

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Густі Микола Іванович**

УДК 004.942:519.876.5

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Математичні моделі процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи  
(шифр і назва спеціальності)  
05 «Технічні науки»  
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

---

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант –  
Бунь Ростислав Адамович,  
д.т.н., професор

***Ідентичність всіх примірників дисертації***

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*Т.в.о. вченого секретаря спеціалізованої  
вченої ради*

/Н.Б. Шаховська/

Львів – 2017

## АНОТАЦІЯ

*Густі М.І.* Математичні моделі процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 «математичне моделювання та обчислювальні методи» (113 - прикладна математика). – Національний університет «Львівська Політехніка» МОН України, Львів, 2017.

Дисертація присвячена актуальній науково-прикладній проблемі математичного моделювання процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування для підвищення ефективності прийняття природоохоронних управлінських рішень щодо пом'якшення зміни клімату на глобальному, регіональному та національному рівнях. У першому розділі проаналізовано глобальний баланс вуглекислого газу, основні процеси кругообігу вуглецю у лісових екосистемах та основні математичні моделі, які використовують для моделювання відповідних процесів, пов'язаних із балансом вуглекислого газу. Другий розділ присвячено розробленню методів та математичних моделей моделювання вуглецевого балансу лісових екосистем. Третій розділ присвячено математичному моделюванню процесів лісокористування та зміни землекористування та розробленню геопросторової математичної моделі G4M. У четвертому розділі описано валідацію розробленої геопросторової математичної моделі. У п'ятому розділі наведено приклади практичного застосування розробленої геопросторової моделі, описано схеми обміну даними моделі G4M з іншими моделями для формування комплексів моделей для інтегральної оцінки. Шостий розділ присвячено дослідженню методів оцінювання невизначеностей емісій парникових газів та впливу невизначеностей на прийняття рішень.

У дисертаційній роботі розв'язано комплекс задач, які у сукупності вирішили науково-прикладну проблему математичного моделювання процесів емісії та стоку CO<sub>2</sub> у лісовому господарстві та при змінах землекористування, що

дало можливість підвищити ефективність прийняття природоохоронних управлінських рішень щодо пом'якшення зміни клімату на глобальному, регіональному та національному рівнях. У дисертаційній роботі розроблено метод моделювання вуглецевого балансу лісової екосистеми, який поєднує процеси кругообігу вуглецю та таксаційні параметри деревостану. Він включає удосконалену структуру математичної моделі вуглецевого балансу лісової екосистеми з врахуванням наявних даних про лісові екосистеми в Україні, доповнену математичною моделлю фенологічних процесів у букових та дубових лісах, які базуються на даних спостережень та враховують часовий зсув цих процесів при зміні клімату. Завдяки такому поєднанню можливо врахувати вікову динаміку деревостану при моделюванні його вуглецевого балансу. Запропонований метод використано при розробці математичних моделей вуглецевого балансу букових, дубових та ялинових лісів, які застосовано для аналізу динаміки запасів вуглецю у компонентах лісової екосистеми при залісненні.

Розроблено метод геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні, який, на відміну від відомих, враховує взаємний вплив цих процесів, а також процесів торгівлі та переміщення заготовленої деревини, процесів заліснення та знеліснення, що дає можливість сумісно аналізувати і прогнозувати ці процеси у залежності від економічної ситуації та встановлених обмежень на емісію парникових газів. Розроблено метод моделювання процесу просторового поширення знеліснення для глобальної геопросторової моделі шляхом врахування інтенсивності знеліснення в даній клітинці растру на попередньому кроці моделювання та мінімальної площі лісу у сусідніх клітинках, а також транспортної мережі, що дає можливість точніше відтворити просторову структуру знеліснення. Розроблено метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини та зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування при збереженні заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни чи регіону, який ґрунтується на принципі максимізації чистої приведеної вартості, поєднанні

інформації про заготівлю деревини на різних геопросторових рівнях (регіони, країни та окремі клітинки растру) та дає можливість проводити імітаційне моделювання процесів лісозаготівлі та впровадження природоохоронних стратегій. З використанням зазначених методів розроблено глобальну геопросторову математичну модель процесів заліснення, знеліснення, заготівлі деревини та відповідних емісій CO<sub>2</sub> (модель G4M). У моделі процеси прийняття рішень щодо зміни землекористування та параметрів лісокористування розглядаються з точки зору власників ділянок землі, які знаходяться у клітинках растру 0.5x0.5 градуса. Також розроблено версію моделі G4M для території Європейського Союзу, у якій додатково використано наявні геопросторові дані, що дало можливість вдосконалити метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни та метод калібрування емісій CO<sub>2</sub> з біомаси лісів. Запропоновано параметри та дані, які необхідні для адаптації геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування для України.

Розроблено метод ідентифікації параметрів моделі G4M, які відповідають за моделювання процесів зміни землекористування, за даними ФАО та звітів країн до РКЗК ООН на національному рівні, що дало можливість відтворити історичні емісії CO<sub>2</sub> країн у секторі лісового господарства та зміни землекористування та прогнозувати емісії за різних сценаріїв соціально-економічного розвитку та податку на емісії парникових газів.

У результаті аналізу неточностей вхідних даних розробленої моделі G4M виявлено, що дані характеризуються досить високою невизначеністю, особливо на рівні клітинок растру. У результаті аналізу чутливості моделі G4M до зміни окремих параметрів виявлено, що результати моделювання швидкості заліснення та знеліснення без впливу податку на вуглець найбільш чутливі до зміни валового внутрішнього продукту, коефіцієнта перерахунку вуглецю у об'єм деревини (комбінація щільності деревини та вмісту вуглецю у деревині), приросту деревини (залежить від чистої первинної продукції), щільності розміщення населення, ціни на деревину, придатності землі для ведення

сільського господарства та вартості заліснення. Реакція емісій CO<sub>2</sub> на зміну ціни на сільськогосподарську землю дуже висока при ціні CO<sub>2</sub> 3-10 \$/тCO<sub>2</sub>, причому симетрична на негативні та позитивні відхилення параметра.

При порівнянні результатів моделювання G4M з статистичними даними та результатами інших моделей показано, що у середньому за 1999-2015рр. середньоквадратичне відхилення змодельованих значень заготівлі деревини склало 0.5% для ЄС; для більшості країн відхилення становить біля 1%, але для кількох країн більше 7%. В загальному, для ЄС середньоквадратичне відхилення змодельованих значень емісій CO<sub>2</sub> з біомаси від лісокористування від значень РКЗК ООН становить 17%, а для окремих країн відхилення складає 30-90%. Порівняння результатів моделей показує, що результати G4M є раціональними, а різниця у результатах моделей пояснюється відмінностями у підходах до моделювання відповідних процесів і вхідних даних, а також те, що якість вхідних даних може бути такою ж важливою при створенні кривих граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення, як і застосування декількох різних моделей для побудови кривих граничних витрат.

Розроблена математична модель G4M призначена для розв'язування широкого класу задач, пов'язаних із прогнозуванням динаміки площі лісу (через процеси заліснення та знеліснення), біомаси лісу, заготівлі деревини та емісій CO<sub>2</sub>, спричинених цими процесами, а також відгуку на заходи по зменшенню емісій CO<sub>2</sub>. Властивості моделі дають можливість використовувати результати моделювання для підтримки прийняття рішень щодо проблеми зменшення емісій CO<sub>2</sub>. Розроблено схеми взаємозв'язку моделі G4M з економічною моделлю біоресурсів GLOBIOM для врахування ефектів торгівлі товарами та потреби у сільськогосподарській землі; моделями енергетичної системи MESSAGE, макроекономіки MACRO, кліматичної системи MAGICC та ін. для формування комплексів моделей інтегральної оцінки. Із використанням розроблених схем взаємозв'язку моделей проведено обчислення референтних рівнів емісій парникових газів для 14 країн-членів ЄС, які подані цими країнами до РКЗК ООН; розроблено прогноз базових емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування, заліснення

та знеліснення, а також потенціалу зменшення емісій на глобальному рівні та для окремих країн; проведено обчислення динаміки заліснення, знеліснення та лісокористування, а також відповідних емісій CO<sub>2</sub> для сценаріїв спільних соціально-економічних шляхів та репрезентативних шляхів концентрацій парникових газів і радіаційного впливу на кліматичну систему (SSP/RCP); проведено аналіз синергії заходів по зменшенню емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення та ризику зникнення видів тварин у країнах, що розвиваються; здійснено обчислення динаміки заліснення, знеліснення та лісокористування, а також відповідних емісій CO<sub>2</sub> для країн ЄС.

На основі розроблених математичних моделей вуглецевого балансу лісових екосистем, а також геопросторової математичної моделі процесів лісокористування та зміни землекористування G4M створено засоби комп'ютерного моделювання.

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

Список публікацій здобувача:

1. Бунь, Р.А., Густі, М.І., Дачук, В.С., Кужій, Л.І., Олексів, Б.Я., Стрямець, Г.В., Стрямець, С.П., Токар, О.Є., Цибрівський, Я.Б.: Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України. Українська академія друкарства, Львів, 376 с. (2004)
2. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Papadopoulos, D., Siskos, P., Apostolaki, E., Zampara, M., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Kouvaritakis, N., Hoeglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Bottcher, H., Frank, S., Havlik, P., Gusti, M., Witzke, H.P.: EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050 - Reference scenario 2013. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 173 p. (2014)

3. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Siskos, P., Kannavou, M., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S., Zampara, M., Papadopoulos, D., Nakos, Ch., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Tsani, S., Karkatsoulis, P., Fragkos, P., Kouvaritakis, N., Höglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Gomez Sanabria, A., Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M., Witzke, H.P., Kesting, M.: EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. European Commission Directorate - General for Energy, Directorate - General for Climate Action and Directorate - General for Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 223 p. (2016)
4. Turkovska, O., Gusti, M, Lauri, P., Forsell, N., Havlik, P., Obersteiner, M.: Linear optimization of forest management for dynamic recursive model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. **5**(4), 12-18 (2015). doi:10.15587/1729-4061.2015.50966
5. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Алгоритм лісокористування для глобальної геопросторової моделі G4M з врахуванням сортиментної структури. Науковий вісник НЛТУ України. **25**(5), 339-345 (2015)
6. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Адаптація глобальної комп'ютерної моделі лісу G4M для України. Вісник Вінницького політехнічного інституту. **5**, 9-15 (2015)
7. Турковська, О.В., Охремчук, І.А., Густі, М.І.: Оцінювання ефективності політики зменшення викидів CO<sub>2</sub> лісами України при різних соціально-економічних сценаріях. Науковий вісник НЛТУ України. **25**(4), 98-104 (2015)
8. Gusti M.: An algorithm for simulation of forest management decisions in the Global Forest Model. Artificial Intelligence. **4**, 45-49 (2010)
9. Токар, О., Густі, М., Король, М.: Автоматизація збору та обробки даних при дослідженні лісових масивів. Вісник НУ "Львівська політехніка", "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". **598**, 171-175 (2007)
10. Бунь, А., Густі, М., Кужій, Л.: Геоінформаційні технології формування кадастрів викидів парникових газів в енергетичній галузі. Вісник Східноукраїнського національного університету. **10**, 87-94 (2005)

11. Бунь, А.Р., Густі, М.І., Кужій, Л.І.: Моделі та алгоритми формування кадастрів викидів парникових газів в енергетичній галузі з врахуванням невизначеностей. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці. **28**, 89-96 (2005)
12. Кужій, Л.І., Густі, М.І., Бунь, А.Р.: Автоматизована система розподіленої інвентаризації парникових газів. Вісник Хмельницького національного університету. **2**(1/4), 22-27 (2005)
13. Густі, М.І., Бунь, Р.А., Дачук, В.С., Шпаківська, І.М.: Математична модель вуглецевого балансу букового лісу. Інформаційні технології та системи. **7**(2), 90-99 (2004)
14. Густі, М.І., Токар, О.Є., Король, М.М.: Порівняльна оцінка стоку вуглецю у фітомасу лісів України при різних рівнях деталізації. Науковий вісник УкрДЛТУ: Збірник науково-технічних праць. **14**(4), 13-18 (2004)
15. Токар, О., Густі, М.: Математичні моделі інвентаризації парникових газів в лісовому господарстві. Інформаційні технології і системи. **6**(1-2), 211-217 (2003)
16. Бунь, Р., Густі, М., Дачук, В., Олексів, Б., Цибрівський, Я.: Спеціалізована комп'ютерна система для багаторівневої інвентаризації парникових газів. Вісник Технологічного університету Поділля. **1**(3), 77-81 (2003)
17. Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schöpp, W., Riahi, K.: The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*. **42**, 251–267 (2017)
18. Forsell, N., Turkovska, O., Gusti, M., den Elzen, M., Obersteiner, M., Havlik, P.: Assessing the INDCs' land use, land use change, and forest emission projections. *Carbon Balance and Management*. **11**(26), 1-17 (2016). doi:10.1186/s13021-016-0068-3
19. Szolgayová, J., Fuss, S., Kaminski, T., Scholze, M., Gusti, M., Heimann, M., Tavoni, M.: The benefits of investing into improved carbon flux monitoring. *Cogent Economics & Finance*, **4**(1), 1239672 (2016). doi:10.1080/23322039.2016.1239672



20. Di Fulvio, F., Forsell, N., Lindroos, O., Korosuo, A., Gusti, M.: Spatially explicit assessment of roundwood and logging residues availability and costs for the EU28. *Scandinavian Journal of Forest Research*. **31**(7), 691-707 (2016). doi: 10.1080/02827581.2016.1221128
21. Frank, S., Böttcher, H., Gusti, M., Havlík, P., Klaassen, G., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Dynamics of the land use, land use change, and forestry sink in the European Union: the impacts of energy and climate targets for 2030. *Climatic Change*. **138**, 253–266 (2016). doi:10.1007/s10584-016-1729-7
22. Kryazhimskiy, A., Rovenskay, E., Shvidenko, A., Gusti, M., Shchepashchenko, D., Veshchinskaya, V.: Towards harmonizing competing models: Russian forests' net primary production case study. *Technological Forecasting and Social Change*. **98**, 245–254 (2015). doi:10.1016/j.techfore.2015.06.003
23. Ometto, J.P., Bun, R., Jonas, M., Nahorski, Z., Gusti, M.: Uncertainties in greenhouse gases inventories - Expanding our perspective. *Climatic Change*. **124**(3), 451-458 (2014). doi: 10.1007/s10584-014-1149-5
24. Kraxner, F., Nordstroem, E.-M., Havlik, P., Gusti, M., Mosnier, A., Frank, S., Valin, H., Fritz, S., Fuss, S., Kindermann, G., McCallum, I., Khabarov, N., Bottcher, H., See, L., Aoki, K., Schmid, E., Mathe, L., Obersteiner, M.: Global bioenergy scenarios - future forest development, land-use implications, and trade-offs. *Biomass and Bioenergy*. **57**, 86-96 (2013). doi: 10.1016/j.biombioe.2013.02.003
25. Bottcher, H., Verkerk, P.J., Gusti, M., Havlik, P., Grassi, G.: Projection of the future EU forest CO<sub>2</sub> sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models. *GCB Bioenergy*. **4**, 773–783 (2012)
26. Strassburg, B.N.B., Rodrigues, A.S.L., Gusti, M., Balmford, A., Fritz, S., Obersteiner, M., Turner, R.K., Brooks, T.M.: Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. *Nature Climate Change*. **2**, 350–355 (2012). doi:10.1038/nclimate1375
27. Gusti, M., Jonas, M.: Terrestrial full carbon account for Russia: revised uncertainty estimates and their role in a bottom-up/top-down accounting exercise. *Climatic Change*. **103**(1-2), 159-174 (2010). doi: 10.1007/s10584-010-9911-9

28. Obersteiner, M., Huettner, M., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Rametsteiner, E., Reyers, B.: On fair, effective and efficient REDD mechanism design. *Carbon Balance and Management*. **4**(11), 1-11 (2009). doi:10.1186/1750-0680-4-11
29. Fuss, S., Szolgayova, J., Obersteiner, M., Gusti, M.: Investment under market and climate policy uncertainty. *Applied Energy*. **85**, 708-721 (2008). doi: 10.1016/j.apenergy.2008.01.005
30. Gusti, M.: Modeling afforestation and the underlying uncertainties. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. **7**(4-5), 475-482 (2007). doi:10.1007/s11267-006-9115-5 (передруковано в монографії Lieberman et al.: Accounting for Climate Change: Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories – Verification, Compliance, and Trading, pp.52-62. Springer, The Netherlands (2007))
31. Ramonet, M., Ciais, P., Nepomniachii, I., Sidorov, K., Neubert R.E.M., Langendorfer, U., Picard, D., Kazan, V., Biraud, S., Gusti, M., Kolle, O., Schulze, E.-D., Lloyd, J.: Three years of aircraft-based trace gas measurements over the Fyodorovskoye southern taiga forest, 300 km north-west of Moscow. *Tellus B*. **54**(5), 713-735 (2002). doi: 10.1034/j.1600-0889.2002.01358.x
32. Turkovska, O., Gusti, M.: A conceptual scheme for modelling forestry and LUC CO<sub>2</sub> emissions in Ukraine. *Econtechmod*. **2**(1), 57-62 (2013)
33. Tokar, O., Bun, R., Gusti, M.: Mathematical models for estimation of the carbon sinks in forests of the Carpathian Region of Ukraine. *Information and Telecommunication Systems*. **9**, 80-89 (2006)
34. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: quality control and specific characters of inventory sectors. *Information and Telecommunication Systems*, Bielsko-Biala: Polish Information Processing Society. **4**, 73-82 (2004)
35. Bun, R., Gusti, M.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: multilevel models. *Information and Telecommunication Systems*, Bielsko-Biala: Polish Information Processing Society. **1**, 61-67 (2004)

36. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L., Tokar, O., Tsybrivskyy, Y., Bun, A.: Spatial GHG inventory: analysis of uncertainty sources. A case study for Ukraine. In: Lieberman, D., Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S. (Eds.) *Accounting for Climate Change: Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories – Verification, Compliance, and Trading*, pp. 63-74. Springer, The Netherlands (2007). doi:10.1007/978-1-4020-5930-8\_6
37. Obersteiner, M., Rametsteiner, E., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Reyers, B.: Towards a sound REDD: Ensuring globally consistent reference scenarios and safeguarding sustainability co-benefits. In: Bosetti, E., Lubowski, R. (Eds) *Deforestation and Climate Change: Reducing Carbon Emissions from Deforestation and Forest Degradation*, pp.121-136. Edward Elgar, Cheltenham, UK (2010)
38. Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Verkerk, P.J., Hengeveld, G., Packalen, T., Sallnäs, O., Pilli, R., Grassi, G., Forsell, N., Frank, S., Gusti, M., Havlik, P.: Forest resource projection tools at the European level. In: Barreiro, S., Schelhaas, M.-J., McRoberts, R.E., Kändler, G. (Eds.) *Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability. Managing Forest Ecosystems*, vol.29, pp. 49-68. Springer International Publishing, Cham, Switzerland (2017). doi:10.1007/978-3-319-56201-8\_4.
39. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Spatial GHG inventory at the regional level: accounting for uncertainty. In: Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S., Whiter, T. (eds.) *Greenhouse Gas Inventories: Dealing With Uncertainty*, pp.227-244. Springer, Dordrecht (2011). doi:10.1007/978-94-007-1670-4\_13
40. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Geoinformation technology and greenhouse gas spatial inventory: An analysis of structural changes in energy sector. In: *Zeszyty Naukowe: Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Przemysłu. Sesja Naukowa "Środowisko i Technologie Informatyczne a Zdrowie Człowieka"*, vol.1, 14-34 (2007)
41. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Savchyn, O.: Information technology for spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: Wieczorek, T. (ed.) *Internet in the information society: Application of the information technologies*, pp. 154-163. WSB, Dabrowa Gornicza (2007)

42. Buń, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Technologie informacyjne inwentaryzacji gazów cieplarnianych z wykorzystaniem georozproszonych baz danych. In: Nowe technologie w komputerowych systemach zarządzania, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, pp. 37-43 (2005)
43. Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B., Dietrich, J.P., Doelmann, J., Gusti, M., Hasegawa, T., Kyle, P., Obersteiner, M., Tabeau, A., Takahashi, K., Valin, H., Waldhoff, S., Weindl, I., Wise, M., Kriegler, E., Lotze-Campen, H., Fricko, O., Riahi, K., van Vuuren, D.: Land use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*. **42**, 331–34 (2017). doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.10.002
44. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal analysis techniques for consideration in the (post-)Kyoto policy process. *Climatic Change*. **103**(1-2), 175-213 (2010) doi:10.1007/s10584-010-9914-6
45. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: How much additional carbon can be stored in forests if economic measures are used and how much could it cost? *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво*. **135**, 244–253 (2009)
46. Густі, М., Цибрівський, Я., Токар, О., Дачук, В., Бунь, Р.: Використання сучасних програмних засобів для оцінки та аналізу вуглецевого балансу лісових екосистем. *Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В.Докучаєва*. **2**, 129-134 (2003)
47. Forsell, N., Korosuo, A., Lauri, P., Gusti, M., Havlik, P., Böttcher, H., Hennenberg, K.: Follow-up study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio follow-up). Publications Office of the European Union, Luxembourg, 68 pp. (2016) ISBN 978-92-79-64433-7
48. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M., Böttcher, H., Hennenberg, K., Hünecke, K., Wiegmann, K., Pekkanen, M., Nuolivirta, P., Bowyer, C., Nanni, S., Allen, B., Poláková, J., Fitzgerald, J., Lindner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio). Final report. Project: ENV.F.1/ETU/2013/0033. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 43 pp. (2016)

49. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy. Task 3: Modelling of impacts of an increased EU bioenergy demand on biomass production, use and prices. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 109 pp. (2016).
50. Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlík, P.: Methodology for estimation and modelling of EU LULUCF greenhouse gas emissions and removals until 2050 in GLOBIOM and G4M. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, 29 pp. (2016) [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models/docs/lulucf\\_methodology\\_report\\_may2016\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models/docs/lulucf_methodology_report_may2016_en.pdf)
51. Den Elzen, M., Fekete H., Admiraal A., Forsell N., Höhne N., Korosuo A., Roelfsema M., van Soest H., Wouters K., Day Th., Hagemann M., Hof A., Mosnier A.; Contributing authors: Havlik P., Gusti M., Obersteiner M., Wong L.: Enhanced policy scenarios for major emitting countries, The Hague, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 134 pp. (2015). [http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-enhanced-policy-scenarios-for-major-emitting-countries\\_1631.pdf](http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-enhanced-policy-scenarios-for-major-emitting-countries_1631.pdf)
52. Havlík, P., Valin, H., Jean P., Gusti, M., Schmid, E., Forsell, N., Herrero, M., Khabarov, N., Mosnier, A., Cantele, M., Obersteiner, M.: Climate change impacts and mitigation in the developing world: an integrated assessment of the agriculture and forestry sectors. Policy Research working paper; no. WPS 7477. Washington, D.C.: World Bank Group, 56 pp. (2015) <http://documents.worldbank.org/curated/en/2015/11/25250682/climate-change-impacts-mitigation-developing-world-integrated-assessment-agriculture-forestry-sectors>
53. Gusti, M.: G4M Overview (global version). Research Gate (2015). doi: 10.13140/RG.2.1.4319.8804. [https://www.researchgate.net/publication/284625564\\_G4M\\_Overview\\_global\\_version](https://www.researchgate.net/publication/284625564_G4M_Overview_global_version)
54. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Bottcher, H., Gusti, M., Kraxner, F., Obersteiner, M., Leduc, S.: The Role of ECA's Forest Resources in Climate Change Mitigation. Final Report submitted to The World Bank on Contract #7158909 (September 2011), International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 78 pp. (2011)

55. Deveney, A., Nackoney, J., Purvis, N., Gusti, M., Kopp, R., Myers, E., Stevenson, A., Kindermann, G., Macauley, M., Obersteiner, M.: Forest carbon index: The geography of forests in climate solutions. Joint report by Resources for the Future and Climate Advisers. Washington, DC, USA, 80 pp. (2009). <http://www.bluepointmaps.com/staging/fci3/index.html>
56. Böttcher, H., Aoki, K., De Cara, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Schneider, U., Obersteiner, M.: GAINS. GHG Mitigation Potentials and Costs from Land-Use, Land-Use Change and Forestry in Annex-I Countries: Methodology. Report. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 39 pp. (2008)
57. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: Technical Description of the IIASA Model Cluster. The Eliasch Review; Office of Climate Change, UK, 12 pp. (2008) [http://www.occ.gov.uk/activities/eliasch/Gusti\\_IIASA\\_model\\_cluster.pdf](http://www.occ.gov.uk/activities/eliasch/Gusti_IIASA_model_cluster.pdf)
58. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for Annex I Countries under the Kyoto Protocol - A Lesson for the Post-Kyoto Policy Process. International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-024, Laxenburg, Austria, 91 pp. (2004)
59. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2001). International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-029, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)
60. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2002). International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-046, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)

61. Gusti, M., Böttcher, H., Kindermann, G., Havlik, P., Obersteiner, M.: Simulation of REDD+ options using IIASA model framework. In: Seppelt, R., Voinov, A.A., Lange, S., Bankamp, D. (Eds.) International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software “Managing Resources of a Limited Planet”, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany (2012). <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>
62. Gusti, M., Kindermann, G.: An approach to modeling landuse change and forest management on a global scale. In: Proceedings, 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011), Noordwijkerhout, Netherlands, 180-185 (2011)
63. Bun, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Greenhouse gas inventory on the base of multilevel model. In: Filho, L.W., Gomez, J.M., Rautenstrauch, C. (Eds.) Second International ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering. Proceedings. Shaker Verlag, Aachen, Germany, 294-308 (2005)
64. Bun, R., Hamal, K., Gusti, M., Bun, A., Savchyn, O.: Spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: Gómez, J.M., Sonnenschein, M., Müller, M., Welsch, H., Rautenstrauch, C. (Eds) Information Technologies in Environmental Engineering. Book Series “Environmental Science and Engineering”, ITEE 2007, Third International ICSC Symposium (2007). <http://www.springerlink.com/content/j183524664262371/>
65. Gusti, M., Khabarov, N., Forsell, N.: Sensitivity of marginal abatement cost curves to variation of G4M parameters. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Cracow, Poland, 163-169 (2015)
66. Fuss, S., Gusti, M., Broquet, G., Ciais, P., Tavoni, M., MacCallum, I.: Assessing the benefit of carbon monitoring systems for REDD+ in Pan-Tropical regions. In: XIV World Forestry Congress, Durban, South Africa, 7-11 (2015)
67. Frank, S., Havlík, P., Soussana, J.F., Levesque, A., Valin, H., Wollenberg, E., Kleinwechter, U., Fricko, O., Gusti, M., Herrero, M., Smith, P.: Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? In: EGU General Assembly Conference: Abstracts, vol. 19, p. 15384 (2015)

68. Forsell, N., Havlík, P., Korosuo, A., Kraxner, F., Frank, S., Valin, H., Gusti, M., Zhang, W., Nordin, A., Lundmark, T., Obersteiner, M.: Global harvesting of wood under different socio-economic and climate mitigation scenarios. In: Towards a New Era of Forest Science in the Boreal Region. Abstracts of the 17th IBFRA Conference, Rovaniemi, Finland. p. 79 (2015)
69. Wehkamp, J., Pietsch, S.A., Kraxner, F., Reuter, W.H., Fuss, S., Gusti, M., Koch, N.: Taking differences in institutional quality into account in global forest modelling. In: Conference Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015”, IIASA, Laxenburg, Austria, p. 67 (2015)
70. Havlík, P., Valin, H., Mosnier, A., Forsell, N., Frank, S., Leclère, D., Palazzo, A., Ermolieva, T., Gusti, M., Balkovič, J., Skalský, R., Schmid, E., Herrero, M., Kraxner, F., Obersteiner, M.: Integrated multi-scale modeling framework for assessment of land-use related challenges under global change. In: Conference Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015”, IIASA, Laxenburg, Austria, p. 73 (2015)
71. Krey, V., Riahi, K., Johnson, N., Kolp, P., Lutz, W., KC S., Crespo Cuaresma, J., Havlik, P., Böttcher, H., Gusti, M., Obersteiner, M.: The new scenarios process – the way toward more integrated assessment of climate change. In: Worlds Within Reach: From Science To Policy - IIASA 40th Anniversary Conference, Hofburg Congress Center, Vienna and IIASA, Laxenburg, Austria (2012). <http://pure.iiasa.ac.at/12238/1/krey1.pdf>
72. Böttcher, H., Gusti, M., Mosnier, A., Havlik, P., Obersteiner, M.: Global forestry emission projections and abatement costs. In: Geophysical Research Abstracts, vol.14 EGU2012-7062 (2012)
73. Kraxner, F., Nordström, E.-M., Obersteiner, M., Havlík, P., Gusti, M., Kindermann, G., Fuss, S., Khabarov, N.: Global feedstock scenarios for bioenergy - Land-use change and trade-offs. In: Paper submitted to the International Energy Workshop - IEW 2012 (2012). <http://iew2012.ercblogs.co.za/wp-content/uploads/sites/7/2012/06/Kraxner.pdf>



74. Fuss, S., Gusti, M., Kraxner, F., Aoki, K., Szolgayova, J.: Boreal forests as a carbon sink: A real options perspective. In: *Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action*. Proceedings of the international conference IBFRA, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia, 382-386 (2011)
75. Shvidenko, A., McCallum, I., Nilsson, S., Schepaschenko, D., Schmillius, C., Beer, C., Santoro, M., Baltzter, H., Quegan, S., LeToan, T., Gusti, M.: Regional terrestrial vegetation full greenhouse account for Northern Eurasia: a system approach. In: *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-07835, 2008, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-07835, EGU General Assembly, Vienna, Austria (2008)
76. Gusti, M., Jonas, M.: How well do we know Russia's carbon budget for 1988-1992? Critical look from uncertainty study of IIASA's Full Carbon Account. In: *Geophysical Research Abstracts*, vol. 10, EGU2008-A-09464, (2008)
77. Gusti, M., Jonas, M.: IIASA'S terrestrial full carbon account for Russia: Revised uncertainty estimates and its role in a bottom-up/top-down accounting exercise. In: *Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 69-85 (2007)
78. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal detection techniques for consideration in the (Post-) Kyoto policy process. In: *Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 107-135 (2007)
79. Bun, R., Gusti, M., Bun, A., Hamal, K.: Multilevel model for greenhouse gas inventory and uncertainty analysis concerning the Kyoto Protocol implementation. In: *Proc. of the Intern. Conf. on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006)*. Yamaguchi, Japan, 118-119 (2006)
80. Bun, A., Gusti, M., Hamal, Kh., Bun, R.: Analysis and minimization of uncertainty of results of multilevel greenhouse gases inventory. In: *Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems "ENVIROMIS'2006"*. Tomsk, Russia, p. 45 (2006)

81. Gusti, M.: Modelling the afforestation process and underlying uncertainties. In: Proceedings of the International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories: Verification, Compliance and Trading, Warsaw, Poland, 59-66 (2004)
82. Bun, R., Gusti, M., Dachuk, V., Oleksiv, B., Tsybrivsky, Ya.: Geoinformation system for greenhouse gas inventories as a practical tool for decision-makers. In: The Information Society and Enlargement of the European Union: 17th International Conference "Informatics for Environmental Protection", Cottbus, Germany, Part 2, 765-772 (2003)
83. Turkovska, O., Gusti, M., Ochremchuk, I.: Modeling forest CO<sub>2</sub> emissions for Ukraine affected by bioenergy and carbon sequestration policies. In: Proceedings of 6th International Academic Conference of Young Scientists "Computer Science and Engineering 2013", Lviv, Lviv Polytechnic National University, pp. 146-147 (2013). <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/23782/1/52-146-147.pdf>
84. Gusti, M.: An algorithm for simulation of forest management response to carbon price incentive. In: Proceedings of the conference 'Modern Information Technologies in Economy, Management and Education', Lviv, 94-97 (2010)
85. Gusti, M.: An approach to simulation of deforestation in tropical forests. In: Proceedings of the conference 'Modern Information Technologies in Economy, Management and Education', Lviv, 81-85 (2011)
86. Gusti, M.: Uncertainty of BAU emissions in LULUCF sector: Sensitivity analysis of the Global Forest Model. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories, LPNU, Lviv, 73-80 (2010)
87. Gusti, M.: Mathematical model for making decisions on land-use change. В: Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті: Всеукр. наук.-практ. конф.: зб. матеріалів, Львів, 57-59 (2008)
88. Gusti, M., Okhremchuk, I.: Accounting for social and sociopolitical factors in global integrated assessment models. В: Обчислювальні методи і системи перетворення інформації: збірник праць IV наук.-техн. конф., Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 133–137 (2016)

89. Густі, М.І., Охремчук, І.А.: Валідація глобальних моделей, які використовують для проведення інтегральної оцінки. В: Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2017: тези доповідей Дванадцятої міжнародної науково-практичної конференції, Чернігів, ЧНТУ, 116-120 (2017)
90. Густі, М.І.: Вдосконалення модуля прийняття рішень щодо параметрів лісокористування у глобальній моделі лісу G4M (версія для ЄС). В: Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: V міжнр. наук.-практ. конф., праці конференції, Чернівці, 109-110 (2016)
91. Густі, М.І.: Алгоритм оцінки емісії вуглекислого газу при знелісненні болотистих ґрунтів для глобальної геопросторової моделі лісу. В: Матеріали статей П'ятої Міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", Івано-Франківськ, 222-223 (2015)
92. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Прогнозування потенціалу зменшення емісій вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін землекористування. В: Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: IV міжнр. наук.-практ. конф., праці конференції, Чернівці, 126-128 (2015)
93. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Алгоритм лісокористування для моделі «лісового господарства» в Україні. В: Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: IV міжнр. наук.-практ. конф., тези доповідей, Вінниця, 105-107 (2014)
94. Токар, О., Густі, М., Король, М.: Автоматизація збору та обробки даних при дослідженні лісових масивів. В: Праці міжнародної конференції «Комп'ютерні науки та інформаційні технології - 2007», Львів, НУ «Львівська політехніка», 214-218 (2007)
95. Бунь, Р.А., Густі, М.І., Кужій, Л.І., Бунь, А.Р.: Комп'ютерна система формування кадастрів викидів парникових газів та оцінки похибок інвентаризацій в енергетичній галузі. В: Матер. 12 міжнар. конф. з автоматичного управління, Харків, НТУ «ХПІ», т. 2, 202-203 (2005)
96. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Застосування інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень щодо пом'якшення глобальної зміни клімату. В: Україна в процесах глобального інформаційного обміну: міжнр. наук.-практ. конф., зб. матеріалів, Львів, 67-69 (2016)

97. Густі, М., Токар, О.: Регіональні особливості екосистем України як джерел і поглиначів парникових газів. В: Інформатизація рекреаційної та туристичної діяльності: Перспективи культурного та економічного розвитку: Праці Другого міжнар. конгресу, Трускавець-Львів, ДНДШ, 175-179 (2003)
98. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Моделювання опцій для пом'якшення зміни клімату в глобальних моделях землекористування. В: 2-й міжнародний конгрес "Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування", збірник матеріалів. "ЗУКЦ", Львів, с.20 (2012)
99. Густі, М.: Математичне моделювання для підтримки прийняття рішень у міжнародних відносинах: досвід застосування глобальної моделі лісу. В: Матеріали II всеукр. наук. конф. «Україна в системі глобального інформаційного обміну: теоретико-методологічні аспекти дослідження і підготовки фахівців», Львів, Ліга-Прес, 37-44 (2013)
100. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Географічний підхід до моделювання викидів CO<sub>2</sub> у лісовому господарстві та при зміні землекористування в Україні. В: Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті: III всеукр. наук.-практ. конф., зб. Матеріалів, Львів, 79-84 (2012)
101. Густі, М.: Прогнозування базового рівня емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування для країн Європейського Союзу. В: Тринадцята відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук (PSC-IMFS-13), Зб. матеріалів конф., Львів, Вид-во Тараса Сороки, 130-132 (2017)
102. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Інформаційні технології для аналізу емісій CO<sub>2</sub> в лісовому господарстві та при зміні землекористування України. В: 10-та наук. конф. ІМФН НУ «Львівська політехніка», зб. матеріалів, Львів, НЗ-Н4 (2012)

## SUMMARY

Gusti M.I. Mathematical models of processes of carbon dioxide emissions and sinks in forestry and land use change. - Qualifying scientific thesis (manuscript).

A dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Sciences by specialty 01.05.02 "Mathematical modeling and computational methods" (113 - Applied mathematics). - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

The dissertation is devoted to the actual scientific and applied problem of mathematical modeling of carbon dioxide emissions and sinks in forestry and land use changes in order to increase the effectiveness of environmental management decisions on climate change mitigation at the global, regional and national levels. The first chapter analyzes the global budget of carbon dioxide, the main processes of carbon cycle in forest ecosystems and mathematical models that are used for studying the processes related to the carbon dioxide budget. The second chapter is devoted to development of methods and mathematical models for modeling the carbon budget of forest ecosystems. The third chapter is devoted to the mathematical modeling of forest management and land use change processes and development of the geospatial mathematical model G4M. The fourth chapter describes validation of the developed geospatial mathematical model. In the fifth chapter, we give examples of the practical application of the developed geospatial model, describe the schemes of data exchange between the G4M model and other models for formation of model complexes for integrated assessment. The sixth chapter is devoted to the study of methods for estimating uncertainties of greenhouse gas emissions and the effect of the uncertainties on decision making.

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

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

A method for geospatial modeling of forest management and land use change processes at the global level is developed. The method takes into account the mutual influence of these processes, as well as trade of harvested wood, processes of afforestation and deforestation allowing to analyze and make projections of these processes depending on the economic situation and the established limits on the emissions of greenhouse gases in a consistent way. A method for modelling of the process of spatial expansion of deforestation for G4M is developed. The method takes into account deforestation rate in current cell on the previous time step, minimum forest area in the neighbor cells and transportation network that allows modelling the spatial structure of deforestation.

A method for modeling the decision-making process on harvesting a given wood quantity and reducing forest management CO<sub>2</sub> emissions while preserving the harvest of given amount of wood at the country or regional level, for the G4M model. The method is based on the principle of maximizing net present value of forestry, combining information on the harvesting of wood at various geospatial levels (regions, countries and individual raster cells) and gives an opportunity to simulate logging process and implementation of environmental policies. Using, in particular, the above mentioned methods a global geospatial model of processes of afforestation, deforestation, forest management and respective CO<sub>2</sub> emissions (G4M) is developed. In the model the processes of making decisions on land use change and forest management are simulated from the point of view of land owner who are located in the 0.5x0.5 deg. cells. Also a special version of the G4M model for the EU, taking advantage of spatial data on tree species and harvest is developed. Data and the model

parameters necessary for development of a special version of the G4M model for Ukraine are proposed.

The method for identification of G4M parameters determining afforestation and deforestation rates is improved by accounting for data on afforestation, deforestation and the trend of changes in forest area on the national level. For the model calibration we use data based on FAO FRA and country reports to the UNFCCC that allows reproducing historical land use change and forestry emissions of carbon dioxide in countries as well as projecting the emissions for different scenarios of socioeconomic development and prices of greenhouse gas emissions.

We found that the G4M input data are quite uncertain, especially on the cell scale. Sensitivity analysis of the model to changes of some parameters reveals that the modelled afforestation and deforestation rates (under zero CO<sub>2</sub> price) are most sensitive to GDP, the coefficient of conversion from ton of carbon to cubic meters, mean annual increment, population density, wood price, agriculture suitability of land and planting costs. The sensitivity of modelled land use change and forestry CO<sub>2</sub> emissions to deviations of agriculture land price is very high at CO<sub>2</sub> price of 3-10 \$/tCO<sub>2</sub> (symmetrically to positive and negative deviations of the parameter value).

Root-mean-square deviation (RMSD) of the G4M modelled wood harvest averaged for 1999-2015 is about 0.5% for the EU; for most EU countries the RMSD is about 1% and for a few EU countries the RMSD is above 7%. RMSD of the G4M modelled forest management CO<sub>2</sub> emissions for the EU is about 17% (comparing to the data submitted by the countries to the UNFCCC that themselves are estimates), while for some EU countries the RMSD is 30-90%. Comparison of the G4M results with other models reveals that the G4M results are reasonable, the differences between the model results are explained by different modelling approaches, definitions and input data. The comparison also reveals that the quality of input data is as much important as the application of a few different models, when developing marginal abatement cost curves.

The developed model G4M is an appropriate tool for solving a wide class of problems of projection of dynamics of forest area (via processes of deforestation and afforestation), forest biomass, wood harvest and respective CO<sub>2</sub> emissions as well as

estimation of the emissions response to emission mitigation policies. The model results can be used for decision making support when developing CO<sub>2</sub> mitigation policies. Schemes of data exchange between G4M and an economic partial equilibrium model GLOBIOM for accounting for trade and demand for agriculture land, energy system model MESSAGE, macroeconomic model MACRO, climate model MAGICC and other models for forming complexes of models for integrated assessment modelling. Applying the data exchange schemes forest management reference levels of CO<sub>2</sub> emissions are estimated for 14 EU member states (that are officially submitted to the UNFCCC); baseline scenario of CO<sub>2</sub> emissions from afforestation, deforestation and forest management as well as CO<sub>2</sub> mitigation potential for the world countries and globally are estimated; numerical assessment of land use change and forestry emissions for the Shared Socio-economic Pathways (SSPs) together with scenarios of Representative Concentration Pathways (RCPs) is carried out; synergy of CO<sub>2</sub> mitigation policies (reducing deforestation) and reduction of species extinction in developing countries is analyzed; dynamics of afforestation, deforestation and forest management and respective CO<sub>2</sub> emissions are estimated for EU countries; etc.

On the basis of the developed mathematical models of carbon budget of forest ecosystems, as well as geospatial mathematical model of processes of forest management and land use change, computer simulation tools are elaborated.

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

The list of author's publications:

1. Bun, R.A., Gusti, M.I., Dachuk, V.S., Kujii, L.I., Oleksiv, B.Ya., Stryamets, H.V., Stryamets, S.P., Tokar, O.Ye., Tsybrivskyy Ya.B.: Information Technologies for Greenhouse Gas Inventories and Prognosis of the Carbon Budget of Ukraine. Ukrainian Academy of Printing, Lviv, 376 p. (2004) (in Ukrainian)
2. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Papadopoulos, D., Siskos, P., Apostolaki, E., Zampara, M., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Kouvaritakis, N., Hoeglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Bottcher, H., Frank, S., Havlik, P., Gusti, M., Witzke, H.P.: EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050



- Reference scenario 2013. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 173 p. (2014)
3. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Siskos, P., Kannavou, M., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S., Zampara, M., Papadopoulos, D., Nakos, Ch., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Tsani, S., Karkatsoulis, P., Fragkos, P., Kouvaritakis, N., Höglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Gomez Sanabria, A., Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M., Witzke, H.P., Kesting, M.: EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. European Commission Directorate - General for Energy, Directorate - General for Climate Action and Directorate - General for Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 223 p. (2016)
  4. Turkovska, O., Gusti, M., Lauri, P., Forsell, N., Havlik, P., Obersteiner, M.: Linear optimization of forest management for dynamic recursive model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. **5**(4), 12-18 (2015). doi:10.15587/1729-4061.2015.50966
  5. Turkovska, O., Gusti, M.: Forest management algorithm considering assortment structure for geospatial global forest model G4M. *Scientific Bulletin of UNFU*. **25**(5), 339-345 (2015) (in Ukrainian)
  6. Turkovska, O., Gusti, M.: Adaptation of global computer forest model G4M for Ukraine. *Scientific Bulletin of Vinnytsya National Technical University*. **5**, 9-15 (2015) (in Ukrainian)
  7. Turkovska, O., Okhremchuk, I., Gusti, M.: The Assessment of Efficiency of a Policy on Reduction of CO<sub>2</sub> Emissions in Ukrainian forests for Three Socio-economic Scenarios. *Scientific Bulletin of UNFU*. **25**(4), 98-104 (2015) (in Ukrainian)
  8. Gusti M.: An algorithm for simulation of forest management decisions in the Global Forest Model. *Artificial Intelligence*. **4**, 45-49 (2010)
  9. Tokar, O., Gusti, M., Korol, M.: Automating of data acquisition and processing for studying forest stands. *Computer Sciences and Information Technologies*. **598**, 171-175 (2007) (in Ukrainian)
  10. Bun, A., Gusti, M., Kujii, L.: Geoinformation technologies for forming the cadasters of greenhouse gas emissions in energy sector. *Herald of the Shidnoukrainsky (East-Ukrainian) National University*. **10**, 87-94 (2005) (in Ukrainian)

11. Bun, A., Gusti, M., Kujii, L.: Models and algorithms for forming the cadasters of greenhouse gas emissions in energy sector taking into account the uncertainties. *Collection of Scientific Papers of the Institute of the Problems of Modeling in Power Engineering*. **28**, 89-96 (2005) (in Ukrainian)
12. Kujii, L., Gusti, M., Bun, A.: An automated system for geospatially distributed greenhouse gas inventory. *Herald of Khmelnytskyi National University*. **2**(1/4), 22-27 (2005) (in Ukrainian)
13. Gusti, M., Bun, R., Dachuk V., Shpakivska I.: Mathematical model of carbon budget of a beach forest. *Information Technologies and Systems*. **7**(2), 90-99 (2004) (in Ukrainian)
14. Gusti, M., Tokar, O., Korol, M.: Comparison of estimates of carbon sink in forest biomass at different levels of details. *Scientific Bulletin of UNFU*. **14**(4), 13-18 (2004) (in Ukrainian)
15. Tokar, O., Gusti, M., Mathematical models for greenhouse gas inventory in forestry. *Information Technologies and Systems*. **6**(1-2), 211-217 (2003) (in Ukrainian)
16. Bun, R., Gusti, M., Dachuk, V., Oleksiv B., Tsybrivskyy Ya.: Specialized computer system for multilevel greenhouse gas inventory. *Herald of Podillya Technological University*. **1**(3), 77-81 (2003) (in Ukrainian)
17. Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schöpp, W., Riahi, K.: The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*. **42**, 251–267 (2017)
18. Forsell, N., Turkovska, O., Gusti, M., den Elzen, M., Obersteiner, M., Havlik, P.: Assessing the INDCs' land use, land use change, and forest emission projections. *Carbon Balance and Management*. **11**(26), 1-17 (2016). doi:10.1186/s13021-016-0068-3
19. Szolgayová, J., Fuss, S., Kaminski, T., Scholze, M., Gusti, M., Heimann, M., Tavoni, M.: The benefits of investing into improved carbon flux monitoring. *Cogent Economics & Finance*, **4**(1), 1239672 (2016). doi:10.1080/23322039.2016.1239672

20. Di Fulvio, F., Forsell, N., Lindroos, O., Korosuo, A., Gusti, M.: Spatially explicit assessment of roundwood and logging residues availability and costs for the EU28. *Scandinavian Journal of Forest Research*. **31**(7), 691-707 (2016). doi: 10.1080/02827581.2016.1221128
21. Frank, S., Böttcher, H., Gusti, M., Havlík, P., Klaassen, G., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Dynamics of the land use, land use change, and forestry sink in the European Union: the impacts of energy and climate targets for 2030. *Climatic Change*. **138**, 253–266 (2016). doi:10.1007/s10584-016-1729-7
22. Kryazhimskiy, A., Rovenskay, E., Shvidenko, A., Gusti, M., Shchepashchenko, D., Veshchinskaya, V.: Towards harmonizing competing models: Russian forests' net primary production case study. *Technological Forecasting and Social Change*. **98**, 245–254 (2015). doi:10.1016/j.techfore.2015.06.003
23. Ometto, J.P., Bun, R., Jonas, M., Nahorski, Z., Gusti, M.: Uncertainties in greenhouse gases inventories - Expanding our perspective. *Climatic Change*. **124**(3), 451-458 (2014). doi: 10.1007/s10584-014-1149-5
24. Kraxner, F., Nordstroem, E.-M., Havlik, P., Gusti, M., Mosnier, A., Frank, S., Valin, H., Fritz, S., Fuss, S., Kindermann, G., McCallum, I., Khabarov, N., Bottcher, H., See, L., Aoki, K., Schmid, E., Mathe, L., Obersteiner, M.: Global bioenergy scenarios - future forest development, land-use implications, and trade-offs. *Biomass and Bioenergy*. **57**, 86-96 (2013). doi: 10.1016/j.biombioe.2013.02.003
25. Bottcher, H., Verkerk, P.J., Gusti, M., Havlik, P., Grassi, G.: Projection of the future EU forest CO<sub>2</sub> sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models. *GCB Bioenergy*. **4**, 773–783 (2012)
26. Strassburg, B.N.B., Rodrigues, A.S.L., Gusti, M., Balmford, A., Fritz, S., Obersteiner, M., Turner, R.K., Brooks, T.M.: Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. *Nature Climate Change*. **2**, 350–355 (2012). doi:10.1038/nclimate1375
27. Gusti, M., Jonas, M.: Terrestrial full carbon account for Russia: revised uncertainty estimates and their role in a bottom-up/top-down accounting exercise. *Climatic Change*. **103**(1-2), 159-174 (2010). doi: 10.1007/s10584-010-9911-9
28. Obersteiner, M., Huettner, M., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Rametsteiner, E., Reyers, B.: On

- fair, effective and efficient REDD mechanism design. *Carbon Balance and Management*. **4**(11), 1-11 (2009). doi:10.1186/1750-0680-4-11
29. Fuss, S., Szolgayova, J., Obersteiner, M., Gusti, M.: Investment under market and climate policy uncertainty. *Applied Energy*. **85**, 708-721 (2008). doi: 10.1016/j.apenergy.2008.01.005
  30. Gusti, M.: Modeling afforestation and the underlying uncertainties. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. **7**(4-5), 475-482 (2007). doi:10.1007/s11267-006-9115-5 (reprinted in monograph Lieberman et al.: *Accounting for Climate Change: Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories – Verification, Compliance, and Trading*, pp.52-62. Springer, The Netherlands (2007))
  31. Ramonet, M., Ciais, P., Nepomniachii, I., Sidorov, K., Neubert R.E.M., Langendorfer, U., Picard, D., Kazan, V., Biraud, S., Gusti, M., Kolle, O., Schulze, E.-D., Lloyd, J.: Three years of aircraft-based trace gas measurements over the Fyodorovskoye southern taiga forest, 300 km north-west of Moscow. *Tellus B*. **54**(5), 713-735 (2002). doi: 10.1034/j.1600-0889.2002.01358.x
  32. Turkovska, O., Gusti, M.: A conceptual scheme for modelling forestry and LUC CO<sub>2</sub> emissions in Ukraine. *Econtechmod*. **2**(1), 57-62 (2013)
  33. Tokar, O., Bun, R., Gusti, M.: Mathematical models for estimation of the carbon sinks in forests of the Carpathian Region of Ukraine. *Information and Telecommunication Systems*. **9**, 80-89 (2006)
  34. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: quality control and specific characters of inventory sectors. *Information and Telecommunication Systems*, Bielsko-Biala: Polish Information Processing Society. **4**, 73-82 (2004)
  35. Bun, R., Gusti, M.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: multilevel models. *Information and Telecommunication Systems*, Bielsko-Biala: Polish Information Processing Society. **1**, 61-67 (2004)

36. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L., Tokar, O., Tsybrivskyy, Y., Bun, A.: Spatial GHG inventory: analysis of uncertainty sources. A case study for Ukraine. In: Lieberman, D., Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S. (Eds.) *Accounting for Climate Change: Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories – Verification, Compliance, and Trading*, pp. 63-74. Springer, The Netherlands (2007). doi:10.1007/978-1-4020-5930-8\_6
37. Obersteiner, M., Rametsteiner, E., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Reyers, B.: Towards a sound REDD: Ensuring globally consistent reference scenarios and safeguarding sustainability co-benefits. In: Bosetti, E., Lubowski, R. (Eds) *Deforestation and Climate Change: Reducing Carbon Emissions from Deforestation and Forest Degradation*, pp.121-136. Edward Elgar, Cheltenham, UK (2010)
38. Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Verkerk, P.J., Hengeveld, G., Packalen, T., Sallnäs, O., Pilli, R., Grassi, G., Forsell, N., Frank, S., Gusti, M., Havlik, P.: Forest resource projection tools at the European level. In: Barreiro, S., Schelhaas, M.-J., McRoberts, R.E., Kändler, G. (Eds.) *Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability. Managing Forest Ecosystems*, vol.29, pp. 49-68. Springer International Publishing, Cham, Switzerland (2017). doi:10.1007/978-3-319-56201-8\_4.
39. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Spatial GHG inventory at the regional level: accounting for uncertainty. In: Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S., Whiter, T. (eds.) *Greenhouse Gas Inventories: Dealing With Uncertainty*, pp.227-244. Springer, Dordrecht (2011). doi:10.1007/978-94-007-1670-4\_13
40. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Geoinformation technology and greenhouse gas spatial inventory: An analysis of structural changes in energy sector. In: *Zeszyty Naukowe: Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Przemysłu. Sesja Naukowa "Środowisko i Technologie Informatyczne a Zdrowie Człowieka"*, vol.1, 14-34 (2007)
41. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Savchyn, O.: Information technology for spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: Wieczorek, T. (ed.) *Internet in the information society: Application of the information technologies*, pp. 154-163. WSB, Dabrowa Gornicza (2007)

42. Buń, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Technologie informacyjne inwentaryzacji gazów cieplarnianych z wykorzystaniem georozproszonych baz danych. In: Nowe technologie w komputerowych systemach zarządzania, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, pp. 37-43 (2005)
43. Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B., Dietrich, J.P., Doelmann, J., Gusti, M., Hasegawa, T., Kyle, P., Obersteiner, M., Tabeau, A., Takahashi, K., Valin, H., Waldhoff, S., Weindl, I., Wise, M., Kriegler, E., Lotze-Campen, H., Fricko, O., Riahi, K., van Vuuren, D.: Land use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*. **42**, 331–34 (2017). doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.10.002
44. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal analysis techniques for consideration in the (post-)Kyoto policy process. *Climatic Change*. **103**(1-2), 175-213 (2010) doi:10.1007/s10584-010-9914-6
45. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: How much additional carbon can be stored in forests if economic measures are used and how much could it cost? *Scientific Bulletin of NUBiP Ukraine: Forestry and Landscape Gardening*. **135**, 244-253 (2009)
46. Gusti, M., Tsybrivskyy, Ya., Dachuk, V., Bun, R.: Use of contemporary software applications for estimation and analysis of carbon budget of forest ecosystems. *Herald of Kharkiv National Agrarian University named after V.V.Dokuchajev*. **2**, 129-134 (2003) (in Ukrainian)
47. Forsell, N., Korosuo, A., Lauri, P., Gusti, M., Havlik, P., Böttcher, H., Hennenberg, K.: Follow-up study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio follow-up). Publications Office of the European Union, Luxembourg, 68 pp. (2016) ISBN 978-92-79-64433-7
48. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M., Böttcher, H., Hennenberg, K., Hünecke, K., Wiegmann, K., Pekkanen, M., Nuolivirta, P., Bowyer, C., Nanni, S., Allen, B., Poláková, J., Fitzgerald, J., Lindner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio). Final report. Project: ENV.F.1/ETU/2013/0033. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 43 pp. (2016)
49. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for

- bioenergy. Task 3: Modelling of impacts of an increased EU bioenergy demand on biomass production, use and prices. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 109 pp. (2016).
50. Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlík, P.: Methodology for estimation and modelling of EU LULUCF greenhouse gas emissions and removals until 2050 in GLOBIOM and G4M. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, 29 pp. (2016) [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models/docs/lulucf\\_methodology\\_report\\_may2016\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models/docs/lulucf_methodology_report_may2016_en.pdf)
  51. Den Elzen, M., Fekete H., Admiraal A., Forsell N., Höhne N., Korosuo A., Roelfsema M., van Soest H., Wouters K., Day Th., Hagemann M., Hof A., Mosnier A.; Contributing authors: Havlik P., Gusti M., Obersteiner M., Wong L.: Enhanced policy scenarios for major emitting countries, The Hague, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 134 pp. (2015). [http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-enhanced-policy-scenarios-for-major-emitting-countries\\_1631.pdf](http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-enhanced-policy-scenarios-for-major-emitting-countries_1631.pdf)
  52. Havlík, P., Valin, H., Jean P., Gusti, M., Schmid, E., Forsell, N., Herrero, M., Khabarov, N., Mosnier, A., Cantele, M., Obersteiner, M.: Climate change impacts and mitigation in the developing world: an integrated assessment of the agriculture and forestry sectors. Policy Research working paper; no. WPS 7477. Washington, D.C.: World Bank Group, 56 pp. (2015) <http://documents.worldbank.org/curated/en/2015/11/25250682/climate-change-impacts-mitigation-developing-world-integrated-assessment-agriculture-forestry-sectors>
  53. Gusti, M.: G4M Overview (global version). Research Gate (2015). doi: 10.13140/RG.2.1.4319.8804. [https://www.researchgate.net/publication/284625564\\_G4M\\_Overview\\_global\\_version](https://www.researchgate.net/publication/284625564_G4M_Overview_global_version)
  54. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Bottcher, H., Gusti, M., Kraxner, F., Obersteiner, M., Leduc, S.: The Role of ECA's Forest Resources in Climate Change Mitigation. Final Report submitted to The World Bank on Contract #7158909 (September 2011), International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 78 pp. (2011)
  55. Deveney, A., Nackoney, J., Purvis, N., Gusti, M., Kopp, R., Myers, E., Stevenson, A., Kindermann, G., Macauley, M., Obersteiner, M.: Forest carbon

- index: The geography of forests in climate solutions. Joint report by Resources for the Future and Climate Advisers. Washington, DC, USA, 80 pp. (2009). <http://www.bluepointmaps.com/staging/fci3/index.html>
56. Böttcher, H., Aoki, K., De Cara, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Schneider, U., Obersteiner, M.: GAINS. GHG Mitigation Potentials and Costs from Land-Use, Land-Use Change and Forestry in Annex-I Countries: Methodology. Report. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 39 pp. (2008)
57. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: Technical Description of the IIASA Model Cluster. The Eliasch Review; Office of Climate Change, UK, 12 pp. (2008). [http://www.occ.gov.uk/activities/eliasch/Gusti\\_IIASA\\_model\\_cluster.pdf](http://www.occ.gov.uk/activities/eliasch/Gusti_IIASA_model_cluster.pdf)
58. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for Annex I Countries under the Kyoto Protocol - A Lesson for the Post-Kyoto Policy Process. International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-024, Laxenburg, Austria, 91 pp. (2004)
59. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2001). International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-029, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)
60. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2002). International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-046, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)
61. Gusti, M., Böttcher, H., Kindermann, G., Havlik, P., Obersteiner, M.: Simulation of REDD+ options using IIASA model framework. In: Seppelt, R., Voinov, A.A., Lange, S., Bankamp, D. (Eds.) International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software “Managing Resources of a Limited Planet”, Sixth Biennial



- Meeting, Leipzig, Germany (2012). <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>
62. Gusti, M., Kindermann, G.: An approach to modeling landuse change and forest management on a global scale. In: Proceedings, 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011), Noordwijkerhout, Netherlands, 180-185 (2011)
  63. Bun, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Greenhouse gas inventory on the base of multilevel model. In: Filho, L.W., Gomez, J.M., Rautenstrauch, C. (Eds.) Second International ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering. Proceedings. Shaker Verlag, Aachen, Germany, 294-308 (2005)
  64. Bun, R., Hamal, K., Gusti, M., Bun, A., Savchyn, O.: Spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: Gómez, J.M., Sonnenschein, M., Müller, M., Welsch, H., Rautenstrauch, C. (Eds.) Information Technologies in Environmental Engineering. Book Series “Environmental Science and Engineering”, ITEE 2007, Third International ICSC Symposium (2007). <http://www.springerlink.com/content/j183524664262371/>
  65. Gusti, M., Khabarov, N., Forsell, N.: Sensitivity of marginal abatement cost curves to variation of G4M parameters. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Cracow, Poland, 163-169 (2015)
  66. Fuss, S., Gusti, M., Broquet, G., Ciais, P., Tavoni, M., MacCallum, I.: Assessing the benefit of carbon monitoring systems for REDD+ in Pan-Tropical regions. In: XIV World Forestry Congress, Durban, South Africa, 7-11 (2015)
  67. Frank, S., Havlík, P., Soussana, J.F., Levesque, A., Valin, H., Wollenberg, E., Kleinwechter, U., Fricko, O., Gusti, M., Herrero, M., Smith, P.: Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? In: EGU General Assembly Conference: Abstracts, vol. 19, p. 15384 (2015)
  68. Forsell, N., Havlík, P., Korosuo, A., Kraxner, F., Frank, S., Valin, H., Gusti, M., Zhang, W., Nordin, A., Lundmark, T., Obersteiner, M.: Global harvesting of wood under different socio-economic and climate mitigation scenarios. In: Towards a New Era of Forest Science in the Boreal Region. Abstracts of the 17th IBFRA Conference, Rovaniemi, Finland. p. 79 (2015)

69. Wehkamp, J., Pietsch, S.A., Kraxner, F., Reuter, W.H., Fuss, S., Gusti, M., Koch, N.: Taking differences in institutional quality into account in global forest modelling. In: Conference Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015”, IIASA, Laxenburg, Austria, p. 67 (2015)
70. Havlík, P., Valin, H., Mosnier, A., Forsell, N., Frank, S., Leclère, D., Palazzo, A., Ermolieva, T., Gusti, M., Balkovič, J., Skalský, R., Schmid, E., Herrero, M., Kraxner, F., Obersteiner, M.: Integrated multi-scale modeling framework for assessment of land-use related challenges under global change. In: Conference Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015”, IIASA, Laxenburg, Austria, p.73 (2015)
71. Krey, V., Riahi, K., Johnson, N., Kolp, P., Lutz, W., KC S., Crespo Cuaresma, J., Havlik, P., Böttcher, H., Gusti, M., Obersteiner, M.: The new scenarios process – the way toward more integrated assessment of climate change. In: Worlds Within Reach: From Science To Policy - IIASA 40th Anniversary Conference, Hofburg Congress Center, Vienna and IIASA, Laxenburg, Austria (2012). <http://pure.iiasa.ac.at/12238/1/krey1.pdf>
72. Böttcher, H., Gusti, M., Mosnier, A., Havlik, P., Obersteiner, M.: Global forestry emission projections and abatement costs. In.: Geophysical Research Abstracts, vol.14 EGU2012-7062 (2012)
73. Kraxner, F., Nordström, E.-M., Obersteiner, M., Havlík, P., Gusti, M., Kindermann, G., Fuss, S., Khabarov, N.: Global feedstock scenarios for bioenergy - Land-use change and trade-offs. In: Paper submitted to the International Energy Workshop - IEW 2012 (2012). <http://iew2012.ercblogs.co.za/wp-content/uploads/sites/7/2012/06/Kraxner.pdf>
74. Fuss, S., Gusti, M., Kraxner, F., Aoki, K., Szolgayova, J.: Boreal forests as a carbon sink: A real options perspective. In: Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action. Proceedings of the international conference IBFRA, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia, 382-386 (2011)
75. Shvidenko, A., McCallum, I., Nilsson, S., Schepaschenko, D., Schullius, C., Beer, C., Santoro, M., Baltzter, H., Quegan, S., LeToan, T., Gusti, M.: Regional terrestrial vegetation full greenhouse account for Northern Eurasia: a system

- approach. In: Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-07835, 2008, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-07835, EGU General Assembly, Vienna, Austria (2008)
76. Gusti, M., Jonas, M.: How well do we know Russia's carbon budget for 1988-1992? Critical look from uncertainty study of IIASA's Full Carbon Account. In: Geophysical Research Abstracts, vol. 10, EGU2008-A-09464, (2008)
77. Gusti, M., Jonas, M.: IIASA'S terrestrial full carbon account for Russia: Revised uncertainty estimates and its role in a bottom-up/top-down accounting exercise. In: Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 69-85 (2007)
78. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal detection techniques for consideration in the (Post-) Kyoto policy process. In: Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 107-135 (2007)
79. Bun, R., Gusti, M., Bun, A., Hamal, K.: Multilevel model for greenhouse gas inventory and uncertainty analysis concerning the Kyoto Protocol implementation. In: Proc. of the Intern. Conf. on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006). Yamaguchi, Japan, 118-119 (2006)
80. Bun, A., Gusti, M., Hamal, Kh., Bun, R.: Analysis and minimization of uncertainty of results of multilevel greenhouse gases inventory. In: Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems "ENVIROMIS'2006". Tomsk, Russia, p. 45 (2006)
81. Gusti, M.: Modelling the afforestation process and underlying uncertainties. In: Proceedings of the International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories: Verification, Compliance and Trading, Warsaw, Poland, 59-66 (2004)
82. Bun, R., Gusti, M., Dachuk, V., Oleksiv, B., Tsybrivskyy, Ya.: Geoinformation system for greenhouse gas inventories as a practical tool for decision-makers. In: The Information Society and Enlargement of the European Union: 17th International Conference "Informatics for Environmental Protection", Cottbus, Germany, Part 2, 765-772 (2003)

83. Turkovska, O., Gusti, M., Okhremchuk, I.: Modeling forest CO<sub>2</sub> emissions for Ukraine affected by bioenergy and carbon sequestration policies. In: Proceedings of 6th International Academic Conference of Young Scientists “Computer Science and Engineering 2013”, Lviv, Lviv Polytechnic National University, pp. 146-147 (2013). <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/23782/1/52-146-147.pdf>
84. Gusti, M.: An algorithm for simulation of forest management response to carbon price incentive. In: Proceedings of the conference ‘Modern Information Technologies in Economy, Management and Education’, Lviv, 94-97 (2010)
85. Gusti, M.: An approach to simulation of deforestation in tropical forests. In: Proceedings of the conference ‘Modern Information Technologies in Economy, Management and Education’, Lviv, 81-85 (2011)
86. Gusti, M.: Uncertainty of BAU emissions in LULUCF sector: Sensitivity analysis of the Global Forest Model. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories, LPNU, Lviv, 73-80 (2010)
87. Gusti, M.: Mathematical model for making decisions on land-use change. In: Proceedings of the conference ‘Modern Information Technologies in Economy, Management and Education’, Lviv, 57-59 (2008)
88. Gusti, M., Okhremchuk, I.: Accounting for social and sociopolitical factors in global integrated assessment models. In: Computational methods and information transformation systems: Proceedings of the IV conf., Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 133–137 (2016)
89. Gusti, M., Okhremchuk, I.: Validation of global models used for integrated assessments. In: Mathematical modelling and simulation of systems. MODS2017: Abstracts of 12<sup>th</sup> International Conference, Chernihiv National Technical University, Chernihiv, 116-120 (2017) (in Ukrainian)
90. Gusti, M.: Improvement of the module simulating decisions on forest management parameters for the global forest model G4M (EU version). In: Problems of informatics and computer technics: V Intern. Conf., Proceedings, Chernivtsi, 109-110 (2016) (in Ukrainian)
91. Gusti, M.: An algorithm for estimation of carbon dioxide emissions due to peat deforestation in the global georeferenced forest model. In: Proceedings of the 5th

