

ПОДАННЯ ЛІСОКОРИСТУВАННЯ У КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЯХ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ

© Турковська О. В., 2015

Проаналізовано низку глобальних комп'ютерних моделей навколишнього середовища. Основну увагу приділено дослідженню структури моделей та алгоритмів моделювання лісокористування. Метою статті є визначити переваги та недоліки різних підходів до моделювання лісокористування, а також можливості моделей до прогнозування наслідків управлінських рішень щодо адаптації та пом'якшення наслідків змін клімату.

Ключові слова: комп'ютерна модель, алгоритм лісокористування, зміна землекористування, структура моделі.

An overview of several global environmental computer models is presented in the article. This study focuses on the analysis of models' structure and the investigation of approaches to forest management modeling. Benefits and drawbacks of different modeling approaches are discussed. The capacities of the models for projecting the consequences of climate policies are discovered.

Key words: computer model, algorithm of forest management, land-use change, model structure.

Вступ. Загальна постановка проблеми

Зміна клімату є одним з найбільших глобальних викликів сьогодення. Питання адаптації та пом'якшення наслідків зміни клімату, зокрема в контексті природних екосистем, є предметом широкої дискусії. Річ у тому, що рішення, метою якого є, наприклад, зменшити знеліснення, стосуватиметься не лише безпосередньо лісів, а й місцевих громад, життя яких пов'язано з лісом, а також вплине на виробництво сільськогосподарської продукції, в подальшій перспективі це торкнеться і біорізноманіття регіону тощо. Суть полягає в тому, що такі рішення здійснюють вплив не лише на їх об'єкт, але й на пов'язані з ним процеси і явища.

Потреба аналізувати зміни клімату під ширшим кутом, а не лише в межах одного явища, спричинилася до появи глобальних комплексних комп'ютерних моделей навколишнього середовища. Використовуючи різні методології, дослідники аналізують різні компоненти навколишнього середовища під впливом соціальних, економічних та політичних факторів [11]. Стало можливим побачити як досліджувана система реагуватиме на ті чи інші управлінські рішення.

Лісова екосистема є доволі складною для моделювання. З одного боку, ліс є джерелом деревини, яка необхідна для виготовлення певних товарів, з іншого, – це середовище перебування для флори і фауни, а також ліс має величезний потенціал поглинання вуглецю. І це лише декілька основних функцій лісу. Під час моделювання такої складної системи, як ліс постає декілька питань, які необхідно вирішити:

- вибрати достатній рівень деталізації, щоб реалістично відтворити процеси, які відбуваються, та передбачити подальший розвиток лісу і при цьому володіти достатніми обчислювальними ресурсами для моделювання на високому рівні деталізації;
- оскільки ліс є повільно відновлювальним ресурсом, вибір поточного режиму лісокористування повинен забезпечити стабільний приріст лісу в майбутньому;

- необхідно так представити всі основні та суміжні аспекти лісової системи, щоб під час моделювання різних управлінських рішень було можливо провести комплексний аналіз впливу такого рішення на всі компоненти системи і знайти оптимальний варіант виконання поставленого завдання;
- врахувати існуючі дані та їх якість для кожного рівня деталізації в розрізі процесів, часового кроку та просторової роздільної здатності.

Метою цієї статті є огляд комп'ютерних моделей навколишнього середовища та аналіз представлення в них лісокористування, щоб визначити, яка з них найкраще вирішує поставлені питання.

Сьогодні у світі розроблено велику кількість таких моделей і у статті проаналізовано лише ті, які широко використовуються для підтримки прийняття рішень у міжнародних переговорах щодо адаптації та пом'якшення зміни клімату. Зокрема, модель EFISCEN та G4M застосовували в межах проектів Європейської комісії щодо оцінювання можливих управлінських рішень у межах боротьби зі зміною клімату [10], GLOBIOM та GTM використовували в межах оцінки заходів програми REDD (Скорочення емісій внаслідок знеліснення та деградації лісів) [7, 8]. Отже, розглянуто моделі, в яких лісокористування є одним з модулів, тобто лише одним з компонентів системи, що моделюється, як у GLOBIOM [4], а також моделі, для яких лісова екосистема є основним об'єктом моделювання, як наприклад EFISCEN [9] чи GTM [12]. Проте спільним для цих моделей є те, що вони демонструють зміни, які відбуваються з об'єктом моделювання внаслідок реалізації відповідних соціально-економічних сценаріїв. Отже, на основі використання різних сценаріїв можна визначити, які управлінські заходи будуть найкращими для досягнення поставленої мети.

