов'язаним з глобальною лісовою моделлю G4M, яка забезпечує його таблицями ходу росту деревостану, площею лісів і їх віковою структурою [76]. Розроблений метод також пов'язаний з глобальною моделлю управління біосферою, з якої отримуються дані стосовно цін на деревину, вартості рубок і посадки лісу [69]. Історичні дані для попиту на деревину отримано на основі статистики ФАО [94]. Прогноз попиту на деревину до 2050 року зберігає динаміку історичних даних.

Робота методу тестувалась протягом п'яти періодів моделювання, щоб визначити, як втрати при передчасних та запізнених рубках впливають на просторовий і часовий розподіл рубок.

Площа лісу представлена у трьох групах, а саме: загальна площа лісу, площа лісу для рубок головного користування і площа вирубаного лісу. Загальна площа лісу містить всі ліси в країні, які розподілені між віковими класами до оптимізації. Площа лісу для рубок головного користування містить ліси, які дозволені для рубок в поточному періоді моделювання. Площа вирубаного лісу містить ліс, який був вирубаний у класі віку у поточному періоді моделювання. Розподіл площі лісів серед

вікових класів на рівні країни для п'яти періодів моделювання з застосуванням розробленого методу виглядає наступним чином (рисунки 3.1-3.5).

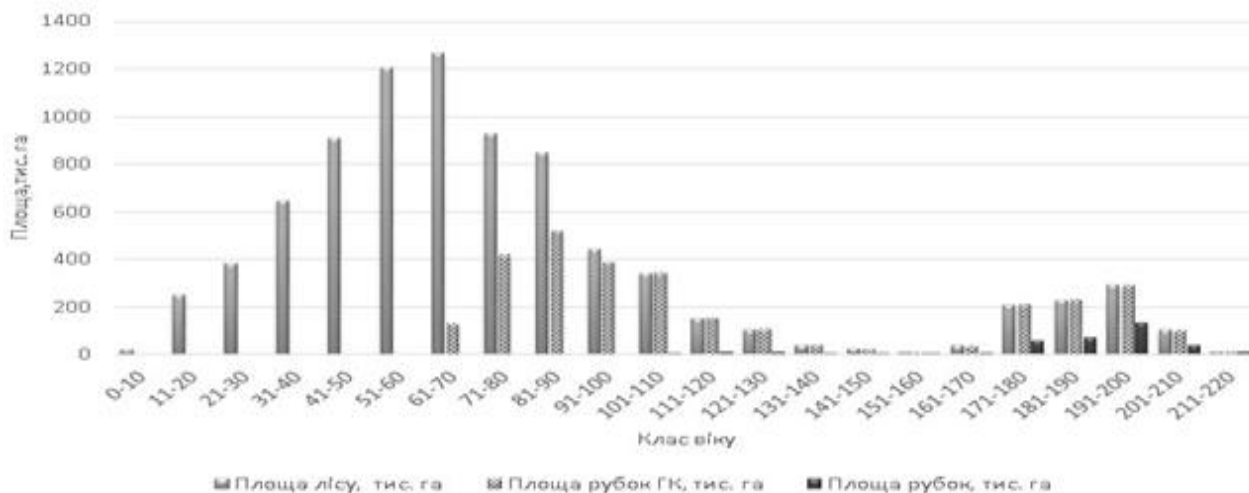


Рисунок 3.1 – Розподіл площі лісу між класами віку 2000-2009 рр. (Ліси України)[11]

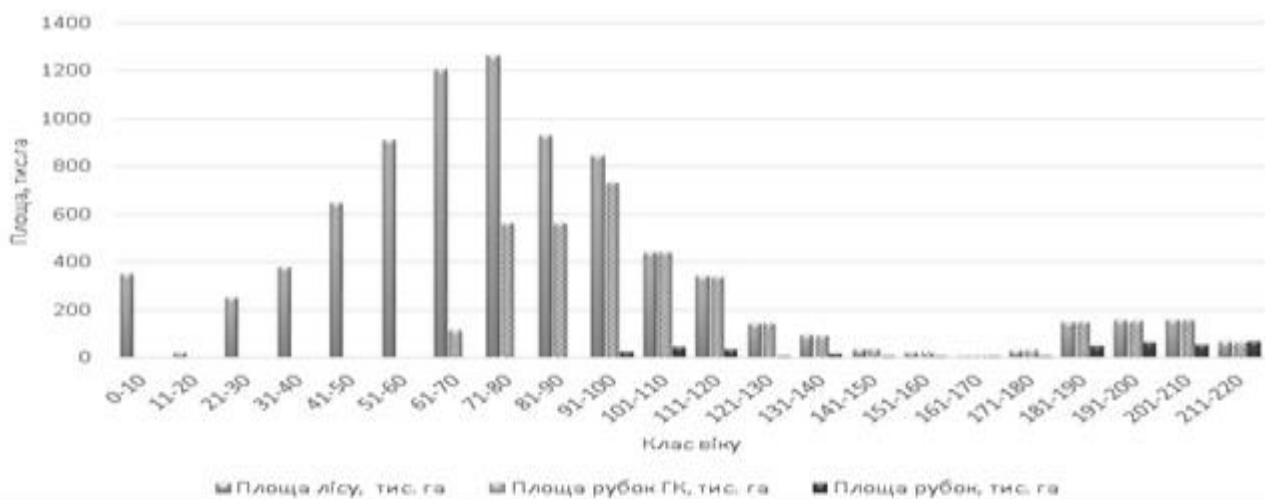


Рисунок 3.2 – Розподіл площі лісу між класами віку 2010-2019 рр. (Ліси України) [11]

Площа лісів для рубок головного користування визначається через тривалість віку рубки. Ліс, який є молодшим ніж вік рубки, не дозволено вирубувати. У моделі обчислюється вік рубки, щоб максимізувати щорічний приріст запасу, що запобігає інтенсифікації рубок. На рисунках 3.1 - 3.5 можна спостерігати, як площа лісу

змінюється в часі між класами віку. Припускається, що на початку періоду моделювання насаджується ліс, площа якого рівна сумарній площі лісу, який був вирубаний у попередньому періоді. Якщо в проточному періоді моделювання, ліс у певному класі віку не вирубується, то у наступному періоді ліс переходить у наступний клас віку. Цей процес можна спостерігати у молодших класах віку. Якщо відбуваються рубки, тоді ліс переходить у наступний клас віку, враховуючи зрубані площі. Площа рубок головного користування для наступного періоду моделювання оцінюється після зміни площі лісів з врахуванням рубок у поточному періоді.

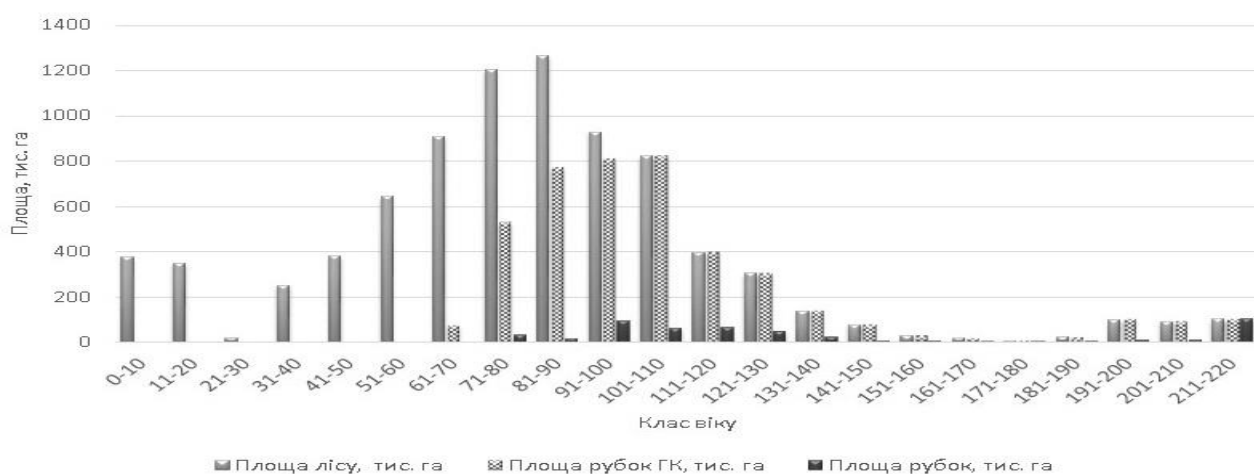


Рисунок 3.3 – Розподіл площі лісів між класами віку 2020-2029 рр. (Ліси України) [11]

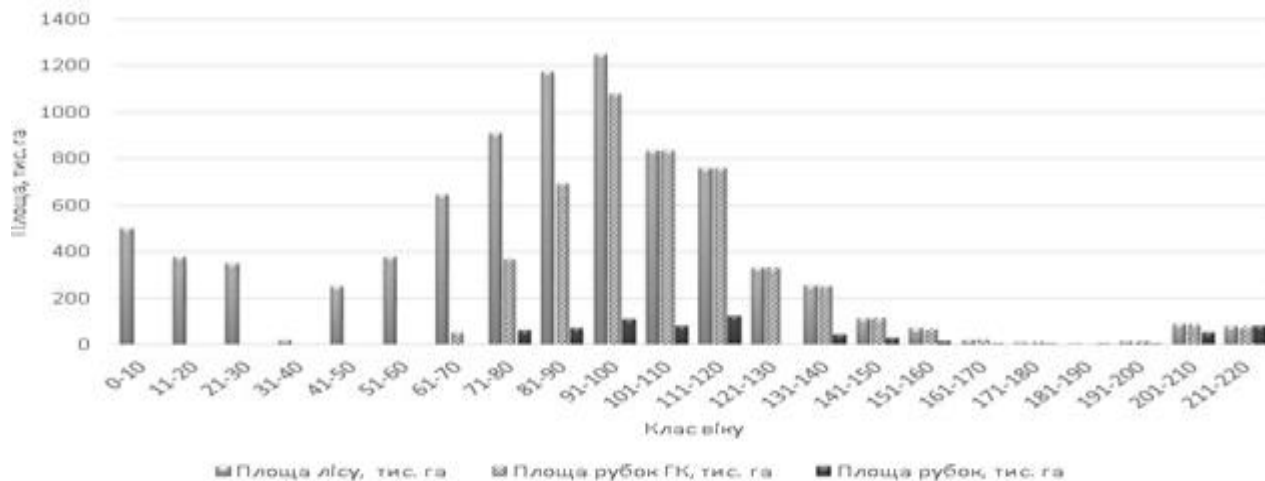


Рисунок 3.4 – Розподіл площі лісів між класами віку 2030-2039 рр. (Ліси України) [11]

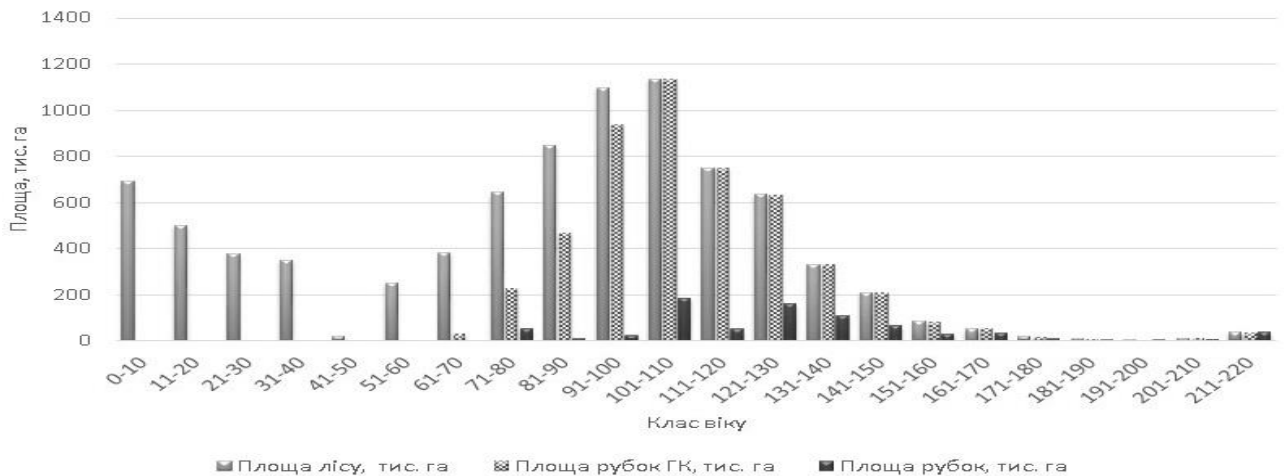


Рисунок 3.5 – Розподіл площі лісу між класами віку 2040-2049 рр. (Ліси України) [11]

У поточній версії моделі, обсяги рубок обмежені внутрішнім попитом на деревину, навіть якщо рубки є прибутковими. Вартість лісу, демонструє зростання до середнього віку, після чого вона зменшується. Така динаміка вартості лісу пояснюється врахуванням запасу фітомаси, а не пиловника. Таким чином втрати при передчасних рубках є високими для молодого лісу, а втрати при запізнілих рубках - для стиглого лісу. Кожного періоду моделювання рубки відбуваються таким чином щоб зменшити втрати при запізнілих рубках; відповідно рубається стиглий та перестиглий ліс. Така практика лісокористування відрізняється від тої, яка існує в Україні. Більшість рубок головного користування проводять у віці 40-80 років, а обсяги перестиглого лісу зростають [90]. Щоб врахувати таку практику рубок потрібно покращити спосіб обчислення вартості лісу, врахувавши додаткові характеристики дерев, як от: діаметр. Врахування даних щодо груп порід (хвойні, широколистяні) і визначення вік рубки для кожної з них усуне зайві обмеження для віку рубки.

Вік рубки є важливим інструментом для контролю обсягів рубок та збереження стабільного приросту запасу фітомаси для майбутніх періодів. В реальності вік рубки

відрізняється для різних порід і природніх умов. Обчислення віку рубки хоча б для різних груп порід забезпечить більш коректні обмеження інтенсивності рубок.

3.1.2 Тестування функцій втрат лісу при зміні параметрів

Функція вартості лісу залежить від таких змінних як коефіцієнт дисконтування та вік рубки. Було досліджено, яким чином кожна змінна впливає на значення функцій втрати вартостей при передчасних та запізнілих рубках. Результати аналізу розроблених функцій втрати вартостей при передчасних та запізнілих рубках для деревостану у вибраному елементі сітки представлено на рисунку 3.6.

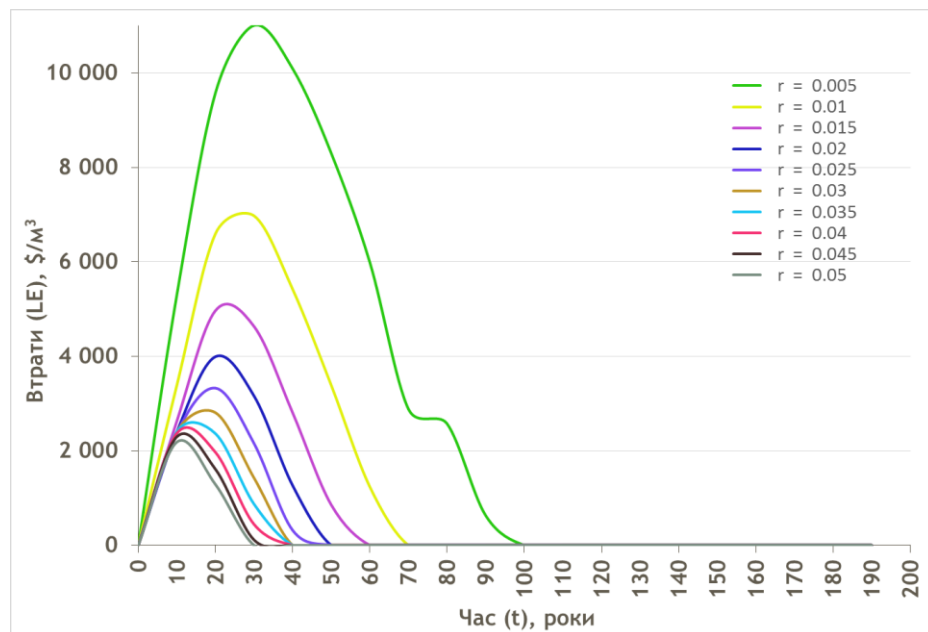


Рисунок 3.6 – Втрати вартості лісу при передчасних рубках при зміні параметра r (r – коефіцієнт дисконтування, %)

Представлено функцію втрати вартості лісу при передчасних рубках якщо значення коефіцієнту дисконтування змінюється від 0.005 до 0.05%, з кроком 0.005%.

При низькому коефіцієнті дисконтування, функція втрати вартості лісу при передчасних рубках протягом тривалого періоду має високі ненульові значення. Тобто, для власника лісової ділянки є більш вигідно відтермінувати рубки до моменту, коли втрати вартості будуть низьким або нульовими. При низькому коефіцієнті

дисконтування, а також з даними біофізичними характеристиками деревостану у розглянутому елементі сітки, найвигідніше рубати ліс у віці 80-100 років. Підвищення коефіцієнту дисконтування призводить до скорочення тривалості періоду, коли функція має ненульові значення, а також зменшення максимального значення функції втрати вартості лісу при передчасних рубках. Беручи до уваги високий коефіцієнт дисконтування та біофізичні характеристики деревостану у розглянутому елементі сітки, можна зробити висновок, що рубки можна проводити, починаючи з віку 30-40 років, тобто коли функція набирає нульового значення.

На рисунку 3.7 представлено вплив коефіцієнту дисконтування на функцію втрати вартості лісу при запізнілих рубках. Значення коефіцієнту дисконтування змінювались, так само як і у попередньому випадку в межах від 0.005 до 0.05%, з кроком 0.005%. Розрахунки проводилися на прикладі деревостану, що відноситься до того ж елемента сітки, що й у попередньому випадку.

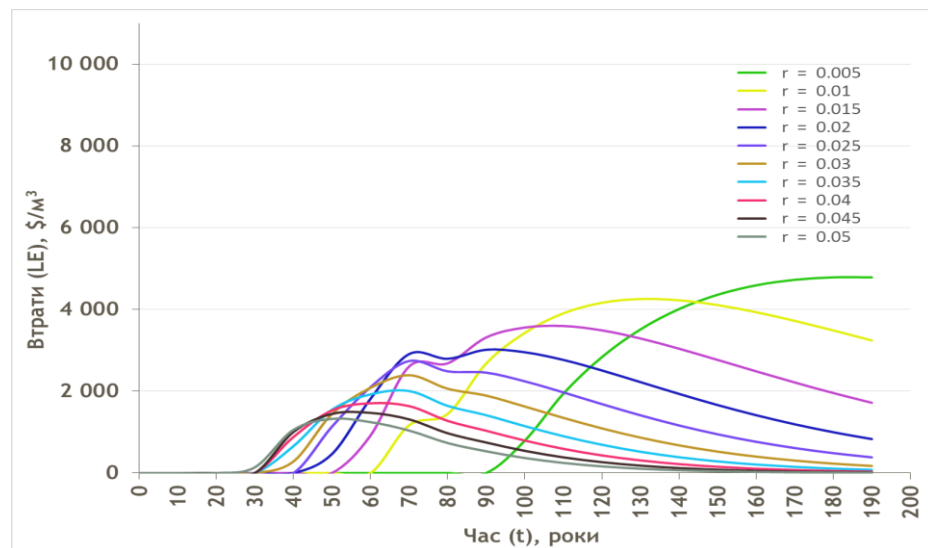


Рисунок 3.7 – Втрати вартості лісу при запізнілих рубках при зміні параметра r (r – коефіцієнт дисконтування)

При низькому коефіцієнті дисконтування втрати вартості лісу при запізнілих рубках починають зростати у деревостанах старшого віку 70-90 років, у перестиглих деревостанах втрати зменшуються через скорочення запасу біомаси. Отже, протягом

тривалого періоду, втрати вартості постійно зростатимуть у часі; при низьких коефіцієнтах дисконтування, період для рубки деревостану з нульовими втратами при запізнілих рубках, становить близько 90 років. Про високому коефіцієнті дисконтування втрати вартості лісу при запізнілих рубках починаються набагато швидше, а саме у віці 30-40 років з врахуванням біофізичних характеристик деревостану у розглянутому елементі сітки. При цьому високий коефіцієнт дисконтування призводить до швидкої втрати вартості лісу і після набору максимального значення у віці 50-60 років функція втрат при запізнілих рубках прямує до нуля. У той же ж час вартість самого лісу також суттєво зменшується. Період при якому функція має нульові значення, а ліс не є перестиглим, є досить коротким порівняно з періодом при низьких коефіцієнтах дисконтування, і становить 30-40 років.

Функції втрат вартості лісу при передчасних та запізнілих рубках було досліджено під впливом зміни віку рубки. Вік рубки змінювався від 30 до 120 років з кроком 10 років, при цьому змінна r була зафіксована на рівні 0.02%. Функції при зміні віку рубки досліджувалися на прикладі деревостану з того ж елемента сітки, що й для попередніх обчислень. Функція втрат вартості лісу при передчасних рубках при різному віці рубок представлена на рисунку 3.8.

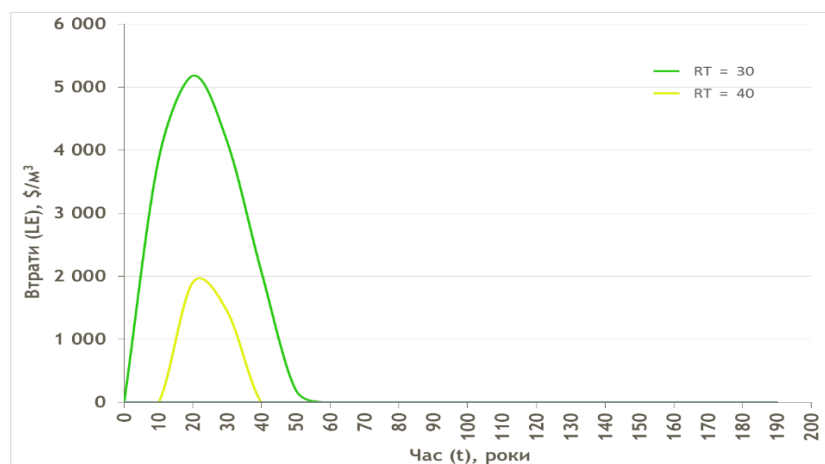


Рисунок 3.8 – Втрати вартості лісу при передчасних рубках при зміні параметра RT (RT – вік рубки)

Беручи до уваги біофізичні характеристики деревостану у певному елементі сітки, у розглянутому випадку втрати вартості лісу при передчасних рубках можливі лише при низьких значеннях віку рубки (30-40 років). При зростанні віку рубки тривалість періоду ненульових втрат, а також максимальне їх значення суттєво скорочуються. Нульові втрати вартості означають, що рубки більше не можуть вважатися передчасними і втрати зростатимуть лише внаслідок запізнених рубок та втрати вартості деревини.