- International Scientific Conference "Information Technology and Computer Engineering", Ivano-Frankivsk, 222-223 (2015) (in Ukrainian)
92. Gusti, M., Turkovska, O.: Projection of mitigation potential of the carbon dioxide emissions from land use change and forest management. In: Problems of informatics and computer technics: IV Intern. Conf., Proceedings, Chernivtsi, 126-128 (2015) (in Ukrainian)
  93. Gusti, M., Turkovska, O.: An algorithm for forest management simulation for the model of forestry in Ukraine. In: Information technologies and computer engineering: IV Intern. Conf., Abstracts, Vinnytsya, 105-107 (2014) (in Ukrainian)
  94. Tokar, O., Gusti, M., Korol, M.: Automating of data acquisition and processing for studying forest stands. In: Proceedings of Intern. Conf. "Computer Sciences and Information Technologies - 2007", Lviv Polytechnic National University, 214-218 (2007) (in Ukrainian)
  95. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L., Bun, A.: Computer system for forming cadasters of greenhouse gas emissions and uncertainty estimation in the energy sector. In: Proceedings of 12 Intern. Conf. on Automatic Control, vol. 2, NTU "KhPU", Kharkiv, 202-203 (2005) (in Ukrainian)
  96. Gusti, M., Turkovska, O.: Application of information technologies for supporting decision making on mitigation of global climate change. In: Proceedings of Intern. Conf. "Ukraine in the Processes of Global Information Exchange", Lviv, 67-69 (2016) (in Ukrainian)
  97. Gusti, M., Tokar, O.: Regional peculiarities of ecosystems in Ukraine as sources and sinks of greenhouse gases. In: Proceedings of 2nd Intern. Congress "Informatization of Recreational and Tourist Activities: Perspectives of Cultural and Economic Development", DNDIII, Truskavets-Lviv, 175-179 (2003) (in Ukrainian)
  98. Turkovska, O., Gusti, M.: Modelling the climate change mitigation options in global land use models. In: Proceedings of the 2-nd Intern. Congress "Environment protection. Energy saving. Sustainable environmental management – EPESSEM'2012", Lviv, p.20 (2012) (in Ukrainian)
  99. Gusti, M.: Mathematical modelling for supporting decision making in international relations: an experience of application of the global forest model. In: Proceedings of Ukrainian Conf. "Ukraine in the Processes of Global Information Exchange:

- theoretical and methodological aspects of research and education”, Lviv, 37-44 (2013) (in Ukrainian)
100. Gusti, M., Turkovska, O., Geographical approach to modelling CO<sub>2</sub> emissions from forestry and land use change in Ukraine. In: Proceedings of the conference ‘Modern Information Technologies in Economy, Management and Education’, Lviv, 79-84 (2012) (in Ukrainian)
101. Gusti, M.: Projection of reference level of forest management CO<sub>2</sub> emissions for the EU countries. In: Proceedings of the 13<sup>th</sup> Open Scientific Conference of the Institute of Applied Mathematics and Fundamental Sciences (PSC-IMFS-13). Taras Soroka Publishing House, Lviv, 130-132 (2017) (in Ukrainian)
102. Turkovska, O., Gusti, M.: Information technologies for analysis of CO<sub>2</sub> emissions from forestry and land use change in Ukraine. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> Open Scientific Conference of the Institute of Applied Mathematics and Fundamental Sciences (PSC-IMFS-10). Lviv Polytechnic National University, Lviv, H3-H4 (2012) (in Ukrainian)

## Зміст

<i>Перелік умовних скорочень</i>	<b>44</b>
<i>Вступ</i>	<b>46</b>
<b><i>Розділ 1. Сучасний стан моделювання процесів емісії та стоку вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін землекористування</i></b>	<b>64</b>
<b>1.1. Процеси емісій та стоку CO<sub>2</sub> в секторі лісового господарства та зміни землекористування</b>	<b>64</b>
1.1.1. Роль емісії та поглинання CO <sub>2</sub> в секторі лісового господарства та зміни землекористування у глобальному циклі вуглецю	64
1.1.2. Процеси кругообігу вуглецю в лісовій екосистемі	66
1.1.3. Основні причини зміни землекористування	67
<b>1.2. Моделювання процесів кругообігу вуглецю в лісових екосистемах, процесів емісії та стоку вуглекислого газу при лісокористуванні та зміні землекористування</b>	<b>69</b>
1.2.1. Моделі процесів кругообігу вуглецю в лісових екосистемах	69
1.2.1. Моделювання процесів зміни землекористування	71
1.2.2. Моделювання процесів лісокористування у глобальних та регіональних моделях	78
<b>1.3. Висновки до розділу 1.</b>	<b>81</b>
<b><i>Розділ 2. Математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем</i></b>	<b>83</b>
<b>2.1. Динамічні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем</b>	<b>83</b>
2.1.1. Структурна модель вуглецевого балансу лісу	83
2.1.2. Математичні моделі потоків вуглецю	85
2.1.3. Підмодель накопичення/танення снігу.	90
2.1.4. Калібрування та перевірка моделей.	92
<b>2.2. Моделювання вуглецевого балансу лісових екосистем</b>	<b>94</b>
2.2.1. Результати моделювання сезонної та вікової динаміки вуглецю в екосистемі букового лісу за теперішнього клімату.	94
2.2.2. Сценарії зміни температури, кількості опадів та концентрації вуглекислого газу в атмосфері	97
2.2.3. Прогнозування вуглецевого балансу лісових екосистем Карпатського регіону України при зміні клімату та концентрації вуглекислого газу в атмосфері	101
2.2.4. Прогнозування вуглецевого балансу екосистем дубових лісів у регіонах України за різних сценаріїв зміни клімату	105
<b>2.3. Математичне моделювання змін в землекористуванні</b>	<b>112</b>
2.3.1. Буковий ліс – рілля	113
2.3.2. Буковий ліс – лука	115

2.3.4. Рілля – буковий ліс _____	117
2.4.5. Рілля – дубовий ліс _____	119
<b>2.4 Дослідження впливу невизначеності параметрів моделі на динаміку вуглецевого балансу лісу при залісненні _____</b>	<b>121</b>
2.4.1. Опис чисельного експерименту _____	121
2.4.2. Моделювання невизначеності параметрів моделі _____	122
2.4.3. Результати чисельного експерименту _____	122
<b>2.5. Висновки до Розділу 2 _____</b>	<b>126</b>
<b><i>Розділ 3. Математичне моделювання процесів лісокористування та зміни землекористування _____</i></b>	<b><i>129</i></b>
<b>3.1. Структурна схема моделі _____</b>	<b>129</b>
<b>3.2. Моделювання лісокористування _____</b>	<b>132</b>
3.2.1. Модель віртуального лісу _____	132
3.2.2. Ініціалізація віртуального лісу _____	136
3.2.3. Моделювання процесу коригування параметрів лісокористування для заготівлі потрібної кількості деревини на рівні країни _____	138
3.2.4. Обчислення емісії CO <sub>2</sub> з біомаси лісів при лісокористуванні _____	140
<b>3.3. Моделювання прийняття рішень щодо землекористування _____</b>	<b>141</b>
3.3.1. Імітаційне моделювання процесу прийняття рішень про зміну землекористування _____	141
3.3.2. Модель чистої приведеної вартості лісового господарства _____	143
3.3.3. Модель чистої приведеної вартості сільського господарства _____	146
3.3.4. Модель вартості деревини, отриманої при знелісненні _____	148
3.3.5. Швидкість зміни землекористування _____	149
3.3.6. Моделювання процесів емісій CO <sub>2</sub> при знелісненні _____	151
3.3.7. Моделювання процесів емісій CO <sub>2</sub> при залісненні _____	155
<b>3.4. Моделювання прийняття рішень щодо зменшення емісій CO<sub>2</sub> при лісокористуванні та зміні землекористування _____</b>	<b>157</b>
<b>3.5. Вхідні дані моделі та калібрування _____</b>	<b>158</b>
3.5.1. Основні рівняння моделі G4M _____	158
3.5.2. Стійкість моделі _____	161
3.5.3. Вхідні дані моделі _____	164
3.5.4. Калібрування швидкості зміни землекористування у моделі G4M _____	167
3.5.3. Калібрування стоку вуглецю у біомасу лісів у моделі G4M _____	168
<b>3.6. Регіональні версії моделі, які враховують наявні додаткові дані _____</b>	<b>170</b>
3.6.1. Додаткові дані про ліси, які наявні для європейських країн _____	170
3.6.2. Вдосконалення представлення лісу у моделі з врахуванням даних про геопросторове розміщення переважаючих деревних порід _____	172



3.6.3. Вдосконалення алгоритму лісокористування з врахуванням додаткових даних _____	173
3.6.4. Моделювання процесу заготівлі відходів деревини у лісах та відповідних емісій CO <sub>2</sub> від втрати вуглецю ґрунту _____	174
3.6.5. Адаптація моделі для України та вдосконалення моделювання процесу заготівлі деревини _____	176
<b>3.7. Висновки до розділу 3 _____</b>	<b>180</b>
<b><i>Розділ 4. Валідація математичної моделі G4M _____</i></b>	<b><i>182</i></b>
<b>4.1. Особливості валідації математичних моделей, які використовують для проведення інтегральної оцінки _____</b>	<b>182</b>
<b>4.2. Чутливість моделі до неточностей параметрів _____</b>	<b>184</b>
4.2.1. Невизначеності вхідних даних _____	184
4.2.2. Аналіз даних про швидкість заліснення та знеліснення, отриманих зі звітів ФАО та РКЗК ООН для окремих країн _____	188
4.2.3. Чутливість результатів моделювання до зміни вхідних параметрів моделі _____	199
<b>4.4. Вплив чутливості моделі до неточності параметрів на криві граничних витрат на зменшення емісій вуглекислого газу _____</b>	<b>210</b>
4.4.1. Вплив різних даних калібрування моделі _____	211
4.4.2. Вплив чутливості моделі до невизначеності параметрів на криві граничних витрат _____	226
<b>4.5. Порівняння результатів моделювання лісозаготівлі з статистичними даними та емісій CO<sub>2</sub> від лісозаготівлі зі звітами країн _____</b>	<b>229</b>
<b>4.6. Порівняння результатів моделювання з результатами інших моделей _____</b>	<b>234</b>
4.6.1. Порівняння прогнозування емісій CO <sub>2</sub> від землекористування моделями G4M та EFISCEN для ЄС _____	235
4.6.2. Порівняння прогнозування швидкості знеліснення моделями G4M та спеціальної версії GLOBIOM для Бразилії _____	237
4.6.3. Порівняння прогнозування глобальної зміни площі лісу та емісій від зміни землекористування моделями інтегральної оцінки для різних соціально-економічних умов та зміни клімату _____	238
4.6.4. Порівняння прогнозування витрат на зменшення емісій від знеліснення _____	241
4.6.5. Верифікація моделювання процесу знеліснення боліт у Індонезії _____	244
4.6.6. Порівняння геопросторової структури знеліснення у Бразилії _____	246
<b>4.7. Обговорення результатів моделювання з національними експертами та іншими зацікавленими особами _____</b>	<b>247</b>

<b>4.8. Висновки до розділу 4</b>	<b>249</b>
<b><i>Розділ 5. Аналіз лісокористування та зміни землекористування, емісій вуглекислого газу та потенціалу зменшення емісій з використанням моделі G4M</i></b>	<b>255</b>
<b>5.1. Типові приклади застосування моделі G4M</b>	<b>255</b>
<b>5.2. Варіанти зменшення емісій вуглекислого газу у моделі G4M та створення кривої граничних витрат на зменшення емісій</b>	<b>256</b>
<b>5.3. Схеми зв'язку моделі G4M з іншими моделями для аналізу емісій вуглекислого газу</b>	<b>260</b>
<b>5.3.1. Взаємодія моделей G4M та GLOBIOM</b>	<b>260</b>
<b>5.3.2. Комплекс моделей інтегральної оцінки IIASA</b>	<b>262</b>
<b>5.3.3. Комплекс моделей для аналізу референтних сценаріїв для країн Європейського Союзу</b>	<b>265</b>
<b>5.3.4. Комплекс моделей для аналізу потенціалу зменшення емісій CO<sub>2</sub>, коштів на зменшення емісій та визначення референтних рівнів емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування для країн ЄС</b>	<b>267</b>
<b>5.4. Прогноз базових емісій та потенціалу зменшення емісій на глобальному рівні</b>	<b>269</b>
5.4.1. Опис чисельного експерименту	269
5.4.2. Сценарії соціально-економічного розвитку для проведення експериментів	271
5.4.3. Результати дослідження	273
<b>5.5. Дослідження сценаріїв спільних соціально-економічних шляхів та репрезентативних шляхів зміни концентрації парникових газів в атмосфері (SSP/RCP)</b>	<b>279</b>
5.5.1. Опис чисельного експерименту	279
5.5.2. Сценарії SSP/RCP	282
5.5.3. Результати дослідження	289
<b>5.6. Дослідження синергії зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення та ризику зникнення видів тварин</b>	<b>294</b>
5.6.1. Опис чисельного експерименту	294
5.6.2. Результати дослідження	298
<b>5.7. Аналіз емісій вуглекислого газу від лісокористування та зміни землекористування для референтних сценаріїв для ЄС та визначення референтних рівнів емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування</b>	<b>302</b>
5.7.1. Опис чисельного експерименту	303
5.7.2. Результати дослідження	306

5.7.3. Визначення референтних рівнів емісій CO <sub>2</sub> від лісокористування	307
<b>5.8. Висновки до розділу 5</b>	<b>311</b>
<b><i>Розділ 6. Прикладні методи оцінки невизначеності емісії парникових газів</i></b>	<b>317</b>
<b>6.1. Методи визначення зміни емісій парникових газів та досяжності визначених цілей зменшення емісій</b>	<b>317</b>
<b>6.2. Дослідження невизначеностей в оцінці повного вуглецевого балансу наземних екосистем та впливу цих невизначеностей на інверсне моделювання потоків CO<sub>2</sub></b>	<b>320</b>
6.2.1. Загальна інформація про дослідження	320
6.2.2. Чиста первинна продукція наземних екосистем, визначена за результатами глобальних біогеохімічних моделей, та оцінка похибок ЧПП	322
6.2.3. Оцінка похибок визначення чистої первинної продукції лісу	324
6.2.4. Оцінка невизначеності обчислень чистої первинної продукції інших екосистем	329
6.2.5. Невизначеності у обчисленнях гетеротрофного дихання ґрунту	331
6.2.6. Невизначеності інших потоків вуглецю	340
6.2.7. Аналіз результатів обчислень	343
<b>6.3. Моделювання процесу прийняття рішень в умовах невизначеності</b>	<b>348</b>
<b>6.4. Оцінка переваг вдосконалення системи моніторингу запасів та потоків вуглецю</b>	<b>352</b>
<b>6.5. Висновки до розділу 6</b>	<b>360</b>
<b><i>Висновки</i></b>	<b>363</b>
<b><i>Список використаних джерел</i></b>	<b>367</b>
<b><i>Додаток А. Технічна інформація до розділів</i></b>	<b>408</b>
<b><i>Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи</i></b>	<b>413</b>
<b><i>Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів</i></b>	<b>423</b>

### Перелік умовних скорочень

BAU	“Business as usual” - "бізнес як завжди" (сценарій, у якому ситуація розвивається без спланованих впливів)
CCS	Carbon capture and sequestration - поглинання та зберігання вуглецю
CDIAC	Carbon Dioxide Information Analysis Center - Центр аналізу інформації про вуглекислий газ
CRF	Common Reporting Format - формат загального звітування до РКЗК ООН (у таблицях MS Excel)
DFCE	Direct fire carbon emissions - прямі емісії вуглецю від пожеж
FAO FRA	The Global Forest Resources Assessments – глобальна оцінка лісових ресурсів ФАО
FL	Forest land - лісові землі
FMRL	Forest management reference level – референтний рівень лісокористування
HR	Heterotrophic respiration – гетеротрофне дихання ґрунтів
IA	Integrated assessment – інтегральна оцінка
IAM	Integrated assessment model – модель для інтегральної оцінки
IAM IIASA	Integrated assessment modelling framework of the International Institute for Applied Systems Analysis - комплекс інтегральної оцінки Інституту прикладного системного аналізу
IPCC МГЕЗК	Intergovernmental Panel on Climate Change - Міжурядова група експертів зі зміни клімату
IPCC SRES	Special Report on Emissions Scenarios – спеціальний звіт IPCC про сценарії емісій парникових газів
JRC	Joint Research Centre - Об'єднаний дослідницький центр Європейської Комісії
MACC	Marginal abatement cost curve – крива граничних витрат на зменшення емісій парникових газів
MAI	Mean annual increment – середній приріст стовбурної деревини
MCPFE	Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe – Forest Europe - Міністерська конференція по захисту лісів у Європі
NIR	National Inventory Report - Національний звіт про інвентаризацію парникових газів
NPP	Net primary production - чиста первинна продукція
NPV	Net present value - чиста приведена вартість
PFCE	Post-fire carbon emissions - емісії вуглецю після пожеж

ppmv	parts per million by volume – часток на мільйон за об'ємом
R_U90	Відносна похибка для 90% інтервалу довіри
RC	Root contribution – вклад коренів у ґрунтове дихання
RCP	Representative Concentration Pathways – репрезентативні траєкторії концентрації парникових газів
REDD	Reduced emissions from deforestation and forest degradation - зменшення емісій парникових газів від знеліснення та деградації лісів
RL	Rotation length - Оборот рубки
RL <sub>Bm</sub>	Оборот рубки, при якому зберігається поточна біомаса деревостану
RL <sub>MAI</sub>	Оборот рубки, при якому середній приріст деревостану є максимальним
RL <sub>maxBm</sub>	Оборот рубки, при якому біомаса деревостану є максимальною
SD	Stocking degree - Повнота деревостану
SR	Soil respiration – ґрунтове дихання
SSP	Shared Socioeconomic Pathways - сценарії спільних соціально-економічних шляхів
U90	Абсолютна похибка для 90% інтервалу довіри
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change - Рамкова конвенція зі зміни клімату ООН
VVA	Verification-validation-accreditation - верифікація-валідація та акредитація
ВВП	Валовий внутрішній продукт
ЗЗЗЛГ	землекористування, зміна землекористування та лісове господарство
КП	Киотський протокол до Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату
МКЗЛЄ	Міністерська конференція по захисту лісів у Європі
ПГ	Парникові гази
РКЗК ООН	Рамкова конвенція зі зміни клімату ООН
ФАО	Продовольча та сільськогосподарська організація ООН
ФАОСТАТ	База статистичних даних ФАО
ЧПП	Чиста первинна продукція

## Вступ

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

Для підтримки прийняття рішень на міжнародних переговорах, а також на національному та локальному рівнях використовують математичне моделювання. Під час моделювання необхідно враховувати взаємодію

економічної, кліматичної та біофізичної підсистем. Використовують, так звану, інтегральну оцінку та інтегральне моделювання. Оскільки об'єктом моделювання є складна (відкрита) система, вхідні дані характеризуються значною невизначеністю і йдеться про моделювання майбутнього, тому неможливо оцінити, в класичному значенні, точність моделювання і вибрати одну найкращу модель. Існує велика кількість математичних моделей, які описують кліматичну, економічну та біофізичну підсистеми з різною деталізацією, а також моделі, які з меншою деталізацією включають всі три підсистеми. Значною невизначеністю характеризується сфера лісокористування та зміни землекористування, що спонукає розроблювати нові математичні моделі процесів емісії вуглекислого газу в цій сфері, методи обчислення емісій для великих територій, методи аналізу невизначеностей та впливу невизначеностей на прийняття рішень. Зокрема, такі вчені отримали вагомні результати в галузі розроблення моделей для інтегральної оцінки з врахуванням процесів лісокористування та зміни землекористування: M.Obersteiner, P.Navlik, A.Popp, S.Fujimori, K.Riahi, D. van Vuuren, E.Stehfest, B.Bodirsky та ін.; в галузі розроблення математичних моделей процесів, пов'язаних із вуглецевим балансом лісових екосистем: A.Shvidenko, D.Schepaschenko, P.Verkerk, S.Pitch, G.Kindermann, П.Лакида, О.Турковська та ін.; галузі розроблення методів обчислення емісій для великих територій: Р.Бунь, М.Лесів, G.Marland, Т.Oda, R.Houghton, A.Baccini, E.Mitchard, S.Saatchi., N.Harris, A.Shvidenko, I.Kurganova, V.Stolbovoi, О.Токар, О.Данило, М.Галушак, Н.Чарковська, О.Срямець та ін.; галузі розроблення методів аналізу невизначеностей та їх впливу на прийняття рішень щодо навколишнього середовища: M.Jonas, Z.Nahorski, S.Fuss, Z.Chladna, H.Laurikka, T.Koljonen E.Kiriyama, A.Suzuki, L.Reedman, P.Graham та ін.

Важливо знайти компроміс між наявними даними, відображенням важливих процесів, важливих взаємодій між процесами різних підсистем для задач, які потрібно вирішувати, а також обчислювальною потужністю. Існуючі моделі не враховують у повній мірі взаємодії процесів заліснення, знеліснення та лісозаготівлі, торгівлі між країнами, а також залежності інтенсивності процесів кругообігу вуглецю та віку деревостану. В багатьох випадках кількість наземних

вимірювань потоків вуглецю є недостатньою, тому важливо розробити методи обчислення середніх потоків вуглецю з великих територій та оцінювання невизначеності цих потоків. Значна невизначеність є характерною ознакою проблем навколишнього середовища, тому необхідно розробити методи аналізу невизначеностей та впливу невизначеностей на прийняття природоохоронних рішень.

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

### **Зв'язок роботи з науковими роботами, програмами, темами**

Основу дисертаційної роботи складають результати теоретичних та практичних досліджень, виконаних автором у рамках планових науково-дослідних робіт та міжнародних проектів Національного університету «Львівська політехніка», зокрема:

- гранту 7РП ЄС “Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів” (2011-2014 рр.; грант 7РП ЄС – Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES);
- держбюджетної НДР “Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень” (2013-2014 рр.; номер державної реєстрації 0113U003181).
- держбюджетної НДР “Геоінформаційні технології побудови регіональних кадастрів емісії парникових газів для підтримки прийняття ефективних



економіко-адміністративних рішень” (2011-2012 рр.; номер державної реєстрації 0111U001210);

- українсько-австрійського проекту „Просторово-часове оцінювання невизначеності кадастрів емісії парникових газів: ретроспективний аналіз для Австрії та України та ефективне прогнозування” (2015-2016 рр.; номери державної реєстрації 0115U006500 та 0116U005309);
- українсько-китайського проекту "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень" (2013-2014 рр.; номери державної реєстрації 0113U001997 та 0114U003703);
- українсько-австрійського проекту "Регіональний просторовий кадастр емісій парникових газів з врахуванням невизначеностей вхідних даних" (2011-2012 рр.; номери державної реєстрації 0111U008510 та 0112U003944);
- українсько-австрійського проекту "Методи просторової інвентаризації емісій парникових газів Кіотського протоколу з врахуванням їх невизначеностей" (2009-2010 рр.; номер державної реєстрації 0109U003461);

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

- Оцінка фактору невизначеності у повному обліку вуглецю методом “знизу-вгору” для Росії (Австрійський науковий фонд - FWF; Проект № P17569-N04, 2005-2007 рр.);
- Застосування моделей для глобальних політик та дій ЄС-27 в умовах режиму після 2012р. (Post 2012 Project) (Європейська комісія, 2008-2009 рр.);
- ату - Адаптація суходолу та пом'якшення наслідків в Європі (CC TAME) (ЄС FP7, Грантова угода № 212535, 2008-2011 рр.);
- Загальна вартість зміни клімату: Зміна Клімату (ЄС FP7, Грантова угода № 212774, 2008-2011 рр.);

- Спостереження за Землею з метою моніторингу та оцінювання впливу на навколишнє середовище внаслідок використання енергії: EnergGEO (ЄС FP7, Грантова угода № 226364, 2009-2013 рр.);
  - Управління парниковими газами в європейських системах землекористування - ПГ-Європа (ЄС FP7, Грантова угода № 244122, 2010-2014 рр.);
  - Аналіз потенціалу та витрат у землекористуванні, змінах в землекористуванні та лісовому господарстві в країнах-членах ЄС (ЄС, Генеральна дирекція з питань екології та Генеральна дирекція з питань зміни клімату, Угода № 07.0307/2009/541003/SER/C5, 2011 р.);
  - EUCLIMIT - Розробка та застосування можливостей моделювання пом'якшення зміни клімату економічними засобами у ЄС (Всі емісії та поглинання парникових газів) (Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013 рр.);
  - Пом'якшення наслідків зміни клімату: Постійні можливості моделей підтримувати цілі міжнародної політики (Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013 рр.);
  - Скорочення емісій внаслідок знеліснення та деградації лісу: Постійні можливості моделей підтримувати підготовку міжнародної політики ЄС (Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013 рр.);
  - Розробка та застосування можливостей моделювання пом'якшення зміни клімату економічними засобами у глобальному масштабі для підготовки міжнародної політики ЄС (Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2012-2014 рр.);
  - Діюча глобальна система спостереження за вуглецем (GEOGarbon) (ЄС FP7, Грантова угода № 283080, 2011-2014 рр.);
- міжнародного проекту Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури НАН України (проект НТЦУ № 1700 „Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України”; 2002-2004 рр.).

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

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

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

1. Аналіз відомих підходів до моделювання та математичних моделей вуглецевого балансу лісових екосистем, процесів лісокористування та змін землекористування, а також визначення похибок.
2. Розроблення математичної моделі вуглецевого балансу лісової екосистеми з врахуванням наявних даних про лісові екосистеми та кліматичних умов в Україні.
3. Розроблення методів геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні із врахуванням взаємного впливу процесів лісокористування та зміни типів землекористування, а також процесів торгівлі та переміщення заготовленої деревини та відповідних емісій вуглекислого газу, впливу заходів щодо зменшення емісій парникових газів на ці процеси.
4. Удосконалення методу ідентифікації параметрів геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування з врахуванням

існуючих даних про заліснення, знеліснення та тренд зміни площі лісу на національному рівні.

5. Створення схем обміну даними між геопросторовою моделлю процесів лісокористування та зміни землекористування та іншими моделями для комплексного оцінювання емісій вуглекислого газу та потенціалу зменшення емісій для сценаріїв соціально-економічного розвитку та зміни концентрацій парникових газів в атмосфері.
6. Розроблення методів обчислення емісій вуглекислого газу екосистем суходолу та невизначеності результатів обчислень у випадку недостатньої кількості вимірювань.
7. Аналіз невизначеностей вхідних даних та результатів моделювання, а також оцінювання впливу невизначеностей на прийняття природоохоронних рішень.
8. Аналіз лісокористування та зміни землекористування, емісій вуглекислого газу та потенціалу зменшення емісій з використанням розробленої геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування.

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

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

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

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

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

Новими є такі наукові результати:

1. Вперше розроблено метод моделювання вуглецевого балансу лісової екосистеми, який поєднує процеси кругообігу вуглецю та таксаційні параметри деревостану, що дає можливість відобразити вікову динаміку деревостану при моделюванні процесів кругообігу вуглецю.

2. Вперше розроблено математичну модель фенологічних процесів у букових та дубових лісах Карпатського регіону України, яка базується на даних спостережень, враховує часовий зсув цих процесів при зміні клімату та дає можливість точніше відтворити сезонну динаміку процесів кругообігу вуглецю.

3. Вперше розроблено метод геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні, який, на відміну від відомих, враховує взаємний вплив цих процесів, а також процесів торгівлі та переміщення заготовленої деревини, процесів заліснення та знеліснення, що дає можливість сумісно аналізувати і прогнозувати ці процеси у залежності від економічної ситуації та встановлених обмежень на емісію парникових газів.

4. Вперше розроблено метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини та зменшення емісій CO<sub>2</sub> від

лісокористування при збереженні заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни чи регіону, для геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування (моделі G4M), який ґрунтується на принципі максимізації чистої приведеної вартості, поєднанні інформації про заготівлю деревини на різних геопросторових рівнях (регіони, країни та окремі клітинки растру) та дає можливість проводити імітаційне моделювання процесів лісозаготівлі та впровадження природоохоронних стратегій.

5. Удосконалено метод геопросторового математичного моделювання процесів знеліснення у моделі G4M, зокрема, просторового поширення знеліснення для глобальної геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування, шляхом врахування інтенсивності знеліснення на локальному рівні, а також транспортної мережі, що дає можливість точніше відтворити просторову структуру знеліснення.

6. Удосконалено структуру математичної моделі вуглецевого балансу лісової екосистеми з врахуванням наявних даних про лісові екосистеми та кліматичні умови в Україні шляхом введення додаткових резервуарів та потоків вуглецю, а також процесів накопичення та танення снігу, що дало можливість враховувати таксаційні параметри деревостанів і залежності інтенсивності процесів кругообігу вуглецю від віку деревостану, а також точніше відтворити вікову та сезонну динаміку процесів кругообігу вуглецю.

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

## **Практичне значення отриманих результатів**

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

Розроблений метод геопросторового моделювання взаємопов'язаних процесів лісокористування та зміни типів землекористування з врахуванням торгівлі між країнами на глобальному рівні, метод моделювання просторового поширення знеліснення, метод ідентифікації параметрів моделі, метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини та скорочення емісій вуглекислого газу, та алгоритм моделювання процесу емісії CO<sub>2</sub> з біомаси, підстилки, ґрунту та боліт при зміні землекористування використано для вдосконалення глобальної геопросторової математичної моделі процесів лісокористування та зміни землекористування G4M. Модель G4M застосовується для аналізу стратегій зменшення емісій вуглекислого газу як на глобальному, так і на регіональному і національному рівнях. Зокрема, модель G4M використано для оцінювання ефективності політики зменшення емісій CO<sub>2</sub> лісами України при різних соціально-економічних сценаріях; при чисельному оцінюванні сценаріїв спільних соціально-економічних шляхів (SSP) разом із сценаріями репрезентативних концентрацій парникових газів (RCP); для аналізу потенціалу та коштів використання земельних та лісових ресурсів країнами Європейського Союзу; створення референтного сценарію емісій парникових газів у секторі землекористування, змін землекористування та лісового господарства до 2050 р. для країн Європейського Союзу; при підготовці Європейською Комісією оцінки впливу сталого використання біоенергії у країнах ЄС; для підтримки прийняття рішень Європейської Комісії щодо зменшення емісій парникових газів у секторі землекористування, зміни землекористування та лісового господарства; підготовлення референтних рівнів емісії вуглекислого газу від лісокористування для країн ЄС; підготовлення сценаріїв посиленних заходів зменшення емісій для

країн, які емітують більшу частину парникових газів; при підготовленні інтегральної оцінки послаблення та адаптації до зміни клімату у країнах, що розвиваються, для секторів сільського та лісового господарства для Світового банку; підготовленні Огляду Еліаша (Eliasch Review), який був науковою основою для прийняття рішення у межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату про заходи для зменшення емісій парникових газів від знеліснення та деградації лісів (REDD); для аналізу синергії заходів щодо зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення та зменшення ризику зникнення видів тварин у країнах, що розвиваються; аналізу переваг вдосконалення системи моніторингу емісій вуглекислого газу від знеліснення; аналізу впливу невизначеностей на прийняття рішень щодо зменшення емісій вуглекислого газу від лісокористування.

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

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

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

Результати дисертаційних досліджень використано:

в Міжнародному інституті прикладного системного аналізу, м.Лаксенбург, Австрія: метод обчислення потоків CO<sub>2</sub> екосистем суходолів та оцінки похибок при неповних даних (при виконанні проекту «Оцінка фактору невизначеності у



повному обліку вуглецю методом “знизу-вгору” для Росії», Австрійський науковий фонд – FWF, Проект № P17569-N04, 2005-2007 pp.); розроблену геопросторову математичну модель процесів лісокористування та зміни землекористування G4M, розроблені методи зв'язку моделі G4M з іншими моделями, розроблені криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub>, аналіз невизначеності вхідних даних та результатів моделювання, а також метод аналізу переваг вдосконалення системи моніторингу емісій CO<sub>2</sub> (при виконанні проектів «Застосування моделей для глобальних політик та дій ЄС-27 в умовах режиму після 2012р.», Post 2012 Project, Європейська комісія, 2008-2009 pp.; «Зміна клімату - Адаптація суходолу та пом'якшення наслідків в Європі», СС ТAME, ЄС FP7, Грантова угода № 212535, 2008-2011 pp.; «Загальна вартість зміни клімату: Зміна Клімату», ЄС FP7, Грантова угода № 212774, 2008-2011 pp.; «Спостереження за Землею з метою моніторингу та оцінки впливу на навколишнє середовище внаслідок використання енергії: EnergGEO», ЄС FP7, Грантова угода № 226364, 2009-2013 pp.; «Управління парниковими газами в європейських системах землекористування - ПГ-Європа», ЄС FP7, Грантова угода № 244122, 2010-2014 pp.; «Аналіз потенціалу та витрат у землекористуванні, змінах в землекористуванні та лісовому господарстві в країнах-членах ЄС», ЄК, Генеральна дирекція з питань екології та Генеральна дирекція з питань зміни клімату, Угода № 07.0307/2009/541003/SER/C5, 2011 р.; «EUCLIMIT - Розробка та застосування можливостей моделювання пом'якшення зміни клімату економічними засобами у ЄС (Всі емісії та поглинання парникових газів», Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013 pp.; «Пом'якшення наслідків зміни клімату: Постійні можливості моделей підтримувати цілі міжнародної політики», Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013 pp.; «Скорочення емісій внаслідок знеліснення та деградації лісу: Постійні можливості моделей підтримувати підготовку міжнародної політики ЄС», Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань зміни клімату, 2011-2013 pp.; «Розробка та застосування можливостей моделювання пом'якшення зміни клімату економічними засобами у глобальному масштабі для підготовки міжнародної політики ЄС», Тендер ЄС, Генеральна дирекція з питань

зміни клімату, 2012-2014 рр.; «Діюча глобальна система спостереження за вуглецем», GEOCarbon, ЄС FP7, Грантова угода № 283080, 2011-2014 рр.)