Характеристики моделей

EFISCEN (European Forest Information Scenario Model) – це матрична модель, яка відтворює розвиток лісових ресурсів від рівня провінції і до загальноєвропейського рівня [9, 13]. Робота над цією моделлю розпочалася у 1992 р. в Шведському сільськогосподарському університеті і на теперішній час продовжується у Європейському лісовому інституті у Фінляндії [13].

EFISCEN застосовували для оцінювання стоків вуглецю в лісовій біомасі в межах проекту Європейської комісії [10].

Загальну структуру моделі EFISCEN наведено на рис. 1. Вхідні дані (табл. 1) в моделі задаються з національної інвентаризації лісів.

Таблиця 1

Основні характеристики EFISCEN

<i>Мета і призначення моделі</i>	Інструмент для оцінки та порівняння розвитку лісових ресурсів під впливом різних соціально-економічних сценаріїв
<i>Рівень моделювання</i>	Від регіонального до загальноєвропейського
<i>Крок моделювання</i>	5 років
<i>Вхідні дані</i>	Попит на деревину, режим лісокористування, площа лісу (га), середня наземна біомаса (м ³ /га), чистий поточний приріст (м ³ /га)
<i>Вихідні дані</i>	Розподіл за віковими класами, розподіл за породами деревини, запас стовбурної деревини, накопичення вуглецю в біомасі та ґрунті
<i>Засоби реалізації</i>	C++

Користувач на основі даних з інших моделей або експертної оцінки визначає режим лісокористування, попит на деревину, рівень заліснення/знеліснення та ін., і у такий спосіб 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 (м³/га) та чистим поточним приростом (м³/га). 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 серед елементів матриці, кожен з яких представляє клас віку лісу або об'єм біомаси. Переходи являють собою процеси, які відбуваються з лісом: ріст, прорідження, суцільні рубки, природне відмирання і відтворення. Як 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. 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 [9, 13].