Функція втрат вартості лісу при передчасних рубках при різному віці рубок представлена на рисунку 3.9.

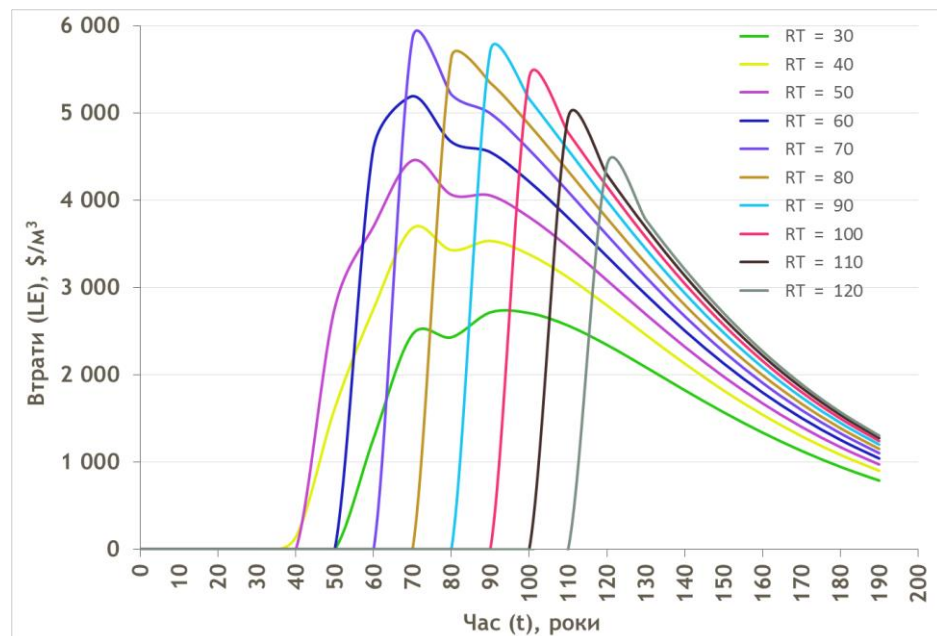


Рисунок 3.9 – Втрати вартості лісу при запізнених рубках при зміні параметра RT (RT – вік рубки)

У цьому випадку втрати вартості деревини можливі лише для лісу у віці, який рівний або більший ніж вік рубки, інакше втрати вважаються нульовими. У даному випадку, при нижчому віці рубки (30-60 років) втрати вартості при запізнених рубках стають максимальними через 10-20 років після настання віку рубки. При вищих значеннях віку рубки (80-120 років) функція досягає максимального значення при

настанні віку рубки. Після досягнення максимального значення функції різко спадають.

Період нульових втрат вартості лісу при запізнілих рубках є відносно коротким – 40-50 років при низьких значеннях віку рубки, тоді як при його високих значеннях, період нульових втрат зростає практично вдвічі – 90-110 років.

3.1.3 Валідація результатів обчислень методу з результатами G4M

Щоб перевірити результати застосування удосконаленого методу для моделювання лісокористування для досліджуваної інформаційної технології, зокрема динаміку зміни площі лісів у визначених вікових класах, було проведено порівняння обчислень з використанням розробленого методу для GLOBIOM з результатами обчислень G4M. Для порівняння було вибрано модель G4M, оскільки алгоритм зміни класів віку є аналогічним до алгоритму, що застосовувався для реалізації розробленого методу, крім цього при порівнянні з G4M є можливість використання однакових даних. Це забезпечує кращі умови для тестування методу, а саме як різниця у підходах до моделювання впливає на результати обчислень.

Отже, обидві моделі є геопросторово розподіленими і відтворюють динаміку розподілу вікових класів. Рівень рубок в моделях залежить від внутрішнього попиту на деревину. Однак G4M не є оптимізаційною моделлю. Методи моделювання лісокористування суттєво відрізняються між G4M та розробленим методом для GLOBIOM [10].

Дві моделі з однаковими вхідними даними було застосовано для моделювання періоду з 2000 по 2050 рік і порівняно розподіл площі між класами віку на рівні країни після останнього періоду моделювання (Рисунок 3.10).

G4M сортує елементи сітки, в яких є ліс, враховуючи середній щорічний приріст, фітомасу, площу лісу та густоту населення [80]. Припускається, що високопродуктивні великі ліси, що розміщені в елементах сітки з високою густотою

населення (близько до ринків) є більш прибутковими. G4M визначає тип лісокористування у кожному елементі сітки на основі середнього приросту та чистої поточної вартості. Для кожного елемента сітки G4M обчислює три типи віку рубки: максимізація середнього приросту, збереження поточної фітомаси і максимізація фітомаси. Наступним кроком є вибір віку рубки для лісу відповідно до попиту на деревину. Вік рубки вибирається від найменшого віку рубки, що забезпечить стабільні рубки, до найбільшого, що дозволить досягнути максимальної фітомаси [76,80].

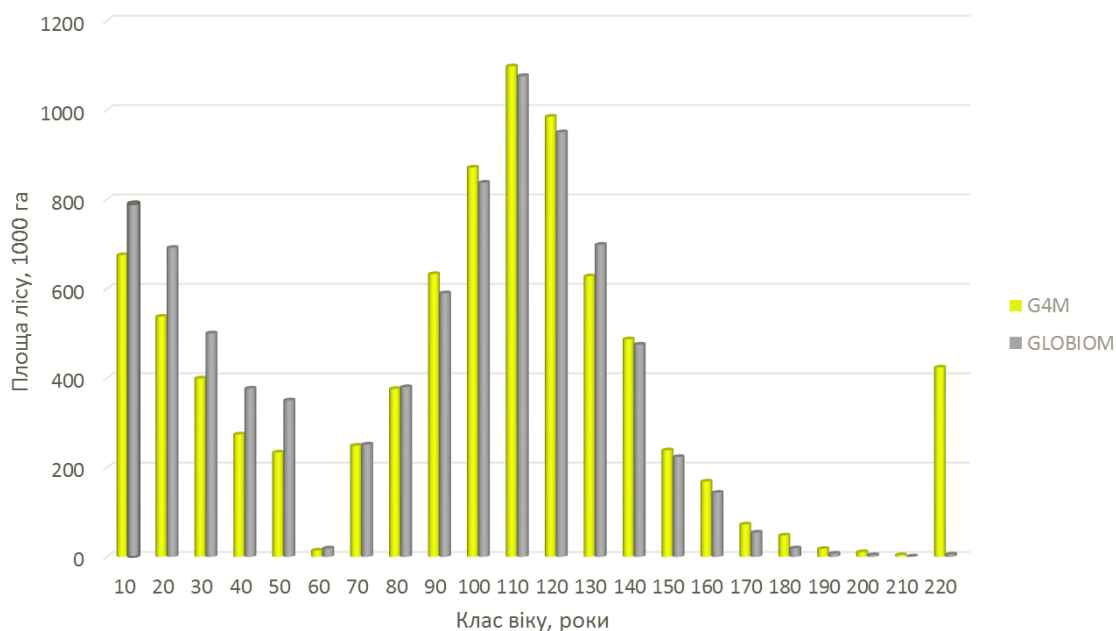


Рисунок 3.10 – Розподіл площі лісу між віковими класами у моделях GLOBIOM та G4M [10]

У G4M лісокористування відбувається таким чином щоб привести ліс до «нормального» стану (однакова площа лісу у всіх вікових класах) після одного віку рубки. Рубки відбуваються у лісах з високим значенням середнього щорічного приросту та порівнюються з попитом на деревину. Якщо обсяги рубок не співпадають зі значенням попиту, то вік рубок налаштовується, а також використовується ліс з нижчим середнім щорічним приростом (якщо необхідно) щоб досягнути різниці між попитом та обсягом рубок в межах $\pm 1\%$ [76,80]. Цей підхід не дозволяє

використовувати всю доступну площу лісу для виробництва деревини. Якщо попит можна задовольнити вирубуючи лише ліс з високим середнім приростом, то ліс з низьким середнім приростом не використовуватиметься [10].

Алгоритм переходу деревостану з одного класу віку в інший є схожим в обох моделях, що пояснює отриманий схожий віковий розподіл. Однак, існує деяка невідповідність, яку необхідно проаналізувати [10].

У результатах обчислень розробленого методу для GLOBIOM площа лісів у перших шести класах віку є більшою ніж в G4M. Обидві моделі застосовують однакове правило щодо посадки лісу: площа посаженого лісу в наступному періоді моделювання є рівною сумарній площі рубок лісу у поточному періоді. Попит на деревину є однаковим для обох моделей, тому вони зрубують однаковий обсяг деревини. Але моделі по-різному вибирають місяця вирубки деревини [10].

У класах віку починаючи з 7-го виникають рубки в обох моделях. У цих класах віку G4M має більшу площу лісу ніж розроблений метод для GLOBIOM. У G4M рубки відбуваються у лісах з вищим середнім приростом і деякі елементи сітки не використовуються, що призводить до збільшення площі лісу в старших вікових класах загалом по країні. Велика різниця між площами лісу появляється в найстаршому класі віку. Як згадувалось раніше, у G4M спочатку вирубується ліс з вищим середнім приростом, а якщо потрібно тоді використовується ліс з меншим середнім приростом. Отже, ліс з меншим середнім приростом продовжує рости і залишається невикористаним протягом всіх періодів моделювання. Це призводить до накопичення лісу в найстаршому класі віку. У розробленому методі для GLOBIOM найстарший клас віку завжди вирубується, оскільки там дуже високі втрати при запізнілих рубках [10].

Площа вирубанної деревини є обмеженою попитом на деревину та вартістю рубок і посадки лісу. Вплив вартості рубок та посадки лісу не є очевидним. Причиною

цьому є високий запас фітомаси, який компенсує витрати. Тому модель не намагається обмежити площу рубок [10].

Порівняння отриманих результатів вказує на те, що застосування фінансових механізмів для лісокористування розглядає питання проведення рубок в часі та просторі лише з однієї сторони. Поточна версія розробленого методу для GLOBIOM не враховує чинників, які визначають середній приріст лісу та відстань до ринків. Збільшення площі рубок не завжди є найкращим рішенням для задоволення попиту. Тим не менше, ці чинники повинні бути врахованими щоб рішення були більш надійними і збалансованими. Така біофізична характеристика, як природна смертність лісів потребує кращого представлення у розробленому методі, оскільки це дасть змогу деталізувати відтворення природних процесів та оцінку лісу, що є доступним для рубок [10].

У розробленому методі для GLOBIOM частка вирубанної площі лісу у класі віку залежить від вартості лісу, втрат при передчасних рубках та втрати при запізнілих рубках. Втрати при запізнілих рубках є вищими для старшого лісу, оскільки майбутній приріст не компенсує дисконтування прибутку. У розробленому методі для GLOBIOM рубки відбуваються в тих класах віку, де втрати при запізнілих рубках є найвищими [10].

3.2 Тестування та валідація методу моделювання лісозаготівлі з врахуванням якості деревини

Дослідження та порівняння двох алгоритмів лісокористування G4M проводилося на прикладі України. Стандартна версія G4M використовує як вхідні дані сумарний попит на всі сортименти деревини в Україні, обчислений на основі статистичних даних ФАО [53].

Сумарна заготівля всіх сортиментів деревини відповідає існуючому попиту на деревину в Україні протягом 2000-2010 рр., отриманому з статистичних даних для досліджуваного періоду (Таблиця 3.1).

Таблиця 3.1. Порівняння попиту на деревину та обсягу вирубанної деревини

Рік	Попит на деревину (за даними ФАО), м ³	Обсяги лісозаготівлі (G4M), м ³
2000	11 091 746	11 080 799
2001	11 125 125	11 113 539
2002	13 815 112	13 899 926
2003	15 473 137	15 620 424
2004	16 719 525	16 732 847
2005	16 432 087	16 741 725
2006	17 829 675	17 840 201
2007	18 994 837	19 000 565
2008	18 994 837	19 300 532
2009	15 999 075	15 938 427
2010	18 163 800	18 077 458

Проте, при детальнішому аналізі результатів моделювання стає зрозуміло, що прогнозовані обсяги заготівлі деревини не відповідають існуючій сортиментній структурі заготівлі деревини в Україні. Зокрема для групи пиловник та фанерний кряж, заготівлі є набагато вищими ніж попит на сортименти даної групи:

Таблиця 3.2 Порівняння попиту та обчисленого у G4M обсягу лісозаготівлі для групи сортиментів пиловник та фанерний кряж

Рік	Попит на пиловник та фанерний кряж (за даними ФАО), м ³	Обсяги заготівлі пиловника та фанерного кряжу (G4M), м ³
-----	--	---

2000	3 801	6 584
2001	3 813	6 622
2002	3 740	8 277
2003	4 378	9 321
2004	5 141	9 998
2005	5 210	10 008
2006	5 501	10 667
2007	6 004	11 364
2008	6 004	11 542
2009	5 401	9 529
2010	6 451	10 805

Схожа ситуація спостерігається і для групи інших сортиментів при порівнянні результатів обчислення G4M та відповідних статистичних даних. У цьому випадку, обсяги лісозаготівлі інших сортиментів деревини є значно нижчими ніж попит на них (Таблиця 3.3)

Таблиця 3.3 Порівняння попиту та обчисленого у G4M обсягу лісозаготівлі для групи інших сортиментів

Рік	Попит на інші сортименти (за даними ФАО), м ³	Обсяги заготівлі інших сортиментів (G4M), м ³
2000	7 290	4 495
2001	7 311	4 491
2002	10 074	5 622
2003	11 094	6 298
2004	11 577	6 734

2005	11 221	6 733
2006	12 327	7 173
2007	12 990	7 635
2008	12 990	7 757
2009	10 597	6 408
2010	11 712	7 272

Після удосконалення математичної моделі для методу лісоматеріалів та реалізації оновленого алгоритму у G4M було досліджено результати обчислення з використанням методу моделювання лісозаготівлі у базовій моделі G4M та встановлено, що оновлений метод дає змогу використовувати результуючі дані GLOBIOM, які не використовувались у попередньому методі моделювання лісозаготівлі.

Результати моделювання з застосуванням удосконаленого методу було перевірено на відповідність наявним статистичним даним. Тестування удосконаленого алгоритму проводилося на прикладі України з використанням вхідних даних за попитом на сортименти деревини, обчислених на основі статистичної інформації ФАО [3]. Застосувавши удосконалений алгоритм лісокористування, спочатку було перевірено наскільки змінилися сумарні обсяги заготованої деревини у порівнянні з попитом (Таблиця 3.4).

Таблиця 3.4. Порівняння попиту на деревину та обсягу вирубанної деревини, обчисленого різними версіями G4M

Рік	Попит на деревину (за даними ФАО), м ³	Обсяги лісозаготівлі (G4M), м ³	Обсяги лісозаготівлі (G4M+удосконалений метод), м ³
2000	11 091 746	11 080 799	11 196 215

2001	11 125 125	11 113 539	11 185 243
2002	13 815 112	13 899 926	14 201 285
2003	15 473 137	15 620 424	15 553 861
2004	16 719 525	16 732 847	16 768 090
2005	16 432 087	16 741 725	16 584 369
2006	17 829 675	17 840 201	17 975 721
2007	18 994 837	19 000 565	19 116 694
2008	18 994 837	19 300 532	18 973 313
2009	15 999 075	15 938 427	16 162 744
2010	18 163 800	18 077 458	18 294 193

У порівнянні з статистичними даними та попередніми результатами обчислень стандартної версії G4M, обсяги лісозаготівлі, обчислені з врахуванням удосконаленого методу є трохи вищими. Це пояснюється відсутністю верхньої межі для заготівлі деревини інших сортиментів. Загалом, і стандартна, і оновлена версія G4M повертає значення дуже близькі до статистичних даних з відхиленням порядку 1%.

Порівняння обсягів лісозаготівлі пиловника та фанерного кряжу з відповідним попитом в Україні на 2000-2010 рр. представлено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5. Порівняння попиту на пиловник і фанерний кряж та обсягу відповідних лісозаготівель, обчисленого оновленою версією G4M

ік	Попит на пиловник та фанерний кряж (за даними ФАО), м ³	Обсяги заготівлі пиловника та фанерного кряжу (G4M + удосконалений метод), м ³
2000	3 801	3 842
2001	3 813	3 841
2002	3 740	3 835

2003	4 378	4 422
2004	5 141	5 142
2005	5 210	5 224
2006	5 501	5 522
2007	6 004	6 045
2008	6 004	6 103
2009	5 401	5 420
2010	6 451	6 528

Результати обчислень змінилися і значно наблизилися до статистичних даних щодо попиту на пиловник та фанерний кряж протягом досліджуваного періоду.

Такий самий висновок випливає з порівняння обсягів лісозаготівлі інших сортиментів з відповідним попитом в Україні на 2000-2010 рр. – різницю між обчисленнями і попитом було усунуто (Таблиця 3.6).

Таблиця 3.6. Порівняння попиту на інші сортименти деревини та обсягу відповідних лісозаготівель, обчисленого оновленою версією G4M

Рік	Попит на інші сортименти (за даними ФАО), м ³	Обсяги заготівлі інших сортиментів (G4M + удосконалений метод), м ³
2000	7 290	4 495
2001	7 311	4 491
2002	10 074	5 622
2003	11 094	6 298
2004	11 577	6 734
2005	11 221	6 733
2006	12 327	7 173
2007	12 990	7 635

2008	12 990	7 757
2009	10 597	6 408
2010	11 712	7 272

На рисунку 3.11 можна спостерігати, що попит та змодельована заготівля пиловника та фанерного кряжу після застосування вдосконаленого алгоритму лісокористування співпадають, на відміну від результатів обчислень стандартної версії G4M.

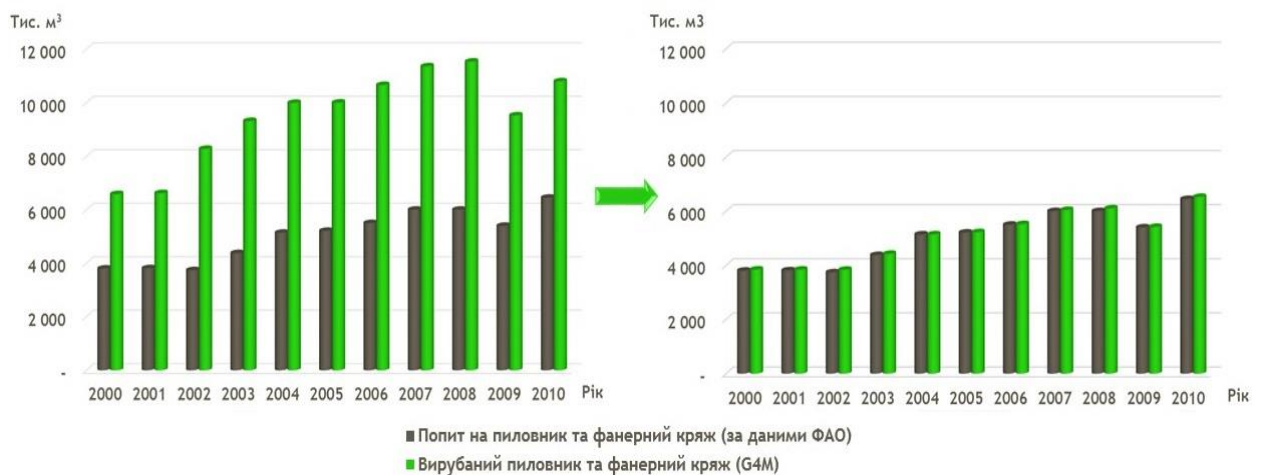


Рисунок 3.11 – Порівняння статистичних даних та результатів моделювання щодо попиту на пиловник та фанерний кряж

У порівнянні з попереднім алгоритмом, де різниця між попитом та заготівлею становила близько 47%, результат моделювання обсягів лісозаготівлі пиловника та фанерного кряжу покращився і тепер різниця становить 0,86%.

На рисунку 3.12 можна спостерігати, що попит та змодельована заготівля інших сортиментів деревини із застосуванням вдосконаленого алгоритму лісокористування співпадають на відміну від результатів обчислень стандартної версії G4M.

У порівнянні з попереднім алгоритмом, де різниця між попитом та заготівлею становила близько 41%, результат моделювання обсягів лісозаготівлі інших сортиментів деревини покращився і тепер різниця становить 0,75%.

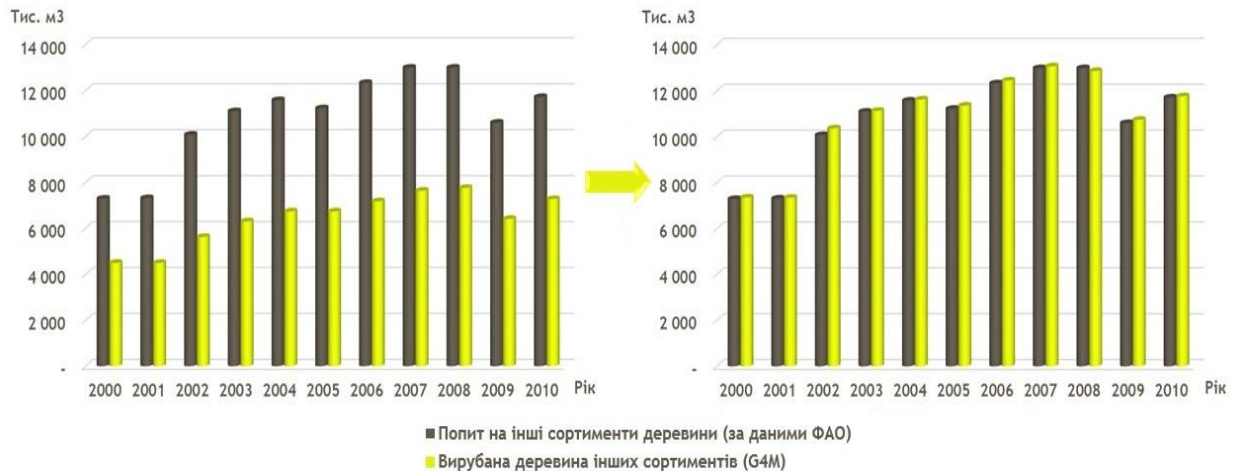


Рисунок 3.12 – Порівняння статистичних даних та результатів моделювання щодо попиту на інші сортименти деревини

Удосконалений алгоритм лісокористування для глобальної геопросторової моделі G4M дозволяє врахувати сортиментну структуру деревостану при відтворенні процесів лісозаготівлі, що, у випадку України, покращує адекватність моделювання заготівлі сортиментів деревини на 38-43%. У запропонованому алгоритмі враховано агрегований розподіл сортиментів, а саме пиловник та фанерний кряж, та інші сортименти деревини. Алгоритм розроблено таким чином, що додаткове виділення сортиментів є простим для технічної реалізації. Варто зауважити, що даний алгоритм мінімально втручається в модулі G4M, що запобігає непотрібній зміні існуючої логіки у програмі.