в Національному університеті „Львівська політехніка”: геопросторова математична модель процесів лісокористування та зміни землекористування G4M (при виконанні держбюджетної теми “Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень”, 2013-2014 рр.); методи обчислення емісій парникових газів у лісовому господарстві та їх невизначеностей, методи просторової інвентаризації парникових газів, методи детектування зміни емісій парникових газів на рівні країни з врахуванням невизначеності (при виконанні проекту “Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів”, 2011-2014 рр., грант 7РП ЄС – Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES; держбюджетної НДР “Геоінформаційні технології побудови регіональних кадастрів емісії парникових газів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень”, 2011-2012 рр.; українсько-австрійського проекту „Просторово-часове оцінювання невизначеності кадастрів емісії парникових газів: ретроспективний аналіз для Австрії та України та ефективне прогнозування”, 2015-2016 рр.; українсько-китайського проекту "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень", 2013-2014 рр.; українсько-австрійського проекту "Регіональний просторовий кадастр емісій парникових газів з врахуванням невизначеностей вхідних даних", 2011-2012 рр.; українсько-австрійського проекту "Методи просторової інвентаризації емісій парникових газів Кіотського протоколу з врахуванням їх невизначеностей", 2009-2010 рр.);

в Державному науково-дослідному інституті інформаційної інфраструктури НАН України: програмні засоби моделювання процесів стоку вуглецю в лісах України та математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем (при виконанні проекту Науково-технологічного центру України № 1700

“Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України”, 2002-2004 рр.);

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

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

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: у роботах [50, 51, 69, 88, 89, 266] – розроблення геопросторової математичної моделі лісокористування та зміни землекористування G4M (версія для ЄС); [22, 118, 123] - метод геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні; [140, 184] – розроблення схем обміну даними між моделями; [23, 24, 50, 51, 93, 69, 89, 96, 116, 131, 139, 236, 294, 310, 362, 391] – розроблення схем обміну даними між моделями, розроблення та проведення обчислювальних експериментів із геопросторовою математичною моделлю лісокористування та зміни землекористування G4M, аналіз та інтерпретація результатів моделювання; [65, 68, 83-86, 88, 90, 140, 182, 183, 228, 278] – проведення обчислювальних експериментів та аналіз результатів моделювання; [65, 90, 116, 131, 139, 278] –

створення та аналіз кривих граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування та змін землекористування; [95] – метод аналізу переваг вдосконалення системи моніторингу емісій CO<sub>2</sub> шляхом зменшення невизначеності, аналіз вхідних даних; [122, 358] – аналіз похибок геопросторової математичної моделі лісокористування та зміни землекористування G4M; [97, 227] – проведення обчислювального експерименту, аналіз та інтерпретація результатів; [301] – аналіз результатів моделювання; [128, 330] – аналіз та інтерпретація параметрів геопросторової математичної моделі лісокористування та зміни землекористування G4M; [87] – аналіз зобов'язань країн щодо зменшення емісій вуглекислого газу від лісокористування та зміни землекористування; [311] – загальна ідея методу моделювання лісокористування з врахуванням вікової структури деревостану за допомогою рекурсивної математичної моделі з оптимізацією методом лінійного програмування; [359, 393] – загальний метод моделювання прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини (без врахування сортиментної структури); [312, 359, 360, 389, 392] – аналіз вхідних даних та параметрів геопросторової математичної моделі лісокористування та зміни землекористування G4M щодо адаптації моделі для України; [120, 121, 132, 185, 274] – аналіз потоків вуглекислого газу екосистем суходолу та їх невизначеностей; [120, 121, 132] – метод обчислення потоків вуглецю екосистем суходолу та їх невизначеностей (для великих територій з недостатньою кількістю вимірювань); [159-162, 166] – методи детектування зміни емісій парникових газів на рівні країн; [346, 357, 365, 366] – математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем, обчислювальні експерименти та аналіз результатів; [29-40, 343- 345, 347, 375] – загальний підхід до просторової інвентаризації парникових газів, методи обчислення емісій вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін землекористування; [29, 34, 229, 343, 366] – аналіз невизначеностей інвентаризацій парникових газів; [306, 365, 366, 386, 387] – методи моделювання потоків вуглецю у лісових екосистемах; [246] – аналіз вертикального розподілу концентрації вуглекислого газу в атмосфері; [354] – аналіз лісових екосистем України та визначення параметрів для

моделювання вуглецевого балансу; [361, 390] – огляд математичних моделей, які використовують для підтримки прийняття рішень щодо зменшення емісій CO<sub>2</sub> в секторі землекористування та зміни землекористування.

Результати спільних наукових праць було використано у дисертаційних роботах таких співавторів, як Токар О.Є. [385] (при розробленні інформаційних технологій дослідження стоку вуглецю в лісових екосистемах) та Турковської О.В. [388] (при розробці методів та засобів аналізу процесів землекористування для дослідження емісій CO<sub>2</sub>).

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати та положення дисертації представлені та обговорені на 43 міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах, зокрема: European Geosciences Union General Assembly Conference (Vienna, Austria, 2008, 2012, 2017); Дванадцятій міжнародній науково-практичній конференції „Математичне та імітаційне моделювання систем - МОДС 2017” (Чернігів, 2017); IV науково-технічній конференції „Обчислювальні методи і системи перетворення інформації“ (Львів, 2016); IV та V Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми інформатики та комп’ютерної техніки» (Чернівці, 2015, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції “Україна в процесах глобального інформаційного обміну” (Львів, 2016); 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions (Cracow, Poland, 2015); XIV World Forestry Congress (Durban, South Africa, 2015); П’ятій міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія" (Івано-Франківськ, 2015); 17th International Conference of the International Boreal Forest Research Association (IBFRA) “Our Boreal Our Future” (Rovaniemi, Finland, 2015); A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015” (Laxenburg, Austria, 2015); IIASA 40th Anniversary Conference “Worlds Within Reach: From Science To Policy” (Vienna and Laxenburg, Austria, 2012); IV міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія” (Вінниця, 2014); 6th International Academic Conference of Young Scientists “Computer Science and Engineering 2013” (Lviv, 2013); 9th International Carbon

Dioxide Conference (ICDC-2013) (Beijing, China, 2013); International Congress on Environmental Modelling and Software “Managing Resources of a Limited Planet”, Sixth Biennial Meeting (Leipzig, Germany, 2012); International Energy Workshop - IEW 2012 (Cape Town, South Africa, 2012); 2-му міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2012); 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011) (Noordwijkerhout, Netherlands, 2011); International Conference of the International Boreal Forest Research Association (IBFRA) “Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action” (Krasnoyarsk, Russia, 2011); 3rd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories (Lviv, 2010); 8th International Carbon Dioxide Conference (ICDC-2009) (Jena, Germany, 2009); Міжнародній науково-практичній конференції “Сталий розвиток лісового господарства в контексті реалізації Кіотського протоколу в країнах Центральної та Східної Європи” (Київ, 2008); Міжнародній конференції „Комп’ютерні науки та інформаційні технології” CSIT'2007 (Львів, 2007); ITEE 2007 - Third International ICSC Symposium (Oldenburg, Germany, 2007); 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories (Laxenburg, Austria, 2007); International Conference on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006) (Yamaguchi, Japan, 2006); International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems “ENVIROMIS’2006” (Tomsk, Russia, 2006); International Conference “Climate Changes and their Impact on Boreal and Temperate Forests” (Ekaterinburg, Russia, 2006); Second International ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering (Magdeburg, Germany, 2005); 12 міжнародній конференції з автоматичного управління (Харків, 2005); International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories: Verification, Compliance and Trading (Warsaw, Poland, 2004); The Information Society and Enlargement of the European Union: 17th International Conference “Informatics for Environmental Protection” (Cottbus, Germany, 2003); Second International Congress “Informatization of Recreation and Tourist Activity: Perspectives of Cultural and Economic Development” (Truskavets, 2003); Всеукраїнській науково-практичній

конференції “Україна в процесах глобального інформаційного обміну” (Львів, 2013); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (Львів, 2010, 2011, 2012); Наукових конференціях ІМФН НУ «Львівська політехніка» (Львів, 2012, 2017); Міжвузівській науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (Львів, 2008).

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

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

## **Розділ 1. Сучасний стан моделювання процесів емісії та стоку вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін землекористування**

### **1.1. Процеси емісій та стоку CO<sub>2</sub> в секторі лісового господарства та зміни землекористування**

#### **1.1.1. Роль емісії та поглинання CO<sub>2</sub> в секторі лісового господарства та зміни землекористування у глобальному циклі вуглецю**

Концентрацію вуглекислого газу в атмосфері вимірюють прямими методами починаючи з 1958р., а для попередніх років значення отримують на основі аналізу повітря, яке знаходиться у давніх пластах криги [71]. У результатах прямих вимірів на фоні стрімкого зростання концентрації CO<sub>2</sub> чітко видно сезонні коливання концентрації, зумовлені кругообігом вуглецю у екосистемах (рис. 5.1). Екосистеми поглинають вуглекислий газ, коли процеси росту біомаси переважають над процесами гетеротрофного дихання. Лісові екосистеми відіграють важливе значення у кругообігу вуглецю і регулюванні кількості CO<sub>2</sub> в атмосфері, оскільки вони акумулюють значну кількість вуглецю у стовбурній біомасі на десятки років.

У 2006-2015рр. Зміни в землекористуванні, в основному знеліснення, спричиняли приблизно 10% антропогенних емісій CO<sub>2</sub> в атмосферу, а наземні екосистеми поглинали в середньому 30% емісій (таблиця 1.1 [193]). За даними ФАО [106] площа лісів скорочувалась на 16 млн га щороку у 1991-2000рр., 10.7 млн га щороку – у 2001-2005, 8.5 – млн га щороку у 2006-2010рр. і 6.6 млн га щороку у 2011-2015рр. Емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення (враховано лише втрати біомаси) склали 4.68 ГтCO<sub>2</sub>/рік у 1991-2000рр., 3.95 ГтCO<sub>2</sub>/рік у 2001-2010рр. та 2.94 ГтCO<sub>2</sub>/рік у 2011-2015рр. [77].



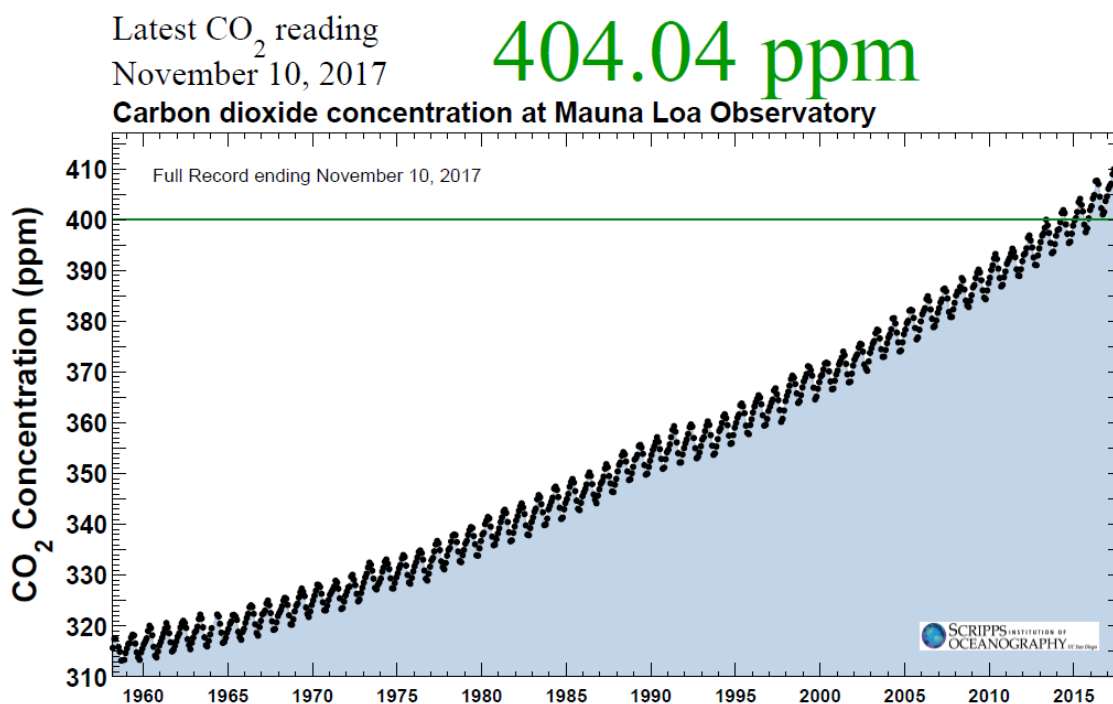


Рис. 1.1. Концентрація вуглекислого газу в атмосфері у 1958-2017рр за даними прямих вимірів на станції Мауна Лоа, %о [304]

Поглинання вуглецю наземними екосистемами складає приблизно 9-11 ГтСО<sub>2</sub>/рік [193, 56]. Щодо зменшення емісій вуглекислого газу для запобігання зміни клімату, то за оцінками ІРСС [285] сектор зміни землекористування та лісокористування може забезпечити скорочення емісій на 0.2-13.8 ГтСО<sub>2</sub>/рік у 2050р., і що важливо – технології скорочення емісій вже існують і таке скорочення емісій є відносно дешевим. Слід зазначити, що зміна клімату, ймовірно, буде мати суттєвий вплив на лісові екосистеми [252].

Таблиця 1.1. Основні глобальні потоки вуглекислого газу, усереднені за 2006-2015рр., ГтСО<sub>2</sub>/рік, за даними [193]

Викопне паливо та промисловість	Зміни в землекористуванні	Поглинання наземними екосистемами	Поглинання океаном	Зміна кількості СО <sub>2</sub> в атмосфері
34.1 ± 1.8	3.7 ± 1.8	11.4 ± 3.3	9.5 ± 1.8	16.5 ± 0.4

### 1.1.2. Процеси кругообігу вуглецю в лісовій екосистемі

Основні потоки вуглецю у лісовій екосистемі: поглинання вуглекислого газу в результаті фотосинтезу (валова первинна продукція, або валовий фотосинтез), автотрофне дихання та створення біомаси (чиста первинна продукція); відмирання біомаси та створення підстилки; розкладання підстилки (повернення вуглекислого газу в атмосферу), гуміфікація підстилки та створення органічної речовини ґрунту; мінералізація органічної речовини ґрунту (повернення вуглекислого газу в атмосферу) [70]; а також змивання і вимивання органічної речовини ґрунту водою; заготівля деревини і вивезення частини біомаси за межі екосистеми.

Потоки вуглецю, пов'язані із фотосинтезом, ростом, відмиранням та розкладанням мертвої органічної речовини залежать, в тому числі, від інтенсивності освітлення (лише фотосинтез), температури повітря та доступності води [371, 376, 380]. Частина потоків суттєво залежать від віку деревостану [99, 226, 232, 338], зокрема, загальна продукція (кількість створеної біомаси), відмирання та розподіл біомаси у різних частинах деревостану (зелені органи, гілля, коріння та стовбури, що впливає на інтенсивність фотосинтезу та розкладу) (рис. 1.2, рис. 1.3 [168]). Чиста первинна продукція, яка визначає кількість органічної речовини, створеної в процесі фотосинтезу, швидко зростає у віці 10-40 років, а пізніше зменшується і стабілізується у старшому віці [338]. Опад залежить від інтенсивності відмирання частин дерев, що також є функцією віку деревостану (рис. 5.3). Інтенсивність розкладання підстилки залежить, в тому числі, від хімічного складу та фізичних властивостей складових частин підстилки (листя/хвоя, кора, деревина, коріння) [141], кількість яких залежить від віку деревостану.

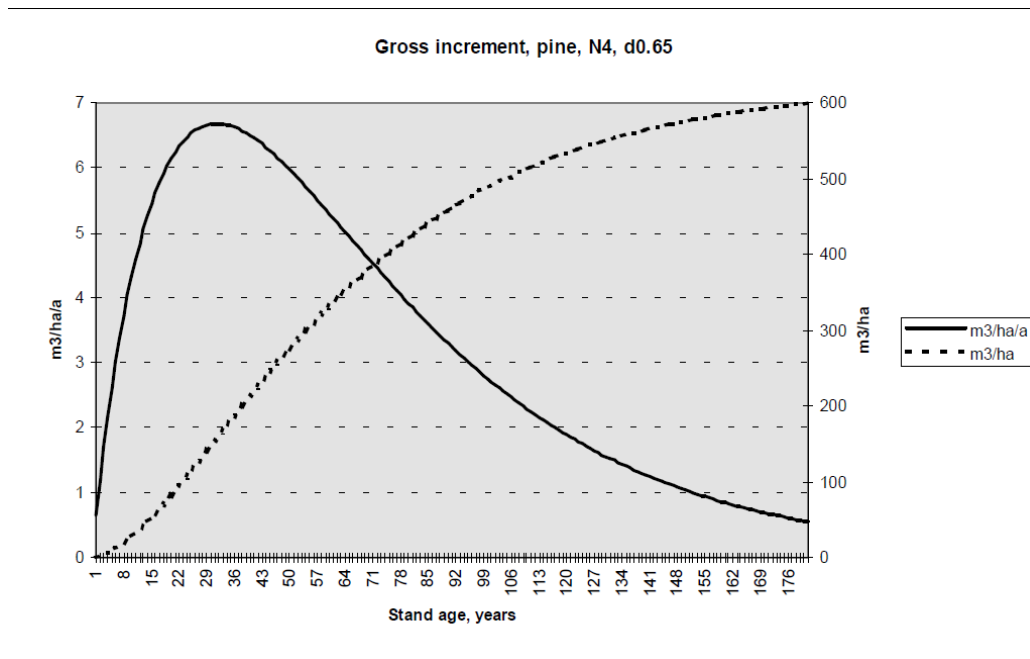


Рис.1.2. Динаміка загального та поточного приросту у сосновому деревостані [168]

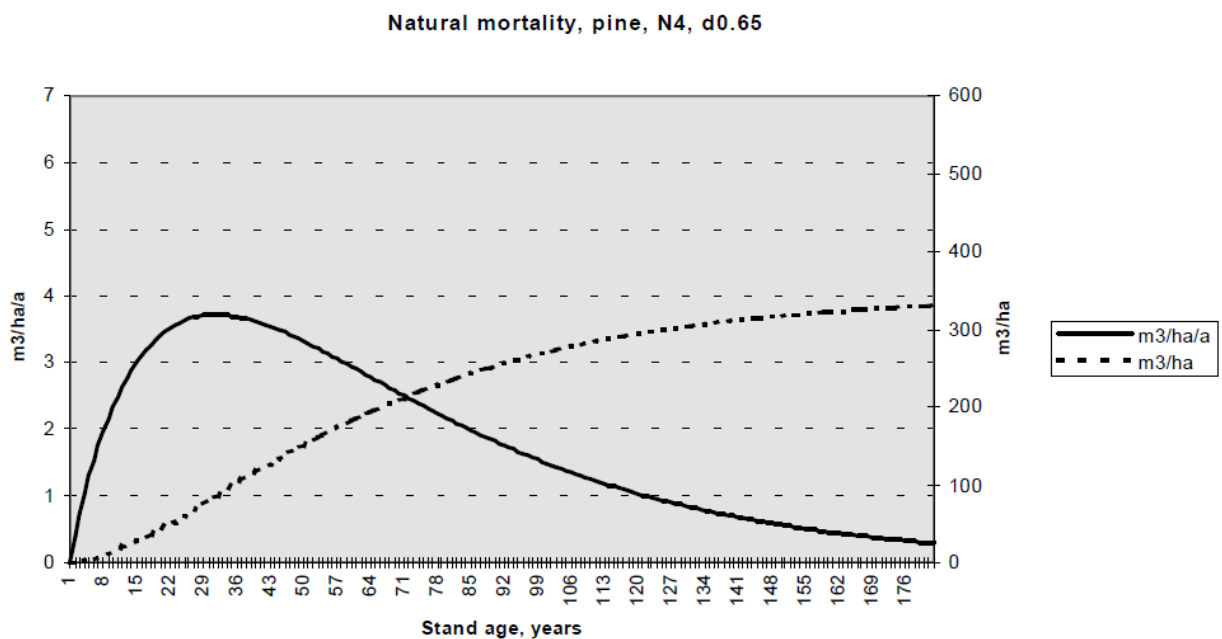


Рис.1.3. Динаміка природного відмирання у сосновому деревостані [168]

### 1.1.3. Основні причини зміни землекористування

На національному рівні для країн, які розвиваються, можна виділити такі основні причини знеліснення (за важливістю) [147]:

- 1) розширення сільського господарства (як комерційного так і для власних потреб людей),

- 2) створення шахт,
- 3) розширення населених пунктів (міст і сіл),
- 4) розбудова інфраструктури.

Економетричний аналіз показав [6, 43], що на глобальному рівні зростання кількості населення збільшує швидкість знеліснення, в той час як економічне зростання має невизначений вплив. Щодо впливу на прийняття рішень про знеліснення на локальному рівні, Angelsen and Kaimowitz (1999) [6] вказують на те, що ціна на сільськогосподарські товари та наявність доріг збільшують знеліснення, а можливості отримати прибуток (чи працевлаштуватись) у інших галузях економіки зменшують знеліснення. Згідно мета-аналізу [43], рушійні сили знеліснення на локальному рівні є (по важливості):

- 1) вища ціна сільськогосподарських продуктів,
- 2) підтримка зростання доходу сільських жителів (наприклад, через доступ до кредитів),
- 3) наближеність до сільськогосподарських угідь,
- 4) кількість населення,
- 5) наближеність до міст,
- 6) наближеність до доріг,
- 7) більша придатність ґрунту для сільського господарства,
- 8) ведення сільського господарства,
- 9) наближеність до знеліснених ділянок.

В. Soares-Filho та ін. (2004) [286] підтверджує важливість впливу щільності населення (сільського) та близькості до дороги на ймовірність знеліснення на локальному рівні. Слід зазначити, що відстань до дороги суттєво впливає на ймовірність знеліснення лише на відстані в межах до 20-30 км (рис.1.4 [230, рис. 4.8., с.58; 209, 286], тому у глобальних моделях з великим розміром клітинок растру ця залежність проявляється інакше.

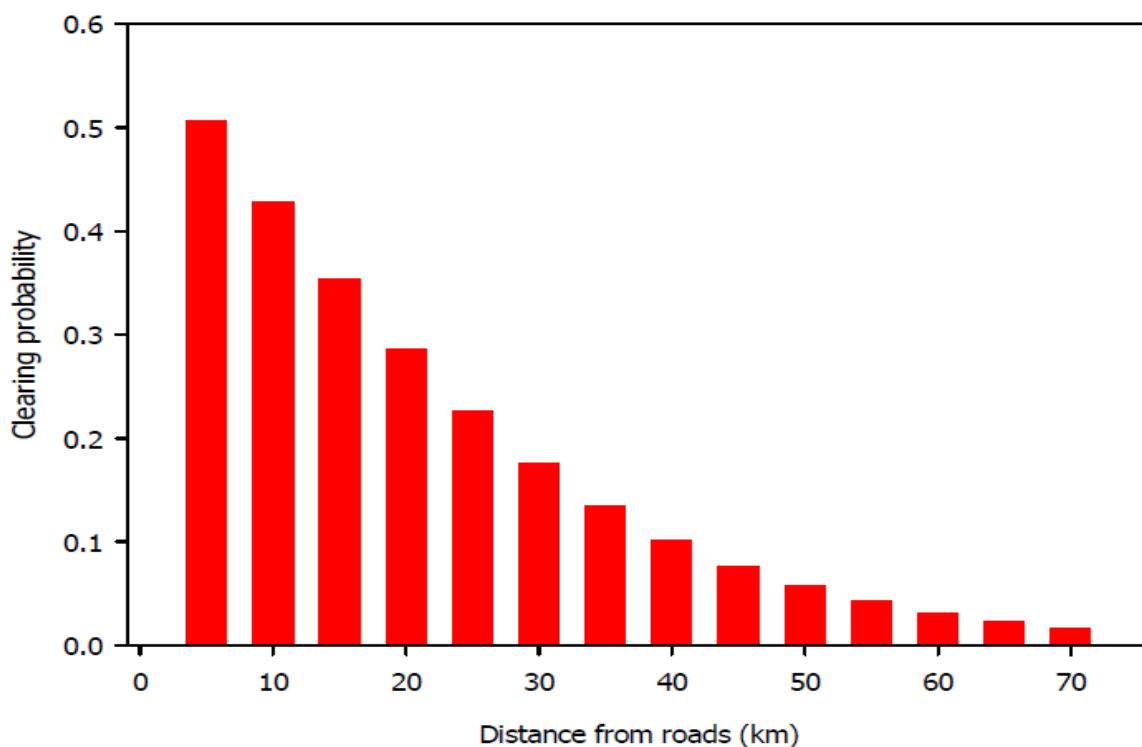


Рис.1.4. Залежність ймовірності знеліснення від відстані до дороги, км [230, рис. 4.8., с.58]

## 1.2. Моделювання процесів кругообігу вуглецю в лісових екосистемах, процесів емісії та стоку вуглекислого газу при лісокористуванні та зміні землекористування

### 1.2.1. Моделі процесів кругообігу вуглецю в лісових екосистемах

Моделі процесів кругообігу вуглецю в лісових екосистемах можна умовно розділити на дві групи – у першій групі запаси вуглецю в компонентах екосистеми моделюють на основі процесу фотосинтезу, а в другій групі – на основі емпіричних даних росту деревостанів [174, 189].

У моделях першої групи потоки вуглецю між резервуарами описують залежностями від факторів навколишнього середовища (температури, кількості опадів, або доступної води, освітленості, кількості азоту, фосфору, концентрації вуглекислого газу в атмосфері та ін.; наприклад, моделі BIOME-GGC [235], CARAIB [328], The Frankfurt Biosphere Model (FBM) [181], Ösnabruk Biosphere Model (ÖBM) [74], Lund–Potsdam–Jena (LPJ) [16]).

Наприклад, у моделі FBM [181] залежність інтенсивності фотосинтезу від денної температури ( $T$ , °C) описують апроксимаційним виразом:

$$F_T = \frac{(T - T_{\min})(T - T_{\max})}{(T - T_{\min})(T - T_{\max}) - (T - T_{opt})^2},$$

а в моделі ÖBM [74] використовують інший апроксимаційний вираз для середньорічних температур:

$$F_T = 3000 / (1 + \exp(1.315 - 0.119 T)).$$

Для врахування впливу концентрації вуглекислого газу в атмосфері ( $C$ , ppmv) та родючості ґрунту у моделі ÖBM [74] використовують комбіновану функцію:

$$F_{C,M} = \left(1 + \frac{f_s}{4}\right) + \left(1 - \exp\left\{-\ln\left(\frac{f_s}{4 + f_s}\right) \frac{1}{240} (C - 80)\right\}\right).$$

Перевагами моделей першої групи є те, що у них використовують як емпіричні залежності так і теоретичні напрацювання, що дає можливість їх використання для прогнозування динаміки вуглецю у компонентах екосистем при змінених умовах навколишнього середовища (наприклад, при зміні клімату). Недоліком моделей першої групи є те, що вони не враховують залежність процесів кругообігу вуглецю від віку деревостану.

У моделях другої групи (наприклад, [168, 281], CBM-CFS3 [189], CO2FIX [205], EFISCEN [265]) використовують функції росту та відмирання деревостанів, розроблені на основі даних багаторічних вимірювань. Зокрема, Shvidenko et al. (1996) [283], Karjalainen and Liski (1997) [168], Shvidenko et al. (2008) [281] застосовували похідні рівняння Річарда-Чапмана для визначення запасу стовбурної деревини ( $GS$ ) та приросту стовбурної деревини ( $dGS$ ), загальної продукції ( $TV$ ) та річної продукції ( $dTV$ ), природного відмирання ( $dM$ ):

$$dTV = b_1 b_2 b_3 [1 - \exp(-b_2 A)]^{(b_3-1)} \exp(-b_2 A)$$

$$b_1 = b_{13} N^2 + b_{12} N + b_{11},$$

$$b_2 = b_{23} N^2 + b_{22} N + b_{21},$$

$$b_3 = b_{33} N^2 + b_{32} N + b_{31},$$

$$GS = c_1 * [1 - \exp(-c_2 * A)]^{c_3},$$

$$dGS = c_1 c_2 c_3 [1 - \exp(-c_2 A)]^{(c_3-1)} \exp(-c_2 A),$$

$$c_1 = c_{13} N^2 + c_{12} N + c_{11},$$

$$c_2 = c_{23} N^2 + c_{22} N + c_{21},$$

$$c_3 = c_{33} N^2 + c_{32} N + c_{31},$$

$$dM = dTV - dGS,$$

де  $N$  – бонітет,  $A$  – вік деревостану, коефіцієнти  $b$  та  $c$  наведено визначають на основі даних вимірювань [283]. Для визначення біомаси у частинах дерев використовують регресійні рівняння, наприклад одного з таких видів [190]:

$$R_f = a_0 A^{a_1},$$

$$R_f = a_0 A^{a_1} B^{a_2},$$

$$R_f = a_0 A^{a_1} B^{a_2} e^{a_3 A},$$

де  $A$  - вік деревостану,  $B$  – бонітет,  $a_0, a_1, a_2, a_3$  - емпіричні коефіцієнти.

Перевагами моделей другої групи є те, що їх розробляють на основі великої кількості вимірювань, умови навколишнього середовища і вік деревостану відображені у параметрах моделей. Разом з тим, моделі другої групи, в більшості випадків, не враховують вплив зміни факторів навколишнього середовища на процеси кругообігу вуглецю.

### 1.2.1. Моделювання процесів зміни землекористування

Моделі процесів зміни землекористування можна розділити на такі групи:

1. Економічні оптимізаційні моделі часткової, або повної рівноваги (наприклад, AgLU [262], FASOM GHG [13], GTM [177], GLOBIOM [138], GTAPE-L [41], GTAP-AEZ-GHG [109]), в яких зміна землекористування моделюється в межах загальної оптимізаційної процедури.
2. Регресійні малої просторової роздільної здатності (наприклад, [2, 167, 201, 203, 340]), в яких залежною змінною (або однією з залежних змінних) є площа лісу (або швидкість знеліснення), а незалежними змінними може бути валовий внутрішній продукт, кількість населення, ціни на сільськогосподарські продукти та деревину та ін.

3. Геопросторові регресійні, нейромережеві, "в правилах" (наприклад, [46, 54, 209, 204] CLUE [324], DINAMICA [288], BIOCAPARO [214]).
4. Гібридні (наприклад, LandSHIFT [264], SimAmazonia (модель DINAMICA третього типу у поєднанні з соціо-економічними даними у регіонах Бразилії) [287], DIMA [259], LUS IMAGE [198, 208] використовують макроекономічні дані, або результати економічних моделей на макрорівні, та принципи геопросторових моделей.

Недоліком першої групи моделей є те, що зміна землекористування на локальному рівні лише частково може бути пояснена економічною доцільністю. Наприклад, значне знеліснення у тропіках у 1990-2005рр. і створення нових сільськогосподарських угідь на місці лісів не відповідає рівню попиту на сільськогосподарську продукцію в той період. Недоліком другої групи моделей є те, що вони не дають можливості прогнозувати зміну землекористування на регіональному, чи локальному рівнях. Моделі третьої групи добре працюють на локальному (просторовому рівні), але вони вимагають велику кількість даних для визначення параметрів, що не дає можливості їх використання на глобальному рівні, оскільки такі дані відсутні. Крім того, вони відображають залежності зміни землекористування для поточних умов (навколишнього середовища, економічних, політичних і т.д.).

Найбільш цікавими є моделі четвертої групи, де поєднують переваги моделей першої, або другої груп із перевагами моделей третьої групи. Серед найбільш розвинених глобальних моделей цього типу можна виділити модель LandSHIFT [264], роботи започатковані Benitez et al. (2004) [14] та Benitez and Obersteiner (2006) [15], на основі яких було створено модель DIMA [176, 177, 259].

Серед економічних оптимізаційних моделей часткової рівноваги слід виділити модель GLOBIOM. Ця модель, взагалі, є геопросторовою (клітинки растру об'єднані у "гомогенні одиниці відгуку" – однакові за геофізичними умовами та в межах однієї країни), але в даний час для моделювання великої кількості сценаріїв геопросторова інформація використовується лише для внутрішніх обчислень. Також використовують рекурсивне розв'язування моделі,



проводячи оптимізацію для 10-ти річних періодів (2001-2010, 2011-2020, ...). Схематичне зображення моделі наведено на рис. 1.5. У моделі GLOBIOM обчислюється ринкова рівновага для продукції сільськогосподарського та лісового господарства через розподіл землекористування між сільським господарством та лісовим господарством таким чином, щоб максимізувати суму надлишків виробників та споживачів за умови обмежень ресурсів, технологій, попиту та політик [138]. Модель записують у формі задачі лінійного програмування [207].