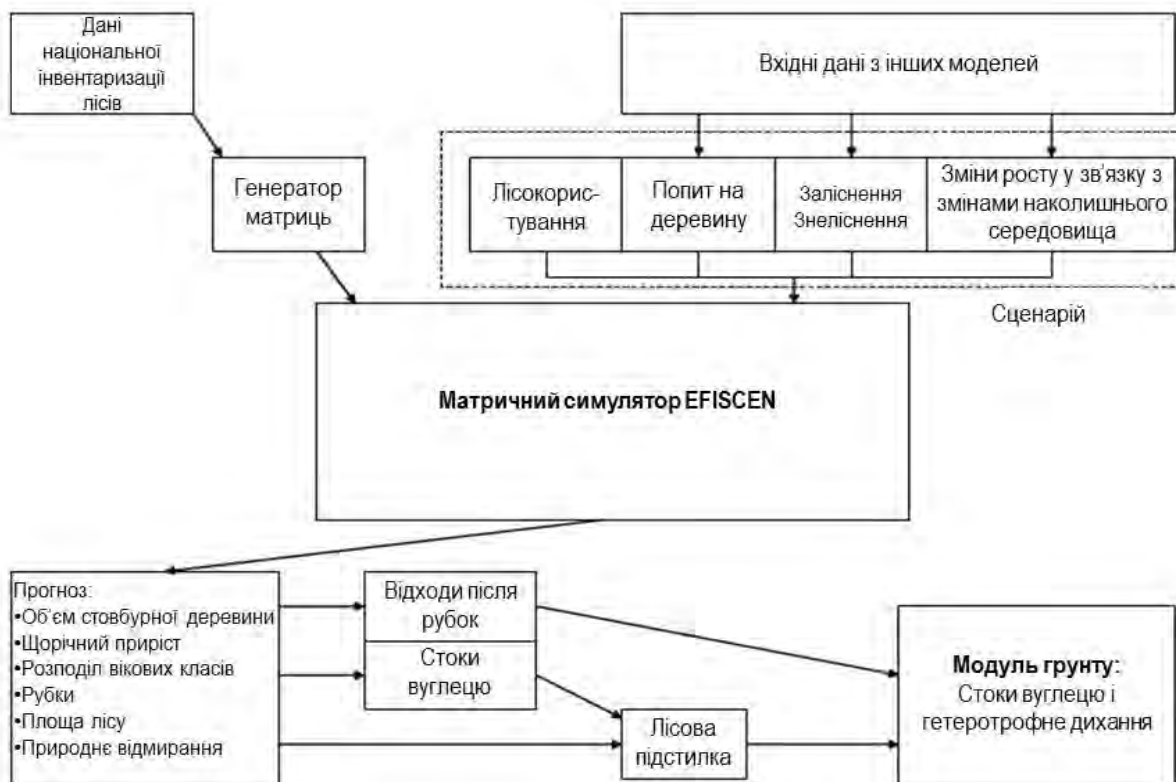


Рис. 1. Структура моделі EFISCEN [9]

Переваги моделі:

- якісні вхідні дані та реалістичне відтворення процесів росту, відмирання та відновлення лісу забезпечує високу точність результатів моделі;
- моделювання при різних сценаріях дає можливість прослідкувати як різні режими лісокористування вплинуть на лісові ресурси;
- матричний підхід є особливо зручним для моделювання одновікових деревостанів, які є в експлуатації;
- результати моделювання біо-фізичних характеристик лісу можна використовувати як вхідні дані іншими комп'ютерними моделями для подальшого опрацювання.

Недоліки моделі:

- 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;
- у процесі моделювання режим лісокористування залишається незмінним, тобто модель не може перевірити чи обораний користувачем режим є оптимальним для певних умов;
- матричний підхід є менш надійним для моделювання різновікових деревостанів та лісів, які не експлуатуються.

GTM (Global Timber Model) – глобальна модель динамічної оптимізації, яка максимізує чисту поточну вартість чистого прибутку глобального ринку лісоматеріалів [12]. На початку 90-х років XX ст. GTM розроблялась як глобальна модель пропозиції лісоматеріалів, але в 1999 р. була оновлена і адаптована для врахування змін клімату [12, 3].

GTM використовували як одну з економічних моделей, щоб оцінити значення скорочення емісії внаслідок знеліснення та деградації лісів у країнах, що розвиваються [7, 8].

Отже, GTM максимізує чистий поточний прибуток глобального ринку лісоматеріалів серед 46 видів екосистем та типів користування (табл. 2).

Таблиця 2

Основні 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 [12]. Формально проблема оптимізації визначається так [12]:

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

де $D[Q(H_1(t) \dots H_I(t)), Z(t)]$ – глобальна функція попиту на споживання лісоматеріалів з $H_i(t)$ – гектарів землі, які вирубані з i -ї породи деревини, 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 у 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 [3, 12].

Переваги моделі:

- результати моделювання щодо цін на лісоматеріали можуть бути використані іншими моделями;
- модель детально відображає економічні процеси, які відбуваються у лісовому секторі, та взаємодію між регіонами.

Недоліки моделі:

- у зв'язку з довгим кроком моделювання (10 років), точність оцінки наявної стовбурної біомаси для рубок знижуватиметься після кожного кроку;
- 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;
- на основі доступних джерел інформації про GTM, не можливо зробити висновок про реалістичність моделювання біофізичних процесів лісу та оцінки стовбурної деревини.

G4M (Global Forest Model) – глобальна географічно [16, 17] 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 (табл. 3) [5]. Модель, спроектована в Міжнародному інституті прикладного системного аналізу (Австрія), початково розроблялась як інтегральна динамічна модель лісового господарства та інших типів землекористування [3], але з часом була оновлена і перейменована на G4M [3].