3.3 Аналіз емісій вуглекислого газу з використанням інформаційної технології

У пункті 2.2 було охарактеризовано, яким чином були визначені параметри управлінських рішень для інформаційної технології аналізу землекористування. У цьому підрозділі досліджено значення даних параметрів та їх вплив на емісії вуглекислого газу.

Як уже згадувалось раніше, розроблено три сценарії, які представляють три групи управлінських рішень, що прямо чи опосередковано можуть здійснювати вплив на значення емісій вуглекислого газу. Управлінські рішення виражено через такі параметри, які характеризують попит на різні сортименти деревини.

Застосувавши математичні моделі для знаходження значень попиту на низку сортиментів деревини, спочатку було обчислено ті параметри, що залишаються незмінними для трьох сценаріїв, зокрема попит на пиловник та фанерний кряж, попит на інші сортименти за винятком паливної деревини, а також обсяги експорту деревини всіх сортиментів. Було здійснено прогноз для кожного цього параметру до 2030 року. Результати обчислень наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 Числові значення параметрів для представлення управлінських рішень

Рік	Попит на пиловник та фанерний кряж, м ³	Попит на інші сортименти деревини, м ³	Експорт паливної деревини, м ³	Експорт решти сортиментів деревини, м ³
2011	6 574 102	1 958 922	1 143 785	581 243
2012	6 619 765	1 977 991	1 120 000	944 980
2013	6 665 429	1 021 554	1 181 151	1 662 662
2014	6 711 092	1 213 590	1 242 302	1 722 098
2015	6 756 756	1 322 747	1 303 454	2 466 193
2016	6 802 419	1 235 810	1 364 605	2 218 572
2017	6 848 083	1 384 467	1 425 756	2 028 477
2018	6 893 746	1 319 003	1 486 907	2 448 745
2019	6 939 410	1 261 234	1 548 058	2 448 745
2020	6 985 073	761 137	1 609 210	2 448 745
2021	7 030 737	1 007 562	1 670 361	2 913 159

2022	7 076 400	1 415 298	1 731 512	2 985 342
2023	7 122 064	1 283 861	1 792 663	2 089 914
2024	7 167 727	1 322 702	1 853 814	2 128 755
2025	7 213 390	1 361 543	1 914 966	2 167 596
2026	7 259 054	1 400 384	1 976 117	2 206 437
2027	7 304 717	1 439 225	2 037 268	2 245 278
2028	7 350 381	1 478 066	2 098 419	2 284 119
2029	7 396 044	1 516 907	2 159 570	2 322 961
2030	7 441 708	1 555 748	2 220 722	2 361 802

Вище обчислені параметри використовуються для обчислення загального попиту на деревину і їхні значені залишаються однаковими для всіх трьох сценаріїв. Прогноз значень параметрів здійснювався на основі статистичних даних міжнародної організації ФАО [94].

Загалом для кожного з вищенаведених параметрів спостерігається поступове зростання, яке повторює динаміку доступних історичних значень для попиту на відповідні типи деревини та експорту.

Наступним кроком було проведено обчислення значень попиту на паливну деревину для кожного сценарію згідно з відповідними математичними моделями, які охарактеризовані у пункті 2.4 дисертаційної роботи. Чисельні значення досліджуваних параметрів для кожного сценарію наведено у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 Чисельні значення попиту на паливну деревину для сценаріїв, м³

Рік	Сценарій		Сценарій D
	A	B	
2011	8 377 115	8 377 115	8 377 115
2012	8 535 879	8 535 879	8 535 879
2013	8 445 959	8 643 408	8 605 005
2014	8 563 950	8 750 936	8 674 130

2015	8 593 349	8 858 465	8 743 256
2016	8 615 188	8 965 993	8 812 381
2017	8 565 252	9 073 522	8 881 507
2018	8 558 424	9 181 051	8 950 632
2019	8 564 924	9 288 579	9 019 758
2020	8 542 276	9 396 108	9 088 883
2021	8 505 306	9 503 636	9 158 009
2022	8 468 176	9 611 165	9 227 134
2023	8 437 665	9 718 694	9 296 260
2024	8 406 861	9 826 222	9 365 385
2025	8 369 150	9 933 751	9 434 511
2026	8 331 312	10 041 279	9 503 636
2027	8 280 394	10 148 808	9 572 762
2028	8 236 051	10 256 337	9 641 887
2029	8 160 032	10 363 865	9 711 013
2030	8 122 370	10 471 394	9 780 138

Обчислені значення попиту на паливну деревину демонструють різну динаміку протягом досліджуваного періоду 2011-2030 рр. У сценарії А попит на паливну деревину залишається практично незмінним з незначним спаданням у порівнянні з історичними даними. Значення попиту на паливну деревину зростають у Сценаріях В та D, у порівнянні з історичними даними, у залежності від збільшення частки використання деревини як енергоресурсу. На останньому етапі побудови сценаріїв, попит на паливну деревину для кожного сценарій додавався до параметрів, представлених у таблиці 3.7. Попит на деревину в Україні для різних сценаріїв за період 2011-2030 рр., представлено на рисунку 3.13.

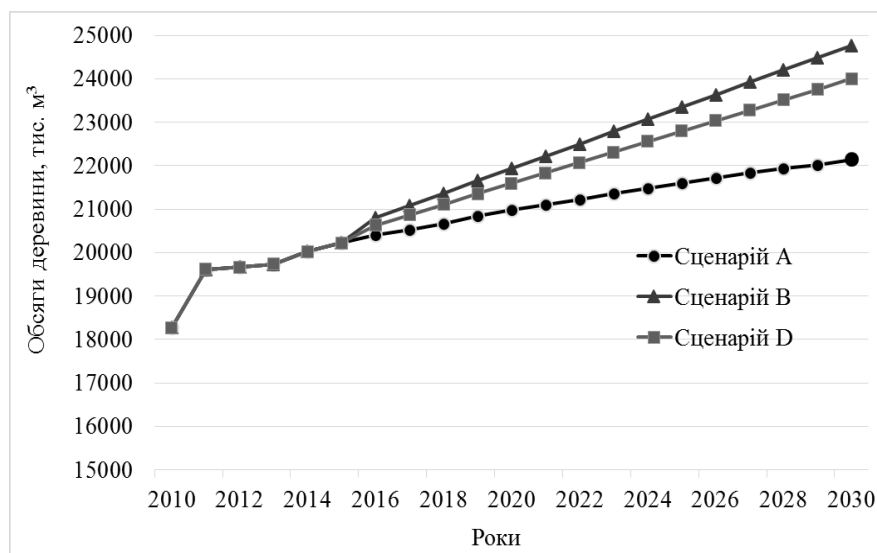


Рисунок 3.13 – Прогноз зміни параметрів лісокористування

Найвищий попит на деревину спостерігається при сценарії В, що пояснюється інтенсивним використанням паливної деревини. При сценарії D попит значно відрізняється від сценарію А, але дещо менший від сценарію В. Оскільки у сценарії D держава націлена на збільшення використання біомаси, хоча й за рахунок відходів від сільського господарства, це також спричинить збільшення використання деревної біомаси, так як умови в державі так чи інакше будуть сприятливі для використання біомаси, то певній категорії споживачів буде вигідніше перейти на деревну біомасу. Також в країні зросте кількість підприємств, які виготовлятимуть пелети. Оскільки виробникам потрібна різна сировина для пелет в залежності від сезону, то в певний період вони використовуватимуть деревну біомасу, що збільшить попит на неї. Це і є причиною зростання попиту на деревину в порівнянні з сценарієм А, однак у сценарії D використання деревної біомаси не є пріоритетним напрямком, що пояснює різницю в попиті з сценарієм В [14,16].

Знайдені значення параметрів управлінських рішень було передано у G4M як вхідні дані і після опрацювання цих даних досліджуваною інформаційною технологією, було отримано наступні результати обчислень. Для дослідження рівня емісій вуглекислого газу, було використано концепцію граничних витрат (додаткові

витрати, пов'язані з додатковим зменшенням емісій, або збільшенням поглинань вуглекислого газу).

Граничні витрати на додаткове поглинання CO_2 лісами України при оптимізації лісокористування для сценарію А у 2020 та 2030 роках за умови, що заходи оптимізації починають впроваджувати у 2015р., наведено на рисунку 3.14 [14].

У 2020р. ефект є невеликим – до 1.6 Мт CO_2 /рік при вартості від 0 до 370 \$/т CO_2 . У 2030р. ефект вже становить до 3.7 Мт CO_2 /рік при вартості від 0 до 370 \$/т CO_2 . Без оптимізації поглинання CO_2 становить 9 та 4.8 Мт CO_2 /рік у 2020 та 2030 рр., відповідно [14].

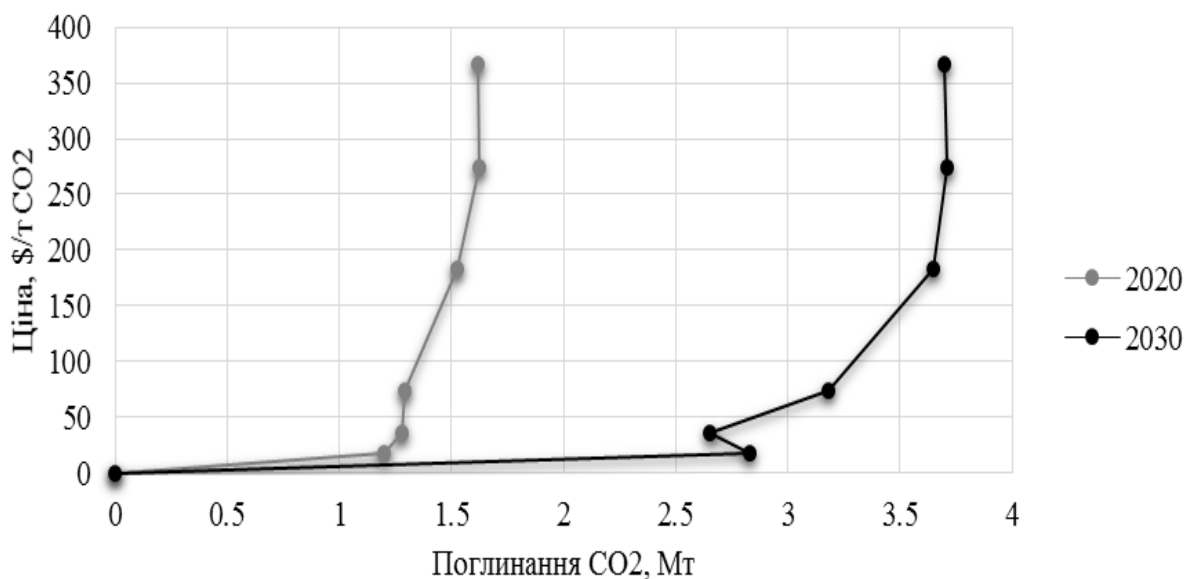


Рисунок 3.14 – Граничні витрати на додаткове поглинання вуглекислого газу лісами України при оптимізації лісокористування для сценарію А у 2020 та 2030 роках [14]

Граничні витрати на додаткове поглинання CO_2 лісами України при оптимізації лісокористування для сценарію В у 2020 та 2030 роках за умови, що заходи оптимізації починають впроваджувати у 2015р. [14], наведено на рисунку 3.15.

У 2020р. ефект є меншим, ніж в базовому сценарії – до 1.2 Мт CO_2 /рік при вартості від 0 до 370 \$/т CO_2 . У 2030р. ефект вже становить до 7.4 Мт CO_2 /рік при вартості від 0

до 370 \$/тCO₂. Без оптимізації поглинання CO₂ становить 5.6 та 1.2 МтCO₂/рік у 2020 та 2030 рр., відповідно [14].

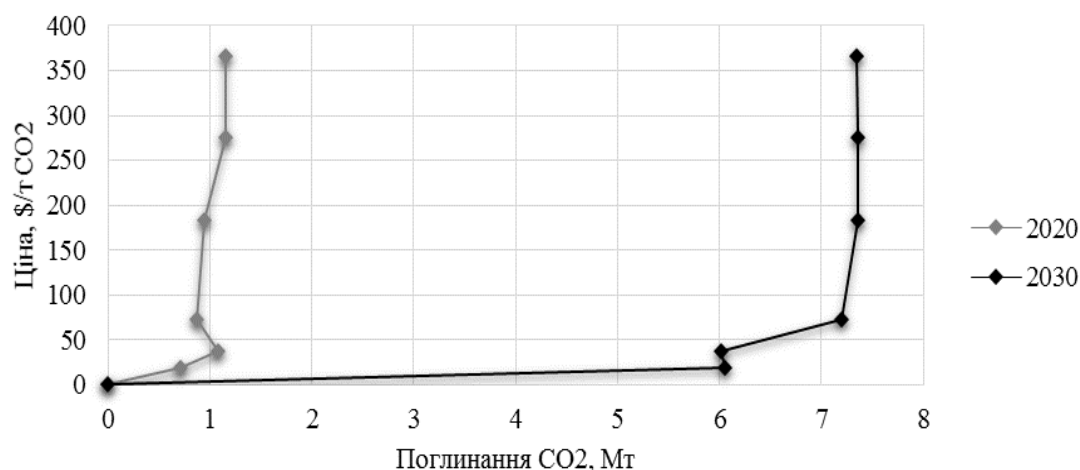


Рисунок 3.15 – Граничні витрати на додаткове поглинання вуглекислого газу лісами України при оптимізації лісокористування для сценарію В у 2020 та 2030 роках [14]

Граничні витрати на додаткове поглинання CO₂ лісами України при оптимізації лісокористування для сценарію D у 2020 та 2030 роках за умови, що заходи оптимізації починають впроваджувати у 2015р. [14], наведено на рисунку 3.16.

У 2020р. ефект, як і в сценарії В, є меншим, ніж в базовому сценарії – до 1.2 МтCO₂/рік при вартості від 0 до 370 \$/тCO₂. У 2030р. ефект вже становить до 6.5 МтCO₂/рік при вартості від 0 до 370 \$/тCO₂. Збільшення додаткового поглинання CO₂ при цінах CO₂ 70 - 200 \$/тCO₂ до 7.2 МтCO₂/рік пояснюється неточностями моделювання. Без оптимізації поглинання CO₂ становить 6 та 2.4 МтCO₂/рік у 2020 та 2030 рр., відповідно. Ефект від запровадження податку на емісії CO₂ у лісовій галузі у 2030р. є найбільшим при сценарії В[14].

Очевидно, що зростання попиту на деревину стимулює її виробництво і зменшує обсяги поглинання CO₂ лісами. Зокрема, у 2030 році при нульовій ціні за тону CO₂ поглинання у сценарії А становить 4.76 МтCO₂/рік, а у сценарії В, де попит на деревину є найвищим, обсяги поглинання скорочуються до 1.19 МтCO₂/рік. Отже,

скорочення викидів у енергетичному секторі за рахунок використання деревної біомаси, призводить до зменшення обсягів поглинання CO₂ лісами. Проте, за рахунок підвищення плати за тону CO₂ можна також збільшити поглинання CO₂.

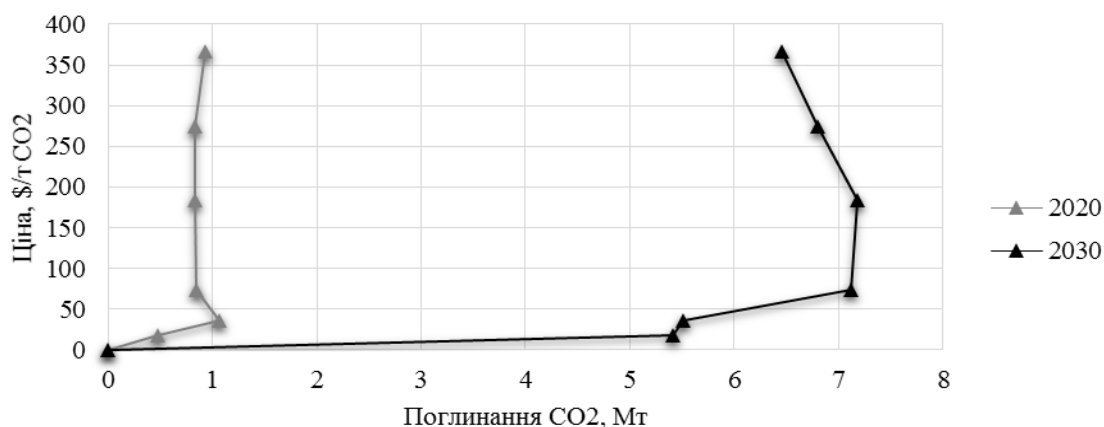


Рисунок 3.16 – Граничні витрати на додаткове поглинання вуглекислого газу лісами України при оптимізації лісокористування для сценарію D у 2020 та 2030 роках [14]

Найбільший ефект при запровадженні податку на вуглець спостерігається у сценарії В, коли додаткове поглинання може досягати 7.2 МтCO₂/рік, при цьому у сценарії А додаткове поглинання не перевищує 3.7 МтCO₂/рік станом на 2030 рік. Такий ефект пояснюється зміною способів лісокористування, оскільки підвищення ціни стимулює власників (користувачів) лісу накопичувати вуглець [14].

3.4 Висновки до Розділу 3

Запропоновано підхід до моделювання лісокористування для рекурсивної моделі. Концепції вартості лісу, втрат при передчасних рубках та втрат при запізнілих рубках забезпечують прийняття рішення щодо рубок, яке враховує майбутній стан лісів. Порівняння результатів з імітаційною моделлю G4M показує, що обидві моделі при однакових умовах показали близький результат, тобто зберігають схожу динаміку площі лісу між класами віку впродовж часу моделювання.

Проаналізувавши результати застосування методу аналізу процесів лісокористування з використанням рекурсивної моделі часткової рівноваги GLOBIOM, встановлено, що розроблений метод дає змогу впровадити ще один рівень даних у GLOBIOM, а саме клас віку деревостану. Таким чином рівні організації даних у GLOBIOM відповідають рівням організації даних у G4M. Впровадження розробленого методу аналізу процесів лісокористування забезпечило подібність вихідних даних, а саме розподілу площі лісів у GLOBIOM до розподілу площі лісів у G4M, з деякими особливостями, що пояснюються способом представлення лісокористування у моделях. Виділення груп дерев в залежності від швидкості росту забезпечує різну динаміку росту для повільно - та швидкоростучих порід, а також дозволяє оцінити вік рубки, втрати при передчасних рубках та втрати при запізнілих рубках більш точно. Природне відмирання лісів представлено спрощено і лише у найстарішому класі. Цей процес потрібно представити у всіх класах віку, але з різною інтенсивністю. Впровадження вищезгаданих удосконалень сприятиме відтворенню лісокористування ще більш наближено до реальності.

Досліджено результати удосконалення методу моделювання лісозаготівлі у базовій моделі G4M та встановлено, що оновлений метод дає змогу використовувати результуючі дані GLOBIOM, які не використовувались у методі моделювання лісозаготівлі включеного у стандартну версію G4M. Перевірено відповідність результатів моделювання з застосуванням удосконаленого методу наявним статистичним даним та визначено, що точність результатів покращилась на 38-43%.

Удосконалено структуру даних інформаційної технології аналізу процесів землекористування шляхом врахування параметрів, з допомогою яких беруться до уваги особливості України щодо боротьби зі змінами клімату. На основі цих параметрів побудовано прогноз можливих варіантів розвитку лісогосподарської галузі під впливом чи відсутністю низки управлінських рішень.

4 РОЗДІЛ. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЕМІСІЙ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ У ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМАХ

4.1 Структура даних досліджуваної інформаційної технології

Основою досліджуваної інформаційної технології є імітаційна модель G4M та рекурсивна модель часткової рівноваги GLOBIOM. До об'єднання в цілісну інформаційну технологію, кожна з цих моделей розроблялась як самостійний продукт, що пояснює значну різницю у підходах та способах їх реалізації. Для глибшого розуміння роботи інформаційної технології аналізу процесів землекористування, необхідно представити організацію даних у G4M та GLOBIOM.

4.1.1 Структура даних моделі G4M

Вхідні дані для G4M, які отримані з електронних баз даних, експертних оцінок та інших доступних джерел інформації, структуровані відповідно до рівня масштабування у текстових (.txt) та бінарних (.bin) файлах.

Найменш детальним рівнем масштабування є рівень всього світу. Низка коефіцієнтів та факторів є спільними для будь-якого регіону, країни чи елемента сітки. Таким даними є коефіцієнт конвертування тон вуглецю в м³, рік початку та закінчення моделювання, ціна на вуглець та ін.

Дані, які не є геопросторово розподіленими і є спільними для однієї країни або регіону записані у текстовий файл з розширенням .txt. Зокрема, до таких даних відносять ціни на землю та деревину, а також історичні дані щодо виробництва деревини та очікуваний попит на деревину в майбутньому. Структурно, такі дані представлено таблицею, де пошук необхідної інформації здійснюється за назвою країни чи регіону (рядок) та роком (стовпець). У окремому файлі записано вікову

структуру на рівні країни. Вікова структура представлена у формі таблиці, де кожному класу віку відповідає певний відсоток площі лісу, яка туди відноситься.