Цільова функція:

$$\begin{aligned} \text{Max } WELF_t = & \sum_{r,y} \left[ \int \phi_{r,t,y}^{\text{demd}} (D_{r,t,y}) d(\cdot) \right] - \sum_r \left[ \int \phi_{r,t}^{\text{splw}} (W_{r,t}) d(\cdot) \right] \\ & - \sum_{r,l,\bar{l}} \left[ \int \phi_{r,l,\bar{l},t}^{\text{lucc}} \left( \sum_{c,o,p,q} Q_{r,t,c,o,l,\bar{l}} \right) d(\cdot) \right] \\ & - \sum_{r,c,o,p,q,l,s,m} \left( \tau_{c,o,p,q,l,s,m}^{\text{land}} \cdot A_{r,t,c,o,l,s,m} \right) \\ & - \sum_r \left( \tau_r^{\text{live}} \cdot B_{r,t} \right) - \sum_{r,m} \left( \tau_{r,m}^{\text{proc}} \cdot P_{r,t,m} \right) \\ & - \sum_{r,\bar{r},y} \left[ \int \phi_{r,\bar{r},t,y}^{\text{trad}} (T_{r,\bar{r},t,y}) d(\cdot) \right]. \end{aligned}$$

Обмеження:

$$\begin{aligned} D_{r,t,y} & \geq d_{r,t,y}^{\text{targ}} \\ D_{r,t,y} & \leq \sum_{c,o,p,q,l,s,m} \left( \alpha_{t,c,o,l,s,m,y}^{\text{land}} \cdot A_{r,t,c,o,l,s,m} \right) + \alpha_{r,t,y}^{\text{live}} \cdot B_{r,t} \\ & \quad + \sum_m \left( \alpha_{r,m,y}^{\text{proc}} \cdot P_{r,t,m} \right) + \sum_{\bar{r}} T_{r,\bar{r},t,y} - \sum_{\bar{r}} T_{\bar{r},t,y} \\ \sum_{s,m} A_{r,t,c,o,l,s,m} & \leq L_{r,t,c,o,l} \\ L_{r,t,c,o,l} & \leq L_{r,t,c,o,l}^{\text{init}} + \sum_{\bar{l}} Q_{r,t,c,o,l,\bar{l}} - \sum_{\bar{l}} Q_{r,t,c,o,l,\bar{l}} \\ Q_{r,t,c,o,l,\bar{l}} & \leq L_{r,t,c,o,l,\bar{l}}^{\text{suit}} \\ \sum_{c,o,l,s,m} \left( \varpi_{c,l,s,m} \cdot A_{r,t,c,o,l,s,m} \right) & \leq W_{r,t} \end{aligned}$$

$$E_{r,t,e} = \sum_{c,o,l,s,m} (\epsilon_{c,o,l,s,m,e}^{\text{land}} \cdot A_{r,t,c,o,l,s,m}) + \epsilon_{r,e,t}^{\text{live}} \cdot B_{r,t} \\ + \sum_m (\epsilon_{r,m,e}^{\text{proc}} \cdot P_{r,t,m}) + \sum_{c,o,l,l} (\epsilon_{c,o,l,l,e}^{\text{lucc}} \cdot Q_{r,t,c,o,l,l}).$$

У вищенаведених виразах  $D$  - означає попит (т, м<sup>3</sup>, ккал),  $W$  - споживання води для іригації (м<sup>3</sup>),  $Q$  - зміна землекористування (га),  $A$  - площа землі під різним користуванням (га),  $B$  - заготівля м'яса (ккал),  $P$  - перероблена сировина (т, м<sup>3</sup>),  $T$  - кількість товарів, якими торгують між регіонами (т, м<sup>3</sup>, ккал),  $E$  - емісії парникових газів (тСО<sub>2</sub> екв.),  $L$  - доступна земля (га);  $\varphi^{\text{demd}}$  - функція попиту,  $\varphi^{\text{splw}}$  - функція постачання води,  $\varphi^{\text{lucc}}$  - функція вартості зміни землекористування,  $\varphi^{\text{trad}}$  - функція вартості торгівлі,  $\tau^{\text{land}}$  - вартість землекористування (крім іригації, \$/га),  $\tau^{\text{live}}$  - вартість заготівлі м'яса (\$/ккал),  $\tau^{\text{proc}}$  - вартість переробки сировини,  $d^{\text{targ}}$  - попит, який потрібно досягнути,  $\alpha^{\text{land}}$  - урожайність сільськогосподарських культур та лісу (т/га, м<sup>3</sup>/га),  $\alpha^{\text{live}}$  - коефіцієнти виробництва м'яса (1 - для м'яса, а негативні значення - корм для тварин, т/ккал),  $\alpha^{\text{proc}}$  - коефіцієнти переробки сировини (-1 - для сировини, позитивні значення - для готової продукції),  $L^{\text{init}}$  - кількість землі у типах землекористування у початковий момент моделювання (га),  $L^{\text{suit}}$  - загальна кількість землі, яка підходить за характеристиками для певного типу використання (га),  $\epsilon$  - коефіцієнти емісії парникових газів (тСО<sub>2</sub>екв/одиночку діяльності),  $\omega$  - кількість води необхідна для іригації (м<sup>3</sup>/га),  $r$  - економічний регіон (у останній глобальній версії моделі розглядають 31 регіон),  $t$  - часовий період (модель працює з 10-річним кроком),  $c$  - країна,  $o$  - геопросторова одиниця моделювання (перетин растру 0.5x0.5 градусів, гомогенних ділянок щодо класу висоти над рівнем моря, крутизни схилів та ґрунту, та меж країн),  $l$  - тип землекористування (рілля, луки, природні ліси, ліси, в яких ведуть лісове господарство, швидкоростучі деревні насадження, інша природна рослинність),  $s$  - види рослин (37 сільськогосподарських культур, ліс, швидкоростучі деревні насадження),  $m$  - технології (наприклад, інтенсивність використання сільськогосподарської землі, перероблення деревини та ін.),  $u$  - продукти переробки сировини (наприклад, пиловник, інша промислова деревина, паливна деревина та ін.),  $e$  - типи джерел парникових газів (СО<sub>2</sub> від зміни землекористування, емісії та стік СО<sub>2</sub> від заміщення викопного палива

біопаливом,  $N_2O$  від мінеральних добрив та поводження з гноєм,  $CH_4$  від внутрішньої ферментації, виробництва рису та поводження з гноєм).

Торгівля моделюється за методом просторового рівноваги, а це означає, що торговельні потоки збалансовані між різними географічними регіонами. Крім того, торгівля ґрунтується на економічній конкурентоспроможності, оскільки товари вважаються однорідними. Це дозволяє відслідковувати двосторонні торговельні потоки між окремими регіонами. [138].

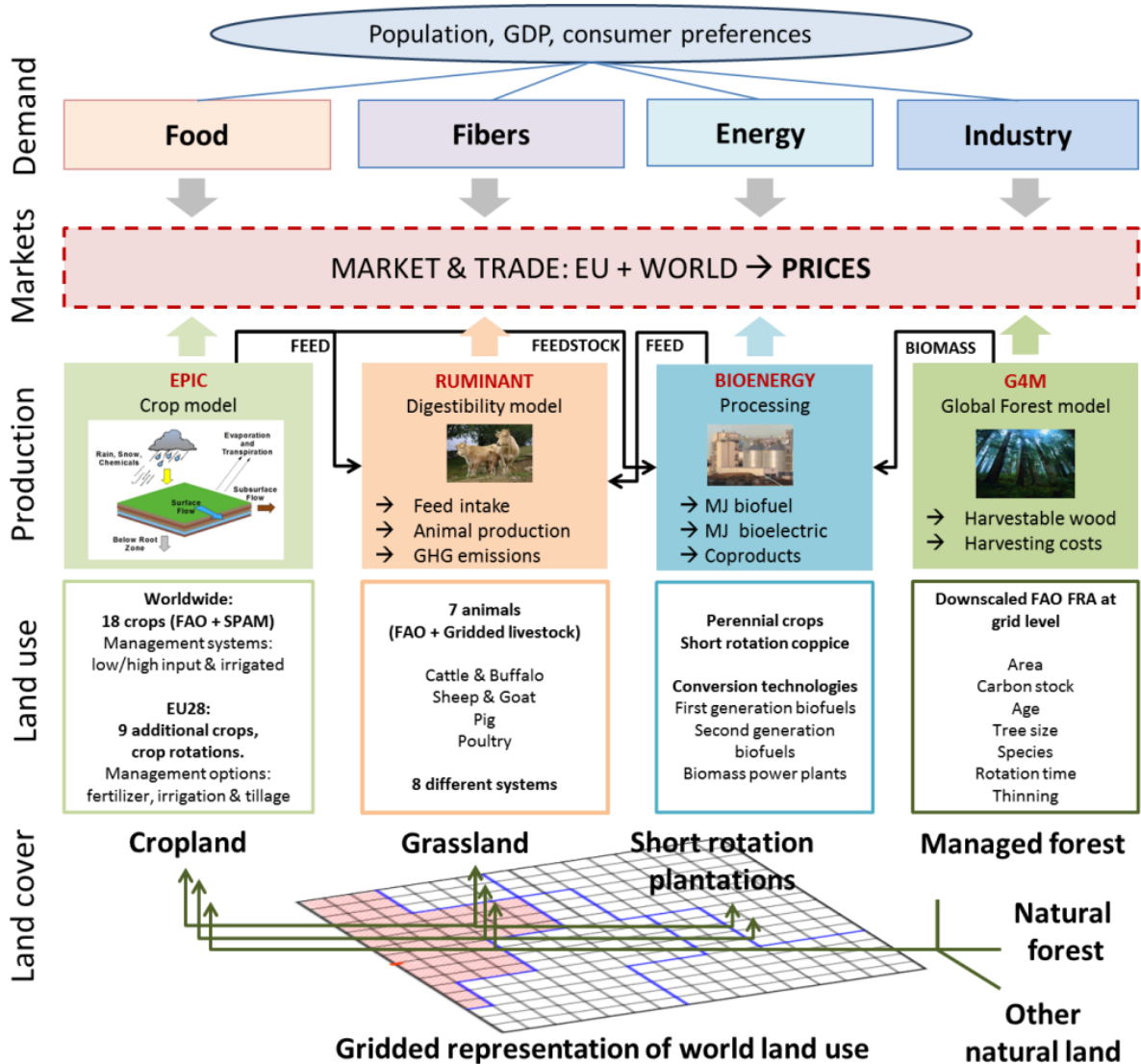


Рис. 1.5. Схематичне зображення моделі GLOBIOM [138]

У моделі GLOBIOM попит на товари визначається функціями з сталими еластичностями і калібрується за даними ФАОСТАТ. Попит на продукти харчування залежить від взаємодії трьох різних факторів: зростання кількості населення, зростання доходу на душу населення та ціни. Зростання кількості

населення та зростання доходу на душу населення є екзогенними параметрами. Попит зростає пропорційно кількості населення в кожному регіоні GLOBIOM. Зміни ВВП на душу населення визначають зміну попиту залежно від еластичності доходу, пов'язаного з кожним сценарієм. Ефект ціни обчислюється ендогенно, тому на остаточний попит впливають також припущення щодо розвитку технологій виробництва товарів та біоенергії, природних ресурсів тощо. [138]

У моделі GLOBIOM враховано сектор біоенергетики, лісове господарство, рільництво та випасання худоби, тваринництво, тому ця модель охоплює всі джерела парникових газів у сільському господарстві та лісовому господарстві: емісії  $N_2O$  від використання добрив,  $CH_4$  від вирощування рису,  $CH_4$  від тваринництва,  $CH_4$  та  $N_2O$  від поводження з гноєм, втрата біомаси після перетворення лісу та інших природних земель на сільськогосподарську землю, емісії  $CO_2$  з ґрунтів з культивованих органічних ґрунтів (осушувані торф'яники, на рівні країни). Обчислення емісій базуються на керівних принципах обліку МГЕЗК [1].

LandSHIFT - це інтегральна модель для середньострокового аналізу сценаріїв (20-50 років), у якій використовують підхід "систем землекористування". Метою цієї моделі є імітація змін у землекористуванні та наземному покритті у континентальному та глобальному масштабах та описує взаємозв'язок між компонентами антропогенних та екологічних систем, як чинників змін у землекористуванні. Структурно LandSHIFT складається з двох частин: LUC-модуля, у якому моделюють зміни у землекористуванні та модуля Productivity, у якому обчислюють врожайність сільськогосподарських культур та чисту первинну продукцію лук. Модель працює на макрорівні (рушійні змінні, що описують соціально-економічний та сільськогосподарський розвиток країни) та мікрорівні (змінні растру, що описують місцеві характеристики ландшафту та зонування). За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО), на макрорівні входить 179 країн; кожна країна ділиться на мікрорівні растром з розміром комірки приблизно  $9 \times 9$  км [264]. У моделі використовують мультикритеріальний аналіз і багатоцільовий розподіл земельних ресурсів для

моделювання змін землекористування. Для кожної клітинки растру обчислюють індекс кращого використання земельної ділянки, який залежить від характеристик навколишнього середовища (suitability) та накладених обмежень використання (constraints).

$$\Psi_k = \underbrace{\sum_{i=1}^n w_i f_i(p_{i,k})}_{\text{suitability}} \times \underbrace{\prod_{j=1}^m g_j(c_{j,k})}_{\text{constraints}}, \text{ with } \sum_i w_i = 1, \\ \text{and } f_i(p_{i,k}), g_j(c_{j,k}) \in [0, 1]$$

Тоді вирощування заданої кількості сільськогосподарських культур та пасовищ розміщують у клітинках з найвищими відповідними індексами використання. Але у LandSHIFT моделюють зміну землекористування без лісового господарства та не обчислюють емісії CO<sub>2</sub>.

Benítez et al. (2004) та Benitez and Obersteiner (2006) [14, 15] застосували порівняння чистих приведених вартостей (NPV) альтернативного землекористування для прийняття рішень про зміну землекористування (заліснення) в клітинках растру у моделі зміни землекористування для Латинської Америки. В такому підході основними рушійними силами зміни типу користування землею є валовий внутрішній продукт (ВВП), щільність населення, продуктивність лісу, частка лісу в клітинці та сільськогосподарська придатність землі. Цей підхід виявився успішним і був далі розвинений в моделі DIMA (ззеліснення) [176,177, 259] та моделі G4M (заліснення, ззеліснення, калібрування на національному рівні, обмін даними з економічною оптимізаційною моделлю GLOBIOM [118, 131]; і лісокористування [116,123]), а результати моделювання із застосуванням цього підходу були використані у багатьох проектах, в тому числі для підтримки прийняття рішень щодо зменшення емісій CO<sub>2</sub> в секторі зміни землекористування та лісового господарства (IPCC Scenario Database [259]; The Eliasch Review [73, 118]; визначення референтних рівнів емісій CO<sub>2</sub> лісового господарства для країн ЄС [24, 356]; розробка референтних сценаріїв для країн ЄС [50, 51, 88, 89]; обчислення сценаріїв SSP/RCP [93, 236] та ін.).

### 1.2.2. Моделювання процесів лісокористування у глобальних та регіональних моделях

Оскільки у лісовій екосистемі параметри залежать від віку деревостану (див. секцію 1.1.2), вона є складнішим об'єктом для моделювання, ніж сільськогосподарська система з однорічним циклом. Природні ліси мають складну просторову структуру і містять дерева різного віку. Лісокористування в таких системах досить складно моделювати. На локальному рівні використовують моделі динаміки лісової екосистеми, в яких розглядають кожне окреме дерево. Такі моделі враховують відстань між деревами (наприклад, SILVA [238], FPS [8]), чи такі процеси як загибель, або вирубування дерева і формування прогалини (gap) у полозі лісу, у якій відбувається конкурентна боротьба між деревами нижчого ярусу, - "gap" моделі (наприклад, FORMIND [78], JABOWA [28], LINKAGES [237], SORTIE [231]). Підхід з розглядом окремих дерев вимагає велику кількість вхідних даних і обчислювальних ресурсів, тому його в даний час не використовують у глобальних і регіональних моделях.

Лісокористування у одновікових деревостанах є простішим для моделювання. Цикл лісокористування схематично можна розбити на такі етапи: посадка дерев, рубки догляду, рубки головного користування, посадка дерев ... Тоді розглядають задачу знаходження такого значення обороту рубки (часу між посадкою дерев і рубкою головного користування, RL), який максимізує прибуток (різницю між витратами на посадку дерев і ціною деревини на корені; див. секцію 3.3.2) [318]. Ліс можна спрощено представити як сукупність одновікових деревостанів. У оптимізаційних рекурсивних моделях (наприклад, GLOBIOM [138]) ліс розглядають у стані рівноваги, вважаючи, що щороку можна заготовляти певну кількість деревини, яка відповідає середньому приросту за винятком втрат при рубках.

Розглянемо дві моделі, які розроблено для аналізу процесів лісокористування на глобальному та регіональному рівнях, - GTM та EFISCEN. Глобальна модель лісу (Global Timber Model - GTM) є економічною моделлю для вивчення глобальних методів управління земельними ресурсами, управління та

торгівлі в лісовому секторі [289]. Це динамічна оптимізаційна модель часткової рівноваги. У моделі розглядають процеси лісонасадження, ведення лісового господарства та уникнення знеліснення як можливі стратегії для зменшення емісій CO<sub>2</sub>, а також оцінюють заготівлю деревини в промислових лісах та недоступних лісах, інтенсивності лісокористування та створення плантацій, всі важливі складові майбутнього постачання деревини та поглинання вуглецю [289]. У моделі світ розділяють на 13 регіонів [177]. GTM відрізняється від інших моделей тим, що в ній детально розглядають глобальний ринок деревини і процеси лісокористування. У той же час у моделі розглядають зміни в землекористуванні лише в контексті уникнення знеліснення.

У моделі GTM максимізують дисконтований прибуток по всіх типах лісокористування:

$$\max \sum_{t=0}^{\infty} \left\{ \int_0^{Q^*(t)} \{D(Q_t, Z_t) - Ch(Q_t)\} dQ(t) - Cp_t - Cn_t - R_t \right\},$$

де  $D(Q, Z)$  – функція глобального попиту на деревину  $Q$ , при доході  $Z$ ;  $Q(t)$  – сумарна кількість деревини, яку можуть заготовити у всіх типах деревостанів і від усіх типів лісокористування у період часу  $t$ ;  $Ch(Q_t)$  – витрати, необхідні для заготовлення деревини;  $Cp_t$  – витрати на посадку зрубаного лісу;  $Cn_t$  – витрати на створення нових насаджень;  $R_t$  – витрати на оренду землі для кожного типу лісу.

Основним недоліком моделі GTM є те, що модель не геопросторовою, тому не враховано локальні ефекти росту лісу, заготівлі деревини та змін землекористування.

EFSICEN - це матрична модель, де стан лісу для кожного типу лісу зображується як розподіл площ за класами віку та класами запасу стовбурної деревини (рис. 1.6 [265]). Вхідні дані використовуються для побудови вихідних матриць. Далі з п'ятирічним кроком обчислюють переходи між комірками матриць (зміна площ у різних вікових класах запасу). Ці переходи представляють такі процеси як приріст, природна смертність і рубки. Приріст моделюється як переміщення площ на один віковий клас та один клас запасу; при рубках догляду площі по запасах зсуваються на один клас назад; відмирання моделюють зсуванням частини площ на один клас вниз (залежить від інтенсивності відмирання). На переходи впливають вибрані користувачем сценарії. Ці сценарії можуть

ґрунтуватися на експертних оцінках або на основі результатів інших моделей або досліджень. Параметри функції приросту визначають із вхідних даних.

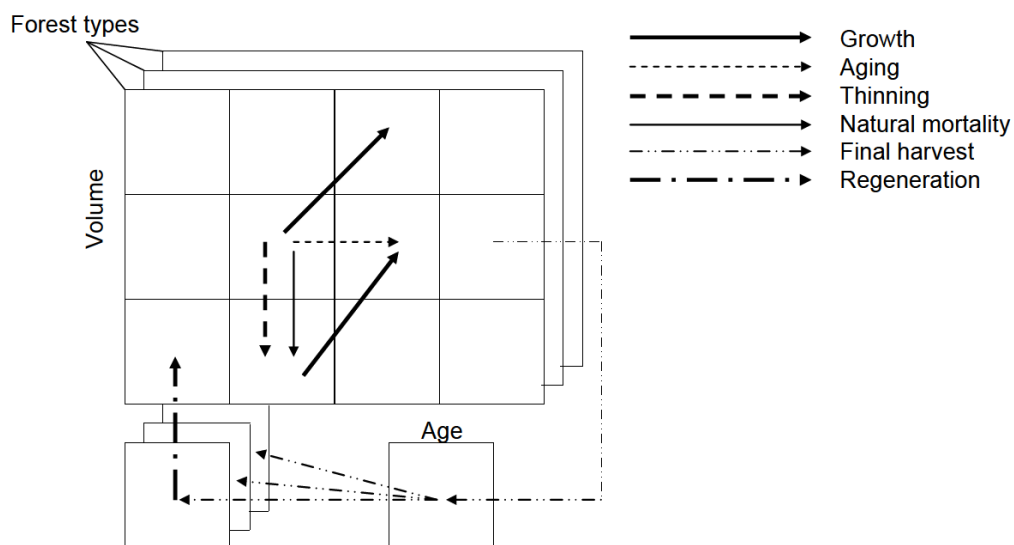


Рис. 1.6. Схематичне представлення переходів між елементами матриць у моделі EFISCEN, які відповідають процесам росту, рубок догляду та головного користування, природним відмиранням та відновленням [265]

Для обчислення біомаси цілого дерева з запасу стовбурної деревини використовують регресійні рівняння (наприклад, як у [191, 302], або надані експертами країн для яких проводять обчислення). Опад обчислюють враховуючи природний опад, час життя частин дерев для різних деревних порід та умов росту. Опад є входом для підмоделі процесів кругообігу вуглецю в ґрунті (використовують модель YASSO [199]). Модель EFISCEN добре себе зарекомендувала для моделювання одновікових лісів, в яких ведуть лісове господарство [265], і в країнах, у яких є якісні дані інвентаризації лісів. Результати в різновікових лісах та країнах, в яких дані інвентаризації лісів не є якісними, є менш надійними.

У моделі розглядають типи лісу за регіонами, типом власності, класом продуктивності, деревною породою. Кількість типів лісу визначається деталізацією вхідних даних, які отримують і національних інвентаризацій лісових ресурсів. Для кожного типу лісу та вікового класу потрібні такі дані: площа (га), середній запас ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ), поточний приріст ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ ).



EFISCEN - це модель, яку розроблено для імітаційного моделювання розвитку лісових ресурсів у масштабах від регіонів, країн до європейського рівня. Користувач задає певний рівень заготівлі деревини, а за допомогою цієї моделі перевіряють, чи можна заготовити таку кількість та проводять імітаційне моделювання розвитку лісу з цим рівнем заготівлі деревини. EFISCEN використовують для оцінки та порівняння різних сценаріїв лісокористування. Визначають сценарії щодо зміни площі лісів, приросту, операцій лісокористування та попиту на деревину. Результатами моделювання є розподіл деревних порід, розподіл за класами віку, відношення вирубанної деревини до приросту, запас вуглецю у біомасі та ґрунті.

Недоліком моделі EFISCEN є те, що модель не є геопросторовою, що не дає можливості повною мірою врахувати локальні особливості росту і використання лісу; у моделі не розглядають процеси заліснення і знеліснення (лише як обчислені ззовні), що не дає можливості врахувати взаємодію між процесами лісокористування та зміни землекористування; модель сильно залежить від даних інвентаризації лісів, що обмежує її використання у країнах, де система інвентаризації не є налагодженою, а також модель призначена для моделювання одновікових лісів.

### **1.3. Висновки до розділу 1.**

1. Наземні екосистеми є важливим компонентом глобального вуглецевого балансу. Біля 10% антропогенних емісій вуглекислого газу є результатом зміни землекористування (в основному знеліснення), а поглинають наземні екосистеми біля 30% емісій. Потенціал зменшення емісій вуглекислого газу від зміни землекористування та лісокористування складає 0.2-13.8 ГтCO<sub>2</sub>/рік у 2050р. Оскільки скорочення емісій від зміни землекористування та лісокористування не потребує розроблення нових технологій і великих коштів, ця сфера діяльності є важливою для стабілізації концентрації вуглекислого газу в атмосфері.
2. Проаналізовано основні потоки та резервуари вуглецю у лісовій екосистемі, а також процеси зміни землекористування та лісокористування. Показано

динаміку вуглецевого балансу лісової екосистеми при залісненні, знелісненні та лісокористуванні.

3. Проаналізовано існуючі математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем, математичні моделі процесів лісокористування та зміни землекористування. Показано, що існуючі моделі не враховують в повній мірі важливі залежності, взаємозв'язки між процесами зміни землекористування та лісокористування, а також наявні дані.

## Розділ 2. Математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем

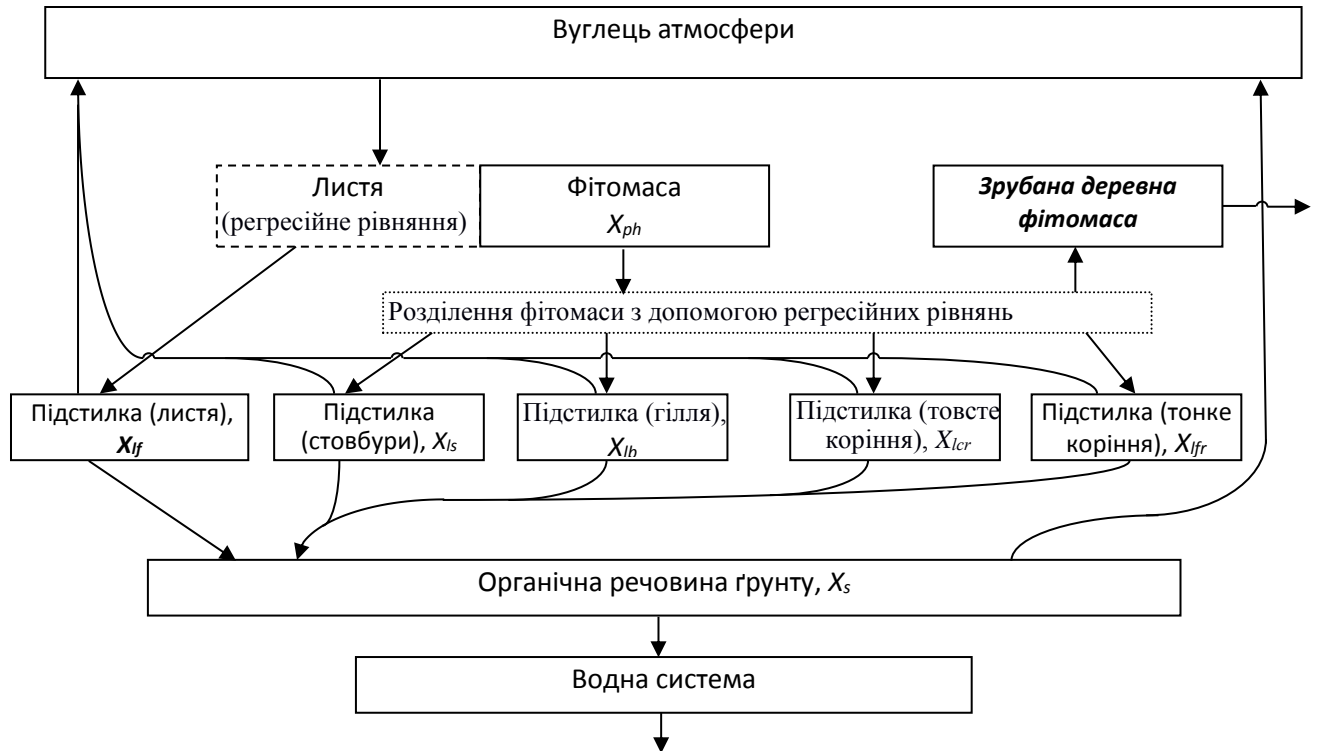
### 2.1. Динамічні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем

#### 2.1.1. Структурна модель вуглецевого балансу лісу

Математичні моделі для дослідження вуглецевого балансу лісових екосистем побудовано на основі структурної моделі вуглецевого балансу лісу (рис. 2.1). Розглянуто наступні резервуари вуглецю: фітомаса (листя (хвою) виділено за допомогою регресійного рівняння), підстилка (п'ять резервуарів: листя, стовбури дерев, гілки, великі корені, дрібні корені), органічна речовина ґрунту, а також наступні потоки вуглецю: атмосфера – фітомаса, фітомаса – підстилка (опад, який сортується у п'ять типів за допомогою регресійних рівнянь), підстилка – атмосфера, підстилка – ґрунт, ґрунт – атмосфера, ґрунт – водна система та фітомаса – межі екосистеми (фітомаса, яку вирубують).

Потік атмосфера – фітомаса (позначаємо  $v_{ap}$ ) відповідає процесу фотосинтезу. Потоки фітомаса – підстилка відповідають процесам відмирання листя ( $v_{plf}$ ), стовбурів дерев ( $v_{pls}$ ), гілок ( $v_{plb}$ ), великих коренів ( $v_{plcr}$ ) і дрібних коренів ( $v_{plfr}$ ). Потік підстилка – атмосфера відповідає процесам мінералізації відповідних компонентів підстилки (листя -  $v_{lfa}$ , стовбурів -  $v_{lsa}$ , гілок  $v_{lba}$ , товстих коренів  $v_{lcr}$  і тонких коренів -  $v_{lfr}$ ). Потік підстилка – ґрунт відповідає процесам гуміфікації відповідних компонентів підстилки (листя -  $v_{lfs}$ , стовбурів -  $v_{lss}$ , гілок  $v_{lbs}$ , товстих коренів  $v_{lcrs}$  і тонких коренів -  $v_{lfrs}$ ). Потік ґрунт – атмосфера ( $v_{sa}$ ) відповідає процесу мінералізації гумусу. Потік ґрунт – водна система ( $v_{aq}$ ) відповідає процесу змивання і вимивання органічної речовини ґрунту водою. Потік фітомаса – межі екосистеми ( $v_{ph}$ ) відповідає процесу заготівлі деревини. Крім того, позначимо літерою  $X$  з нижніми індексами резервуари вуглецю ( $ph$  – фітомаса,  $lf$  – підстилка з листя,  $ls$  – підстилка зі стовбурів дерев і гілок діаметром більшим ніж 10 см,  $lb$  – підстилка з гілок діаметром меншим ніж 10 см,  $lcr$  – підстилка з товстих коренів,  $lfr$  – підстилка з тонких коренів).

Рис. 2.1. Структурна модель вуглецевого балансу лісу



Враховуючи введені позначення математичну модель вуглецевого балансу записуємо у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку

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

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

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

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

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

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

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

### 2.1.2. Математичні моделі потоків вуглецю

Інтенсивність фотосинтезу (потік  $v_{ap}$ ) представлено складеною функцією (використовуємо принцип лімітуючих факторів Лібіха [323, 380, 383]):

$$v_{ap} = \alpha_{ap} F_l \min \{F_T, F_c, F_w\},$$

де  $\alpha_{ap}$  – калібрувальний коефіцієнт,  $F_l$  – функція кількості листя, яка, в свою чергу, залежить від середнього віку насадження ( $A$ ),  $F_T$  – залежність інтенсивності фотосинтезу від середньомісячної температури повітря ( $T$ ),  $F_c$  – залежність інтенсивності фотосинтезу від середньомісячної концентрації вуглекислого газу в атмосфері ( $C$ ) і  $F_w$  – залежність інтенсивності фотосинтезу від середньомісячної кількості доступної води ( $w$ ) в екосистемі. Всі вказані залежності, які описують інтенсивність фотосинтезу, відмирання та розкладу, є функціями часу.

Масу листя (позначено літерою  $f$ ) визначаємо за допомогою регресійного виразу (див. вираз 2.3, описаний далі), а час появи листя у букових та дубових лісах задається температурою повітря ( $T_{lg}$ , див. табл. 2.1) [129, 133, 346, 357]:

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

Таблиця 2.1. Середньомісячна температура повітря, при якій відбуваються фенологічні зміни, °C

Порода дерев	Поява листків, $T_{lg}$	Масове опадання, $T_{lfb}$	Кінець опадання, $T_{lfe}$
Бук лісовий	9.5	10.5	4.8
Дуб звичайний, рання форма	12.5	9.0	5.7

Так, наприклад, для ялинового лісу масу хвої визначаємо з допомогою виразу

$$F_l = \frac{R_f \cdot X_{ph}}{R_{tot}}.$$

Функція залежності інтенсивності фотосинтезу від середньомісячної температури повітря має вигляд [353, 368, 373]

$$F_T = 1.2 \exp[-0.0117 (T - T_{opt})^2], \quad (2.1)$$

де  $T_{opt}$  – оптимальна температура фотосинтезу, тобто експериментально визначене значення температури, при якій інтенсивність фотосинтезу є максимальною. Значення оптимальних температур фотосинтезу для деяких типів екосистем України наведено в табл. 2.2 (значення взято з [376, 202] та адаптовано для екосистем України).

Залежність інтенсивності фотосинтезу від концентрації вуглекислого газу в атмосфері має вигляд [179]

$$F_C = 1 + Z \beta \ln \left( \frac{C}{350} \right). \quad (2.2)$$

В табл. 2.3 наведено значення експериментально визначених параметрів виразу (2.2):  $\beta$  – фактор росту та  $Z$  – коефіцієнт для переходу від рівня окремих рослин, для яких визначали  $\beta$ , до рівня екосистем [179], для екосистем регіону, а на рис. 4.6 – показано сімейство відповідних кривих. Криві мають різний нахил, що відповідає різній чутливості екосистем до зміни концентрації атмосферного вуглекислого газу, яка найвища у листяних лісів, дещо менша у сінокосів та пасовищ і найменша у хвойних лісів та ріллі. Функція (2.2) побудована таким чином, що криві перетинаються в точці  $f_C(350) = 1$  (відповідає середній концентрації  $\text{CO}_2$  в атмосфері у ХХ ст.).