G4M застосовували, як інструмент для аналізу стану лісів у декількох кліматичних проектах та оглядах, зокрема Eliasch review [1], проект Всесвітнього фонду дикої природи «Живі ліси» [15] та огляді існуючих заходів щодо боротьби зі зміною клімату Нідерландського агентства оцінки навколишнього середовища [2].

Таблиця 3

Основні характеристики G4M

<i>Мета і призначення моделі</i>	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
<i>Рівень моделювання</i>	Від географічної сітки розміром 50 × 50 км до регіонального
<i>Крок моделювання</i>	1 рік
<i>Вхідні дані</i>	Чиста поточна продукція, площа лісу та інших типів землекористування, вартість землі, ціна деревини та вуглецю, попит на деревину
<i>Вихідні дані</i>	Режим лісокористування, емісії вуглецю, рівні заліснення та знеліснення, об'єм біомаси, приріст біомаси
<i>Засоби реалізації</i>	C++

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

У модулі «Віртуальний ліс» на основі вхідних параметрів (табл. 3) та функції ходу росту лісів, а також враховуючи локальні особливості природних умов, обчислюється повнота деревостану, тривалість ротації, 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 отримано з моделі GLOBIOM [4]. Ціна на землю, а також вартість деревини є агрегованими для 50-ти регіонів, а попит на деревину визначається на рівні країни. Модуль «Ініціалізація лісу» запускається лише один раз і якщо відповідно до вхідних даних в елементі сітки є ліс, то він ініціалізується у цьому елементі сітки. Ініціалізація означає присвоєння біофізичних параметрів лісу елементу сітки (середній річний приріст, повнота деревостану, діаметр, висота тощо), обчислених за допомогою модуля «Віртуальний ліс». Модуль «Лісокористування», сортує елементи сітки за продуктивністю лісу та густотою населення. Суцільні рубки відбуваються передусім у найпродуктивніших лісах та з високою густотою населення. У такий спосіб 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 [6].

У модулі «Зміна землекористування» для кожного елементу 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 елементу сітки оновлюється площа лісу, об'єм біомаси, вік, враховуючи зміни, які відбулися. Після оновлення починається наступна ітерація [5]. Схему моделі ітерації наведено на рис. 2.