Просторово розподілені дані для кожного елемента сітки також зчитуються з текстового файлу. Дані представлено у формі багатовимірної таблиці, яка схематично зображена на рисунку 4.1.

ID	Географічні координати	Соціо-економічні дані	Дані щодо землекористування	Біофізичні дані	Дані лісокористування
	X, Y	населення, ...	площа землі, ...	запас біомаси, ...	заповідник, ...
1	25.75 49.75	45	1997	63,06	0
2	..	33	1976	63,21	0
3	..	32	1976	61,33	0
4	..	22	1914	61,25	1
...
n	...	60	2058	58,46	0

Рисунок 4.1 – Структура даних на рівні елемента сітки

Дані, збережені у файлі, можна розділити на декілька підгруп:

- ID: ідентифікаційний номер рядка, основне поле по якому здійснюватиметься пошук необхідного елемента сітки;
- Географічні координати: визначають широту і довготу, на якій розташований кожен елемент сітки;
- Соціо-економічні дані: прогноз кількості населення на квадратний кілометр, прогноз ВВП, фактор корупції та інші;
- Дані землекористування: площа землі, частка сільськогосподарських земель, частка забудованих земель та інші;
- Біофізичні дані: запас наземної біомаси, середній щорічний приріст біомаси, частка вуглецю в ґрунті та інші;

– Дані лісокористування: належність землі до заповідної зони, наявність експлуатаційних лісів.

У бінарному файлі збережено сітку карти з розподілом 50x50 км . Після проведення всіх операцій у G4M, в процесі збереження даних, цей файл буде використано для створення карти. Після зчитування вхідних файлів, G4M створює багатовимірні масиви вказівників для кожного рівня масштабування. В процесі обробки вхідних даних, створюється вікова структура лісу для елементів сітки, на основі вікової структури лісу, що представлена на рівні країни. Структуру вхідних та вихідних даних представлено на рисунку 4.2.

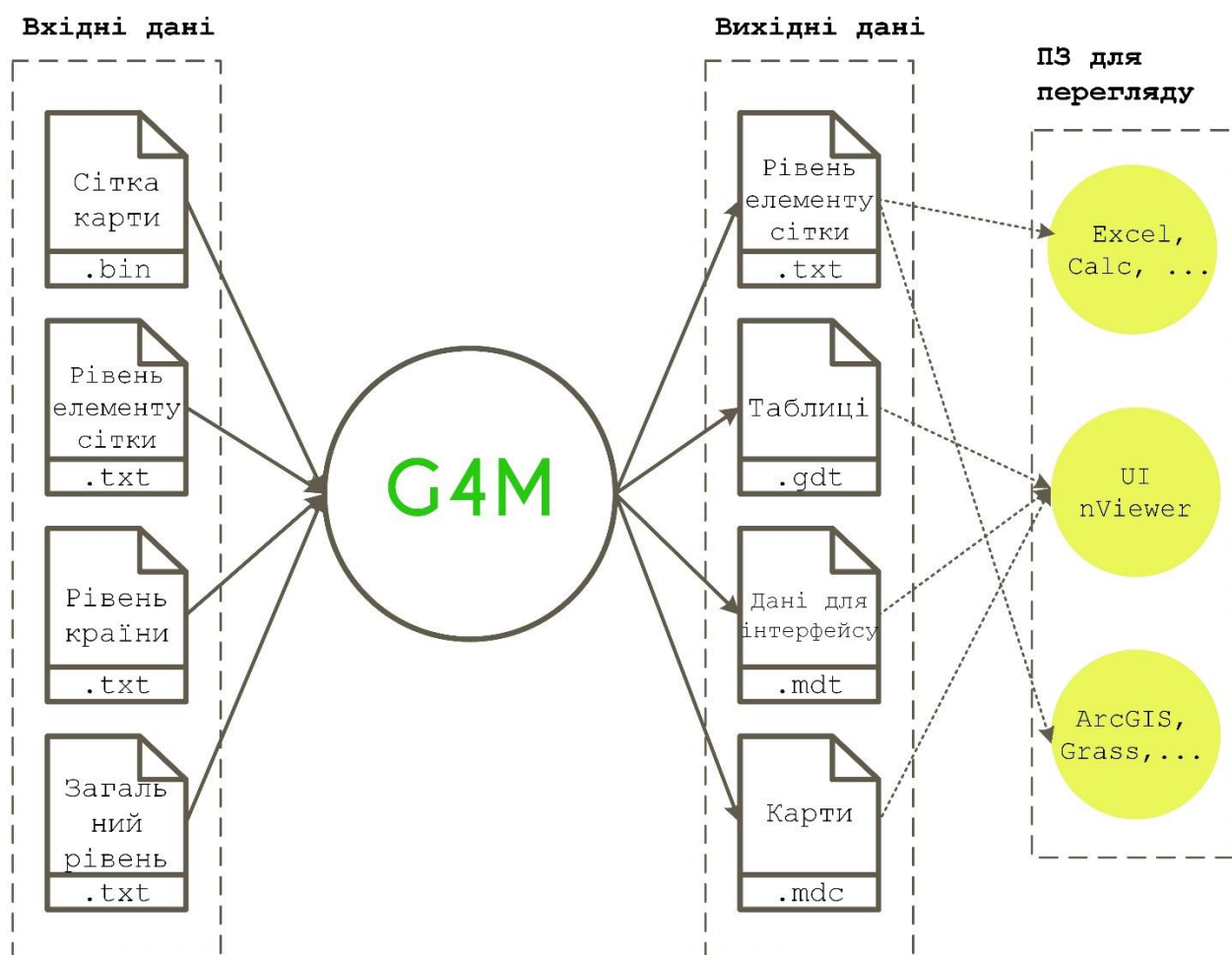


Рисунок 4.2 – Структура даних у G4M

Вихідні дані записано у файли так, щоб вони могли зчитуватися певним програмними продуктами без додаткового конвертування. Вихідні дані представлено

на рівні елементів сітки. Текстовий дозволяє переглядати отримані дані в табличних редакторах (MS Excel, OO Calc, та ін.), а також опрацьовувати їх в системах управління базами даних (PostgreSQL). Оскільки у файл включено географічні координати, то після конвертування за допомогою інструментів ArcGIS, дані можна буде представити у формі карти. Файли з розширенням .gdt (тестовий) та .mdc (бінарний) є необхідними для представлення даних у формі таблиці і карти за допомогою користувацького інтерфейсу nViewer. За допомогою nViewer дані агрегують і представляють уже на рівні країни. Файл з розширенням .mdt містить технічну інформацію необхідну для коректного представлення даних за допомогою користувацького інтерфейсу nViewer.

4.1.2 Структура даних моделі GLOBIOM

Структура даних у GLOBIOM є ієрархічною і кількість рівнів відрізняється для кожного типу даних. GLOBIOM як і G4M є геопросторово розподіленою моделлю і рівні масштабування є дуже схожими до G4M, за винятком того, що у стандартній версії GLOBIOM відсутній рівень класу віку для лісів. GLOBIOM розроблена, застосовуючи математичний апарат лінійного програмування, цільова функція моделі оптимізує на рівні всього світу, враховуючи обмеження на рівні елементів сітки.

Структуру організації даних GLOBIOM представлено на рисунку 4.3.

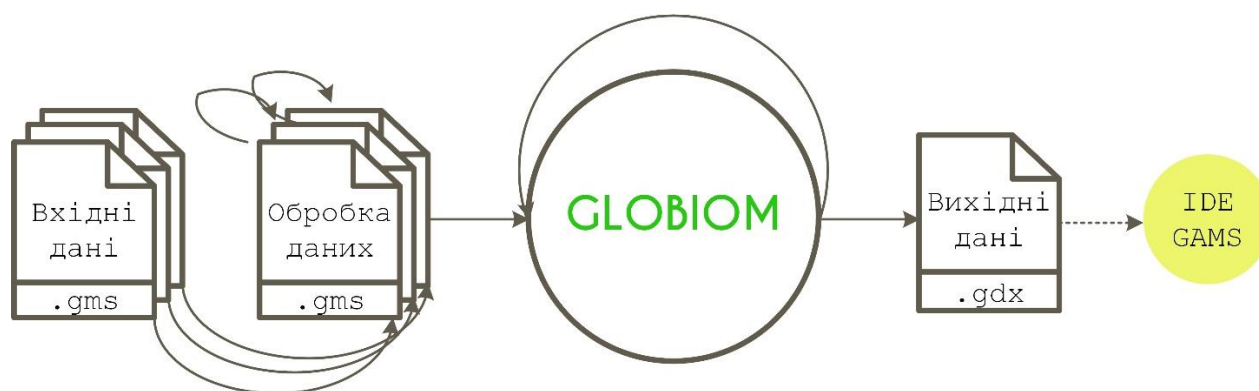


Рисунок 4.3 – Структура даних GLOBIOM

Як і у випадку G4M, вхідні дані отримуються з доступних електронних баз даних, експертних оцінок, звітів та інших доступних джерел інформації. Оскільки модель розроблена використовуючи мову програмування GAMS, а також відповідне середовище розробки та користувацький інтерфейс (IDE GAMS), то вхідні дані повинні бути підготовані належним чином. Вхідні дані, що відповідають різним рівням ієрархії та масштабування записуються у текстові файли з розширенням .gms. Наступним кроком, проводяться попередні обчислення, які на основі вже наявних вхідних даних створюють додаткові знання необхідні для роботи безпосередньо самої моделі. Попередні обчислення виконуються у декілька кроків таким чином, що вхідні дані та знання отримані в результаті виконання попереднього кроку враховуються при виконанні наступного кроку обчислень з використанням додаткових вхідних даних. Таку послідовність проведення обчислень схематично представлено на рисунку 4.4.

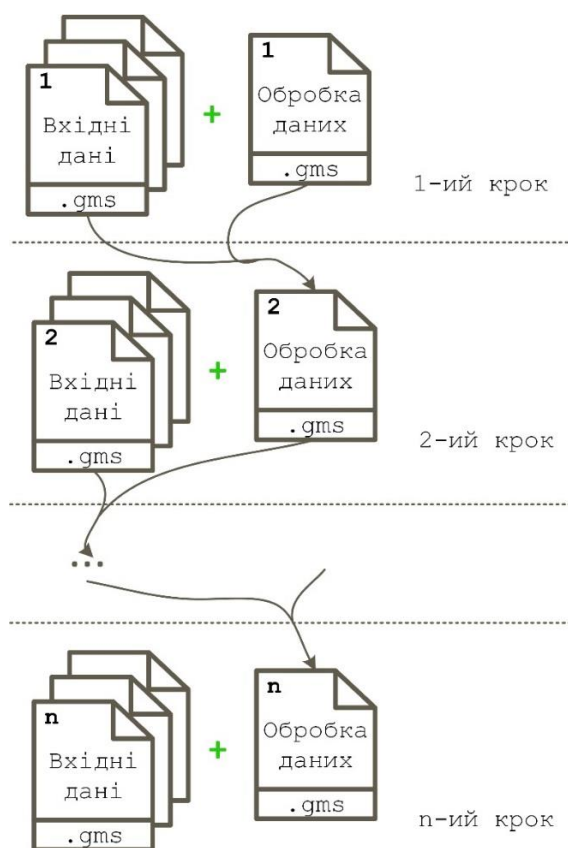


Рисунок 4.4 – Послідовність обробки даних у GLOBIOM

Процеси оптимізації в моделі запускаються після того як попередня обробка вхідних даних та створення нових завершено. В моделі оптимізується баланс прибутку та витрат користувачів землі та її ресурсів для кожного періоду часу. Один період – це десять років, як правило таких періодів буває п'ять. Оскільки модель є рекурсивною, то після оптимізації кожного періоду його результати записуються у бінарний файл вихідних даних з розширенням .gdx, а також ці результати разом з необхідними обробленими вхідними даними використовуються у моделі у наступному періоді оптимізації. Після того оптимізацію проведено для всіх періодів, файл вихідних даних містить результати для всіх періодів і готовий для перегляду. Оскільки розширення файлу є специфічним для GAMS, то перегляд результатів без попереднього конвертування можливий лише у середовищі IDE GAMS.

Дані у моделі структуровано через масиви даних та вказівників. Оскільки структура даних є ієрархічною, то створюється масив індексів, який зв'язує дані вищого та нижчого рівнів. Наприклад, щоб прив'язати певні країни до одного регіону, створюються масиви індексів регіонів та країн, а для зв'язку між ним створюється ще один масив, який зв'язує певний регіон з низкою країн (рисунок 4.5).

```
REGIONILRI_MAP (ANYREGION, ALLCOUNTRY)
/
Austral_ILRI.Australia      ,    EUbalti_ILRI.Estonia      ,
FrmUSSR_ILRI.Armenia       ,    FrmUSSR_ILRI.Azerbaijan   ,
FrmUSSR_ILRI.Kazakhstan    ,    FrmUSSR_ILRI.Kyrgyzstan   ,
FrmUSSR_ILRI.Tajikistan    ,    FrmUSSR_ILRI.Turkmenistan ,
SouthAs_ILRI.Bangladesh    ,    SouthAs_ILRI.Bhutan       ,
SouthAs_ILRI.Pakistan      ,    SouthAs_ILRI.SriLanka     ,
CentAfr_ILRI.Chad          ,    CentAfr_ILRI.CongoDemR    ,
CentAfr_ILRI.Gabon         ,    EUceast_ILRI.Bulgaria     ,
EUceast_ILRI.Poland        ,    EUceast_ILRI.Romania     ,
```

Рисунок 4.5 – Масив для створення зв'язку між даним різного рівня ієрархії

Масив, що створюється – REGIONILRI_MAP, приймає два масиви індексів – ANYREGION (всі наявні регіони) та ALLCOUNTRY (всі країни), зв'язуючи їх між собою. Таким чином звернувшись до масиву REGIONILRI_MAP, можна вибрати автоматично вибрати регіон та відповідні країни. Якщо потрібно вибрати країни

певного регіону, де є експлуатаційні ліси, то потрібно створити відповідних масив, що містить дані про експлуатаційні ліси, та зв'язати його з вже існуючим масивом REGIONILRI_MAP.

4.2 Обмін даними між моделями

4.2.1 Зв'язок між моделями в межах інформаційної технології аналізу процесів землекористування

Структуру даних кожної з моделей відрізняється, оскільки вони виконують різні задачі і їх стикування проводиться лише на певних етапах і стосується тільки частини даних, то різниця в структурі даних не впливає на процеси, де моделі не взаємодіють в межах досліджуваної інформаційної технології. Проте, там де процеси між моделями взаємопов'язані, невідповідність даних погіршує результат. Організація обміну даними між моделями і рамках досліджуваної інформаційної технології до вдосконалення представлена на рисунку 4.6.

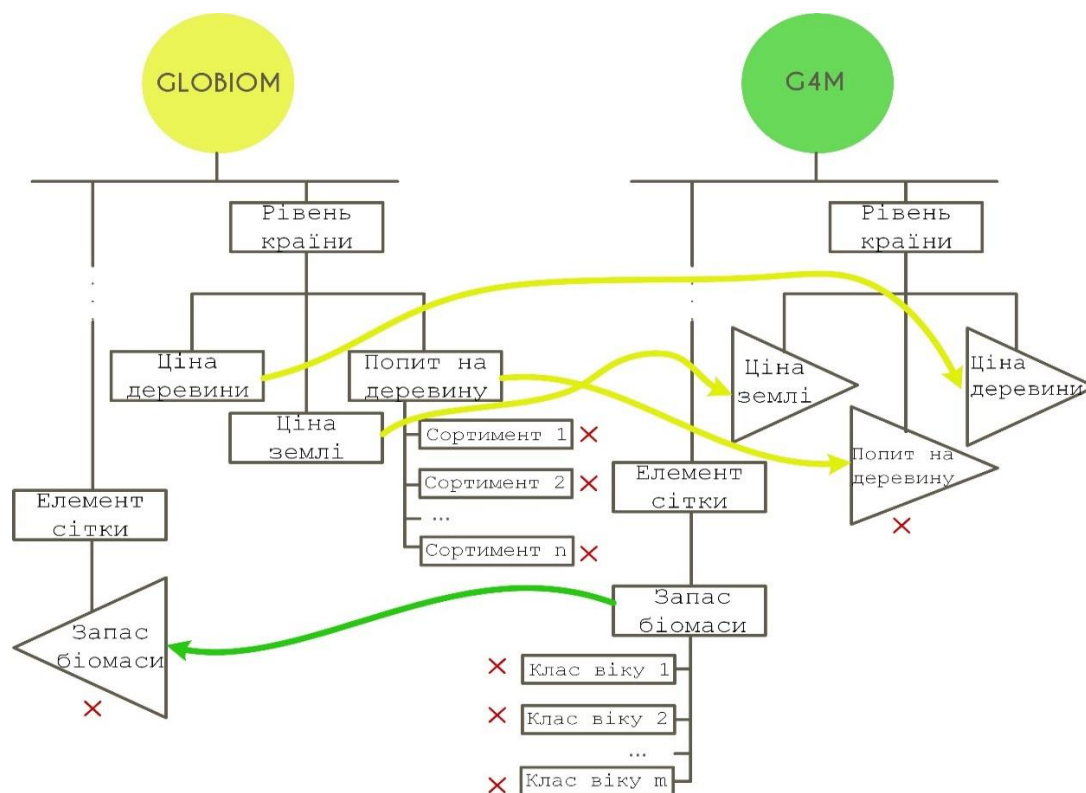


Рисунок 4.6 – Організація зв'язків між моделями-складовими інформаційної технології

Дане зображення спрощено відображає ті частини інформаційної технології, де відбувається обмін даними між моделями-складовими досліджуваної інформаційної технології. G4M та GLOBIOM обмінюються даними на двох геопросторових рівнях: країни та елемента сітки. На рівні країни G4M використовує дані з GLOBIOM щодо прогнозу цін на деревину та землю, а також прогноз попиту на деревину. У стандартній версії G4M попит на деревину є сукупним і не враховує того, як попит варіюється для різних сортиментів деревини. У GLOBIOM моделюється не сукупний попит на деревину, а окремо для визначених сортиментів деревини (пиловник, пиломатеріали, та ін.). Оскільки у стандартній версії G4M не передбачено розподілу на сортименти, то дані щодо попиту на різні сортименти деревини отримані за допомогою GLOBIOM агрегуються і тоді використовуються в G4M.

GLOBIOM отримує за допомогою G4M біофізичні характеристики лісових земель на рівні елемента сітки. Представлення лісу у GLOBIOM не є настільки детальним як у G4M, характеристики лісу (площа, запас біомаси, та ін.) є узагальненими для кожного елемента сітки, де ліс є наявний. У G4M характеристики лісу представлено більш детально. У кожному елементі сітки, де існує ліс, дані щодо запасу біомаси, площі лісу, обсягів лісозаготівлі є доступними для кожного класу віку деревостану. У зв'язку з тим, що у GLOBIOM не передбачено деталізації на рівні класу віку деревостану, відповідні дані з G4M агрегуються і передаються у форматі доступному для GLOBIOM.

4.2.2 Удосконалення обміну даними між моделями-складовими інформаційної технології

Для покращення взаємодії між моделями та підвищення точності результатів інформаційної технології аналізу процесів землекористування, було удосконалено її обмін даними між ними.

Було визначено дві цільові області у інформаційній моделі досліджуваної технології, де структура даних підлягала вдосконаленню: дані щодо попиту на деревину у G4M та дані про вікову структуру лісів.

Зміни у структуру даних досліджуваної інформаційної технології інтегрувалися у декілька етапів:

- 1) Аналіз існуючої структури даних, та розробка оновленої структури (Рисунок 4.7);
- 2) Визначення методів моделей, які необхідно змінити/розробити щоб уможливити використання нових даних;
- 3) Розробка/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) Оновлення вхідних даних, враховуючи нову доступну інформацію.

Взаємодія моделей щодо передачі даних про ціни на землю та деревину залишилась незмінною.

У G4M попит на деревину було розділено на дві групи сортиментів:

- Пиловник та фанерний кряж;
- Інші сортименти деревини.

Розподіл по сортиментах здійснено відштовхуючись від мінімальної величини діаметру стовбура. Було удосконалено метод моделювання заготівлі матеріалів, враховуючи групи сортиментів. Наступним кроком було додано нові масиви даних до компонентів моделі, що безпосередньо пов'язані з моделюванням заготівлі матеріалів, зокрема у модулі обчислення емісій та підготовки вихідних даних.

Структуру вхідних даних також було змінено. Дані щодо попиту на деревину було розділено відповідно до груп сортиментів: для оновлення даних було використано агреговані дані ФАО для історичних значень виробництва деревини на

кожну групу сортиментів деревини та безпосередньо дані GLOBIOM для майбутнього попиту на кожну групу сортиментів деревини.