Таблиця 2.2. Оптимальна температура фотосинтезу для екосистем України

Екосистема	$T_{opt}, ^\circ\text{C}$
Листяні ліси	17.5
Хвойні ліси	16.0

Таблиця 2.3. Значення параметрів виразу (2.2): фактора росту –  $\beta$  та коефіцієнта переходу до рівня екосистем  $Z$ , для лісових екосистем областей (вибрано з [179])

Екосистема	$Z$	$\beta$
Листяні ліси помірної зони	0.6	0.71
Хвойні ліси помірної зони	0.6	0.57
Бореальні ліси	0.6	0.56

Функція кількості опадів має вигляд [353, 368, 373]  $F_p = 1 - \exp(-k_p P)$ , де  $k_p$  – коефіцієнт, який визначає чутливість інтенсивності фотосинтезу екосистеми до кількості опадів. Коефіцієнт вибрано таким чином, що кількості опадів 66 % від середньорічної  $f_p(66\%) = 0.95$ , а при кількості опадів, більшій середньорічної, значення функції приблизно рівне одиниці і не впливає на загальний результат ( $k_p = 0.075$ ). При від’ємних температурах вода від опадів не поступає в екосистеми, а накопичується, а при  $T > 0$  додається до поточних опадів.

Оптимальна температура фотосинтезу вибрана рівною нормальної температурі липня у відповідному рослинному поясі, що для букових лісів становить 17.2 °С, для дубових – 18.4 °С, а для ялинових – 15.4 °С. Калібрувальний коефіцієнт ( $\alpha_{ag}$ ) у моделі вуглецевого балансу букових лісів дорівнює 21.6, дубових – 19.8, ялинових – 6.

Потік фітомаса-опад з листя ( $v_{plf}$ ). Час опадання листя у букових лісах задається температурою повітря, яка зменшується ( $T_{lfb}$  – температура масового опадання,  $T_{lfe}$  – температура, при якій закінчується опадання листя; (див. табл. 2.1), а інтенсивність – кількістю листя, яке не опало [129, 133, 346, 357]:

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

Середньомісячні температури повітря, при яких відбувались основні фенологічні зміни в екосистемах букових та дубових лісів, наведено в табл. 2.1 (складено за даними спостережень в заповіднику “Розточчя” [379]).

Фітомасу розділяємо на складові (листя – позначено літерою  $f$ , стовбури і гілки діаметром більшим ніж 10 см –  $s$ , гілки діаметром меншим ніж 10 см –  $b$ , товсті корені –  $cr$ , тонкі корені –  $fr$ ; а також введено такі позначення: надземна частина деревостану –  $ab$ , підземна частина –  $bl$ , крона –  $kr$ , сума надземної і підземної частин –  $tot$ ) за допомогою регресійних виразів та співвідношень між ними [191, 306, 385, 387]

$$R_i = a_0^i A^{a_i^i}, \quad (2.3)$$

де  $a_0$  та  $a_1$  – регресійні коефіцієнти, значення яких представлено в табл. 2.4 (для обчислення фракції підземної частини бука використано коефіцієнти для дуба, оскільки коефіцієнти для бука не визначені). Крім того використані наступні співвідношення між регресійними виразами:

$$R_b = R_{kr} - R_f,$$

$$R_{fr} = R_f,$$

$$R_{cr} = R_{bl} - R_{fr},$$

$$R_s = R_{ab} - R_{kr}.$$

Потоки вуглецю з фітомаси, включаючи хвою, у відповідні резервуари підстилки визначаємо за допомогою виразу (адаптовано з [168])

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

де  $\alpha_i$  – калібрувальний коефіцієнт,  $dM$  – природний відпад деревостанів, а  $GS$  – запас стовбурної деревини, визначені у [283]. Величина  $Turn$  означає тривалість життя частин дерев, яка наведена в табл. 2.5 [168]. Для зручності запису приймаємо, що для стовбурів  $Turn = \infty$ .

Мінералізацію підстилки описуємо наступним виразом (адаптовано з [353]):

$$v_{lia} = kle \cdot F_{phi} \cdot F_{Tl} \cdot F_{Pl} \cdot X_i, \quad i = \{f, s, b, cr, fr\},$$

де  $kle$  – калібрувальний коефіцієнт,  $F_{phi}$  – залежність від кількості фітомаси [188]

$$F_{phi} = k_i + 0.5 k_i \exp \left( - \frac{9.21 \cdot X_{ph}}{0.065 \cdot GS} \right),$$

причому  $k = 0.045 - 0.42$  [373],  $F_{Tl}$  – залежність швидкості мінералізації від температури [373]

$$F_{Tl} = \begin{cases} \exp \left( \frac{\ln(Q_{10})}{10} T \right), & \text{якщо } T \leq T_{\max}, \\ \exp \left( \frac{\ln(Q_{10})}{10} T_{\max} \right), & \text{якщо } T > T_{\max}, \end{cases}$$

$Q_{10} = 2.25$  ( $Q_{10} = 2.13$  для ялинових) [273],  $F_{Pl}$  – залежність швидкості мінералізації від кількості води, яка визначається у підмоделі (див. нижче) [353, 368, 373]



$$F_{pl} = 1 - \exp(-0.017 P) .$$

Табл. 2.4. Значення регресійних коефіцієнтів [191]

	Бук*		Дуб		Ялина	
	$a_0$	$a_1$	$a_0$	$a_1$	$a_0$	$a_1$
$R_{ab}$	0.956	-0.068	1.039	-0.104	0.325	-0.087
$R_{bl}$	1.496	-0.698	1.496	-0.698	0.135	-0.147
$R_f$	1.899	-1.320	1.813	-1.279	1.702	-0.916
$R_{kr}$	1.040	-0.581	1.020	-0.555	0.641	-0.470

Таблиця 2.5. Тривалість життя частин дерев [168]

Частина дерева	Тривалість життя, років
Листя	1
Хвоя	9
Корені	50
Гілля	80

Мінералізацію органічної речовини ґрунту ( $v_{sa}$ ) описуємо таким же виразом, але з іншими параметрами, зокрема,  $Q_{10}=1.84$  ( $Q_{10}=1.71$  для ялинових) [273], та  $F_{ph}=1$ .

Для гуміфікації підстилки:  $v_{lis}=0.19 \cdot v_{lia}$ ,  $i=\{f, s, b, cr, fr\}$ . Прийнято, що гілки, корені і пні зрубаних дерев залишаються в лісі:  $v_{hli}=R_i \cdot Harv$ ,  $i=\{f, s, b, cr, fr\}$ ;  $v_{hls}=0.35 \cdot Harv$  для букових,  $v_{hls}=0.3 \cdot Harv$  для дубових і  $v_{hls}=0.2 \cdot Harv$  для ялинових, де  $Harv$  – кількість заготовленої стовбурної деревини за статистичними даними. Потік  $v_{sqa}$  введено для моделювання збільшення змивання органічної речовини ґрунту при господарській діяльності. В описаній версії математичної моделі цей потік встановлено постійним на рівні  $0.0004 \text{ кгС}/(\text{м}^2\text{рік})$ .

\* Для обчислення фракції підземної частини бука використано коефіцієнти для дуба.

### 2.1.3. Підмодель накопичення/танення снігу.

Зміну кількості снігу на поверхні ґрунту ( $m_s$ ) описуємо рівнянням [129, 133, 346, 357]

$$\frac{dm_s}{dt} = -\{v_a + v_p + v_w\} \cdot \{1 - \exp(-2 \cdot m_s)\} \cdot \gamma,$$

причому, функція  $\{1 - \exp(-2 \cdot m_s)\}$  дає можливість врахувати той факт, що лише поверхня снігу піддається інтенсивному впливу зовнішніх факторів, в лісі існують місця, які є закриті від прямого сонячного проміння, чи від попадання дощу, де залишки снігу затримується до літа;  $v_a$  – сніг, що розтанув завдяки теплообміну між снігом та повітрям (використано вираз для внутрішньої енергії ідеального газу)

$$v_a = \begin{cases} 3/2 (m_{air}/\mu) R \cdot T/\lambda, & \text{якщо } T > 0 \text{ та } m_s > 0, \\ 0, & \text{якщо } T \leq 0 \text{ або } m_s = 0, \end{cases}$$

де  $m_{air}$  – маса повітря в приземному шарі атмосфери (3000 м), кг;  $\mu$  – молярна маса повітря (0.029 кг/моль),  $R$  – молярна газова стала (8.314 Дж/(моль К)),  $T$  – температура повітря, °С;  $\lambda$  – питома теплота плавлення льоду ( $3.34 \times 10^5$  Дж/кг).

Складова  $v_p$  – сніг, що розтанув завдяки теплообміну між водою, яка надійшла з поточними опадами у вигляді дощу, та снігом, а також завдяки кінетичній енергії дощу

$$v_p = \begin{cases} \{C_w \cdot W_i \cdot (T + 5) + 0.5 \cdot W_i \cdot v^2\} / \lambda, & \text{якщо } T > 0 \text{ та } m_s > 0, \\ 0, & \text{якщо } T \leq 0 \text{ або } m_s = 0, \end{cases}$$

де  $C_w$  – питома теплоємність води ( $4.3 \cdot 10^3$  Дж/(кг К)),  $W_i$  – опади, кг/м<sup>2</sup>,  $v$  – середня вертикальна швидкість крапель дощу біля поверхні землі (6.5 м/с [142]).

Складова  $v_{SR}$  – сніг, що розтанув завдяки нагріванню сонячним випромінюванням

$$v_{SR} = \begin{cases} SR \cdot (1 - \alpha) / \lambda, & \text{якщо } T > 0 \text{ та } m_s > 0, \\ 0, & \text{якщо } T \leq 0 \text{ або } m_s = 0, \end{cases}$$

де –  $SR$  сонячна радіація, Вт/(м<sup>2</sup>рік),  $\alpha$  – альbedo лісу (0.15).

Величина  $v_{wt}$  – сніг, який вивірюється та здувається вітром,  $v_{wt} = 0.1 \cdot m_s$ .

В рівняння також входить коефіцієнт розмірності  $\gamma=1 \text{ c}^{-1}$ .

Кількість води, яка є доступною в екосистемі та впливає на інтенсивність процесів кругообігу вуглецю,  $W_a$ , визначаємо виразом:

$$W_a = \begin{cases} W_i + v_a + v_p + v_{SR} - v_{wt}, & \text{якщо } T > 0 \text{ та } m_s > 0, \\ W_i, & \text{якщо } T > 0 \text{ або } m_s = 0, \\ 0, & \text{якщо } T \leq 0. \end{cases}$$

На рис. 2.2 зображено сезонну динаміку кількості опадів та доступної води в екосистемі букового лісу. Вода є недоступною для екосистеми в замороженому стані (грудень, січень, лютий і частина березня). В березні починається інтенсивне танення снігу, яке продовжується до початку червня (сніг у лісі затримується довше, ніж на відкритій місцевості, оскільки дерева зменшують вплив сонячного випромінювання та дощу). Це веде до істотного збільшення кількості води в березні-травні. З червня по листопад кількість доступної води в екосистемах визначається кількістю опадів (рис. 2.2). Динаміка доступної води у лісових екосистемах відповідає даним гідрометеорологічних спостережень [352] та описів [350].

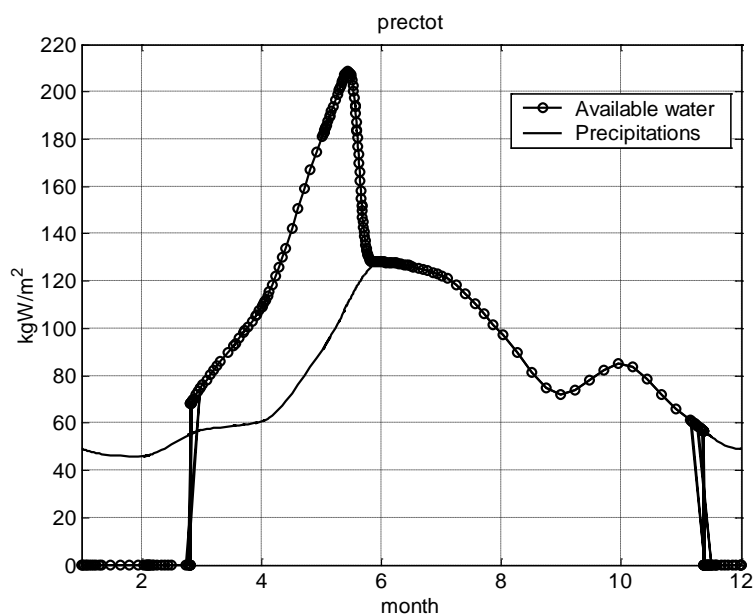


Рис. 2.2. Кількість опадів та кількість доступної води в екосистемі букового лісу

### 2.1.4. Калібрування та перевірка моделей.

Для калібрування та перевірки моделі букового лісу використано дані вимірювань з чотирьох пробних ділянок букового лісу різного віку – 33, 48, 75 і 100 років [351]. В процесі калібрування контролюємо фітомасу (рис. 2.3) та нетто приріст (рис. 2.4). Запас вуглецю у підстилці та органічній речовині ґрунту змінюється в незначних межах. Середньоквадратичне відхилення фітомаси складає 20 %, а приросту фітомаси – 34% (табл. 2.6).

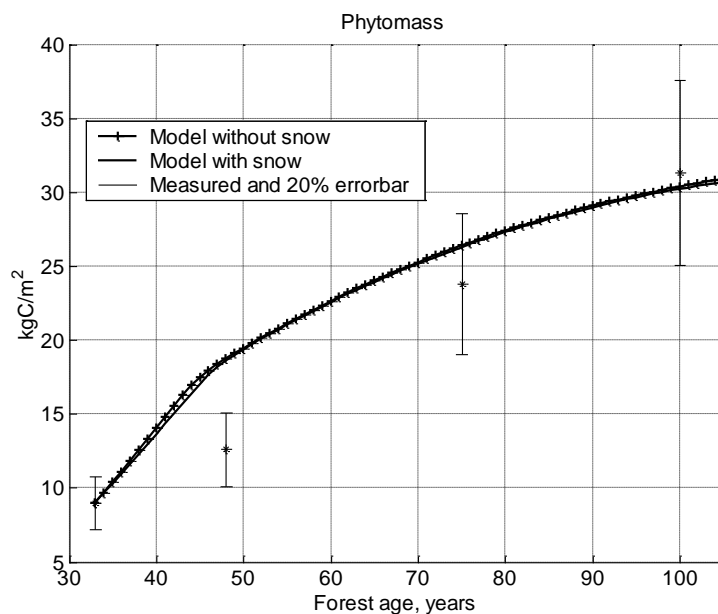


Рис. 2.3. Виміряний вуглець фітомаси екосистем букового лісу з 20 % інтервалом та модельований

Для калібрування та перевірки моделі дубового лісу використано дані вимірювань з чотирьох пробних ділянок дубового лісу різного віку – 33, 54, 75 і 106 років [378]. Середньоквадратичне відхилення фітомаси складає 16%, а приросту фітомаси – 24% (табл. 2.6).

Для калібрування та перевірки моделі ялинового лісу використано дані вимірювань з чотирьох пробних ділянок ялинового лісу різного віку – 35, 50, 80 і 120 років [341]. Середньоквадратичне відхилення фітомаси складає 21 %, а приросту фітомаси – 27% (табл. 2.7).

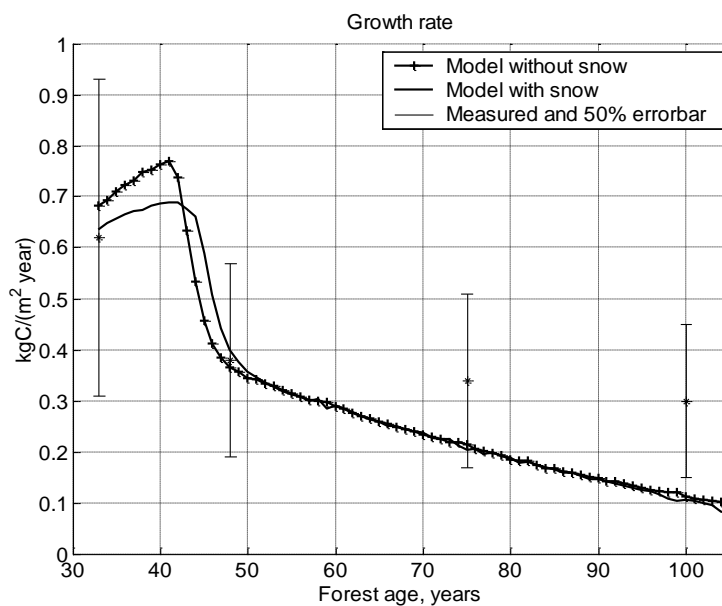


Рис. 2.4. Вимірний приріст фітомаси екосистем букового лісу з 50 % інтервалом та модельований

У випадку букового лісу модельований потік вуглецю з фітомаси у підстилку (процес відмирання) майже вдвічі більший, ніж визначений на експериментальних ділянках. Причина криється в тому, що в моделі використано припущення, згідно з яким щороку відмирає все дрібне коріння [168], що складає приблизно  $0.7 \text{ кгC}/(\text{м}^2\text{рік})$  проти  $0.34 \text{ кгC}/(\text{м}^2\text{рік})$  за даними вимірювань. Вимірювання дихання ґрунту та підстилки в екосистемах Карпатського регіону є нечисленними та нерегулярними. Згідно з вимірюваннями дихання підстилки є менш інтенсивним, ніж дихання ґрунту. Але за літературними даними гуміфікація підстилки складає 2-50 % від мінералізації підстилки, тому дихання підстилки мало б бути інтенсивнішим, ніж дихання ґрунту, інакше буде відбуватись швидка втрата органічного вуглецю ґрунту. Модельована первинна продукція майже вдвічі більша, ніж експериментально визначена. Причиною цього є величина потоку з фітомаси у підстилку.

Модель переоцінює приріст фітомаси у віці 35-40 років і недооцінює у віці 80-100 років. Як наслідок, модельований запас вуглецю фітомаси переоцінений у віці 40-50 років.

## 2.2. Моделювання вуглецевого балансу лісових екосистем

Нижче описано результати числових експериментів з розробленими та програмно реалізованими математичними моделями букового, дубового та ялинового лісів описаними вище). Експерименти полягають в тому, що досліджується вуглецевий баланс екосистем за різних сценаріїв зміни клімату (температура, кількість опадів) та концентрації вуглекислого газу в атмосфері. Для екосистем букового, дубового та ялинового лісів розглядається зміна запасу вуглецю із зміною віку деревостану (від 33-35 років до 108-110 років).

### 2.2.1. Результати моделювання сезонної та вікової динаміки вуглецю в екосистемі букового лісу за теперішнього клімату.

Кількість зеленої фітомаси (фотосинтезуючі органи) різко зростає у квітні-серпні від початкового нульового значення до максимального  $0.2 \text{ кгC}/\text{м}^2$ , і так само різко зменшується осінню до початкового значення, що відображає фенологічні зміни в екосистемах листяних лісів. З віком кількість вуглецю в листі зростає від  $0.2 \text{ кгC}/\text{м}^2$ , досягаючи максимуму у віці 47 р., після чого лінійно зменшується до  $0.17 \text{ кгC}/\text{м}^2$  в сторічному віці, що відповідає віковим змінам у деревостані.

Кількість підстилки дещо збільшується ранньою весною від початкового значення  $1.2 \text{ кгC}/\text{м}^2$  до максимального  $1.3 \text{ кгC}/\text{м}^2$  за рахунок відмерлої деревини, коли інтенсивність розкладу підстилки невелика через низьку температуру та недостатню кількість води, зменшується у квітні-вересні до мінімуму ( $0.8 \text{ кгC}/\text{м}^2$ ) і різко зростає у вересні-жовтні за рахунок опалого листя і повільніше в листопаді-січні за рахунок відмерлої деревини та коренів, повертаючись до початкового значення (рис. 2.5).

На рис. 2.6 наведено графік вікової динаміки запасу вуглецю підстилки.

Кількість вуглецю органічної речовини ґрунту різко зростає у березні-червні, коли відбувається інтенсивна трансформація підстилки (зростає температура повітря, а також таниє сніг, збільшуючи кількість доступної води; в цей же час температура ґрунту ще низька і мінералізація гумусу незначна),

досягаючи максимального значення  $7.535 \text{ кгС/м}^2$  у червні (рис. 2.7). Зменшення органічної речовини ґрунту у липні-листопаді пов'язане з прогріванням ґрунту та інтенсифікацією процесів мінералізації.

Таблиця 2.6. Порівняння результатів моделювання та вимірювань на пробних ділянках

Буковий ліс						
	Вік, років	33	48	75	100	Середньо-квадратичне відхилення, %
Фітомаса, $\text{кгС/м}^2$	Виміряна	8.97	12.61	23.14	31.28	20
	Моделювана	9.00	18.57	26.28	30.20	
	Відхилення	0.03	5.96	3.14	1.08	
Приріст, $\text{кгС/м}^2\text{рік}$	Виміряний	0.62	0.38	0.34	0.30	34
	Моделюваний	0.64	0.40	0.20	0.11	
	Відхилення	0.02	0.02	0.14	0.19	
Дубовий ліс						
	Вік, років	33	54	75	106	Середньо-квадратичне відхилення, %
Фітомаса, $\text{кгС/м}^2$	Виміряна	5.40	8.70*	11.56*	13.67*	16
	Моделювана	5.40	10.05	12.99	15.58	
	Відхилення	0.00	1.35	1.43	1.91	
Приріст, $\text{кгС/м}^2\text{рік}$	Виміряний	0.36	0.17	0.16	0.11	24
	Моделюваний	0.34	0.16	0.12	0.05	
	Відхилення	0.02	0.01	0.04	0.06	
Ялиновий ліс						
	Вік, років	35	50	80	120	Середньо-квадратичне відхилення, %
Фітомаса, $\text{кгС/м}^2$	Виміряна	4.90	9.60	12.50	15.10	21
	Моделювана	4.90	7.85	13.50	18.37	
	Відхилення	0.00	1.75	1.00	3.27	
Приріст, $\text{кгС/м}^2\text{рік}$	Виміряний	0.25	0.14	0.13	0.12	27
	Моделюваний	0.24	0.20	0.16	0.08	
	Відхилення	0.01	0.06	0.03	0.04	

\* Значення приведені до повноти деревостану 0.79.

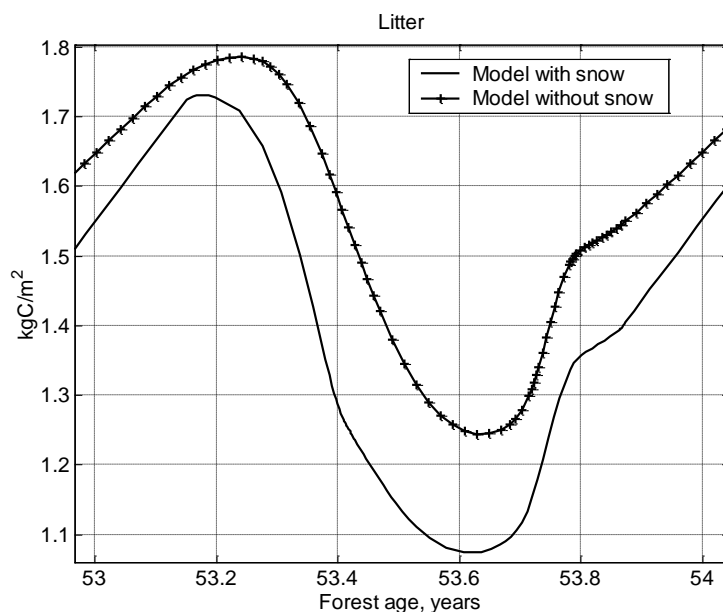


Рис. 2.5. Сезонна зміна запасу вуглецю підстилки букового лісу

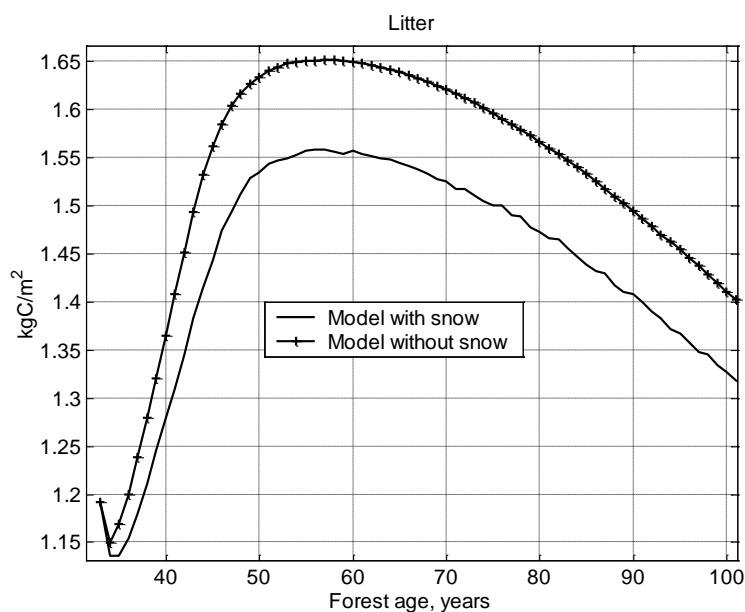


Рис. 2.6. Зміна запасу вуглецю підстилки з віком деревостану

На рис. 2.8 представлено зміну кількості вуглецю органічної речовини ґрунту з віком деревостану. Характерно, що врахування ефекту накопичення та танення снігу сприяє депонуванню більшої кількості вуглецю органічної речовини ґрунту протягом 100 років росту деревостану –  $9.2 \text{ кг/м}^2$  проти  $8.4 \text{ кг/м}^2$ .



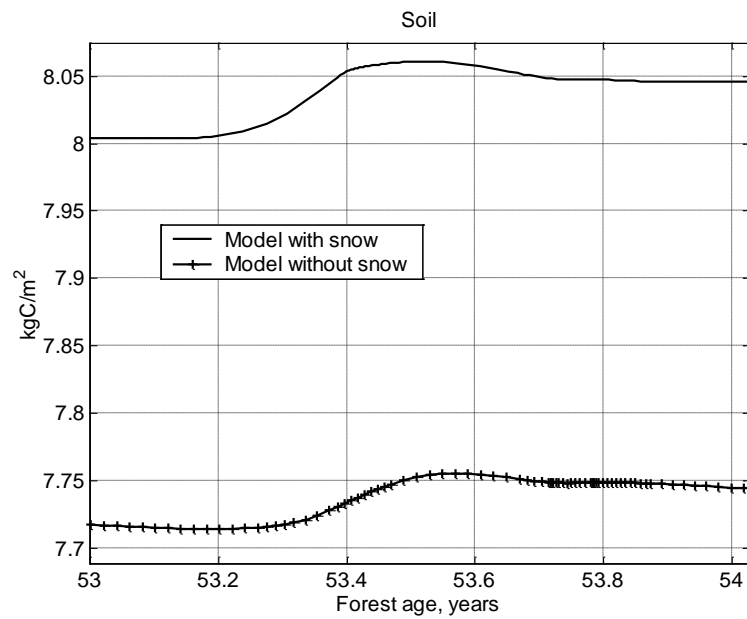


Рис. 2.7. Сезонна динаміка вуглецю органічної речовини ґрунту букового лісу

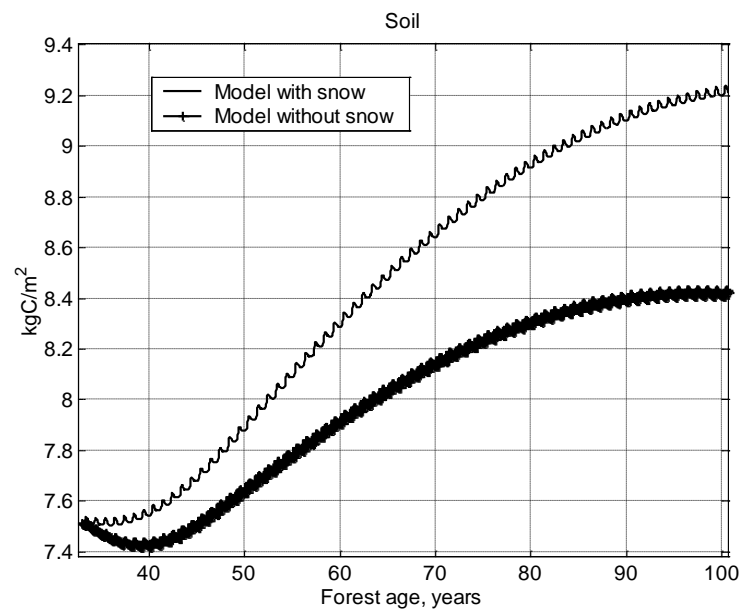


Рис. 2.8. Вуглець органічної речовини ґрунту, зміна з віком деревостану

### 2.2.2. Сценарії зміни температури, кількості опадів та концентрації вуглекислого газу в атмосфері

Для дослідження вуглецевого балансу лісових екосистем України при зміні клімату використано підхід, запропонований у [346, 353]. Сформовано базові

сценарії таких змін клімату (під кліматом мається на увазі лише температура та опади):

- Встановлені значення температури та опадів при подвоєному вмісті вуглекислого газу в атмосфері (700 ppmv). Такий режим може встановитись за деякий час після стабілізації атмосферного CO<sub>2</sub>.
- Температура та опади змінюються разом із зміною концентрації вуглекислого газу в атмосфері від 350 ppmv на початку моделювання до 700 ppmv через 75 р. Такий режим є більш реальним, оскільки тут явно враховані зміни факторів навколишнього середовища з часом, але кількість даних є обмеженою у зв'язку із складністю моделювання.

Базові сценарії зміни температури та кількості опадів будуюмо за даними [342], на основі моделювання клімату при подвоєному вмісті CO<sub>2</sub> в атмосфері за допомогою математичних моделей загальної циркуляції атмосфери CCCM, GISS, GFDL, UKMO, прив'язаних до метеорологічної мережі України. Сценарії побудовано на основі результатів усіх моделей. Для цього визначено середні значення температури та опадів (базові), мінімальні та максимальні для кожного місяця (табл. 2.7 та табл. 2.8, а також рис. 2.9 і рис. 2.10).

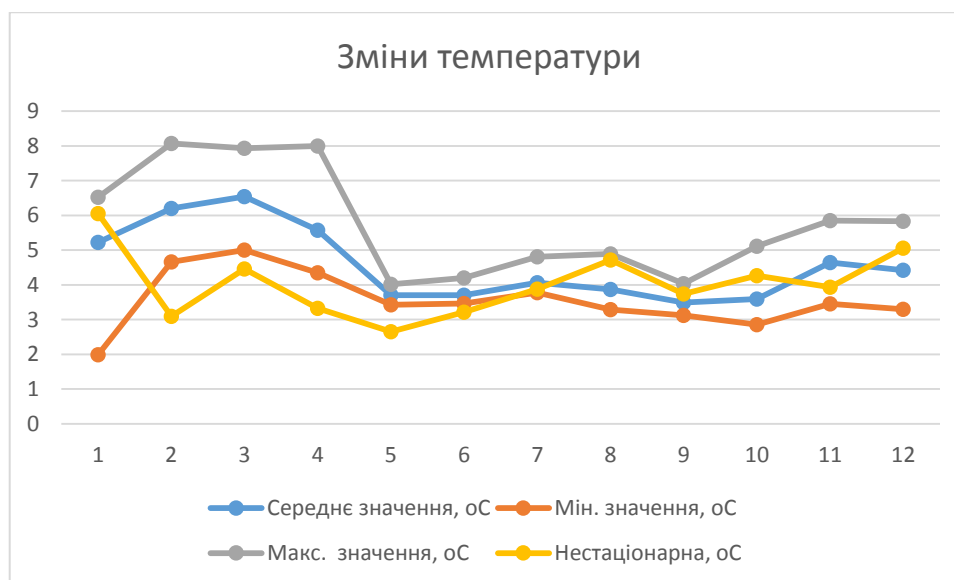


Рис. 2.9. Зміни температури в Україні, °C, за сценаріями при подвоєному вмісті CO<sub>2</sub> в атмосфері (мінімальні зміни, середні та максимальні), а також нестационарної моделі через 70 років після початку моделювання

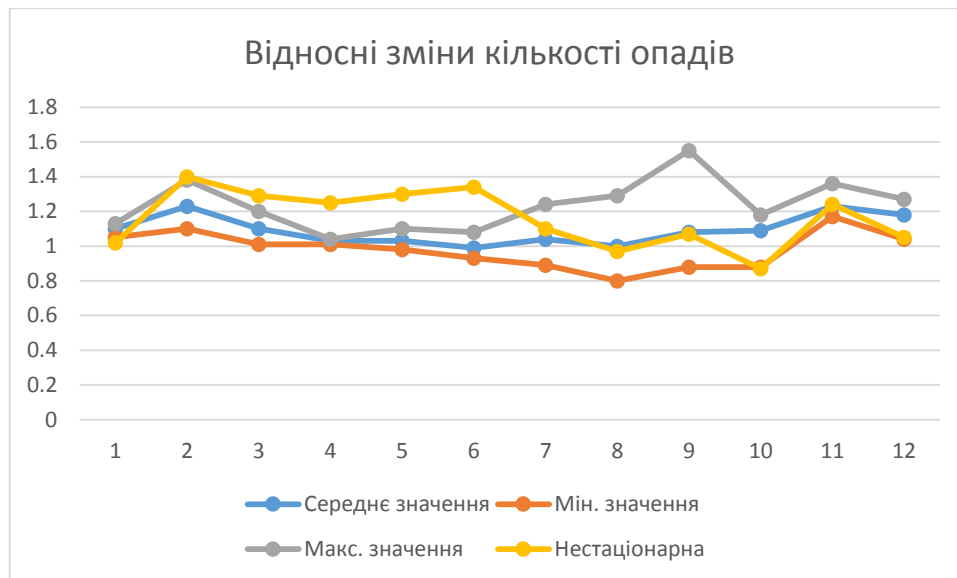


Рис. 2.10. Відносні зміни опадів в Україні за сценаріями при подвоєному вмісті  $\text{CO}_2$  в атмосфері (мінімальні зміни, середні та максимальні), а також нестаціонарної моделі через 70 років після початку моделювання

У стаціонарному стані максимальна різниця температур повітря, обчислених за допомогою використаних моделей, складає  $4.53\text{ }^\circ\text{C}$  для січня ( $\pm 44\%$ ) від середнього значення. Для відношення кількостей опадів максимальна різниця складає 0.67 у вересні ( $\pm 33\%$  від середнього значення).