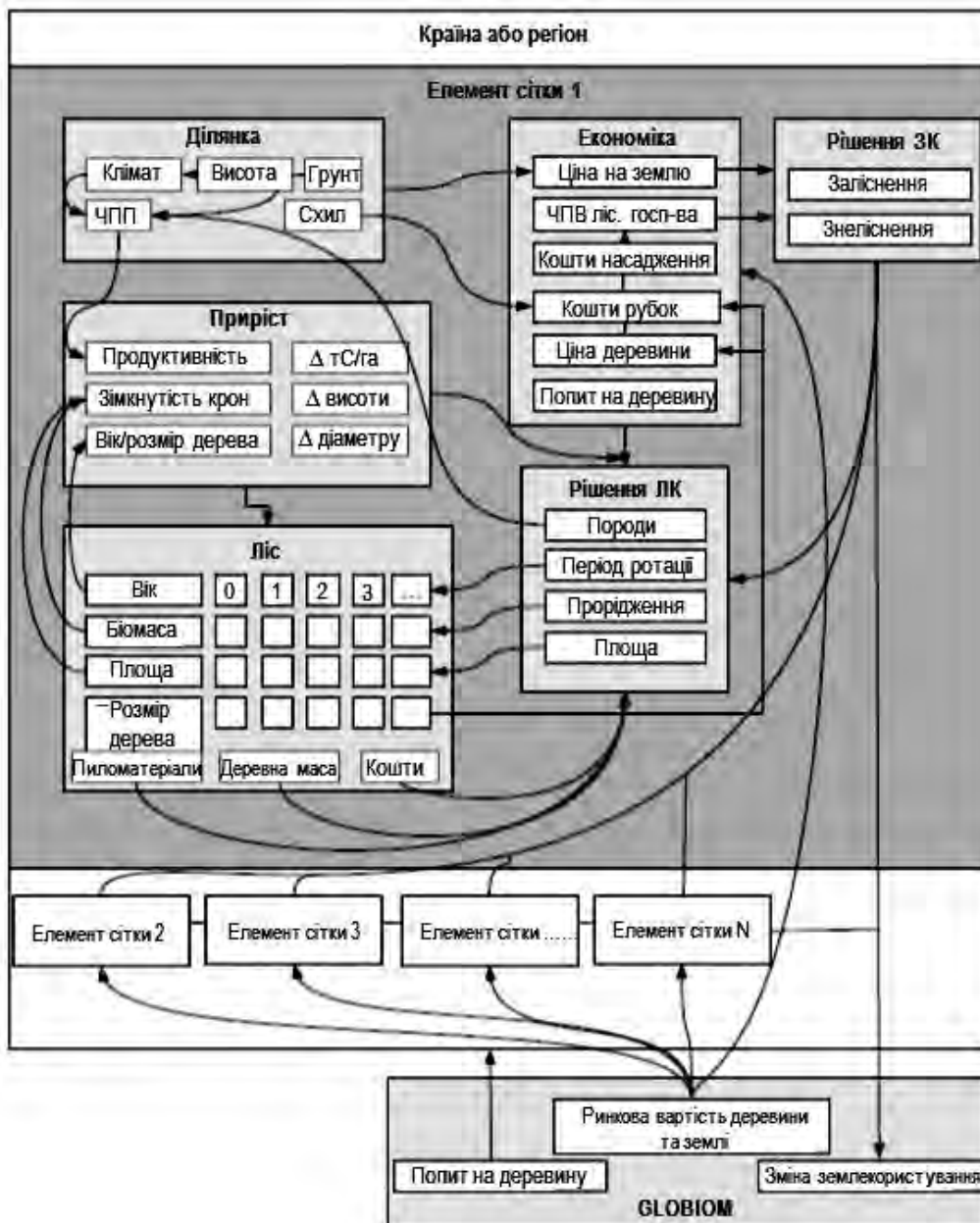


Рис. 2. Процеси моделювання G4M [5]

Переваги:

- моделювання прорідження, суцільних рубок та зміни землекористування з кроком один рік, дає можливість точніше відстежити, які зміни площі, об'єму біомаси та вікової структури відбуваються внаслідок цих процесів;
- залежно від досліджуваних процесів, користувач може задавати крок моделювання від 1 до 10 років;
- обчислення відходів деревини після рубок дає можливість оцінити потенціал використання енергії біомаси з відходів деревини;
- короткий крок моделювання і детальне представлення біофізичних процесів лісу дає можливість оцінити потенціал плантацій швидкоростучих порід для виробництва біоенергії з деревини.

Недоліки:

- існуючий механізм визначення режиму та інтенсивності лісокористування за допомогою сортування за продуктивністю та густрою населення визначає не оптимальний режим лісокористування, а лише наближений до нього;

- відсутність диференціації між попитом на основні типи деревини, призводить до зміщення рубок в інші вікові класи, що своєю чергою знижує достовірність даних з розподілу площі між віковими класами;

- теперішня версія моделі не враховує витрат на вирубку та прорідження лісу, що могло б удосконалити алгоритм визначення режиму лісокористування.

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 (табл. 4) [4]. Модель була розроблена і використовується у Міжнародному інституті прикладного системного аналізу (Австрія) [4, 14].

GLOBIOM використовували як одну з моделей під час оцінювання ефективності заходів для скорочення емісій внаслідок знеліснення та деградації лісів у країнах, що розвиваються [7, 8], а також у огляді існуючих заходів щодо боротьби зі зміною клімату Нідерландського агентства оцінки навколишнього середовища [2].