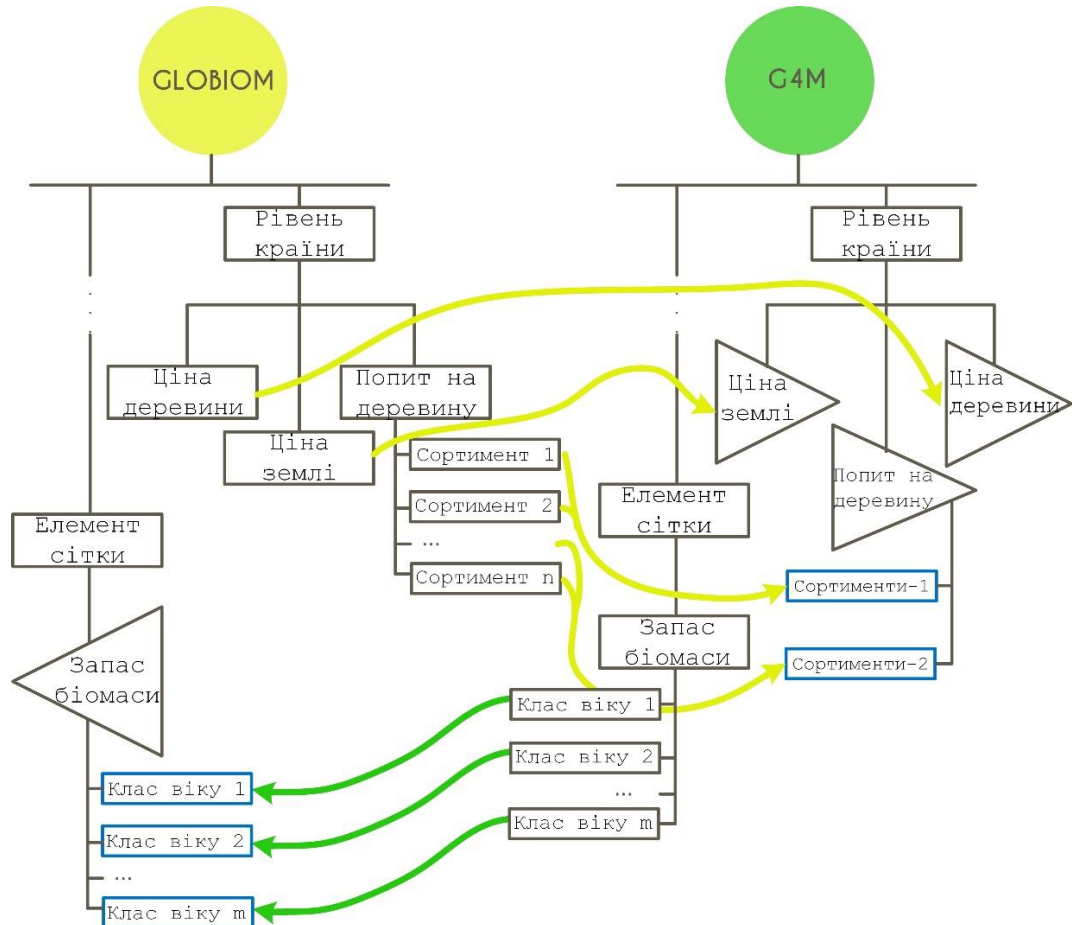


Рисунок 4.7 – Організація зв'язків між моделями-складовими інформаційної технології після вдосконалення

Хоча й оновлена структура даних G4M не використовує результати GLOBIOM по кожному сортименту деревини окремо, розподіл навіть на дві групи сортиментів дозволяє суттєво покращити результати моделювання, що було продемонстровано у 3-му розділі дисертаційної роботи.

Для GLOBIOM було впроваджено новий рівень в ієрархії даних, а саме класи віку деревостану. Впровадження нового рівня в структуру даних GLOBIOM не лише змінює організацію та процеси передачі даних у моделі, але й сам алгоритм

оптимізації. Саме тому було розроблено новий метод оптимізації, що враховує структурні зміни даних моделі, а також вирішує проблему представлення часової динаміки у моделі та уточнює результати моделювання.

Було створено нові масиви даних та вказівників, які забезпечують використання нових даних щодо вікових класів. Зокрема вікові класи було додано до таких груп даних як: площа лісів, запас біомаси, площа лісу в експлуатаційних лісах. Кількість класів віку у GLOBIOM відповідає кількості класів віку у G4M. Було розроблено новий метод моделювання лісокористування, а також механізм зміни площі та запасу біомаси у класах віку у залежності від періоду моделювання. Математична модель розробленого методу, а також механізму зміни площі та біомасу у класах віку детально охарактеризовано у 2-му розділі дисертаційної роботи.

Структура вхідних даних також зазнала суттєвих змін. Обсяг вхідних даних суттєво зріс з врахуванням вікової структури деревостану. Було включено додаткові файли з даними що містять інформацію про площу та запаси біомаси у кожному класі віку.

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. Оскільки, досліджувана інформаційна технологія є геопросторово розподіленою, вхідні дані та операції, що виконуються, поділено на п'ять рівнів масштабування (Рисунок 4.8).

До цих рівнів масштабування або організації даних належать:

- Весь світ;
- Географічний регіон;
- Країна;
- Елемент сітки (розміром 50×50 км);
- Вік лісу (за наявності).

На рисунку 4.8 схематично зображено три рівні масштабування; оскільки дослідження проводяться на прикладі України, то рівень всього світу та регіону не застосовується для вхідних даних та виконуваних операцій не застосовується

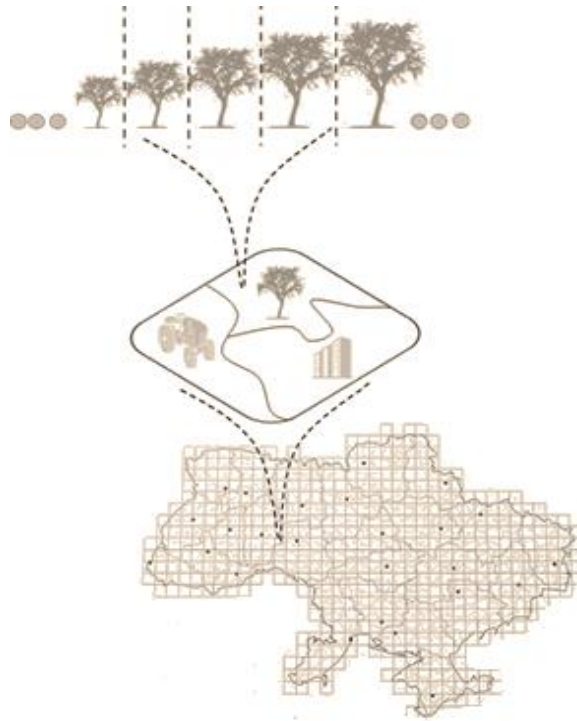


Рисунок 4.8 – Рівні масштабування даних інформаційної технології аналізу

4.3 Програмна реалізація інформаційної технології

4.3.1 Програмна реалізація удосконаленої моделі G4M

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. Для розробки та вдосконалення G4M використовується інтегроване середовище розробки MS Visual Studio Express 2012.

Метод моделювання процесів лісозаготівлі було також реалізовано на мові С++ та використовуючи середовище розробки MS Visual Studio Express 2012. Основною складністю даного завдання була інтеграція розробленого методу таким чином щоб не надто ускладнити G4M та не змінити існуючу логіку програми.

Для початку вносяться зміни в модуль зчитування даних та їх попередньої обробки: необхідно щоб нові дані, які необхідні для використання були отримані. Тому, було створено нові масиви, у який записуються нові дані, по кожній групі сортиментів. Приклад такого зчитування та створення масиву даних виглядає наступним чином (Рисунок 4.9):

```

ifstream fppr;
    FileName = "RestWoodProduction_UA_EU.txt";

cout<<"Reading file: "<<FileName<<endl;
fppr.open(FileName.c_str(), ios::in);
if (!fppr.is_open()) {
    cout << "Cannot read " << FileName << endl;
    system("pause");
    exit(0);
}
getline(fppr,line); // we don't need 1st line
int LineNum=0;
while (!fppr.eof()) {
    getline(fppr,line);
    if(line.size()>0 && line[0] != '#')
    {
        stringstream ss(line);
        string regID;
        double val;
        ss >> regID;
        int ElemNum = 0;
        string colname;
        char regstr[4];
        int2str(countryNwp[LineNum],regstr);
        colname = "re" + string(regstr) + "price0";
        while (ss >> val) {
            wprod_restwood[colname].insert(yearNwp[ElemNum],val);
            ElemNum++;
        }
        LineNum++;
    }
}
fppr.close();
}

```

Рисунок 4.9 – Зчитування файлу даних та створення масиву даних для групи сортиментів

Для реалізації методу було створено новий клас `harvestWood`. Клас `harvestWood` складається з інтерфейсу та відповідної реалізації. У інтерфейсі класу оголошено відкриті та закриті методи та члени класу. Реалізація класу описує чотири

методи класу `harvestWood`, три з яких є відкриті, а також конструктор та деструктор. Клас складається з таких методів:

- `calcHarvM3` – відкритий метод, де обчислюються обсяги лісозаготівлі для кожної групи сортиментів у м³/га;
- `calculateHarvest` – відкритий метод, де обчислюються обсяги лісозаготівлі для кожної групи сортиментів у тС/га;
- `InitData` – відкритий метод, де обчислюються обсяги лісозаготівлі здійснені різними типами рубок (рубки головного користування та санітарні рубки)
- `ClearData` – закритий метод, який використовується для обнулення членів класу;
- `harvestWood` – конструктор;
- `~ harvestWood` – деструктор.

Наступним завданням після створення класу є його інтеграція у існуючу програму. Для виклику методів класу було створено об'єкт `objHarvWood`. Є декілька модулів програми, які необхідно змінити для того щоб інтегрувати новостворений клас. Схематично зміни, які необхідно внести у програму зображено на рисунку 4.10.

У модулі ініціалізації лісу (`init...cpp`) відбувається створення віртуального лісу у початковому році, а також моделюються лісозаготівельні операції у базовому році. У стандартному варіанті моделі, обсяги лісозаготівлі визначались безпосередньо у тілі функції `init`, у вдосконаленому варіанті за допомогою об'єкта `objHarvWood` викликається потрібний метод класу `harvestWood`, який проводить обчислення.

Наступним кроком є проведення лісозаготівельних операцій після базового року. Для цього у G4M створено функцію `adjust`. У межах цієї функції моделюються такі операції як рубки головного користування та санітарні рубки, при цьому їх обсяги налаштовуються так, щоб попит на певний сортимент деревини було задоволено, враховуючи природоохоронні та економічні обмеження.

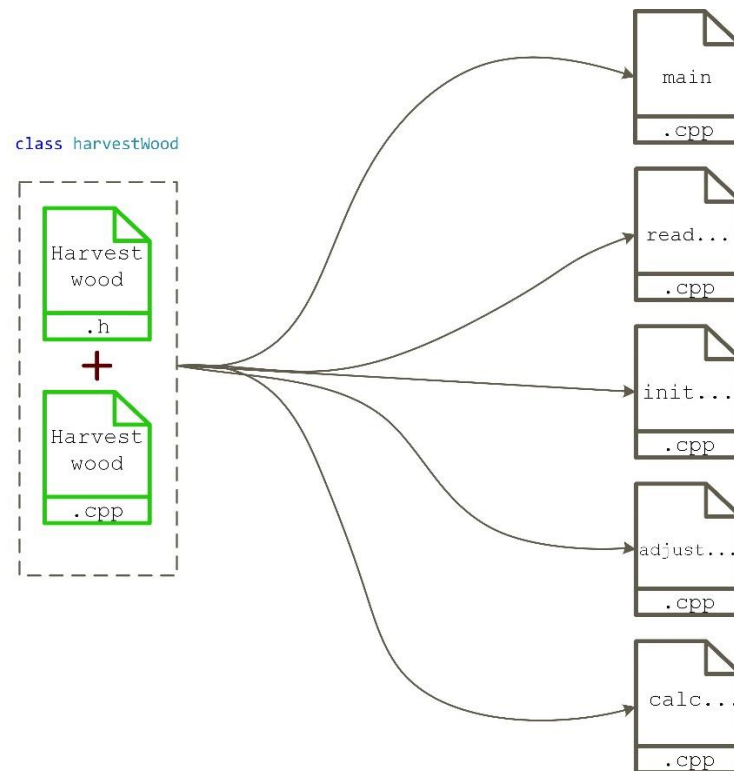


Рисунок 4.10 – Основні модулі G4M та клас harvestWood

Отже, лісозаготівельні операції проводяться у декілька етапів, моделюються рубки і обчислюється їх обсяги, враховуються обсяги деревини заготованої внаслідок прорідження, тоді налаштовується вік рубки, та площа експлуатаційних лісів. Так відбувається доти, доки обсяги лісозаготівлі задовільняють очікуваний попит на деревину.

У вдосконаленій версії моделі вищенаведені етапи моделювання виконуються тільки для сортиментів першої групи, коли досягнуто бажаних обсягів лісозаготівлі сортиментів першої групи, то обчислюється скільки було заготовано деревини другої групи сортиментів і наступним етапом проводиться налаштування обсягів лісозаготівлі другої групи.

Як і у попередньому випадку, у функції `adjust` обчислення обсягів лісозаготівлі у тілі функції замінено на звертання до методу, де обчислюються значення для обох груп сортиментів.

Отже, у функції `adjust` знаходяться значення параметрів, які дозволять отримати певні обсяги заготованої деревини для визначених сортиментів.

Коли потрібні значення параметрів знайдено, наступним кроком обчислюються обсяги лісозаготівлі, емісії внаслідок процесів землекористування та готуються вихідні дані. Для проведення фінальних обчислень розроблена функція `calc`, яка приймає результати роботи попередніх модулів програми для їх подальшого опрацювання.

Функція `calc` на основі параметрів визначених функцією `adjust` знаходить обсяги лісозаготівлі, використовуючи методи класу `harvestWood`. Різниця між підходами до програмної реалізації обчислення лісозаготівлі зображено на рисунку 4.11.

Стандартна версія G4M:	Оновлена версія G4M:
<pre> } else if (thinningForest.get(xi,yi)>0) { if (OforestShare>0){ harvArea0 = res.second.area; realArea0 = cohort.getArea(); if (realArea0>0) { sawnW = res.second.sw * harvArea0/realArea0/modTimeStep; restW = res.second.rw * harvArea0/realArea0/modTimeStep; sawnThW = res.first.sw/realArea0/modTimeStep; restThW = res.first.rw/realArea0/modTimeStep; bmH = res.second.bm * harvArea0/realArea0/modTimeStep; bmTh = res.first.bm/realArea0/modTimeStep; } } </pre>	<pre> } else if (thinningForest.get(xi,yi)>0) { if (OforestShare>0){ harvArea0 = res.second.area; realArea0 = cohort.getArea(); if (realArea0>0) { objHarvWood.InitData(res, harvArea0, realArea0, modTimeStep); sawLogs0 = objHarvWood.sumSW; restLogs0 = objHarvWood.sumRW; Logs0_FC = objHarvWood.fcut; Logs0_TH = objHarvWood.thinning; } } </pre>

Рисунок 4.11 – Порівняння версій G4M

Після визначення обсягів лісозаготівлі, обчислюються емісії внаслідок процесів землекористування, зокрема лісокористування, заліснення та знеліснення. У вдосконаленій версії моделі створено додаткові масиви даних для врахування обох визначених груп сортиментів. У основній функції `main` створюються масиви даних, які записуються у файли, що зчитуються у `nViewer` для огляду результатів у формі таблиць, графіків та карт. Щоб забезпечити можливість перегляду результатів з врахуванням сортиментів деревини було додано відповідні налаштування у файли вихідних даних. Результати отримані за допомогою G4M є детальними і багатовимірними, подальший аналіз отриманих результатів вимагає інструменту,

який допоміг би покращити візуальне представлення отриманих даних. Для цього в ПАСА, в рамках досліджуваної технології, що поєднує G4M та GLOBIOM був розроблений користувацький інтерфейс nViewer. nViewer було розроблено за допомогою мови програмування JAVA; за допомогою nViewer результати моделювання можна переглядати у формі таблиць та карт на рівні країни. Оскільки вихідні файли з результатами роботи досліджуваної інформаційної технології, генеруються у G4M, то і для перегляду результатів інформаційної технології використовується nViewer. Щоб мати можливість переглядати дані в nViewer, у G4M генеруються файли з розширенням .gdt, .mdc та .mdt, в яких містяться дані для перегляду у табличному вигляді, у вигляді карти, а також налаштування. Після цього у папці, де знаходяться робочі файли nViewer, у файлі main.mnu необхідно вказати адресу розташування вихідних даних G4M (рисунок 4.12).

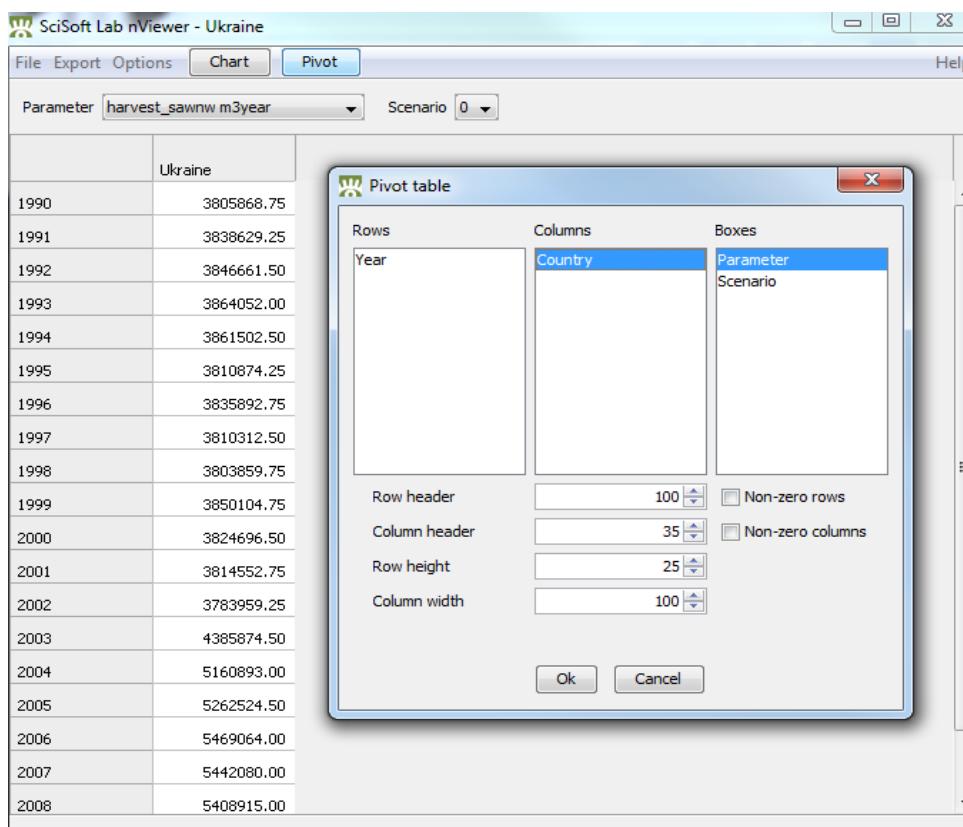


Рисунок 4.12 – Початковий екран nViewer та меню налаштування режиму «Pivot table»

На початковому екрані nViewer (Рисунок 4.12) відображається назва одного з параметрів, період моделювання, значення впродовж попередньо визначеного періоду моделювання та сценарій на рівні країни. Оскільки такий спосіб перегляду результатів не завжди є зручним, то у nViewer передбачено режим перегляду «Pivot table». У вікні налаштувань цього режиму можна обрати зручний спосіб перегляду параметрів. Зокрема, можна вибрати, які дані будуть відображатися в стовпцях, колонках, списках випадання, також можна визначити ширину та довжину колонок та рядків, і брати чи показувати нульові значення чи ні. Вигляд таблиці перегляду після налаштувань (Рисунок 4.13).

	st_new_th m3	harvest_old_fc m3y	harvest_old_th m3y	harvest_restw m3y	harvest_sawnw m3	harvest_total m3ye	rotation_avg year
1992		43599.05	11347228.00	7544169.00	3846661.50	11390830.00	272.99
1993		44157.02	10151464.00	6331572.00	3864052.00	10195624.00	270.23
1994		43610.64	9980813.00	6162924.00	3861502.50	10024426.00	270.48
1995		43275.02	9786445.00	6018849.00	3810874.25	9829723.00	270.71
1996		42968.29	9716554.00	5923633.00	3835892.75	9759526.00	270.94
1997		42561.97	9650525.00	5882778.00	3810312.50	9693091.00	271.29
1998		42094.79	9594869.00	5833107.00	3803859.75	9636967.00	271.63
1999		41601.73	9540207.00	5731707.50	3850104.75	9581812.00	271.98
2000		41176.10	9490716.00	5707199.50	3824696.50	9531896.00	272.32
2001		40721.34	9438612.00	5664784.50	3814552.75	9479337.00	272.78
2002		40758.87	9410938.00	5667737.00	3783959.25	9451696.00	273.01
2003		39386.17	9366151.00	5019663.00	4385874.50	9405537.00	274.39
2004		36898.94	9346175.00	4222180.50	5160893.00	9383074.00	276.57
2005		34624.06	9284242.00	4056341.75	5262524.50	9318866.00	278.99
2006		34562.56	9245043.00	3810541.50	5469064.00	9279606.00	278.99
2007		36175.58	9203794.00	3797889.00	5442080.00	9239969.00	273.99
2008		37883.18	9151460.00	3780427.75	5408915.00	9189343.00	268.99

Рисунок 4.13 – Вікно перегляду в режимі «Pivot table»

Окрім перегляду даних в режимі таблиці також передбачено можливість створення графіків. Зокрема можна створити 2D та 3D гістограми, векторну та стовпчикову діаграму, а також стандартний лінійний графік.

Одна з опцій nViewer – експортування файлів. Згенеровану таблицю чи графік можна експортувати з nViewer як текстовий файл з розширенням .csv або як графічний файл з розширенням .png (рисунок 4.14).

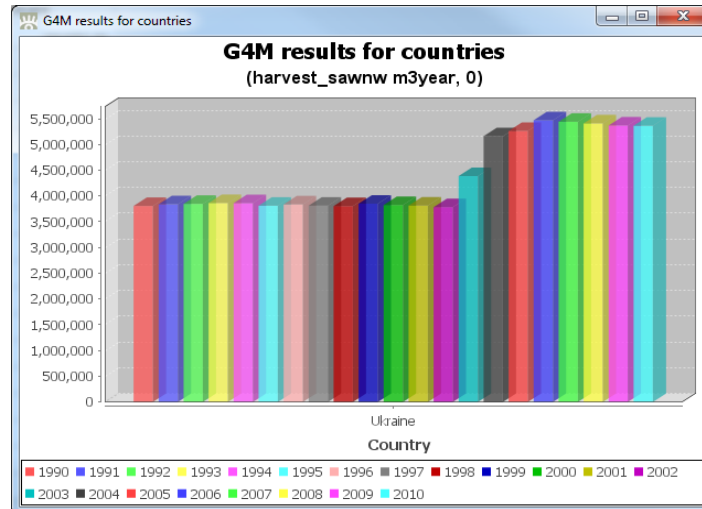


Рисунок 4.14 – Вигляд графіка в nViewer

4.3.2 Огляд мови програмування GAMS та середовища GAMS IDE

GAMS (General Algebraic Modelling System – загальна система алгебраїчного моделювання) – це високорівнева система моделювання для математичного програмування та оптимізації [107] розроблена на початку 80-их років XX ст. [107,108]. GAMS було розроблено спеціально для моделювання лінійних, нелінійних та змішаних дискретних задач оптимізації. Система є особливо зручною для вирішення складних та комплексних задач [107].