Таблиця 2.7. Різниця середньомісячних температур ( $T_{2\times\text{CO}_2} - T_{\text{CO}_2}$ ),  $^\circ\text{C}$ , за результатами моделей CCCM, GISS, GFDL, UKMO [342], а також середнє, мінімальне та максимальне значення сценаріїв температури в середньому по Україні при подвоєному вмісті  $\text{CO}_2$  в атмосфері [353].

Модель/ Місяць	$T_{2\times\text{CO}_2} - T_{\text{CO}_2}$ , $^\circ\text{C}$				Середнє значення, $^\circ\text{C}$	Мін. значення, $^\circ\text{C}$	Макс. значення, $^\circ\text{C}$
	CCCM	GISS	GFDL	UKMO			
Січень	6.52	6.52	1.99	5.85	5.22	1.99	6.52
Лютий	6.04	6.04	4.66	8.07	6.20	4.66	8.07
Березень	6.62	6.62	5.00	7.93	6.54	5.00	7.93
Квітень	4.35	4.35	5.59	8.00	5.57	4.35	8.00
Травень	3.43	3.43	3.92	4.02	3.70	3.43	4.02
Червень	3.46	3.46	4.20	3.67	3.70	3.46	4.20
Липень	3.78	3.78	4.81	3.85	4.06	3.78	4.81
Серпень	3.29	3.29	4.89	3.99	3.87	3.29	4.89
Вересень	3.40	3.40	3.12	4.03	3.49	3.12	4.03
Жовтень	2.85	2.85	3.54	5.11	3.59	2.85	5.11
Листопад	3.45	3.45	5.82	5.85	4.64	3.45	5.85
Грудень	3.30	3.30	5.24	5.83	4.42	3.30	5.83

Для визначення температури та кількості опадів в нестационарному стані використано дані, наведені в [342], отримані на основі моделювання реакції кліматичної системи на поступове зростання вмісту CO<sub>2</sub> в атмосфері за допомогою нестационарної моделі GFDL та прив'язані до метеорологічної мережі України. Температуру та кількість опадів представлено по десятиріччях (табл. 2.9). Вважаємо, що між ключовими точками величини змінюються лінійно. Концентрація вуглекислого газу в атмосфері змінюється від 350 ppmv до 700 ppmv, враховуючи сезонну залежність, цю зміну описуємо виразом [353]

$$C_{tran} = \exp\left(\frac{t}{108.2}\right) F_{CO_2}(t),$$

де  $F_{CO_2}$  реалізує інтерполяцію кубічними сплайнами між відповідними вузлами (середньомісячними даними).

Таблиця 2.8. Відношення середніх місячних кількостей опадів ( $R_{2xCO_2}/R_{CO_2}$ ) за результатами моделей CCCM, GISS, GFDL, UKMO [342], а також середнє, мінімальне та максимальне значення сценаріїв кількості опадів в середньому по Україні при подвоєному вмісті CO<sub>2</sub> в атмосфері [353].

Модель/ Місяць	$R_{2xCO_2}/R_{CO_2}$				Середнє значення	Мін. значення	Макс. значення
	CCCM	GISS	GFDL	UKMO			
Січень	1.13	1.13	1.09	1.05	1.10	1.05	1.13
Лютий	1.10	1.10	1.38	1.33	1.23	1.10	1.38
Березень	1.09	1.09	1.20	1.01	1.10	1.01	1.20
Квітень	1.03	1.03	1.01	1.04	1.03	1.01	1.04
Травень	0.98	0.98	1.05	1.10	1.03	0.98	1.10
Червень	0.93	0.93	1.08	1.00	0.99	0.93	1.08
Липень	0.89	0.89	1.24	1.15	1.04	0.89	1.24
Серпень	0.80	0.80	1.12	1.29	1.00	0.80	1.29
Вересень	0.88	0.88	1.55	1.02	1.08	0.88	1.55
Жовтень	1.18	1.18	1.10	0.88	1.09	0.88	1.18
Листопад	1.17	1.17	1.21	1.36	1.23	1.17	1.36
Грудень	1.27	1.27	1.04	1.15	1.18	1.04	1.27

Таблиця 2.9. Різниця середньомісячних температур ( $T_{2xCO_2} - T_{CO_2}$ ), °C, та відношення середніх місячних кількостей опадів ( $R_{2xCO_2}/R_{CO_2}$ ) за результатами нестационарної моделі GFDL в середньому по Україні, при поступовому збільшенні вмісту  $CO_2$  в атмосфері від 350 ppmv до 700 ppmv [342].

Показник/ період, років	$T_{2xCO_2} - T_{CO_2}$ , °C			$R_{2xCO_2}/R_{CO_2}$		
	0-10	30-40	70-80	0-10	30-40	70-80
Місяць						
Січень	1.17	3.79	6.05	0.85	0.95	1.02
Лютий	1.80	2.16	3.09	1.18	1.15	1.40
Березень	3.41	3.71	4.46	1.06	1.25	1.29
Квітень	1.45	1.99	3.32	1.08	0.89	1.25
Травень	-0.02	1.12	2.65	1.17	1.20	1.30
Червень	0.37	1.87	3.21	1.30	1.27	1.34
Липень	-0.60	0.63	3.88	1.44	1.48	1.10
Серпень	0.39	2.25	4.72	1.09	0.96	0.97
Вересень	2.12	2.42	3.74	1.03	0.80	1.07
Жовтень	1.91	2.56	4.26	0.76	0.95	0.87
Листопад	0.78	1.68	3.93	1.19	1.20	1.24
Грудень	1.23	2.53	5.06	0.97	0.93	1.05
Середнє за рік	1.17	2.22	4.03	1.06	1.07	1.15

### 2.2.3. Прогнозування вуглецевого балансу лісових екосистем Карпатського регіону України при зміні клімату та концентрації вуглекислого газу в атмосфері

Узагальнені результати числових експериментів по прогнозуванню вуглецевого балансу лісових екосистем Карпатського регіону України при зміні клімату та концентрації вуглекислого газу в атмосфері в кінці дослідження (через 75 р.) представлено в табл. 2.10 та табл. 2.11. В табл. 2.11 наведено зміну сумарного вуглецевого балансу та умови моделювання, в табл. 2.11 – запас вуглецю в компонентах екосистем та відносну зміну запасу.

Таблиця 2.10. Опис умов для числових експериментів із створеними моделями, а також модельовані зміни у сумарному запасі вуглецю, %, по відношенню до запасу вуглецю у відповідній системі у початковий момент часу (чисельник) і незміненого клімату (знаменник).

№ з/п	Сценарій зміни клімату	Концентрація CO <sub>2</sub> , ppmv	Максимальні зміни у сумарному вуглецевому балансі екосистем відносно початкового значення (чисельник) і незміненого клімату (знаменник), %		
			Буковий ліс	Дубовий ліс	Ялиновий ліс
1	Незмінений	350	$\frac{135.9}{0.0}$	$\frac{89.5}{0.0}$	$\frac{54.1}{0.0}$
2	Середній стаціонарний	700	$\frac{118.1}{-17.8}$	$\frac{80.8}{-8.7}$	$\frac{39.4}{-14.7}$
3	Мінімальний стаціонарний	700	$\frac{122.3}{-13.6}$	$\frac{83.0}{-6.5}$	$\frac{43.5}{-10.6}$
4	Максимальний стаціонарний	700	$\frac{115.4}{-20.5}$	$\frac{77.8}{-11.7}$	$\frac{34.6}{-19.5}$
5	Нестаціонарний	Поступова зміна від 350 до 700	$\frac{123.1}{-12.8}$	$\frac{84.4}{-5.1}$	$\frac{45.2}{-9.2}$

Хоча збільшення температури повітря, кількості опадів та концентрації вуглекислого газу в атмосфері ведуть до покращення умов продукування фітомаси, накопичення вуглецю відбувається у блоках “фітомаса” (у всіх розглянутих екосистемах), “підстилка” (втрати у всіх лісових екосистемах) та “органічна речовина ґрунту”, оскільки в той же час посилюються процеси розкладу мертвої органічної речовини, що в результаті, в загальному, може викликати втрати вуглецю системою (табл. 2.10). В лісових екосистемах найбільш вразливим елементом вуглецевого балансу є ґрунт та підстилка.

Згідно з результатами імітаційного моделювання всі сценарії зміни клімату, які розглядаються в цій роботі, передбачають втрату вуглецю лісовими екосистемами – від 5.1% дубовим лісом при нестаціонарному сценарії до 20.5% буковим лісом при максимальному стаціонарному. Вклад фітомаси у сумарний вуглецевий баланс є суттєвим для екосистем лісів (біля 1/3). Приріст фітомаси лісів збільшиться при всіх сценаріях – від 0.2% в екосистемі ялинового лісу при всіх сценаріях, крім максимального стаціонарного, до 4.7% в екосистемі дубового лісу при всіх сценаріях.

Таблиця 2.11. Запас вуглецю у компонентах екосистем та зміна запасу відносно теперішнього клімату при різних сценаріях зміни клімату

Сценарій зміни клімату	Запас вуглецю, кг С			Зміна запасу відносно незміненого клімату, %		
	фітомаса	підстилка	грунт	фітомаса	підстилка	грунт
<u>Буковий ліс</u>						
Незмінений	31.2	1.27	9.27			
середній стаціонарний	31.72	0.87	6.01	1.67	-31.50	-35.17
мінімальний стаціонарний	31.75	1.02	6.57	1.76	-19.69	-29.13
максимальний стаціонарний	31.75	0.71	5.65	1.76	-44.09	-39.05
нестаціонарний	31.75	0.84	6.98	1.76	-33.86	-24.70
<u>Дубовий ліс</u>						
незмінений	15.6	0.37	6.84			
середній стаціонарний	16.34	0.25	5.18	4.74	-32.43	-24.27
мінімальний стаціонарний	16.34	0.28	5.40	4.74	-24.32	-21.05
максимальний стаціонарний	16.34	0.21	4.86	4.74	-43.24	-28.95
нестаціонарний	16.34	0.24	5.68	4.74	-35.14	-16.96
<u>Ялиновий ліс</u>						
незмінений	17.46	1.80	24.16			
середній стаціонарний	17.5	1.37	20.37	0.23	-23.89	-15.69
мінімальний стаціонарний	17.5	1.57	21.30	0.23	-12.78	-11.84
максимальний стаціонарний	17.51	1.12	19.15	0.29	-37.78	-20.74
нестаціонарний	17.51	1.30	22.15	0.29	-27.78	-8.32

Всі розглянуті сценарії ведуть до втрати вуглецю підстилкою – від 12% в екосистемі ялинового лісу, при мінімальному стаціонарному сценарії, до 44.09 % в екосистемі букового лісу, при максимальному стаціонарному. Також при всіх сценаріях зміни клімату відбувається втрата органічного вуглецю ґрунту – від 8.32% в ялиновому лісі, при нестаціонарному сценарії, до 39.05% в буковому лісі, при максимальному стаціонарному (табл. 2.11).

Вуглецевий баланс екосистем листяних лісів є найменш чутливий до сценарію зміни клімату, різниця у модельованому сумарному вуглецевому балансі складає лише 7.7% для букового лісу (рис. 2.11 та табл. 2.11) і 6.6% для дубового лісу (рис. 2.12 та табл. 2.11).

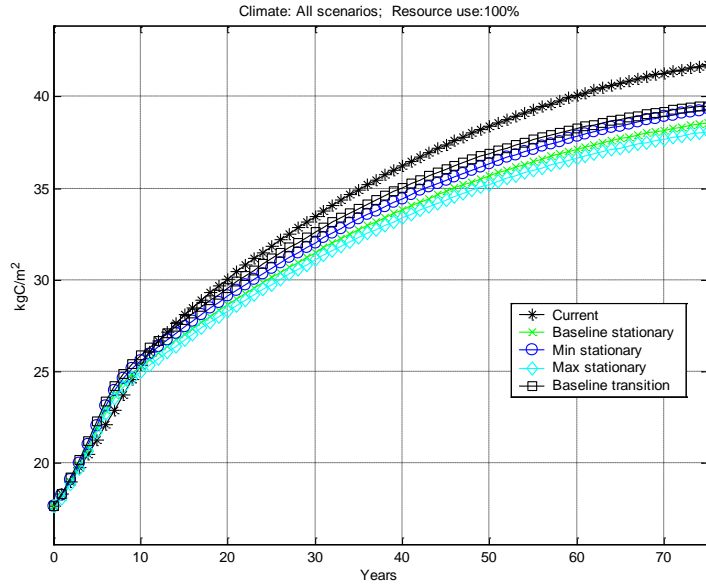


Рис. 2.11. Зміна сумарного запасу вуглецю в екосистемі букового лісу при різних сценаріях зміни клімату

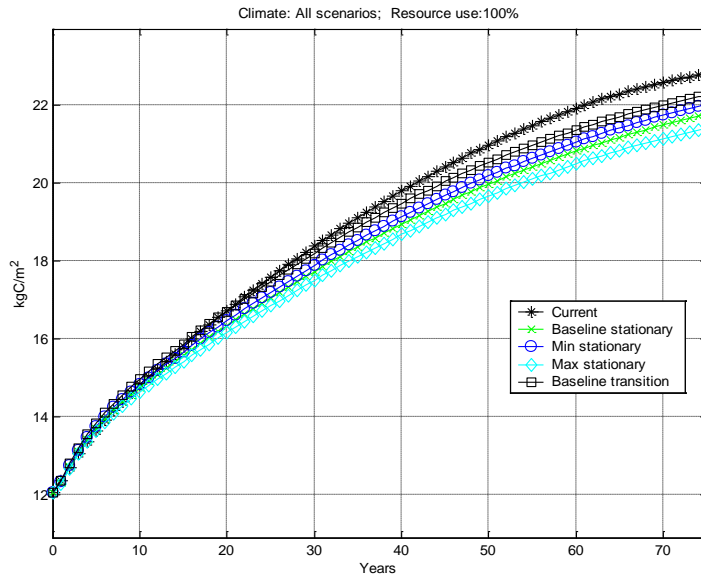


Рис. 2.11. Зміна сумарного запасу вуглецю в екосистемі дубового лісу при різних сценаріях зміни клімату



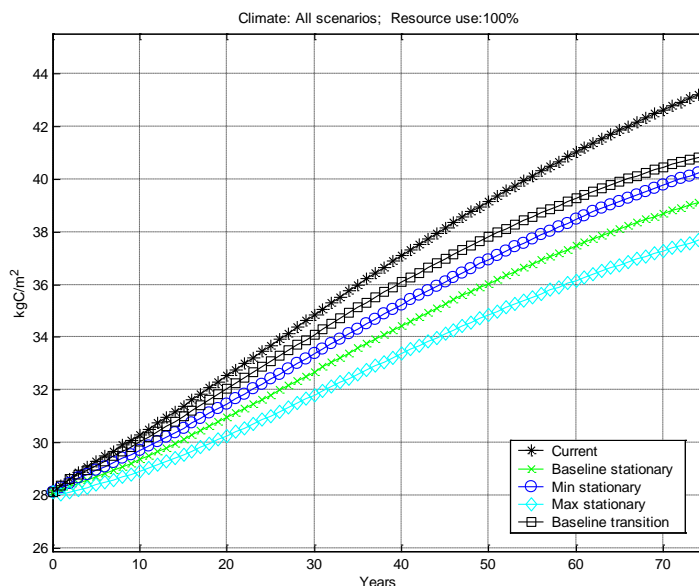


Рис. 2.13. Зміна сумарного запасу вуглецю в екосистемі ялинового лісу при різних сценаріях зміни клімату

Вуглецевий баланс екосистем ялинового лісу є більш чутливий до сценарію зміни клімату, ніж екосистеми листяних лісів, різниця у модельованому сумарному вуглецевому балансі складає 10.3% (рис. 2.13 та табл. 2.10).

#### 2.2.4. Прогнозування вуглецевого балансу екосистем дубових лісів у регіонах України за різних сценаріїв зміни клімату

Метою такого дослідження є оцінка реакції екосистем дубових лісів в областях, які представляють географічні зони (Чернігівська область – полісся, Черкаська – лісостеп і Запорізька – степ) [354], на прогнозовану зміну клімату.

- ліс (дубовий ліс), середні дані про дубові ліси в областях за [372].

**Дубовий ліс.** Чисту первинну продукцію та опад визначено за даними інвентаризації лісів. Для можливості порівняння в усіх областях розглянуто динаміку вуглецевого балансу деревостанів 1 бонітету у віці від 33 до 108 років. Коефіцієнт гуміфікації мертвої органічної речовини (0.12) взято з [349], а коефіцієнти мінералізації фракцій мертвої органічної речовини з [101, 168].

**Кліматичні дані.** Одними з параметрів розглянутих моделей є кліматичні – середньомісячна температура та кількість опадів. Для моделювання вуглецевого балансу за теперішніх умов використовуємо дані, усереднені за багато років “норми”. Здійснено інтерполяцію середньомісячних даних [101], щоб отримати неперервну змінну, яка необхідна для розв’язування диференціальних рівнянь.

Середньомісячна температура в Запорізькій області, яка представляє степ, є вищою протягом всього року, а температура в Чернігівській області, яка представляє Полісся, є найнижчою. Температура в Черкаській області (лісостеп) знаходиться в середині сформованого інтервалу, ближче до значень Чернігівської області (рис. 2.14). Натомість в Запорізькій області випадає найменше опадів в літні місяці, але найбільше в січні та грудні. Крім того мінімальне значення кількості опадів у травні є у Черкаській області. У Чернігівській області випадає найбільше опадів протягом усього року, крім січня та грудня (рис. 2.15) [354].

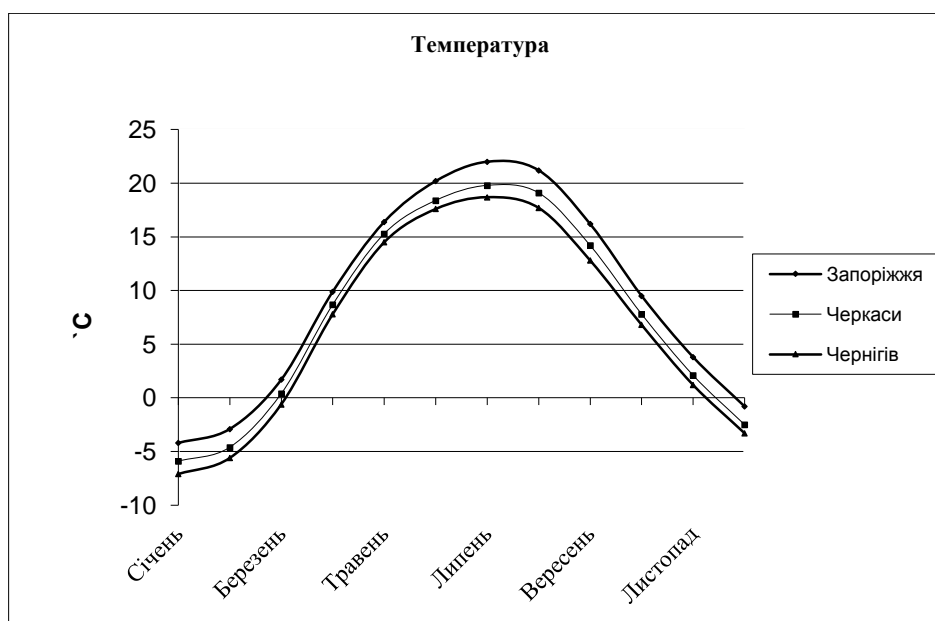


Рис. 2.14. Нормальна середньомісячна температура повітря у Запорізькій, Черкаській та Чернігівській областях

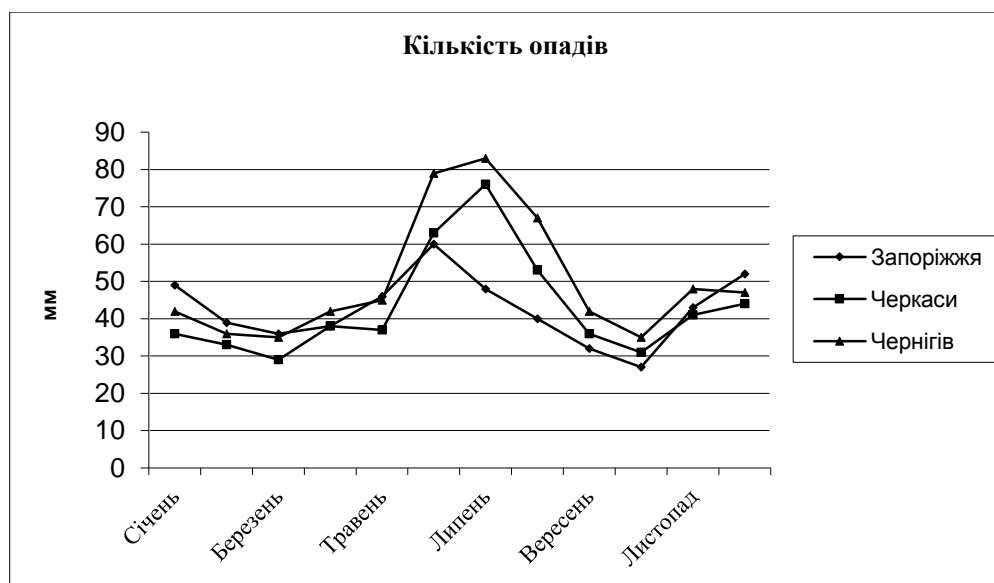


Рис.2.15. Нормальна середньомісячна кількість опадів у Запорізькій, Черкаській та Чернігівській областях

Для прогнозування вуглецевого балансу екосистем сформовано сценарії зміни кліматичних параметрів (температури та опадів). Розглянуто два випадки:

- 1) Встановлені значення температури та опадів при подвоєному вмісті вуглекислого газу в атмосфері (700 ppmv). Такий режим може встановитись за деякий час після стабілізації атмосферного CO<sub>2</sub>.
- 2) Температура та опади змінюються разом із зміною концентрації вуглекислого газу в атмосфері від 350 ppmv на початку моделювання до 700 ppmv через 75 р. Такий режим є більш реальним, оскільки тут явно враховані зміни факторів навколишнього середовища з часом, але кількість даних є обмеженою у зв'язку із складністю моделювання.

При побудові сценаріїв використано дані [381] на основі моделювання клімату при подвоєному вмісті CO<sub>2</sub> в атмосфері за допомогою математичних моделей загальної циркуляції атмосфери CCCM, GISS, GFDL, UKMO, прив'язаних до метеорологічної мережі України.

Створено чотири сценарії зміни клімату, три – за стаціонарними моделями: усереднених змін – (*base*), мінімальних змін (*min*) і максимальних змін (*max*); та

один – за результатами нестационарної моделі загальної циркуляції атмосфери (*tran*). Алгоритм побудови сценаріїв взято з [353] і описано в п.2.2.2. Натомість для здійснення описаних нижче досліджень було відібрано дані про зміни клімату для полісся, лісостепу та степу.

Стаціонарні сценарії передбачають збільшення температури повітря протягом року у трьох областях, натомість згідно зі сценарієм *tran* температура на поліссі та лісостепу знизиться у травні-липні в першу декаду і поступово зростатиме в наступні. Характер зміни опадів значно складніший. За різними сценаріями можливе, як збільшення, так і зменшення кількості опадів, зміщуються максимуми та мінімуми (рис. 2.16 – рис. 2.23).

У Чернігівській області розкид прогнозованої середньомісячної температури складає від 1.02°C в червні в середині інтервалу моделювання до 12.7 °C у січні на 75 році; розкид середньомісячної кількості опадів – від 2.8 мм у березні в першій половині інтервалу моделювання до 39.48 мм у вересні на середині інтервалу моделювання.

У Черкаській області цей розкид становить для температури від 0.6 °C у травні в середині інтервалу моделювання до 13.2 °C у січні на 75 році; розкид кількості опадів – від 2.9 мм у березні в першій половині інтервалу моделювання до 38.76 мм у липні в першій декаді.

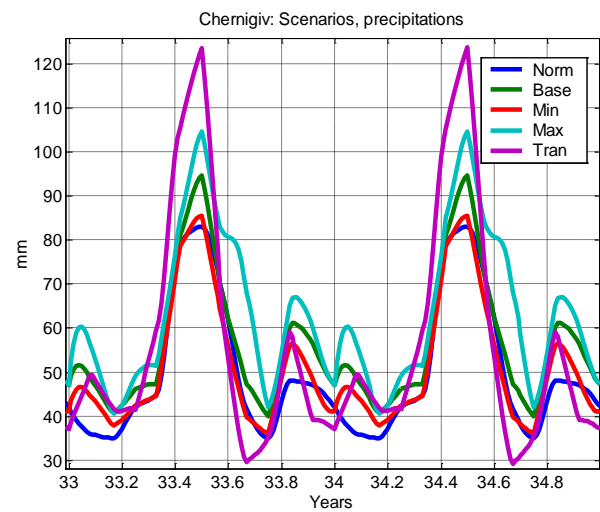
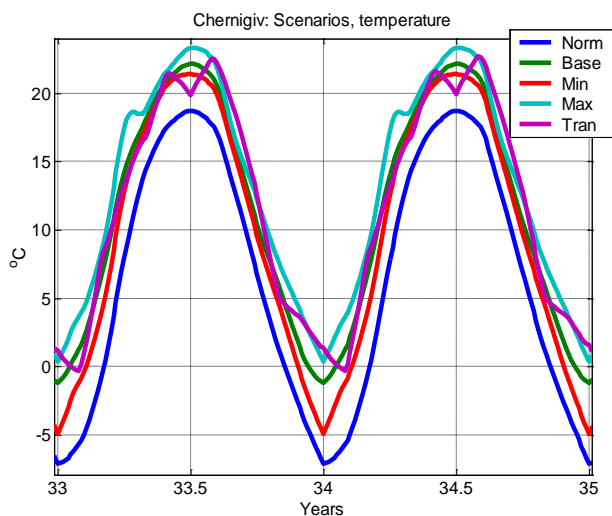


Рис. 2.16. Сценарії зміни температури у Чернігівській області

Рис. 2.17. Сценарії зміни кількості опадів у Чернігівській області

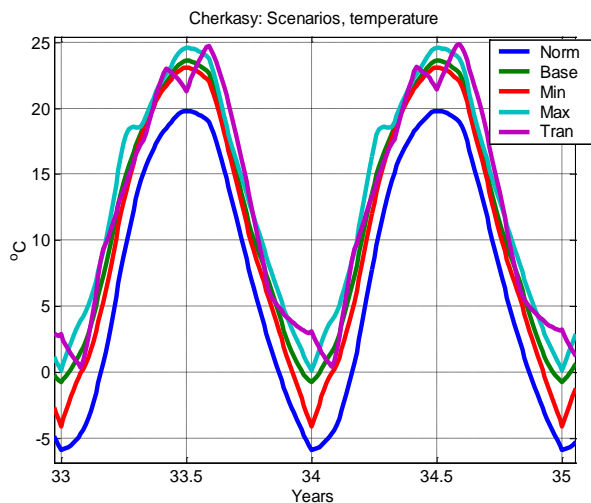


Рис. 2.18. Сценарії зміни температури у Черкаській області

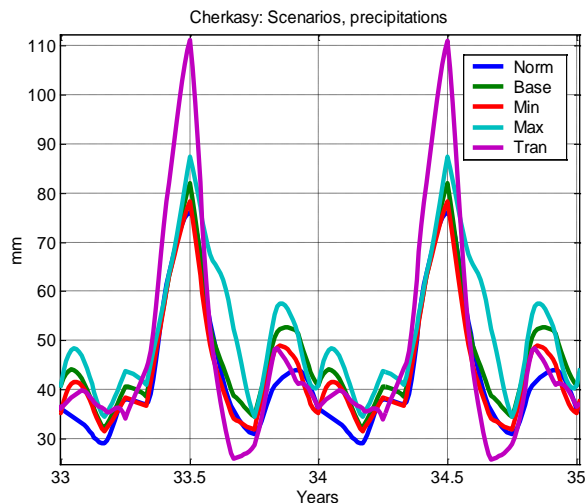


Рис. 2.19. Сценарії зміни кількості опадів у Черкаській області

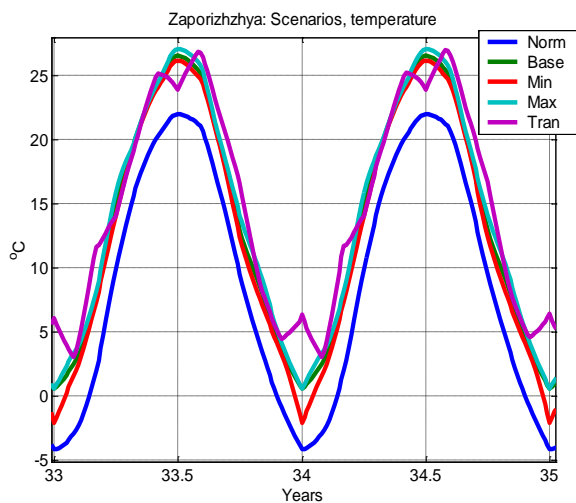


Рис. 2.20. Сценарії зміни температури в Запорізькій області

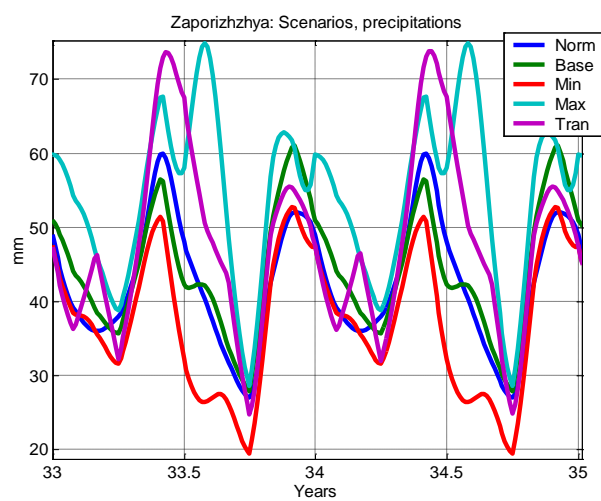


Рис. 2.21. Сценарії зміни кількості опадів в Запорізькій області

У Запорізькій області розкид температур становить від  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$  у травні в середині інтервалу моделювання до  $12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  у січні на 75 році, а розкид кількості опадів – від  $7.22\text{ мм}$  у квітні до  $48.4\text{ мм}$  у серпні.

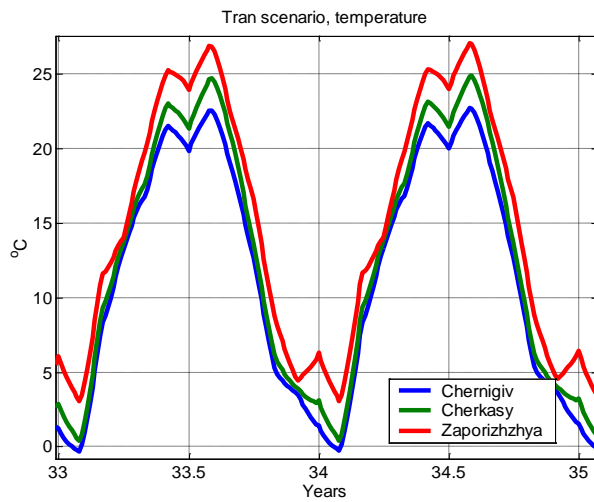


Рис. 2.22. Зміна температури в областях згідно сценарію *tran*

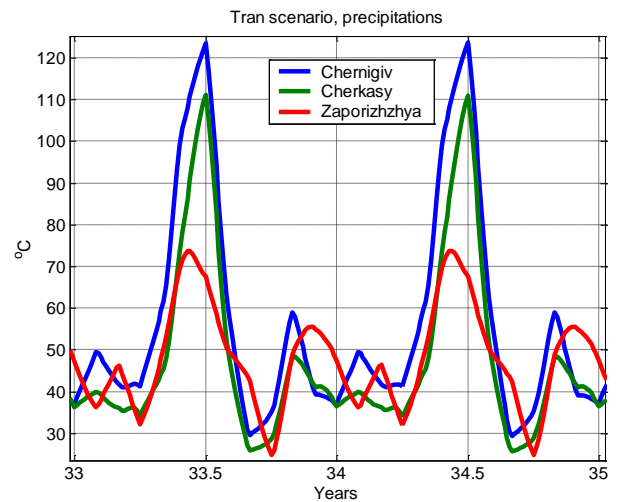


Рис. 2.23. Зміна кількості опадів в областях згідно сценарію *tran*

### Результати моделювання.

У Чернігівській області зміни температури та опадів згідно зі сценарієм *max* та *tran* викликають найбільші втрати вуглецю екосистемою –  $2.5 \text{ кгС/м}^2$  за 75 років, а найменші втрати відбуваються за сценарієм *min* –  $1.3 \text{ кгС/м}^2$  (рис.2.24). При цьому запас фітомаси зростає по відношенню до незміненого клімату за всіх сценаріїв практично однаково (на 4.5%). Відбуваються втрати вуглецю підстилки (найбільше за сценарієм *tran* – на 53%) та гумусу (найбільше за сценарієм *max* – на 24%).