Таблиця 4

Основні характеристики GLOBIOM

<i>Мета і призначення моделі</i>	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
<i>Рівень моделювання</i>	Від географічної сітки розміром 50 × 50 км до регіонального
<i>Крок моделювання</i>	10 років
<i>Вхідні дані</i>	Геопросторові дані щодо ґрунту, погодних умов, топографії, початкова площа земель кожного типу, середній щорічний приріст біомаси, обсяг стовбурної деревини, населення та ВВП
<i>Вихідні дані</i>	Виробництво та споживання по кожному типу землекористування, а також води, торгівельні потоки, ціни на товари
<i>Засоби реалізації</i>	GAMS

Рівновага глобальних ринків лісоматеріалів та сільськогосподарської продукції визначається вибором землекористування та вживанням заходів, які максимізують суму прибутків користувача та споживача [4]. Світ поділено на 30 регіонів, які можуть виробляти, споживати і торгувати кінцевими продуктами сільськогосподарського та лісогосподарського секторів на ідеальних конкурентних ринках [14].

У моделі виділяють шість типів землекористування (рис. 3):

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

Зміна землекористування відбувається під час кожного кроку моделювання. На рис. 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 пропозиції первинних ресурсів та можливості міжрегіональних торгових потоків [4].

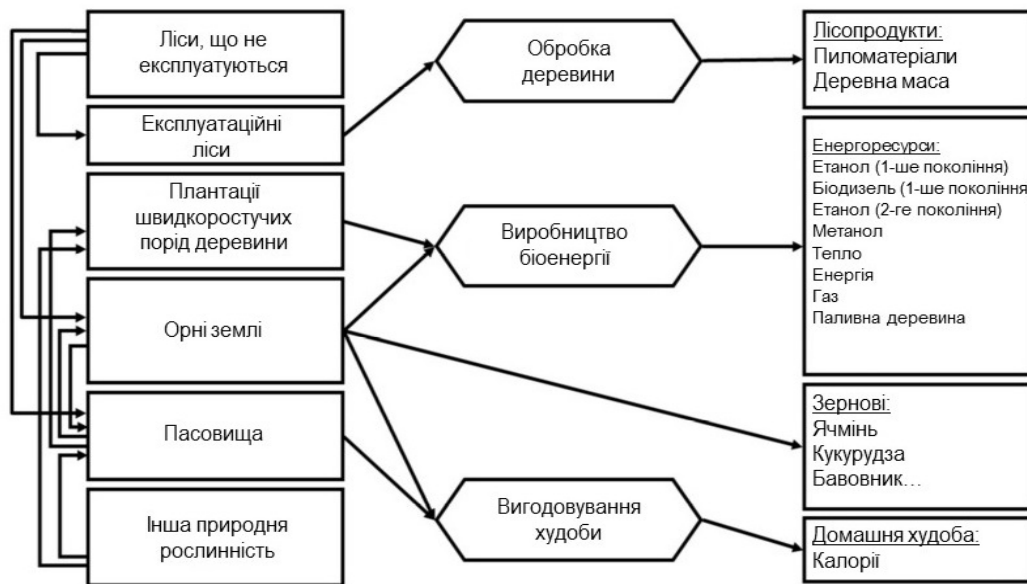


Рис. 3. Типи землекористування та структура товарів у GLOBIOM [4]

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 [14].

Для представлення лісогосподарського сектору GLOBIOM тісно взаємодіє з G4M [5], використовуючи оцінку середнього річного приросту біомаси та обсяги стовбурної деревини на рівні елементу сітки (50 × 50 км). 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 [14].

Переваги:

- сильна економічна складова GLOBIOM дає можливість оцінити, який економічний ефект матимуть певні управлінські рішення у межах боротьби зі зміною клімату;
- моделювання суміжних економічних секторів дає змогу детально дослідити як зміни в одному з них впливатимуть на інші сектори, що уможливує проведення комплексного аналізу наслідків певних управлінських рішень;
- 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.

Недоліки:

- спрощене представлення лісу та лісокористування зменшує точність оцінки наземної біомаси, а разом з тим і оцінки стоків вуглецю;
- 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;
- рекурсивна оптимізаційна модель обмежує представлення динаміки лісу, а також врахування майбутнього при поточному плануванні лісокористування.