Структура моделі GAMS складається з таких блоків:

- Декларація індексів, параметрів та змінних;
- Ініціалізація цільової функції та рівнянь;
- Визначення моделі;
- Вибір солвера та виклик цільової функції.

Код простої моделі розробленої за допомогою GAMS виглядає наступним чином (Рисунок 4.15).

```

SETS
  I  canning plants / SEATTLE, SAN-DIEGO /
  J  markets        / NEW-YORK, CHICAGO, TOPEKA / ;

PARAMETERS
  A(I) capacity of plant i in cases
      / SEATTLE 350
      SAN-DIEGO 600 /
  B(J) demand at market j in cases
      / NEW-YORK 325
      CHICAGO 300
      TOPEKA 275 / ;

TABLE D(I,J) distance in thousands of miles
      NEW-YORK CHICAGO TOPEKA
SEATTLE 2.5 1.7 1.8
SAN-DIEGO 2.5 1.8 1.4 ;

SCALAR F freight in dollars per case per thousand miles /90/ ;
PARAMETER C(I,J) transport cost in thousands of dollars per case ;
C(I,J) = F * D(I,J) / 1000 ;

VARIABLES
  X(I,J) shipment quantities in cases
  Z total transportation costs in thousands of dollars ;

POSITIVE VARIABLE X ;

EQUATIONS
  COST define objective function
  SUPPLY(I) observe supply limit at plant i
  DEMAND(J) satisfy demand at market j ;
  COST .. Z =E= SUM((I,J), C(I,J)*X(I,J)) ;
  SUPPLY(I) .. SUM(J, X(I,J)) =L= A(I) ;
  DEMAND(J) .. SUM(I, X(I,J)) =G= B(J) ;

MODEL TRANSPORT /ALL/ ;
SOLVE TRANSPORT USING LP MINIMIZING Z ;

```

Рисунок 4.15 – Структура моделі GAMS на прикладі транспортної задачі [107]

Для визначення індексів у GAMS використовуються SETS. Для декларації SETS необхідно визначити його ім'я, при потребі додати пояснювальний текст, що фактично виконує роль коментаря, і безпосередньо перелік самих індексів [108]. Запис нового SET починається з нового рядка, якщо ж декларацію SETS завершено то необхідно відділити їх від наступного структурного елемента крапкою з комою (;).

У структурному елементі PARAMETERS визначаються параметри моделі відповідно до раніше заданих SETS. PARAMETERS бувають кількох типів, безпосередньо PARAMETER, TABLE, SCALAR. PARAMETER використовується, якщо значення залежать від одного індексу, якщо ж значення залежать від двох чи більше індексів, то застосовується формат TABLE. У випадку, коли значення не прив'язані до індексів, то використовується формат SCALAR [108].

VARIABLES – це змінні, яку будуть використовуватися для знаходження розв'язку задачі. Змінні та їх зв'язок з індексами повинні бути задекларованими до початку їх використання. У GAMS існує близько 10 видів VARIABLES, кожен з яких

задає певні обмеження щодо числових значень змінних. У вищенаведеному прикладі використовується два типи змінних: VARIABLES та POSITIVE VARIABLE. VARIABLES не має ніяких обмежень щодо числових значень, тоді як POSITIVE VARIABLE вказує на те, що числове значення змінної допустимо тільки більше нуля [108].

EQUATION у цій частині визначаються рівняння, що будуть вирішені чи оптимізовані, а також обмеження щодо змінних, які повинні бути дотриманими під час розв'язку. Перш ніж обмеження будуть заданими, рівняння повинні бути задекларованими. Рівняння вважається задекларованим якщо визначено його назву, та вказано зв'язок з індексами, якщо такий існує, наприклад:

COST (назва рівняння) { пояснювальний текст }

Запис обмежень рівняння починається з назви рівняння та символу «..» після чого записується права та ліва частина рівняння, розділені знаками =E= (рівність), =L= (менше рівне) чи =G= (більше рівне). Як правило, цільову функцію декларують першою, проте вона розпізнається у GAMS як цільова функція після її виклику у блоці SOLVE.

MODEL є обов'язковим структурним елементом, за допомогою нього визначають, які рівняння будуть розв'язуватись. Також у MODEL можна записати пояснювальний текст, у прикладі введено назву моделі – TRANSPORT. У прикладі MODEL визначено як /ALL/, тобто всі рівняння включаються в розв'язок. Якщо ж необхідно включити лише частину рівнянь, то їх перелік вводиться між похилими рисками [108].

SOLVE – це також обов'язковий структурний елемент, SOLVE дає команду GAMS використати один з вибраних солверів щоб оптимізувати модель або розв'язати систему алгебраїчних рівнянь [108]. Запис SOLVE має таку структуру:

SOLVE {назва моделі} USING {тип солвера} MINIMAZING/MAXIMIZING {назва цільової функції}.

Отже, дається команда запустити певну модель (наприклад TRANSPORT) використовуючи (USING) певний тип солвера, це може бути LP – лінійне програмування, NLP – нелінійне програмування, CNS – для розв’язування обмежених нелінійних систем без цільової функції, тощо. Також визначається чи функція мінімізується чи максимізується (MINIMIZING або MAXIMIZING) і вказується назва функції, яка мінімізується (максимізується).

4.3.3 Програмна реалізація методу моделювання лісокористування з рекурсивними обмеженнями

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).

Розроблений метод також реалізовано з використанням мови програмування GAMS, що виправдано з точки зору простоти інтеграції методу в GLOBIOM.

Програмна реалізація методу аналізу лісокористування та аналіз результатів проводилися в середовищі GAMS IDE (GAMS Integrated Development Environment – інтегроване середовище розробки GAMS).

Програмно реалізований метод складається з файлів вхідних даних, модуля попередніх обчислень, оптимізаційної моделі та файлу вихідних даних.

У модулі попередніх обчислень відбувається декларація індексів (SETS). Задекларовано індекси елемента сітки (g), вікового класу (i) та періоду моделювання (t) (Рисунок 4.16).

Для індексу періоду моделювання (t) названо всі його елементи, тоді як для індексів елемента сітки (g) та вікового класу (i) використано іншу форму запису. Вказано тільки перший та останній елемент індексів:

```
i 'age classes' /c01 * c22/
```

При такій формі запису компілятор GAMS заповнює значення індексів між вказаними з кроком 1.

The screenshot shows the GAMS IDE window with the following content:

```

gamside: C:\Docs\gamssdir\ForestManagement\FM_v_1008ua\main_fm_v_1008ua.gpr - [C:\Docs\gamssdir\Forest
IDE File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
HARVAREA_VAR {a} gdx=. \gdx\01.gdx s=. \01
01_PreCalc.gms
SETS
g 'grid cells' /g001 * g159/,
i 'age classes' /c01 * c22/,
t 'initial years of simulation periods' /2000, 2010, 2020, 2030, 2040/ ;

*Includes
#include GridCell_AgeClass_G4M_UA.gms
$include AgeStruct_g4m_UA_300316.gms
$include Biomass_ha_UA_220615.gms
$include OptRotTime_g4m_UA.gms
$include TimePeriod_GridCell_UA.gms

```

Рисунок 4.16 – Декларація індексів та підключення вхідних даних у середовищі GAMS IDE

Наступним кроком вказується, що кожен елемент сітки включає 22 класи віку деревостану. Для цього потрібно створити окремий індекс, який створить зв'язок між індексами елемента сітки (g) та вікового класу (i). Оскільки такий масив індексів є дуже великим (22 x 159 елементів), то для зручності, його було ініціалізовано в окремому файлі (GridCell_AgeClass_G4M_UA.gms), який підключено в модулі попередньої обробки даних (Рисунок 4.17).

Після ініціалізації такого масиву індексів, його можна використовувати у прив'язці до параметрів. Наприклад, ініціалізується параметр площі лісу, який зв'язаний з вже визначеним масивом індексів, це дозволяє в майбутньому обчислити площу лісу в елементі сітки звернувшись до конкретного елемента чи розрахувати площу десятирічних лісів сумарно по всіх елементах сітки.


```

IDE gamside: C:\Docs\gamsdir\ForestManagement\FM_v_1008ua\main_fm_v_1008ua.gpr - [C:\Docs\gamsdir\ForestManagement\FM_v_
IDE File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
HARVAREA_VAR
01_PreCalc.gms | GridCell_AgeClass_G4M_UA.gms
+ 22 age classes
SET GridClassArea_UA (g,i) 'correspondence between grid cells and age classes [G4M]'
/
g001.c01
g001.c02
g001.c03
g001.c04
g001.c05
g001.c06
g001.c07
g001.c08

```

Рисунок 4.17 – Масив індексів для зв'язку елементів сітки (g) та вікових класів
(i)

Коли визначено блок SETS, записується блок PARAMETERS Ініціалізація частини параметрів відбувається в окремих файлах, оскільки об'єм даних є дуже великим. Такі файли приєднуються до модуля попередніх обчислень. Параметри, числові значення яким будуть присвоєні пізніше або які є невеликими за обсягом декларуються безпосередньо в модулі попередніх обчислень. (Рисунок 4.18).

```

IDE gamside: C:\Docs\gamsdir\ForestManagement\FM_v_1008ua\main_fm_v_1008ua.gpr - [C:\Docs\gamsdir\Fc
IDE File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
HARVAREA_VAR | gdx=\gdx\01.gdx s=\01
01_PreCalc.gms | AgeStruct_g4m_UA_300316.gms | GridCell_AgeClass_G4M_UA.gms
$include Biomass_ha_UA_220615.gms
$include OptRotTime_g4m_UA.gms
$include TimePeriod_GridCell_UA.gms

PARAMETERS
GridArea (g)          forest area in the grid cell [ha]
MAI (g,i)
maxMAI (g)
PAI (g,i)
calc (g,i)
SumBiom
ConvFactor           conversion tC into m3          /4/,
Biomass_ha (g,i)     biomass per grid per age class in 2000 [m3 per ha]
Biomass (g,i)        biomass per grid per age class in 2000 [m3]
AvgRotTime           average rotation time [years]
ForestGrid (g)       grid cells with available forest [1 or 0]
RotTimeAdj (g)       rotation time [10 years]

```

Рисунок 4.18 – Блок PARAMETERS

Частина параметрів є зв'язаною з двома індексами (наприклад $MAI (g, i)$ – середній щорічний приріст біомаси), проте вони ініціалізовані як PARAMETER, а не

TABLE. Оскільки було створено зв'язок між індексами елементів сітки (g) та вікових класів (i), то задавати параметри як TABLE не потрібно.

Коли визначено індекси та параметри, задаються рівняння для проведення попередніх обчислень (Рисунок 4.19).

```

$offtext
LOSSES_T(t,g,i)$((FV(t,g,i)-FV(t+1,g,i))>=0)= 0;
LOSSES_T(t,g,i)$((FV(t,g,i)-FV(t+1,g,i))<0)= FV(t,g,i)-FV(t+1,g,i);
LOSSES_T('2040',g,i)$((FV('2040',g,i)-FV_2050(g,i))>=0)= 0;
LOSSES_T('2040',g,i)$((FV('2040',g,i)-FV_2050(g,i))<0)= FV('2040',g,i)-FV_2050(g,i);

DCOSTS(t,g,i)= FV(t+1,g,i)-FV(t,g,i);
DCOSTS(t,g,i)$ (DCOSTS(t,g,i)>0)= 0;
*DCOSTS(t,g,'c01')= FV(t+1,g,'c01')-FV(t,g,'c01');

DCOSTS('2040',g,i)= FV_2050(g,i)-FV('2040',g,i);
DCOSTS('2040',g,i)$ (DCOSTS('2040',g,i)>0)= 0;
*
+++YEAR 2000+++
FORESTVALUE(g,i)= FV('2000',g,i);
LOSSES(g,i)= LOSSES_T('2000',g,i);
DELAYCOSTS(g,i)= DCOSTS('2000',g,i);

```

Рисунок 4.19 – Приклад запису рівнянь для виконання попередніх обчислень

Зокрема, обчислюються найважливіші параметри: вартість лісу ($FV(t, g, i)$), втрати вартості лісу при передчасних рубках ($LOSSES_T(t, g, i)$) та втрати вартості лісу при запізнілих рубках ($DCOSTS(t, g, i)$). Кожен з цих параметрів обчислюється для всіх періодів моделювання (t). Підчас роботи блоку оптимізації, значення цих параметрів будуть змінюватися при зміні періоди моделювання і їх не потрібно буде обчислювати безпосередньо перед кожним кроком оптимізації. Також присвоюються початкові значення вищенаведених параметрів для першого періоду моделювання. Щоб присвоїти значення для конкретного періоду моделювання, потрібно звертатися безпосередньо до відповідного значення індексу. Індекс першого періоду має значення «2000», тому параметр визначатиметься наступним чином:

$$FORESTVALUE(g, i) = FV('2000', g, i);$$

Варто також звернути увагу на запис в командному рядку (Рисунок 4.19). Щоб отримати можливість переглядати результати попередніх обчислень необхідно створити файл .gdx, тому в командному рядку робиться наступний запис:

`gdx = .\gdx\01.gdx`

Ліва частина запису означає що створюється файл типу `gdx`, а права частина вказує відносний шлях до його розташування та назву файлу. Окрім цього необхідно щоб дані цього блоку попередніх обчислень та результати були збережені для використання при роботі блоку оптимізації. Для цього записується наступна команда:

`s = .\t\01`

Ліва частина запису означає команду зберегти, а права частина запису вказує відносний шлях та назву файлу, що зберігається у форматі `.g00`.

Коли всі необхідні записи зроблено і визначено потрібні індекси, рівняння та параметри, то запускається програма, в процесі роботи якої ініціалізуються вхідні дані, розв'язуються рівняння, створюється файл вихідних даних та зберігаються дані для використання у наступному блоці.

Якщо не було виявлено помилок, то можна переходити до наступного кроку – оптимізації.

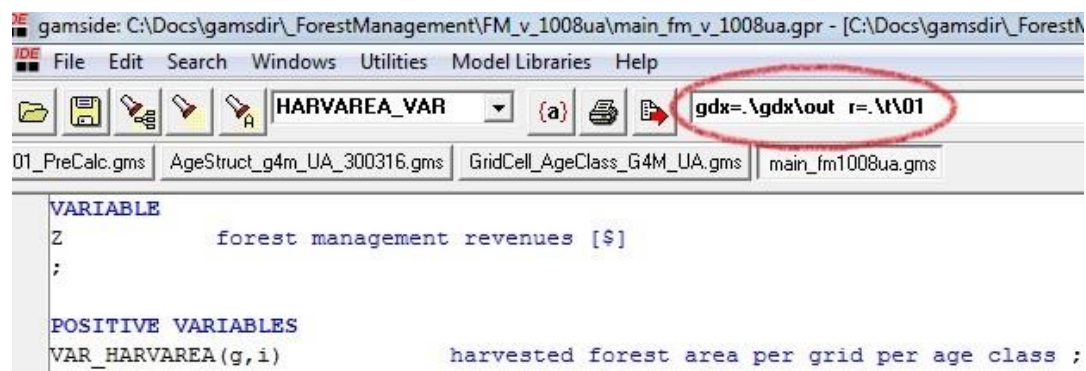
Спочатку ініціалізуються додаткові параметри, варто зауважити, що індекси та параметри, які були задані у попередньому блоці, не потрібно ініціалізовувати знову, оскільки інформація про них зберігається у згенерованому файлі `01.g00`. Щоб отримати доступ до його даних, вже у командному рядку блоку оптимізації прописується звертання до цього файлу:

`r = .\t\01`

Ліва частина запису означає команду звертання до файлу, а права частина вказує шлях до нього та назву. У тому ж командному рядку, аналогічно до попереднього блоку створюється файл вихідних даних з розширенням `.gdx`.

Оскільки розробляється оптимізаційна модель, то потрібно визначити змінні. У даній моделі є дві змінні, одна з них типу `VARIABLE`, без обмежень її числових значень. Це змінна `Z` – залежна змінна цільової функції, яка означає обсяги прибутку внаслідок лісокористування. `I` змінна типу `POSITIVE VARIABLE` –

VAR_HARVAREA (g, i), тобто площа лісу у кожному віковому класі кожного елемента сітки. Саме її значення змінюються з метою досягнення максимального прибутку для власника лісу (Рисунок 4.20).



```

gamside: C:\Docs\gamsdir\ForestManagement\FM_v_1008ua\main_fm_v_1008ua.gpr - [C:\Docs\gamsdir\ForestM
IDE File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
HARVAREA_VAR (a) gdx=. \gdx\out r=. \r\01
01_PreCalc.gms AgeStruct_g4m_UA_300316.gms GridCell_AgeClass_G4M_UA.gms main_fm1008ua.gms

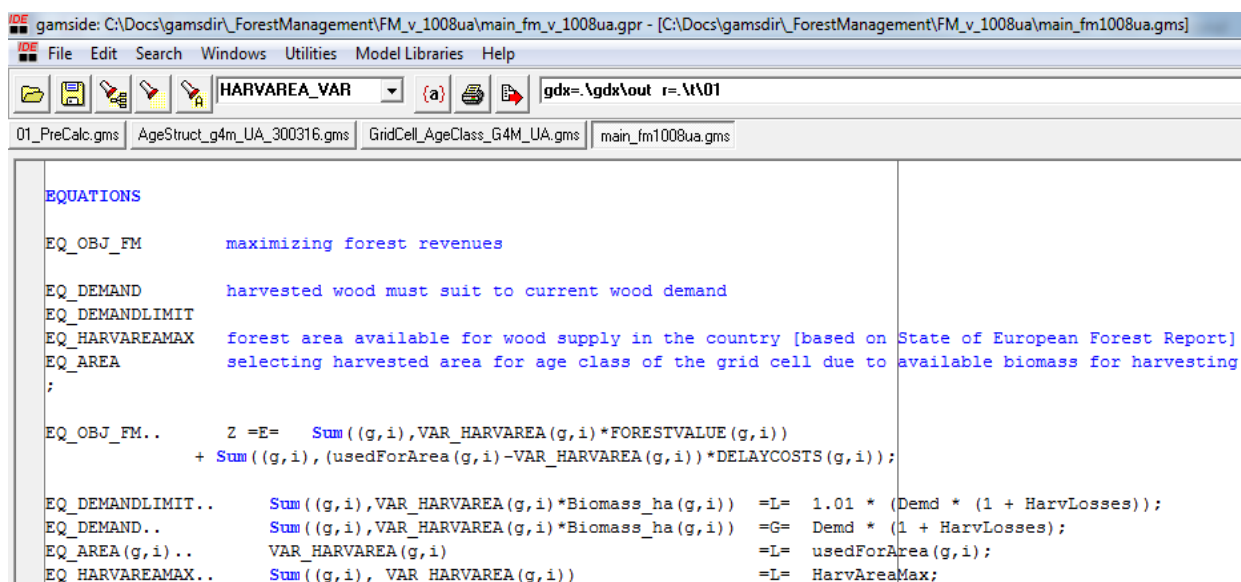
VARIABLE
Z          forest management revenues [$]
;

POSITIVE VARIABLES
VAR_HARVAREA(g,i)          harvested forest area per grid per age class ;

```

Рисунок 4.20 – Ініціалізація змінних та створення файлу вихідних даних

Наступним кроком записуються рівняння та цільова функція – EQUATIONS. Спочатку визначаються рівняння з лівої сторони записується назва рівняння, з правої сторони у коментарях записується пояснення до рівняння. Хоча й опис рівняння не є обов'язковим, для зручності користувача і покращення розуміння роботи програми, описи варто включати. Після того як рівняння задекларовано, записуються їх обмеження. Назва кожного рівняння співвідноситься з певним обмеженням, тому назва рівняння відділяється від обмежень двома крапками (Рисунок 4.21).



```

gamside: C:\Docs\gamsdir\ForestManagement\FM_v_1008ua\main_fm_v_1008ua.gpr - [C:\Docs\gamsdir\ForestManagement\FM_v_1008ua\main_fm1008ua.gms]
IDE File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
HARVAREA_VAR (a) gdx=. \gdx\out r=. \r\01
01_PreCalc.gms AgeStruct_g4m_UA_300316.gms GridCell_AgeClass_G4M_UA.gms main_fm1008ua.gms

EQUATIONS
EQ_OBJ_FM          maximizing forest revenues
EQ_DEMAND          harvested wood must suit to current wood demand
EQ_DEMANDLIMIT
EQ_HARVAREAMAX    forest area available for wood supply in the country [based on State of European Forest Report]
EQ_AREA           selecting harvested area for age class of the grid cell due to available biomass for harvesting
;

EQ_OBJ_FM..       Z =E=   Sum((g,i), VAR_HARVAREA(g,i)*FORESTVALUE(g,i))
                  + Sum((g,i), (usedForArea(g,i)-VAR_HARVAREA(g,i))*DELAYCOSTS(g,i));

EQ_DEMANDLIMIT.. Sum((g,i), VAR_HARVAREA(g,i)*Biomass_ha(g,i)) =L= 1.01 * (Demd * (1 + HarvLosses));
EQ_DEMAND..       Sum((g,i), VAR_HARVAREA(g,i)*Biomass_ha(g,i)) =G= Demd * (1 + HarvLosses);
EQ_AREA(g,i)..   VAR_HARVAREA(g,i) =L= usedForArea(g,i);
EQ_HARVAREAMAX.. Sum((g,i), VAR_HARVAREA(g,i)) =L= HarvAreaMax;

```

Рисунок 4.21 – Цільова функція та рівняння

Першою записано цільову функцію, після цього всі наступні обмеження. Рівняння може бути прив'язаним до індексів, як наприклад:

$$EQ_AREA(g, i),$$

Це означає, що дане обмеження повинно виконуватися на для всіх параметрів та змінних, які записані в даному рівнянні із зазначеним індексом.

Якщо потрібно щоб дане обмеження виконувалось лише для деяких значень параметрів чи індексів, то перед записом обмеження можна вставити умову. У даному випадку запису умови не потрібно.

Після запису рівнянь вказується, які з них будуть виконуватися і вибирається солвер. Також визначається назва моделі, у даному випадку це FM (forest management - лісокористування) і вибрано всі рівняння для пошуку оптимального значення (Рисунок 4.22).

```

MODEL FM /ALL/;

*           +++ Time loop +++
LOOP (t,

SOLVE FM USING LP MAXIMIZING Z;

```

Рисунок 4.22 – Вибір рівнянь та солвера для розв'язку оптимізаційної задачі

Також визначено цикл для розв'язку оптимізаційної задачі. Оскільки задача розв'язується для кожного періоду окремо, то щоб не запускати модель декілька разів, створено цикл за індексом періоду моделювання.

Отже, задачу оптимізації буде розв'язано послідовно для кожного періоду без зупини роботи програми. Також після кожного періоду оптимізації, передбачено оновлення вхідних даних, щоб використовувати ті які відповідають наступному періоду моделювання.

Найважливіший крок, це коли визначаються критерії розв'язку задачі. Вказано, що розв'язується (SOLVE) модель FM, використовуючи метод лінійного програмування (LP – LINEAR PROGRAMMING) максимізуючи (MAXIMIZING) змінну Z , яка відповідно і вказує, яке з рівнянь є цільовою функцією.

Коли всі елементи для проведення оптимізації визначено, запускається програма. Спочатку зчитується файл з даним блоку попередніх обчислень, потім ініціалізуються додаткові параметри та змінні, відбувається оптимізація першого періоду, після завершення результати записуються у файл з вихідними даними, оновлюються параметри для наступного періоду, знову відбувається оптимізація і так продовжується доти, доки цикл не буде завершено.

Вихідні дані можна переглядати у середовищі GAMS IDE, користувацький інтерфейс якого представлено на рисунку 4.23.

	2000	2010	2020	2030	2040
c01				-196.746041916432	-600.540655331588
c02			-291.232204127105	-888.9468729157	-1097.33941974134
c03		-431.094805743318	-1315.8585282295	-1624.33040468773	-1628.32314507368
c04	-638.125622459531	-1947.79206617278	-2404.40579836812	-2410.31602949559	-1903.86205477695
c05	-2883.20807416155	-3559.10794164413	-3567.85652750792	-2818.18092585648	-2317.54658378954
c06	-5268.34919002622	-5281.2992342522	-4171.59620936494	-3430.53508568501	-2655.74482488282
c07	-7817.61300844546	-6174.98144789947	-5078.02995479711	-3931.15109923426	-2945.0828693165
c08	-9140.48099773001	-7516.72481923257	-5819.06394779198	-4359.44208591666	-3186.97628687239
c09	-11126.5889549729	-8613.63615229345	-6453.03923311065	-4717.50343481314	-3386.05825621809
c10	-12750.2856867984	-9552.07444516589	-6983.05749846481	-5012.1933821674	-3547.12246604101
c11	-14139.4036065714	-10336.6309533587	-7419.27060885885	-5250.60775826267	-3674.58277860546
c12	-15300.7388940193	-10982.332917026	-7772.18212651624	-5439.26015749009	-3772.65574572264
c13	-16256.5355354983	-11504.7281741202	-8051.46336719446	-5584.45210657029	-3844.72540858928
c14	-17029.6081292804	-11918.132634519	-8266.35331515089	-5691.13281314462	-3894.06615020046

Рисунок 4.23 – Середовище розробки GAMS IDE: перегляд вихідних даних

У лівій частині знаходиться перелік всіх індексів, параметрів, змінних та рівнянь, які були ініціалізовані у моделі. Вказується їх номер по порядку ініціалізації, назва, тип, розмір та кількість значень. Також існує вікно пошуку елементів. У правій частині можна переглядати кожен елемент, який знаходиться у лівій частині. У верхній частині вікна відображається вибраний елемент, якщо він багатовимірний, можна налаштувати режим його перегляду, наприклад вибрати лише одне значення, або один індекс. У нижній частині вікна відображено безпосередньо значення вибраного елемента. Тут також можна редагувати режим перегляду міняючи положення стовпців та рядків.

У GAMS IDE передбачено перегляд вихідних даних у формі графіків та діаграм, зокрема можна побудувати гістограми, лінійні графіки, 3D графіки. Дуже важливою є опція експортування даних. Дані можна експортувати у формат HTML та для перегляду у MS Excel. При цьому можна вибрати чи експортувати абсолютно всі дані, чи відфільтровані дані, чи лише ті, які вибрані в даний момент.

4.4 Висновки до Розділу 4

Представлено схеми обміну даними між моделями-складовими інформаційної технології аналізу процесів землекористування до та після доповнення зв'язків між ними, що дозволило застосувати розроблені та удосконалені методи у досліджуваній інформаційній технології.

Охарактеризовано програмну реалізацію інформаційної технології аналізу процесів землекористування, та технічні засоби, що застосовувалися. Представлено програмну реалізацію розроблених та удосконалених методів, а також характеристику користувацьких інтерфейсів та їхні можливості для подальшого дослідження отриманих результатів обчислень.

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 організацією даних.

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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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 вики-дів CO2 лісами України при різних соціально-економічних сценаріях / О.В. Турков-ська, 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. 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 CO₂ 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 на-укової конференції Інституту прикладної математики та фундаментальних наук. – Львів: НУ “Львівська політехніка”. – 2013. – с. 166-168.
 14. Турковська О.В. Інформаційні технології для аналізу емісій CO₂ 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 гло-бальних моделях землекористування / О.В. Турковська, М.І. Густі // Захист навко-

- лишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: 2-ий міжнар. 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.
 17. The General Assembly of the United Nations. 55/2 United Nations Millennium Declaration / The General Assembly of the United Nations. – New York, 2000. – Available online at <http://www.un.org/millennium/declaration/ares552e.htm>
 18. The General Assembly of the United Nations. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer / The General Assembly of the United Nations. – New York, 1987. – Available online at [https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume 1522/volume-1522-I-26369-English.pdf](https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201522/volume-1522-I-26369-English.pdf)
 19. The General Assembly of the United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change / The General Assembly of the United Nations. – New York, 1992. – Available online at <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
 20. The General Assembly of the United Nations. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change / The General Assembly of the United Nations. – Kyoto, 1998. – Available online at <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
 21. The General Assembly of the United Nations. Paris Agreement / The General Assembly of the United Nations. – Paris, 2015. – Available online at <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
 22. Intergovernmental Panel on Climate Change. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) / Intergovernmental Panel on Climate Change // Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2014. – P. 811–922.
 23. Intergovernmental Panel on Climate Change. Glossary / Intergovernmental Panel on Climate Change // Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and

- Forestry Glossary / Hayama, Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2003. – 23 p.
24. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths / [E.F. Lambin, B.L. Turner, H.J. Geist [et al.]] // Global Environmental Change – 2001. – № 4. – P. 261–269.
 25. Food and Agriculture Organization. Global Forest Resources Assessment 2015 Food and Agriculture Organization //–Rome, 2015. – 244 p.
 26. Основні засади державної екологічної політики України на період до 2020 року / Київ, 2010. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2818-17>
 27. Коржов В.Л. Значення біомаси дерев у процесі оптимізації енергетичного балансу України / В.Л. Коржов // Наукові праці Лісівничої академії наук України: збірник наукових праць. – 2008. – № 6. – С. 20–24.
 28. Дідух Я. Енергетичні проблеми екосистем і забезпечення сталого розвитку України / Я. Дідух // Вісник Національної академії наук України. – 2007. – № 4. – С. 3–12.
 29. Прокіп А.В. Оцінка потенціалу деревинних відходів для енергетичного використання / А.В. Прокіп // Науковий вісник НЛТУ України. – 2009. – № 19.4. – С. 97–103.
 30. Дебринюк Ю.М. Планаційні лісові насадження як об'єкти невичерпного виробництва енергетичної біомаси / Ю.М. Дебринюк // Лісівництво і агрономеліорація. – 2009. – № 166. – С. 170–178.
 31. Гелетуша Г. Возможности замещения природного газа в Украине за счет местных видов топлива / Г. Гелетуша, А. Долинский // Энергетическая политика Украины. – 2006. – №3-4. – С. 60–65.
 32. Пристая О.Д. Регуляторні передумови, ресурсний потенціал та техніко-економічні перспективи енергетичного використання деревини та її відходів в Україні / О.Д. Пристая // Науковий вісник НЛТУ України. – 2010. – № 20.5. – С. 94–100.

33. Соловій І.П. Державна політика щодо власнісного статусу лісів: міжнародний досвід і актуальні проблеми / І.П. Соловій // Наукові праці Лісівничої академії наук України: збірник наукових праць. – 2012. – №10. – С. 26–34.
34. Шведюк Ю.В. Еколого-економічний аналіз методів лісовідновлення / Ю.В. Шведюк // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2012. – №10. – С. 275–282.
35. Зміна віку стиглості деревостану - шлях оптимізації вікової структури лісів і розміру лісокористування / Л.В. Полякова, С.Л. Кирилук, В.Ф. Сторожук та ін. // Лісівництво і агроеліорація. – 2002. – № 17. – С. 1–5.
36. Соловій І.П. Еколого-економічна оцінка процесу поглинання вуглецю лісовими екосистемами карпатського регіону / І.П. Соловій, Х.І. Ільків. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – № 21.17. – С. 97–103.
37. Польовський А.М. Аналіз глобальних проблем знеліснення та сталого лісокористування / А.М. Польовський. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2013. – № 23.8. – С. 27–33.
38. Nijnik M. Responding to the Kyoto Protocol through forestry: A comparison of opportunities for several countries in Europe / M. Nijnik, L. Bizikova. // Forest Policy Economics – 2008. – № 10. – P. 257–269
39. Негрей М.В. Моделювання динаміки лісових ресурсів України / М.В. Негрей, Т.В. Гнот. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2014. – № 24.9. – С. 347–355.
40. Nijnik M. Economics of climate change mitigation forest policy scenarios for Ukraine / M. Nijnik. // Climate Policy. – 2004. – № 4:3. – P. 319–336.
41. Інформаційні технології формування кадастру емісій парникових газів Львівщини / Р.А.Бунь, Н.О.Шпак, Б.М.Матолич, Х.В.Бойчук, К.І.Дмитрів, О.Б.Яремчишин. — Львів : Видавничий дім «Укрпол», 2010. — 272 с.
42. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України / Р.А.Бунь, М.І.Густі, В.С.Дачук, Л.І.Кужій, Б.Я.Олексів, Г.В.Стрямець, С.П.Стрямець, О.Є.Токар, Я.Б.Цибрівський; За ред. Р.А.Буня.- Львів: Українська академія друкарства, 2004.- 376 с.

43. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу / К: Видавнича група ВНУ, 2007. – 544 с.
44. Спицнадель, В.Н. Основи системного аналізу: Учеб. пособие. — СПб.: «Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000 г. — 326 с.
45. Юськів Б.М. Опорний конспект лекцій з дисципліни «Системний аналіз» для студентів спеціальностей 7.030404 «Міжнародна інформація» та 7.030405 «Країнознавство». – Рівне: РІС КСУ, 2003. – 48 с.
46. Using system dynamics for environmental modelling: Lessons learnt from six case studies / [S. El Sawah, D. Haase, H. Van Delden et al.] // International Environmental Modelling and Software Society. – 2012. – P. 1–8.
47. Форрестер Д. Мировая динамика / Москва: ООО "Издательство АСТ", 2003. – 379 с.
48. Selecting Among Six Modelling Approaches for Integrated Environmental Assessment and Management / [R. Kelly, A.J. Jakeman, O. Barreteau et al.] – 2012. – 35 p.
49. Modelling forest management within a global vegetation model-Part 1: Model structure and general behaviour / [V. Bellassen, Le Maire, G. Dhôte et al.] // Ecological Modelling – 2010. – № 221. – P. 2458–2474.
50. Modelling forest management within a global vegetation model-Part 2: Model validation from a tree to a continental scale // [V. Bellassen, Le Maire, O. Guin et al.] // Ecological Modelling – 2011. – № 222. – P. 57–75.
51. Cox P.M. Description of the “ TRIFFID ” Dynamic Global Vegetation Model / P.M. Cox [et al.] // Hadley Centre technical note. – 2001. – P. 1–17.
52. Mladenoff D.J. LANDIS and forest landscape models / D.J. Mladenoff // Ecological Modelling – 2004. – № 180. – P. 7–19.
53. Scheller R.M. A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: Design, validation, and application / R.M. Scheller, D.J. Mladenoff [et al.] // Ecological Modelling – 2004. – № 180. – P. 211–229.

54. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model / [S. Sitch, B. Smith, I.C. Prentice et al.] // *Global Change Biology*. – 2003. – №9. – P. 161–185.
55. LANDIS PRO: A landscape model that predicts forest composition and structure changes at regional scales / [W.J. Wang, H.S. He, J.S. Fraser et al.] // *Ecography*. – 2014. – № 37. – P. 225–229.
56. Evaluation of an integrated land use change model including a scenario analysis of land use change for continental Africa / [J. Alcamo, R. Schaldach, J. Koch et al.] // *Environmental Modelling & Software* – 2011. – № 26. – P. 1017–1027.
57. The French Forest Sector Model: version 1.0 / [S. Caurla, F. Lecocq, P. Delacote et al.] 2010. – 40 p.
58. Paying for forest carbon or stimulating fuelwood demand? Insights from the French Forest Sector Model / [F. Lecocq, S. Caurla, P. Delacote et al.] // *Journal of Forest Economics* – 2011. – № 17. – P. 157–168.
59. International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): Model Description / [M.W. Rosegrant, C. Ringler, S. Msangi, et al.] - 2008. – 42 p.
60. Estimating Armington elasticities for sawnwood and application to the French Forest Sector Model / [A. Sauquet, F. Lecocq, P. Delacote et al.] // *Resource and Energy Economics*. – 2011. – № 33. – P. 771–781.
61. Land use change modelling : current practice and research priorities / [P.H. Verburg, P.P. Schot, M.J. Dijst [et al.] // *GeoJournal*. – 2004. – № 61. – P. 309–324.
62. Werf E. Van Der Modeling linkages between climate policy and land use: an overview / E. Werf, S. Peterson // *Agricultural Economics*. – 2009. – № 40. – P. 507–517.
63. Brown D. Integrated Modeling of Land Use / Cover and the Carbon Cycle CCSP Science Plan (Land Use) / D. Brown – 2009 – 30 p.
64. Land Use in Computable General Equilibrium Models : An Overview / T.W. Hertel, S. Rose, R.S. Tol [et al.]. – GTAP Working Paper, 2008. – № 39. – 1-32 P.

65. McConnell W.J. Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change / W.J. McConnell – 2002. – 140 p.
66. Projection of the future EU forest CO₂ sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models / [H. Böttcher, P.J. Verkerk, M. Gusti et al.] // GCB Bioenergy. – 2012. – № 6. – P. 773–783.
67. Linking reduced deforestation and a global carbon market: impacts on costs, financial flows, and technological innovation / [V. Bosetti, R. Lubowski, A. Golub et al.] // Bc3 Working Paper Series – 2009. – 25 p.
68. Lubovski R.. The role of REDD in stabilising greenhouse gas concentrations [Электронный ресурс] / Lubovski R.. // Center for International Forestry Research (. – 2008. – Режим доступа: https://www.edf.org/sites/default/files/10485_Role_of_REDD_in_stabilizing_GHG_Concentrations_Lubowski.pdf
69. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets / [P. Havlík, U. Schneider, E. Schmid et al.] // Energy Policy. – 2011. – № 10. – P. 5690–5702.
70. Model documentation for the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 3.1.3) / [M. J. Schelhaas, J. Eggers, M. J. Lindner et al.]. – Wageningen : Alterra, 2007. – 118 p.
71. A global model of climate change impacts on timber markets / [B. Sohngen, R. Mendelsohn, R. Sedjo et al.] // Journal of Agricultural and Resource Economics – 2001. – № 26. – P. 326–343.
72. The European Forest Information Scenario Model – EFISCEN [Электронный ресурс] // European Forest Institute. – 2015. – Режим доступа: http://www.efi.int/portal/virtual_library/databases/efiscen/.
73. Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation / [G. Kindermann, M. Obersteiner, B. Sohngen et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2008. – № 105 – P. 10302–10307.

74. Woody biomass energy potential in 2050 / [P. Lauri, P. Havlik, G. Kindermann et al.] // *Energy Policy*. – 2014. – V. 66. – P. 19–31.
75. Enhanced policy scenarios for major emitting countries / [M. Elzen, H. Fekete, A. Admiraal et al.]. – Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2015. – 48 p
76. Gusti M. An approach to modeling landuse change and forest management on a global scale / M. Gusti, G. Kindermann // *SIMULTECH-2011: Proceedings of 1st Intern. Conf. on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, 29–31 July 2011. – Noordwijkerhout, 2011. – P. 180-185.
77. Eliasch review. Climate change: financing global forests – Richmond: The Stationery Office Limited, 2008. – 273 p.
78. WWF living forest report: Forests for a living planet – Gland: World Wide Fund for Nature, 2011. – 37 p.
79. Climate Change Impacts and Mitigation in the Developing World - An Integrated Assessment of the Agriculture and Forestry Sectors / [P. Havlík, H. Valin, M. Gusti et al.] – 2015. – Policy Research Working Paper 7477– 54 p.
80. Gusti M.I. An algorithm for simulation of forest management decisions in the global forest model / M.I. Gusti. // *Штучний Інтелект*. – 2010. – № 4. – С. 45–49.
81. Pretzsch H. *Forest Dynamics, Growth and Yield* / Berlin Heidelberg: Springer, 2010. – 664 p.
82. Models for supporting forest management in a changing environment / [L. Fontes, J.-D. Bontemps, H. Bugmann et al.] // *Forest Systems* – 2010. – № 3. – P. 8–29.
83. Economics of Forest Resources / [G. Amacher, M. Ollikainen, E. Koskela et al.] // *European Review of Agricultural Economics*. – 2010. – № 37. – P. 423-426.
84. An assessment of forest sector modeling approaches: conceptual differences and quantitative comparison / H.K. Sjølie, G.S. Latta, E. Trømborg [et al.] // *Scand. J. For. Res.* – 2015. – № 1. – P. 60–72
85. Buongiorno J., Gilless J.K. *Decision Methods for Forest Resource Management* / San Diego: Academic Press, 2003. – 439 p.

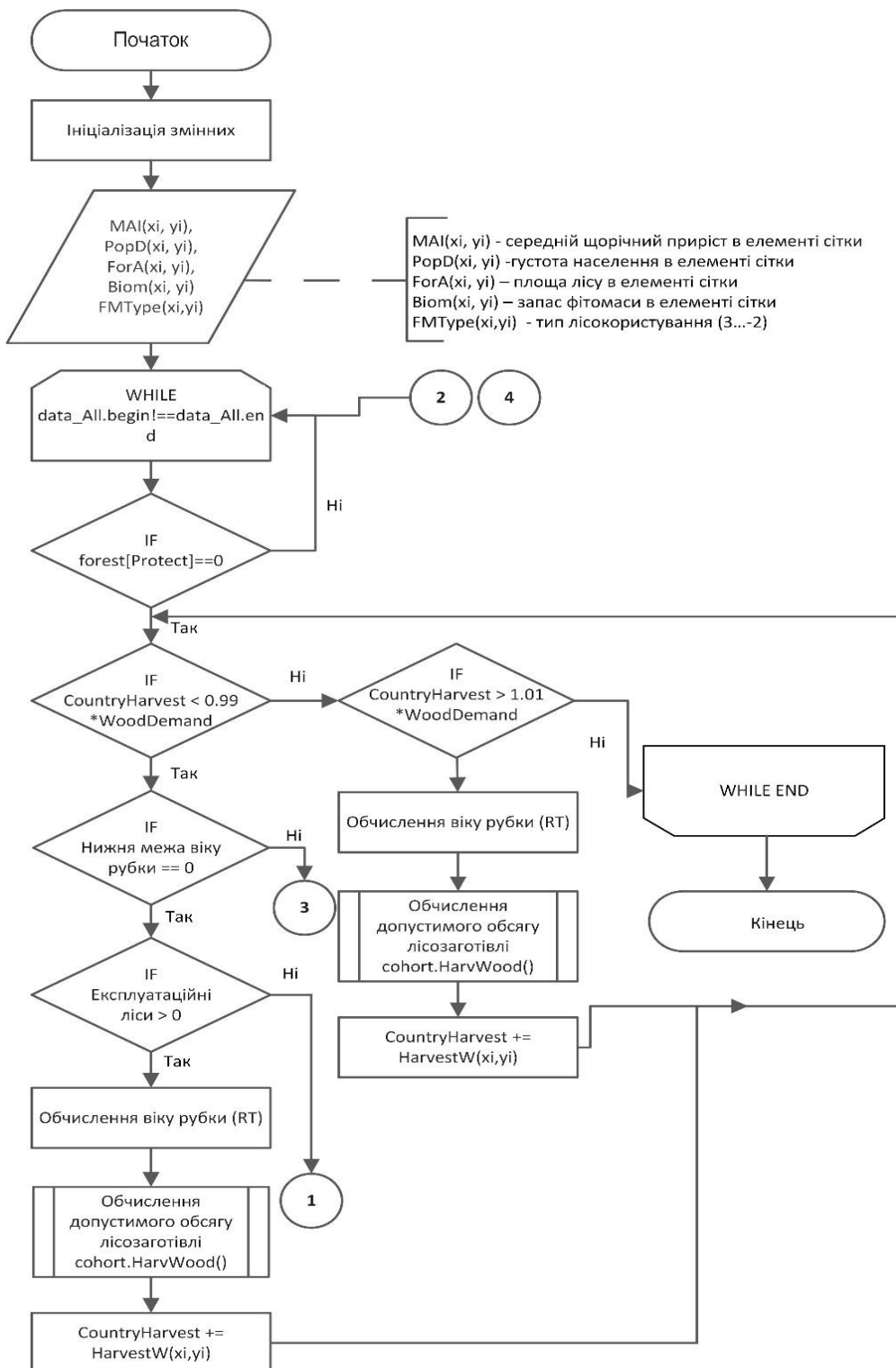
86. Predicting the Deforestation – Trend Under Different Carbon – Prices / [G.E. Kindermann, M. Obersteiner, E. Rametsteiner et al.] // Carbon Balance Management – 2006. – № 1. – P. 1–17.
87. McDill, M. E. The forest value - land and trees [Electronic resource] / M.E. McDill. – Forest resource management. – 1999. – Available at: https://www.courses.psu.edu/for/for466w_mem14/PDFs/Ch7_ForestValue.PDF
88. Basket, E. Spatial forest planning: a review / E. Basket, S. Keles // Ecological Modelling. – 2005. – Vol. 188, Issue 2-4. – P. 145–173. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.01.059
89. Gusti M. Technical description of the IIASA model cluster / M. Gusti, P. Havlík, M. Obersteiner // Laxenburg, IIASA, 2008. – 12 p.
90. Загальна характеристика лісів України [Електронний ресурс] // Державне агентство лісових ресурсів України. — 2015. — Режим доступу: http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=62921&cat_id=32867.
91. Dynamics of the land use, land use change, and forestry sink in the European Union: the impacts of energy and climate targets for 2030 / [S. Frank, H. Bottcher, M. Gusti et al.] // Climatic Change. – 2016. – № 138. – P. 253–266.
92. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century / [O. Fricko, P. Havlik, J. Rogelj et al.] // Global Environmental Change. – 2017 – № 42. – P. 251–267.
93. Land-use futures in the shared socio-economic pathways / [A. Popp, K. Calvin, S. Fujimori et al.] // Global Environmental Change– 2017 – № 42. – P. 331–345.
94. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Statistics Division. [Electronic resource]. – Mode of access <http://faostat3.fao.org/home/E>.
95. Ключ С.В. Визначення та прогнозування енергетичного потенціалу деревини та її відходів / С.В. Ключ // Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. - №22.7. – С.84-91.