Висновки та перспективи подальших наукових розвідок

На основі проведеного аналізу варто виділити такі тези:

- частина моделей, більшою чи меншою мірою, фокусується на представленні лісового сектору, при цьому вони використовують абсолютно різні підходи, як от G4M та EFISCEN;

- інша група моделей фокусується на представленні економічної складової лісового сектору, наприклад GTM;
- економічні моделі рівноваги чи часткової рівноваги представляють лісокористування як один з економічних секторів, моделюючи з різною детальністю процеси лісокористування, наприклад GLOBIOM;
- жодна з моделей не є повністю самодостатньою, щоб представити всі компоненти навколишнього середовища з однаковою детальністю, моделі взаємодіють між собою, щоб отримати дані, які вони не можуть обчислити самостійно;
- сценарії задають у різних моделях різними параметрами, наприклад у EFISCEN – це режим лісокористування, а в GLOBIOM – це внутрішній валовий продукт та густота населення;
- деякі моделі (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;
- що довшим є часовий проміжок моделювання, то менш точним стає економічний прогноз моделі.

Отже, для оцінювання наслідків певного рішення щодо пом'якшення чи адаптації до змін клімату використання лише однієї моделі не дозволяє бути впевненим у точності результатів. Найкращим способом є використання декількох схожих моделей і порівняння їх результатів.

1. *Eliasch review. Climate change: financing global forests – Richmond: The Stationery Office Limited, 2008. – 273 p.*
2. *Enhanced policy scenarios for major emitting countries / [M. Elzen, H. Fekete, A. Admiraal et al.]. – Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2015. – 48 p.*
3. *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. – V. 105. – P. 10302–10307.*
4. *Global land-use implications of first and second generation biofuel targets / [P. Havlik, U. A. Schneider, E. Schmid et al.] // Energy Policy. – 2011. – V. 39. – P. 5690–5702.*
5. *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.*
6. *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.*
7. *Linking reduced deforestation and a global carbon market: implications for clean energy technology and policy flexibility / V. Bosetti, R. Lubowski, A. Golub, A. Markandya. // Environment and Development Economics. – 2011. – P. 1–27.*
8. *Lubovski R. The role of REDD in stabilising greenhouse gas concentrations [Електронний ресурс] / Lubovski R.. // Center for International Forestry Research (. – 2008. – Режим доступу: https://www.edf.org/sites/default/files/10485_Role_of_REDD_in_stabilizing_GHG_Concentrations_Lubowski.pdf*
9. *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.*
10. *Projection of the future EU forest CO2 sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models / [H. Bottcher, P. J. Verkerk, M. I. Gusti et al.]. // GCB Bioenergy. – 2012. – V.4. – P. 773–783.*
11. *Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management / [R. A. Kelly (Letcher), A. J. Jakeman, O. Barreteau et al.]. // Environmental Modelling & Software. – 2013. – V.47. – P. 159–181.*
12. *Sohngen B. A Global model of climate change impacts on timber markets / B. Sohngen, R. Mendelsohn, R. Sedjo // Journal of Agricultural and Resource Economics. – 2001. – V. 26. – P. 326–343.*
13. *The European Forest Information Scenario Model – EFISCEN [Електронний ресурс] // European Forest Institute. – 2015. – Режим доступу: http://www.efi.int/portal/virtual_library/databases/efiscen/.*
14. *Woody biomass energy potential in 2050 / [P. Lauri, P. Havlik, G. Kindermann et al.] // Energy Policy. – 2014. – V. 66. – P. 19–31.*
15. *WWF living forest report: Forests for a living planet – Gland: World Wide Fund for Nature, 2011. – 37 p.*
16. *Любінський Б. Б. Архітектура спеціалізованого програмного модуля ГІС: побудова карт векторного формату / Б. Б. Любінський, І. О. Пеняк // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2014. – № 783 : Інформаційні системи та мережі. – С. 154–160.*
17. *Чарковська Н. В. Моделювання та просторовий аналіз емісійних процесів від целюлозно-паперової та харчової промисловостей Польщі / Н. В. Чарковська, О. С. Стрямець, Р. А. Бунь // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2014. – № 783 : Інформаційні системи та мережі. – С. 478–486.*