96. Кондратюк О.В. Економічні аспекти використання альтернативних джерел енергії та енергозберігаючих технологій / О.В. Кондратюк, В.В. Колос // Вісник СумДУ. Серія Економіка – 2010. – №1 – С. 71–75.
97. Пуцентейло П.Р. Еколого - економічні аспекти використання відходів деревини / П.Р. Пуцентейло, М.Б. Свинтух // Інноваціна економіка. – 2013. – №2 – С. 135–139.
98. Гелетуша Г.Г. Возможности замещения природного газа за счет биомассы в / Г.Г. Гелетуша . – 2009. – 7с.
99. A demand scenario based fuelwood supply chain: A conceptual model / [G. Arabatzis G.Petridis, K.Galatsidas et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. . – №25 – P. 687–697.
100. Simangunsong B.C.H. International Demand Equations for Forest Products: A Comparison of Methods / B.C.H. Simangunsong, J. Buongiorno // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2001. – № 16. – P. 155–172 .
101. Проект енергетичної стратегії України на період до 2035 року / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. – 2014. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>.
102. Гелетуша Г.Г. Перспективи виробництва теплової енергії з біомаси в Україні / Г.Г. Гелетуша, Т.А. Желєзна, Є.М. Олійник. – К. : Вид-во "Біоенергетична асоціація України", 2013. – 23 с.
103. World population prospects: the 2012 revision / United Nations, Department of Social and Economic Affairs, Population Division. – New York, 2013. – 94 pp.
104. Smith P. Competition for land / P. Smith, P.J. Gregory, D. van Vuuren [та ін.] // Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences. – 2010. – Vol. 365. – Pp. 2941-2957.
105. Кузнецова А. Виробництво пелет в Україні: прибутковий варіант сталого розвитку? / А. Кузнецова. – 2012. [Електронний ресурс]. – Доступний з http://www.apd-ukraine.de/images/PP37_Pellets_UKR_f.pdf.

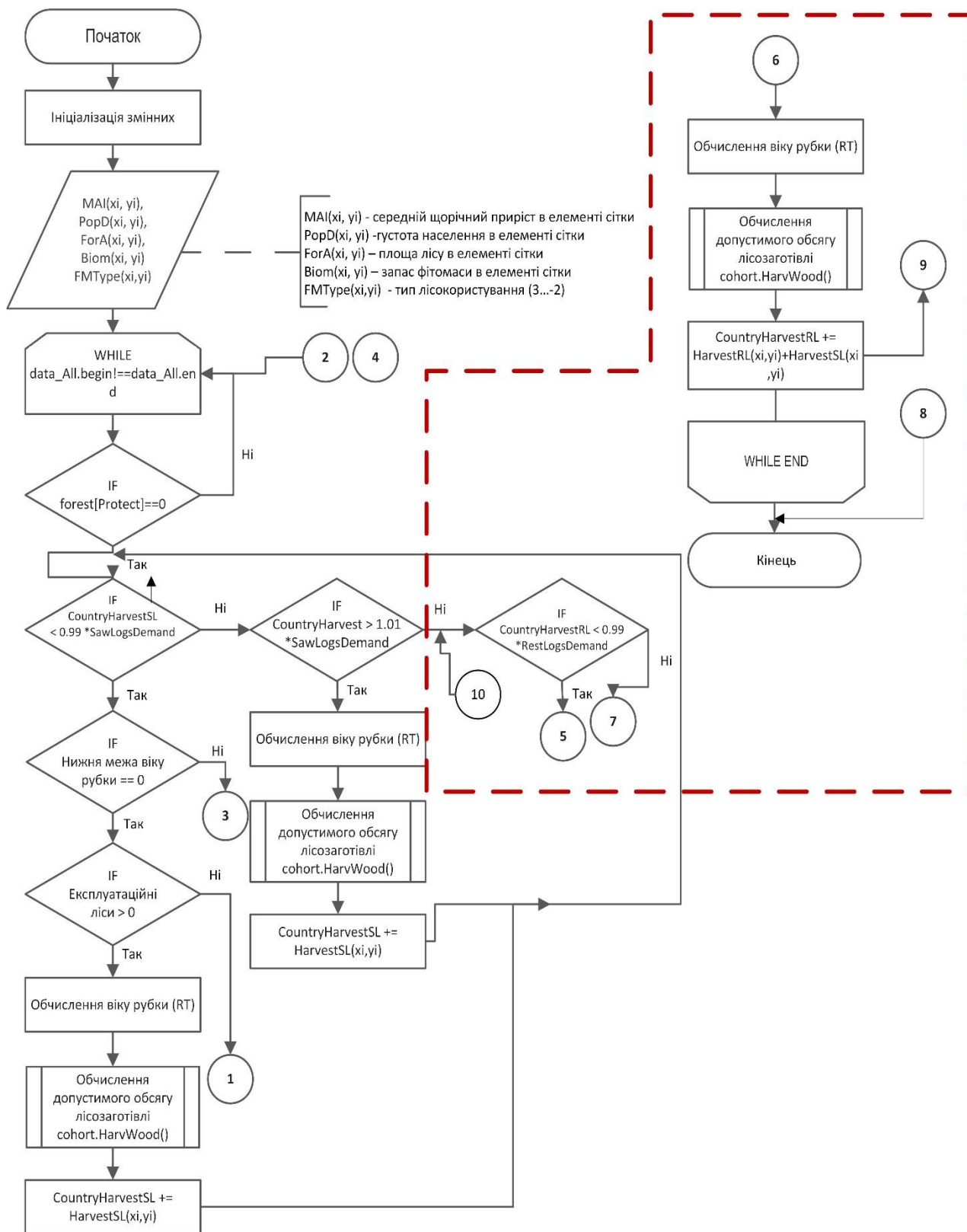
106. The United Nations Environment Programme. Global Environmental Outlook 5 / The United Nations Environment Programme // Valetta: Progress Press Ltd., 2012. – 407 p.
107. General Algebraic Modeling System [Electronic Resource] – Available online at <https://www.gams.com/>
108. McCarl B. GAMS User Guide / B. McCarl // 2016 – 929 p. – [Electronic Resource] – Available online at <http://www.gams.com/latest/docs/userguides/mccarl/mccarlgamsuserguide.pdf>

ДОДАТКИ

Додаток 1. А) Блок-схема алгоритму виконання стандартного методу моделювання лісозаготівельних операцій у G4M



Додаток 1. Б) Блок-схема алгоритму виконання удосконаленого методу моделювання лісозаготівельних операцій у G4M



Додаток 2. А) Програмна реалізація розробленого методу моделювання лісокористування засобами GAMS. Блок попередніх обчислень

SETS

```
g 'grid cells'           /g001 * g159/,
y 'years for thinning'  /y01 * y51/,
i 'age classes'         /c01 * c22/,
t 'initial years of simulation periods' /2000, 2010, 2020, 2030, 2040/ ;
```

*Includes

```
$include GridCell_AgeClass_G4M-UA.gms
$include AgeStruct_g4m-UA_300316.gms
$include Biomass_ha-UA_220615.gms
$include OptRotTime_g4m-UA.gms
$include TimePeriod_GridCell-UA.gms
```

PARAMETERS

```
GridArea(g)           forest area in the grid cell [ha]
*LEV(g,i)             land expectation value for every age class of a grid cell [$ per ha]
MAI (g,i)
maxMAI(g)
*CAI(g,i)             per 10 years
PAI(g,i)
calc(g,i)
SumBiom
ConvFactor            conversion tC into m3           /4/,
Biomass_ha(g,i)      biomass per grid per age class in 2000 [m3 per ha] [g4m estimation]
Biomass (g,i)        biomass per grid per age class in 2000 [m3]
AvgRotTime           average rotation time [years]
ForestGrid(g)        grid cells with available forest [1 or 0]
RotTimeAdj(g)        rotation time [10 years];
```

* Calculations

```
GridArea(g)          = Sum(i,ClassArea(g,i));
MAI(g,i)             = Biom_ha(g,i)* ConvFactor/(ord(i)*10);
maxMAI(g)            = smax(i,MAI(g,i));
calc(g,i) = 0$ ((MAI(g,i)-maxMAI(g))>0);
calc(g,i)=0$ ((MAI(g,i)-maxMAI(g))<0);
calc(g,i) = ord(i)$ (MAI(g,i)=maxMAI(g));

RotTime(g)           =sum(i, calc(g,i))*10;

SumBiom              = Sum((g,i), Biom_ha(g,i)*ClassArea(g,i));
Biomass_ha(g,i)      = Biom_ha(g,i)* ConvFactor;
Biomass(g,i)         = Biomass_ha(g,i)*ClassArea(g,i);
```

* Rotation time adjustment

```
ForestGrid(g)$ (RotTime(g) > 0) = 1;
ForestGrid(g)$ (RotTime(g) = 0) = 0;
RotTimeAdj(g)           = RotTime(g)/10;
AvgRotTime              = Sum(g, RotTimeAdj(g)) / Sum(g, ForestGrid(g));
```



```

*Age structure for 2000

Parameter part(i) percentage of area in each age class
      ForArea;
ForArea = sum((g,i),ClassArea(g,i));
part(i) = sum(g, ClassArea(g,i))/ForArea*100;

*NPV calculation

PARAMETERS
FV(t,g,i)      forest value for harvesting in the first period for each age class in every
grid cell [$ per ha],
MAX_FV(g,i)    higher forest value between current and following simulation periods
FORESTVALUE(g,i) forest value at the current simulation period
DELAYCOSTS(g,i)
DCOSTS (t,g,i)
LEV(g)         land expectation value [$ per ha]

Price          wood price [$ per m3]                /160/,
HarvCosts      harvesting costs [$ per m3]          /10/,
PlanCosts      planting costs [$ per ha]            /450/,
DiscountRate   /0.04/

R(g)           rotation time to calculate NPV
BIO(g)
Diff(g,i)
TEST_PARAM(t,g,i)
LOSSES_T(t,g,i)      possible profit losses in case of harvesting at the simulation period
LOSSES(g,i)
iter
FV_2050(g,i)
;
R(g) = RotTime(g);
Diff(g,i) = ord(i) - RotTimeAdj(g);
Diff(g,i)$ (Diff(g,i) eq 1 ) = 2;
Diff(g,i)$ (Diff(g,i) eq 0 ) = 1;
Diff(g,i)$ (Diff(g,i)<0) = 0;
Diff(g,i)$ (Diff(g,i)>1) = 0;

BIO(g) = Sum(i, Biomass_ha(g,i) * Diff(g,i));

iter=0;
loop(t,
      FV(t,g,i) = (Price * Biomass_ha(g,i+iter)- PlanCosts)/((1+DiscountRate)**(10+10*iter));
      iter=iter+1;
);
FV_2050(g,i)= ((Price * Biomass_ha(g,i+5)- PlanCosts)/(1+DiscountRate)**60);

LOSSES_T(t,g,i)$((FV(t,g,i)-FV(t+1,g,i))>=0)= 0;
LOSSES_T(t,g,i)$((FV(t,g,i)-FV(t+1,g,i))<0) = FV(t,g,i)-FV(t+1,g,i);
LOSSES_T('2040',g,i)$((FV('2040',g,i)-FV_2050(g,i))>=0)= 0;
LOSSES_T('2040',g,i)$((FV('2040',g,i)-FV_2050(g,i))<0)= FV('2040',g,i)-FV_2050(g,i);

DCOSTS(t,g,i) = FV(t+1,g,i)-FV(t,g,i);
DCOSTS(t,g,i)$ (DCOSTS(t,g,i)>0) = 0;
DCOSTS('2040',g,i) = FV_2050(g,i)-FV('2040',g,i);
DCOSTS('2040',g,i)$ (DCOSTS('2040',g,i)>0) = 0;

*      +++YEAR 2000+++
FORESTVALUE(g,i) = FV('2000',g,i);
LOSSES(g,i) = LOSSES_T('2000',g,i);
DELAYCOSTS(g,i) = DCOSTS ('2000',g,i);

```

Додаток 2. Б) Програмна реалізація розробленого методу моделювання лісокористування засобами GAMS. Блок оптимізації

PARAMETERS

```

Demand(t)    demand for each simulation period [m3] /          2000 157989000,
                                                       2010 195835000,
                                                       2020 233681000,
                                                       2030 271527000,
                                                       2040 309373000/,

Demd          wood demand [m3]                               /157989000/,

ForestArea    old forest area [ha]                           /8444527.069/,
usedForArea(g,i) forest area available for harvesting due to rotation period [ha],
HarvLosses    harvest losses coefficient                       /0.15/,
TempClassArea(g,i) temporary array for calculations,
Diff(g,i)
val(g,i)
val_1(g,i)
valmin(g)
k(t)
CurrRotTime(t,g)    current rotation time in grid cell
HarvAreaMax        /6242000/
;

```

VARIABLE

```

Z            forest management revenues [$]
;

```

POSITIVE VARIABLES

```

VAR_HARVAREA(g,i)    harvested forest area per grid per age class
;

```

```

*      +++Precalculations+++

```

```

Diff(g,i)           = ord(i) - RotTimeAdj(g);
Diff(g,i)$(Diff(g,i)<0) = 0;
Diff(g,i)$(Diff(g,i)>1) = 1;
usedForArea(g,i)    = ClassArea(g,i) * Diff(g,i);
biomass(g,i)        = usedForArea(g,i) * Biomass_ha(g,i);
*HarvAreaMax(g)     = Sum(i, ClassArea(g,i))/RotTimeAdj(g);
k('2000')=1;
k('2010')=2;
k('2020')=3;
k('2030')=4;
k('2040')=5;

```

EQUATIONS

```

EQ_DEMAND          harvested wood must suit to current wood demand
EQ_DEMANDLIMIT    forest area available for wood supply in the country [based on State of European
Forest Report]
EQ_AREA            selecting harvested area for age class of the grid cell due to available biomass
for harvesting
EQ_OBJ_FM          maximizing forest revenues;

EQ_DEMANDLIMIT..  Sum((g,i),VAR_HARVAREA(g,i)*Biomass_ha(g,i)) =L= 1.01 * (Demd * (1 +
HarvLosses));
EQ_DEMAND..       Sum((g,i),VAR_HARVAREA(g,i)*Biomass_ha(g,i)) =G= Demd * (1 + HarvLosses);

```

```

EQ_AREA(g,i)..          VAR_HARVAREA(g,i)                =L= usedForArea(g,i);
EQ_HARVAREAMAX..       Sum((g,i), VAR_HARVAREA(g,i))      =L= HarvAreaMax;

EQ_OBJ_FM..           Z =E=  Sum((g,i),VAR_HARVAREA(g,i)*FORESTVALUE(g,i)) +
Sum((g,i),(usedForArea(g,i)-VAR_HARVAREA(g,i))*DELAYCOSTS(g,i));

MODEL FM /ALL/;

*           +++ Time loop +++
LOOP (t,

SOLVE FM USING LP MAXIMIZING Z;

val(g,i)$(usedForArea(g,i)>0) = VAR_HARVAREA.l(g,i)/usedForArea(g,i);
val_1(g,i)$(val(g,i)>0)      = ord(i) - val(g,i) + 0.1;
valmin(g)                   = smin(i$(val_1(g,i)>0), val_1(g,i));

*           +++Area transition between age cohorts+++

TempClassArea(g,i)         = ClassArea(g,i-1) - VAR_HARVAREA.l(g,i-1);
TempClassArea(g,'c01')     = sum(i, VAR_HARVAREA.l(g,i));
TempClassArea(g,'c22')     = ClassArea(g,'c21') - VAR_HARVAREA.l(g,'c21') +
ClassArea(g,'c22') - VAR_HARVAREA.l(g,'c22');
ClassArea(g,i)             = TempClassArea(g,i);
usedForArea(g,i)           = ClassArea(g,i) * Diff(g,i);

REPORT ("AvgForArea2050", '2050', 'ANY', i) = Sum(g, ClassArea(g,i));

*           +++Updating parameters for the next simulation period+++

Demd = Demand(t+1);
*ThinnTotal = ThinnTot(t+1);

*           +++Updating forest value+++

FORESTVALUE(g,i+k(t))     = FV(t+1,g,i);
LOSSES(g,i+k(t))          = LOSSES_T(t+1,g,i);
DELAYCOSTS(g,i+k(t))      = DCOSTS(t+1,g,i);

*end of time loop

);

```



Dr. Michael Obersteiner
Program Director
Ecosystems Services and Management Program

17 November 2016

CERTIFICATE

This is to certify that Olga Turkovska's scientific results on the development of the Global Forest Model (G4M), a forest management method with recursive limitations and studying carbon dioxide emissions from the land use sector have been used in a number of research projects at the International Institute for Applied Systems Analysis, in particular:

- Methods for representation of forest management operations (Ministry of Education and Science of Ukraine, individual grant; № 863 from 27.06.2013 and № 965 from 12.07.2013, 01.10.2013-30.12.2013)
- GIS technologies for studying forest cover of Ukraine (Österreichische Austauschdienst GmbH, individual grant; Project ICM-2013-04161, 03.03.2014-31.05.2014)
- Forest management for dynamic recursive model (2014 IIASA Young Scientists Summer Program, 01.06.2014-31.08.2014)
- Assessing Intended Nationally Determined Contributions to the Paris Climate Agreement (European Commission, DG Clima Service Contract no. 071303/2011/662342/SER/CLIMA.A4 – Renewal (Ares (2013)3407741), 2013)

The methods developed by O. Turkovska allowed to improve modeling of forest management considering wood assortments, represent temporal dynamics under recursive limitations; and assess carbon dioxide emissions and removals levels considering countries' commitments under Paris Agreement. Some of the relevant reports and publications are listed below:

- Methods for representation of forest management operations, Brief project report, IIASA - NULP, 2013
- GIS technologies for studying forest cover of Ukraine. Brief project report, IIASA - OEAD, 2014
- Forest management for dynamic recursive model Brief project report, IIASA, 2014
- Turkovska, O., & Gusti, M. (2015). Forest Management Algorithm Considering Assortment Structure for Geospatial Global Forest Model G4M. Research Journal of Ukrainian National Forestry University, 25(5), 339–345
- Turkovska, O., Gusti, M., Lauri, P., Forsell, N., Havlík, P., & Obersteiner, M. (2015). Linear optimization of forest management for dynamic recursive model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(4(77)), 12–18. doi:10.15587/1729-4061.2015.50966
- Admiraal, A., den Elzen, M., Forsell, N., Turkovska, O., Roelfsema, M., & van Soest, H. (2015). Assessing Intended Nationally Determined Contributions to the Paris Climate Agreement – what are the projected global and national emission levels for 2025–2030? The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency

Yours sincerely,


Dr. Michael Obersteiner

IIASA INTERNATIONAL INSTITUTE
FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS
A-2361 LAXENBURG, SCHLOSSPLATZ 1

Program Director, Ecosystems Services and Management Program

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Національного університету
"Львівська політехніка"

проф. Чухрай Н.І.

2016 р.



А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи Турковської Ольги Володимирівни "Методи та засоби аналізу процесів землекористування для дослідження емісії вуглекислого газу", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи Національного університету "Львівська політехніка"

Ми, що нижче підписалися, начальник НДЧ, к.т.н., доц. Жук Л.В. та члени комісії: завідувач відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г.В., заступник начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М., зав. кафедри прикладної математики, д.ф.-м.н., проф. Костробій П.П. та зав. кафедри міжнародної інформації, д.політ.н., проф. Гулай В.В. цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційного дослідження Турковської Ольги Володимирівни використано під час виконання держбюджетної науково-дослідної роботи ДБ/Інформ "Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень" (2013-2014 рр., номер державної реєстрації 0113U003181).

В рамках науково-дослідної роботи Турковська О.В. розробила підходи до визначення параметрів для чисельного представлення управлінських рішень у секторі землекористування та проаналізувала їх вплив на емісії вуглекислого газу з використанням інформаційної технології для аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування.

Використання розроблених Турковською О.В. підходів до визначення параметрів для чисельного представлення управлінських рішень дозволило дослідити зміну емісій вуглекислого газу під впливом конкретних управлінських рішень в Україні стосовно сектору землекористування з використанням інформаційної технології для аналізу процесів землекористування та зміни типів землекористування.

Начальник НДЧ,
канд. техн. наук, доц.



Л.В. Жук

Члени комісії:
Зав. відділу НОСНД,
канд. техн. наук



Г.В. Лазько

Заст. нач. ПФВ



Т.М. Чулой

Зав. кафедри
прикладної математики,
докт. фіз.-мат. наук, проф.

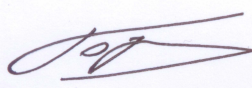


П.П. Костробій

Зав. кафедри
міжнародної інформації,
докт. політ. наук, проф.



В.В. Гулай

 Бужко Р.А.