У Черкаській області зміни температури та опадів згідно зі сценарієм *tran* викликають найбільші втрати вуглецю екосистемою –  $2.8 \text{ кгС/м}^2$  за 75 років, а найменші втрати вуглецю відбуваються за сценарієм *min* –  $1.5 \text{ кгС/м}^2$  (рис.2.25). При цьому запас фітомаси зростає по відношенню до незміненого клімату за всіх сценаріїв практично однаково (на 1.9 %). Відбуваються втрати вуглецю підстилки (найбільше за сценарієм *tran* – на 59 %) та гумусу (найбільше за сценарієм *max* – на 22%).

У Запорізькій області зміни температури та опадів згідно зі сценарієм *tran* викликають найбільші втрати вуглецю екосистемою –  $2.7 \text{ кгС/м}^2$  за 75 років, а найменші втрати відбуваються за сценарієм *min* –  $1.3 \text{ кгС/м}^2$  (рис. 2.26). При цьому запас фітомаси практично не зростає по відношенню до незміненого

клімату за всіх сценаріїв. Найбільші втрати вуглецю підстилки та гумусу відбуваються за сценарієм *tran* (60% і 19%, відповідно).

Серед областей екосистеми дубових лісів є найбільш вразливими у Черкаській області за всіх сценаріїв зміни клімату. Найменш вразливими вони є у Запорізькій області за сценаріїв *base* та *max*, а у Чернігівській – за сценаріїв *min* і *tran* (рис. 2.27 – рис. 2.30).

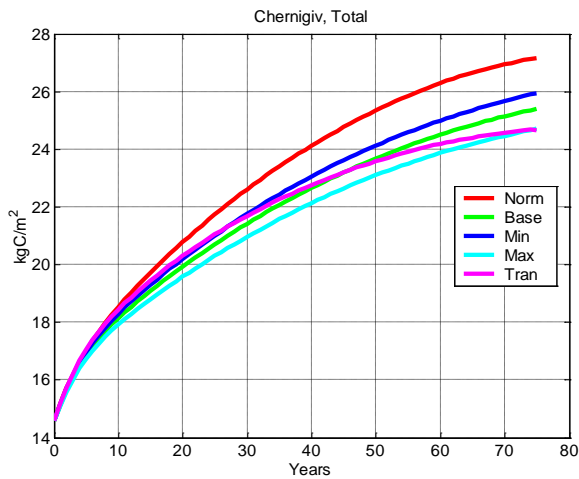


Рис. 2.24. Загальний запас вуглецю в екосистемі дубові ліси за різних сценаріїв зміни клімату у Чернігівській області

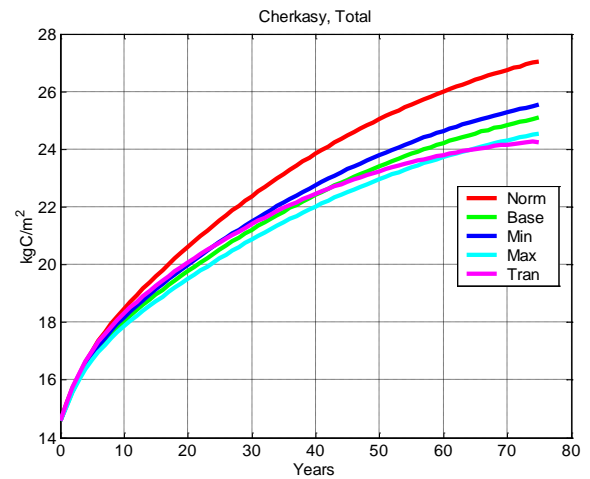


Рис. 2.25. Загальний запас вуглецю в екосистемі дубові ліси за різних сценаріїв зміни клімату у Черкаській області

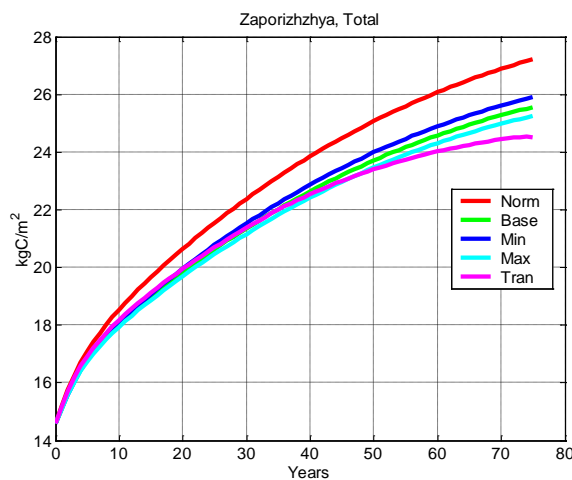


Рис. 2.26. Загальний запас вуглецю в екосистемі дубові ліси за різних сценаріїв зміни клімату у Запорізькій області

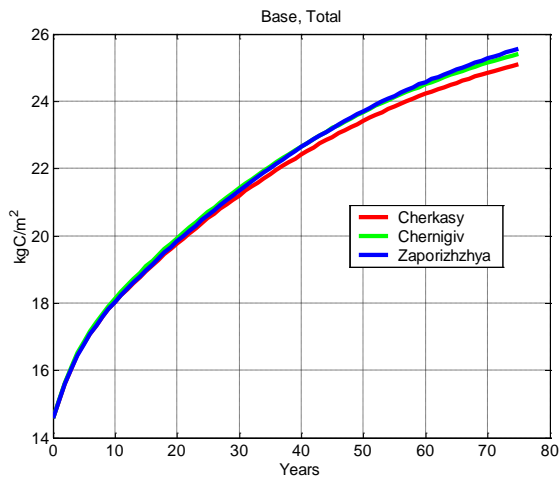


Рис. 2.27. Загальний запас вуглецю в екосистемі дубові ліси за сценарію *base* у Черкаській, Чернігівській та Запорізькій областях

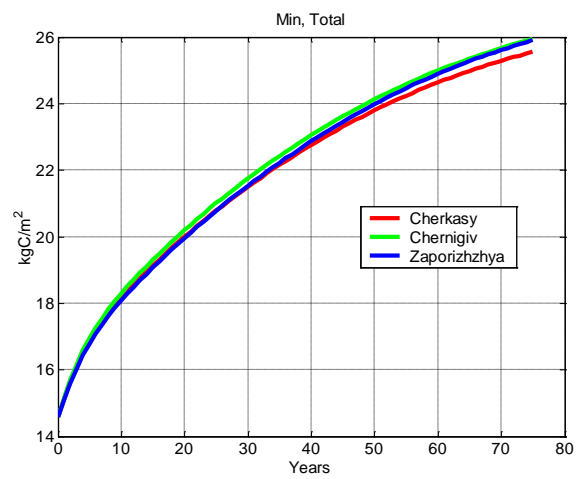


Рис. 2.28. Загальний запас вуглецю в екосистемі дубові ліси за сценарію *min* у Черкаській, Чернігівській та Запорізькій областях

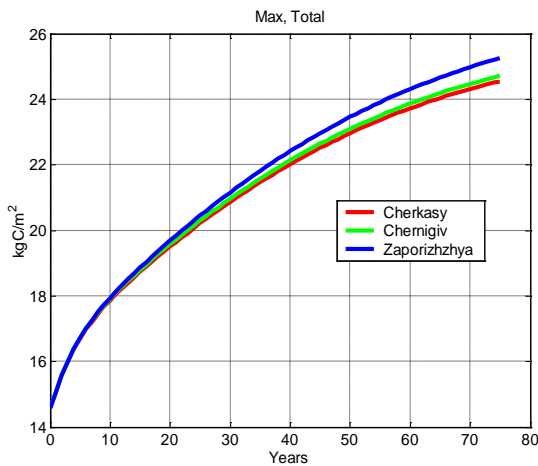


Рис. 2.29. Загальний запас вуглецю в екосистемі дубові ліси за сценарію *max* у Черкаській, Чернігівській та Запорізькій областях

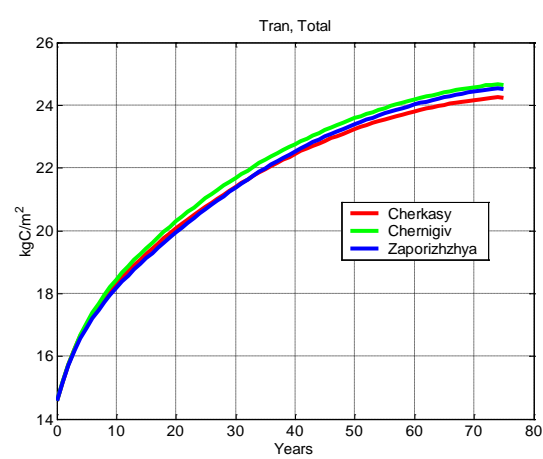


Рис. 2.30. Загальний запас вуглецю в екосистемі дубові ліси за сценарію *tran* у Черкаській, Чернігівській та Запорізькій областях

### 2.3. Математичне моделювання змін в землекористуванні

Розглянемо такі випадки зміни землекористування [346]: буковий ліс – рілля, буковий ліс – лука, лука – рілля, рілля – буковий ліс, а також рілля – дубовий ліс. При цьому в кожному розглянутому випадку кліматичні умови відповідали “корінному” типу рослинності, тобто поясу букових лісів у першому, другому і четвертому випадках; усередненому клімату по рівнинних луках у третьому випадку; і поясу дубових лісів у п’ятому випадку.



### 2.3.1. Буковий ліс – рілля

У цьому випадку 130-ти річний буковий ліс вирубують, забирають стовбурну деревину, а гілля, пні і товсте коріння спалюють. Тонке коріння залишається в ґрунті. Землю розорюють і місцевість починає функціонувати як рілля. Все це відбувається за один рік.

Для моделювання такої ситуації використовуємо модель вуглецевого балансу ріллі, описану в [353]. Як початкові дані про запас вуглецю у модельованих компонентах екосистеми (фітомаса, підстилка та ґрунт) беремо результати, отримані за допомогою моделі вуглецевого балансу букового лісу, описаної вище в цьому розділі. Фрагмент програми моделювання вуглецевого балансу ситуації “буковий ліс – рілля” наведено нижче:

```
% Defining of forest clear-cut
```

```
if t<1
```

```
% harvesting of stemwood, burning of branches and coarse roots
```

```
vpo=20*x(1)*(0.956*130^(-0.068)+1.496*130^(-0.698)-0.3*1.496*130^(-0.698));
```

```
vpl_luc=0.3*x(1)*1.496*130^(-0.698);
```

```
%increase of soil temperature caused by onsite burning
```

```
if t>0.45 & t<0.50 tem=tem+10; end
```

```
else
```

```
%defining of vpo - crop gathering
```

```
vpo=3.179*((sin(pi*t-0.8)).^4)*x(1);
```

```
vpl_luc=0;
```

```
vop=0;
```

```
end
```

Кількість фітомаси зменшується від 23 кгС/м<sup>2</sup> до нуля в кінці року, а в наступному році система вже функціонує як рілля – фітомаса коливається в межах 0-0.5 кгС/м<sup>2</sup> (рис. 2.31).

Запас підстилки (тут і далі маємо на увазі мертву органічну речовину, яка ще не гуміфікована) спочатку різко збільшується від початкового значення 1.01 до 1.84 кгС/м<sup>2</sup> (відмирає все тонке коріння) (рис. 2.32). З початку наступного року кількість підстилки зростає за рахунок внесення органічних добрив, а ще через рік кількість підстилки змінюється періодично як у звичайній системі “рілля” (рис. 2.32). Ці коливання визначаються спільно сезонною мінливістю клімату і періодичністю сільськогосподарських робіт.

Запас органічної речовини ґрунту (тут і далі маємо на увазі гуміфіковану органічну речовину) зростає в першій половині року від 9.28 до 9.41 кгС/м<sup>2</sup>, що спричинене інтенсивним розкладанням тонкого коріння. Далі кількість органічної речовини ґрунту експоненційно зменшується до 7.36 кгС/м<sup>2</sup> за 100 років (рис. 2.33). Сумарний запас вуглецю системи зменшується за 100 років від 42 до 7.5 кгС/м<sup>2</sup> (рис. 2.34).

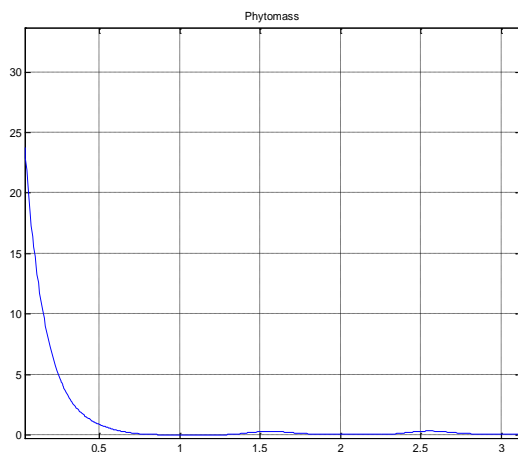


Рис. 2.31. Динаміка фітомаси в системі при заміні букового лісу ріллею (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  – кгС/м<sup>2</sup>)

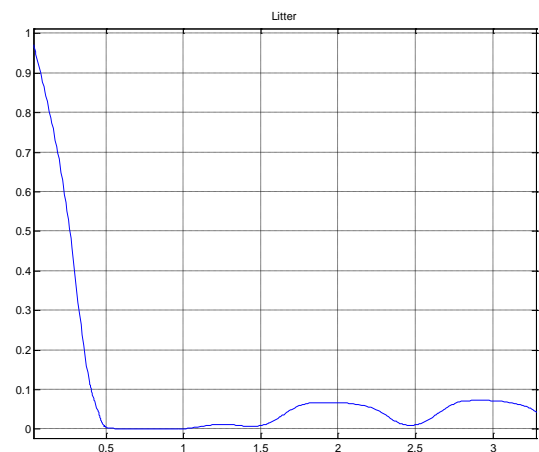


Рис. 2.32. Динаміка підстилки в системі при заміні букового лісу ріллею (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  – кгС/м<sup>2</sup>)

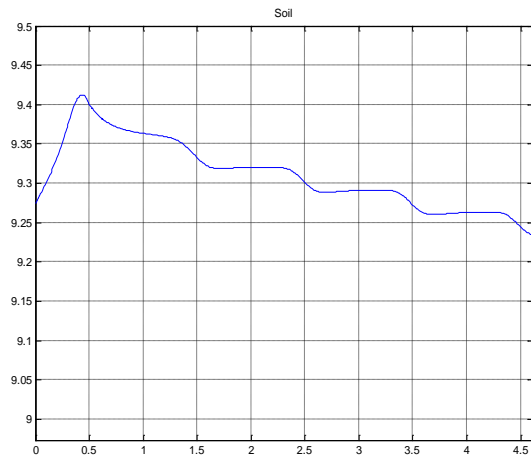


Рис. 2.33. Динаміка органічної речовини ґрунту в системі при заміні букового лісу ріллею (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгC}/\text{м}^2$ )

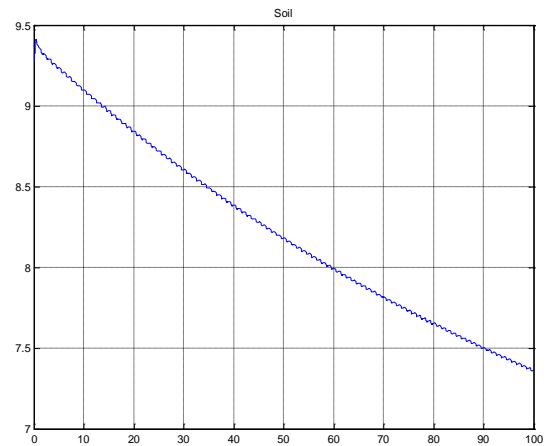


Рис. 2.34. Динаміка сумарного вуглецевого балансу в системі при заміні букового лісу ріллею (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгC}/\text{м}^2$ )

### 2.3.2. Буковий ліс – лука

У відповідності з цим сценарієм 130-ти річний буковий ліс вирубують, забирають стовбурну деревину, а гілля, пні і товсте коріння спалюють. Тонке коріння залишається в ґрунті. Землю розорюють і сіють траву. Для моделювання такої ситуації використано модель вуглецевого балансу системи “сінокоси та пасовища”, описаної в [353]. Як початкові дані про запас вуглецю у модельованих компонентах екосистеми (фітомаса, підстилка та ґрунт) взято результати, отримані за допомогою моделі вуглецевого балансу букового лісу, описаної у вище у цьому розділі. Фрагмент відповідної програми наведено нижче.

```
% Defining of forest clear-cut
```

```
if t<1
```

```
% harvesting of stemwood, burning of branches and coarse roots:
```

```
vpo=20*x(1)*(0.956*130^(-0.068)+1.496*130^(-0.698)-0.3*1.496*130^(-0.698));
```

```
vpl_luc=0.3*x(1)*1.496*130^(-0.698);
```

```
if t>0.45 & t<0.50 tem=tem+20; end
```

```
else
```

*%defining of vpo - hay production and grazing:*

$vpo=0.61*((\sin(\pi*t-0.8)).^2)*x(1);$

$vpl\_luc=0;$

$vop=0;$

*end*

Кількість фітомаси зменшується від 23 кгС/м<sup>2</sup> до нуля в кінці року. В наступні п'ять років фітомаса зростає до 0.49 кгС/м<sup>2</sup> і встановлюється на цьому рівні, спостерігаються також сезонні коливання (рис. 2.35). Запас підстилки зменшується від початкового значення 1.01 до 0.2 кгС/м<sup>2</sup> за півтори року, після чого збільшується і встановлюється на рівні 0.49 кгС/м<sup>2</sup> на 8-му році (рис. 2.36). На ці зміни також впливають сезонні коливання. Запас органічної речовини ґрунту зростає в першій половині року від 9.28 до 9.32 кгС/м<sup>2</sup>, що спричинене розкладанням коріння. Починаючи з другої половини червня першого року, кількість органічної речовини ґрунту зменшується до 9.19 кгС/м<sup>2</sup> в перші шість років, далі повільно знижується до 9 кгС/м<sup>2</sup> за 100 років (рис. 2.37). Сумарний запас вуглецю системи зменшується за 100 років від 41.76 до 10 кгС/м<sup>2</sup> (рис. 2.38).

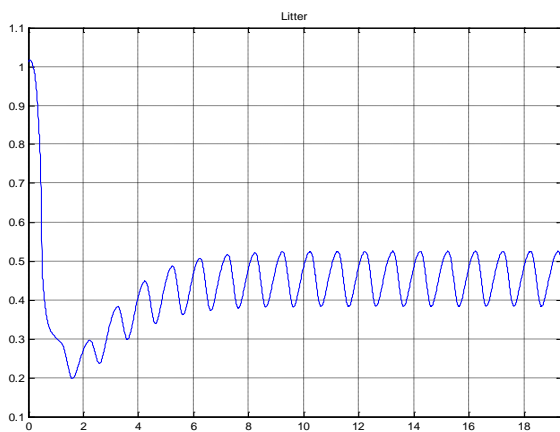


Рис. 2.36. Динаміка підстилки в системі при заміні букового лісу лукою (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  – кгС/м<sup>2</sup>)

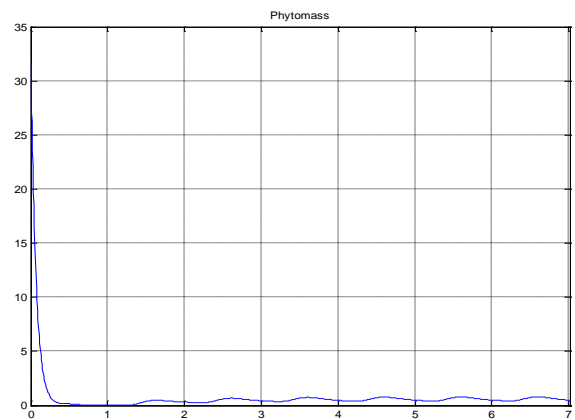


Рис. 2.35. Динаміка фітомаси в системі при заміні букового лісу лукою (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  – кгС/м<sup>2</sup>)

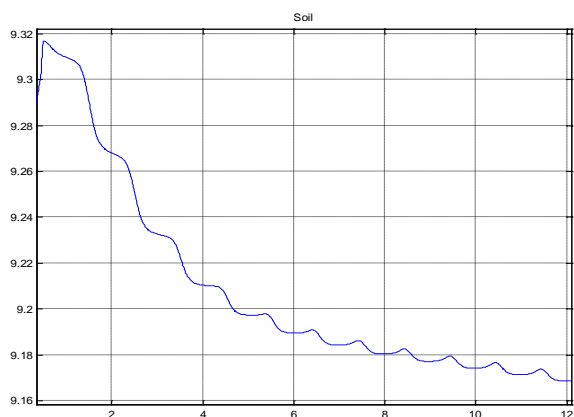


Рис. 2.37. Динаміка органічної речовини ґрунту в системі при заміні букового лісу лукою (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгС}/\text{м}^2$ )

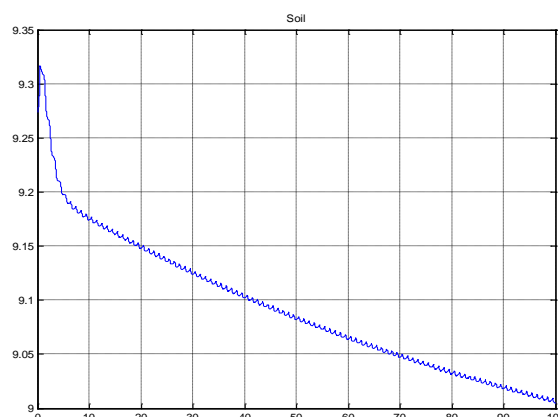


Рис. 2.38. Динаміка сумарного вуглецевого балансу в системі при заміні букового лісу лукою (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгС}/\text{м}^2$ )

#### 2.3.4. Рілля – буковий ліс

На місці ріллі садять буковий ліс (III бонітет). Для моделювання використано математичну модель вуглецевого балансу букового лісу, у якій враховано вік деревостану з початковими умовами, які є результатом моделі вуглецевого балансу ріллі. Фітомаса зростає від 0 до  $15 \text{ кгС}/\text{м}^2$  за 100 років (рис. 2.39). Запас підстилки (сумарний запас, складений з таких компонентів: листя, гілля, стовбури, грубе коріння і тонке коріння) у перший рік зменшується з  $0.21$  до  $0.02 \text{ кгС}/\text{м}^2$  (розкладаються рештки рослин), а потім поступово збільшується, досягаючи максимуму  $0.46 \text{ кгС}/\text{м}^2$  через 60 років і спадає до  $0.4 \text{ кгС}/\text{м}^2$  через 100 років (рис. 2.40). Така динаміка підстилки пояснюється віковими змінами лісу. Запас органічної речовини ґрунту на початку експерименту зменшується від  $6.3$  до  $6.04$  (за 14 років), оскільки поступлення підстилки ще незначне і гумусу утворюється менше, ніж мінералізується, а в наступні роки зростає до  $7.31 \text{ кгС}/\text{м}^2$  разом із збільшенням кількості підстилки (рис. 2.41). Сумарний запас вуглецю за 100 років зростає з  $6.64$  до  $22.74 \text{ кгС}/\text{м}^2$  (рис. 2.42).

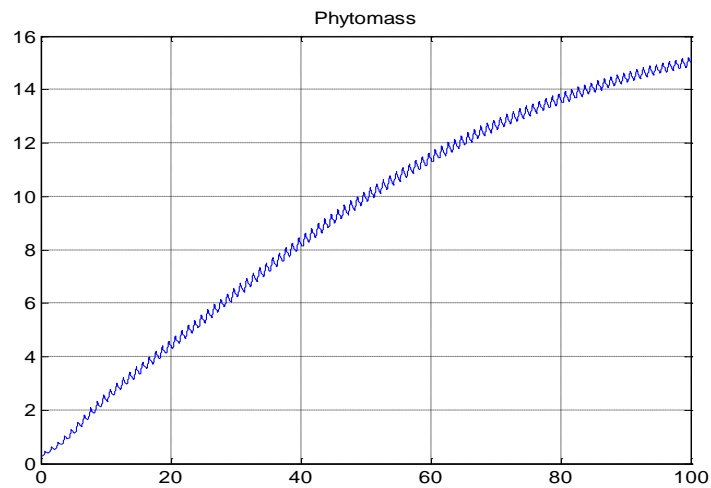


Рис. 2.39. Динаміка фітомаси в системі при заміні ріллі буковим лісом (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгC}/\text{м}^2$ )

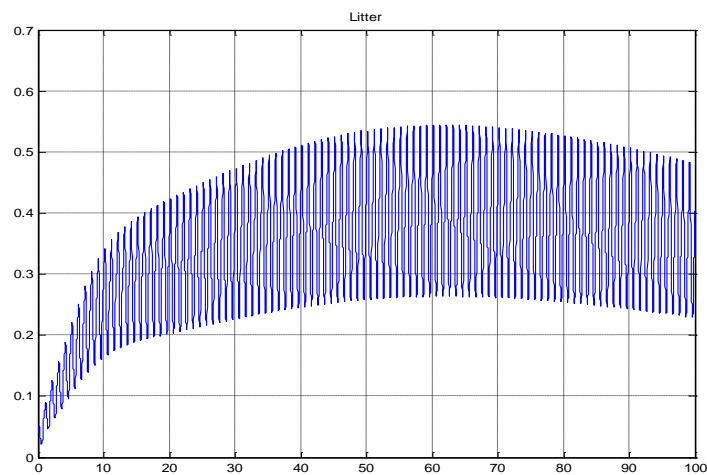


Рис. 2.40. Динаміка підстилки в системі при заміні ріллі буковим лісом (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгC}/\text{м}^2$ )

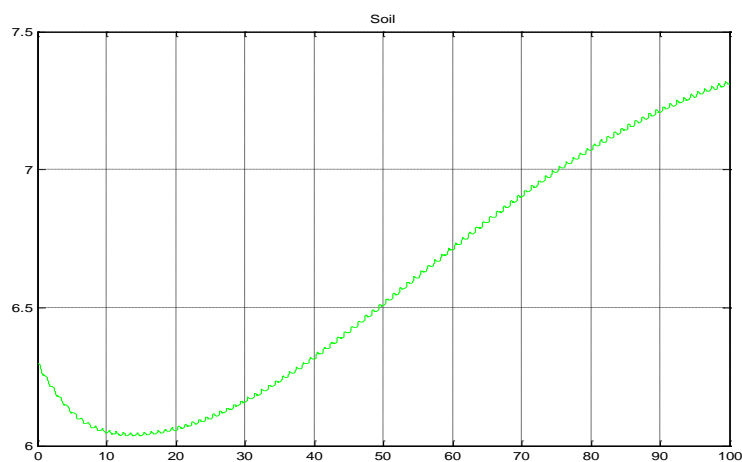


Рис. 2.41. Динаміка органічної речовини ґрунту в системі при заміні ріллі буковим лісом (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгC}/\text{м}^2$ )

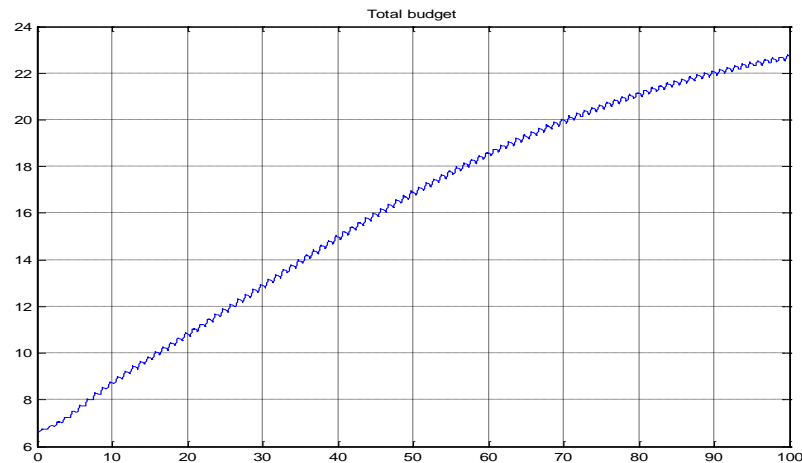


Рис. 2.42. Динаміка сумарного вуглецевого балансу в системі при заміні ріллі буковим лісом (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгС}/\text{м}^2$ )

### 2.4.5. Рілля – дубовий ліс

На місці ріллі садять дубовий ліс (III бонітет). Для моделювання використовують математичну модель вуглецевого балансу дубового лісу, у якій враховано вік деревостану, з початковими умовами, які є результатом моделі вуглецевого балансу ріллі. Фітомаса зростає від 0 до  $15.9 \text{ кгС}/\text{м}^2$  за 100 років (рис. 2.43). Запас підстилки (сумарний запас, складений з таких компонентів: листя, гілля, стовбури, грубе коріння і тонке коріння) поступово збільшується від  $0.21$ , досягаючи максимуму  $0.5 \text{ кгС}/\text{м}^2$  через 55 років, і спадає до  $0.41 \text{ кгС}/\text{м}^2$  через 100 років (рис. 2.44). Така динаміка підстилки пояснюється віковими змінами лісу. Запас органічної речовини ґрунту на початку експерименту зменшується від  $6.3$  до  $6.02$  (за 17 років), оскільки підстилки ще небагато і гумусу утворюється менше, ніж мінералізується, а в наступні роки зростає до  $7.23 \text{ кгС}/\text{м}^2$  разом із збільшенням кількості підстилки (рис. 2.45). Сумарний запас вуглецю за 100 років зростає з  $6.92$  до  $22.85 \text{ кгС}/\text{м}^2$  (рис. 2.46).

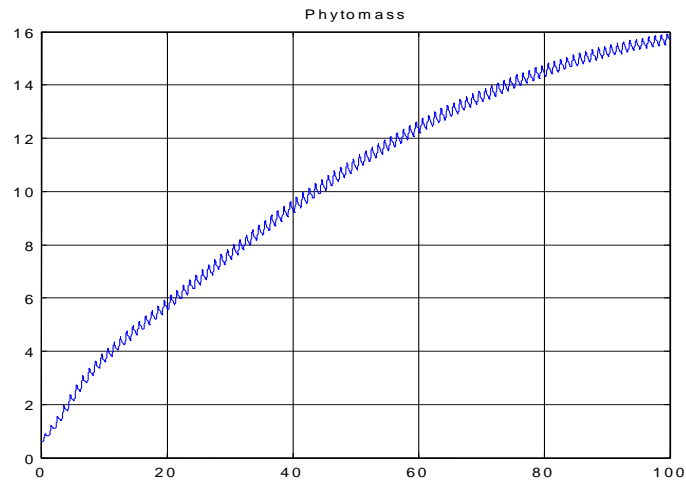


Рис. 2.43. Динаміка фітомаси в системі при заміні ріллі дубовим лісом (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгС}/\text{м}^2$ )

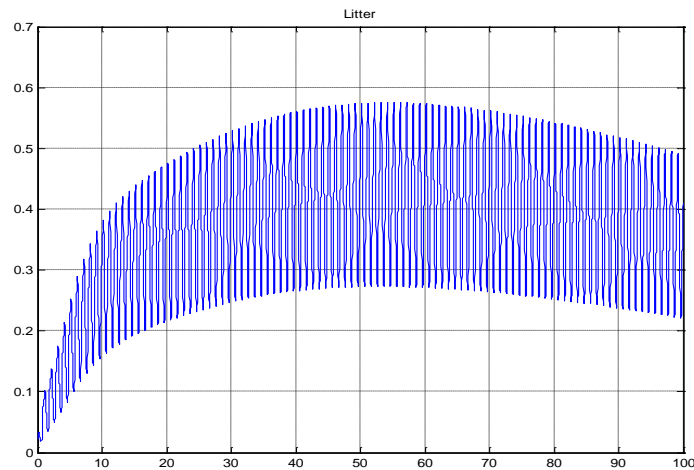


Рис. 2.44. Динаміка підстилки в системі при заміні ріллі дубовим лісом (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгС}/\text{м}^2$ )

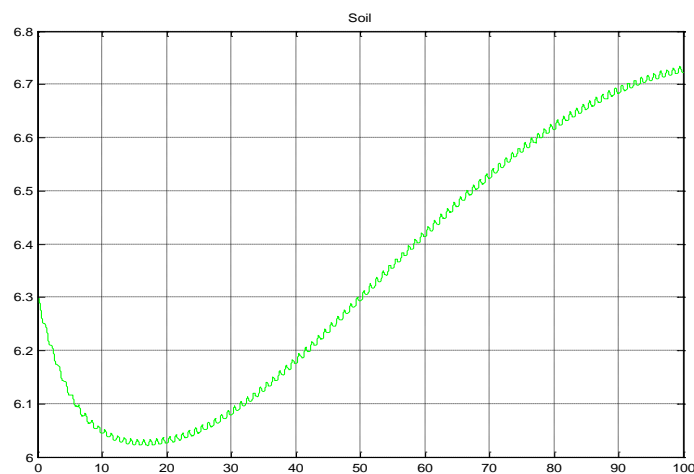


Рис. 2.45. Динаміка органічної речовини ґрунту в системі при заміні ріллі дубовим лісом (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгС}/\text{м}^2$ )



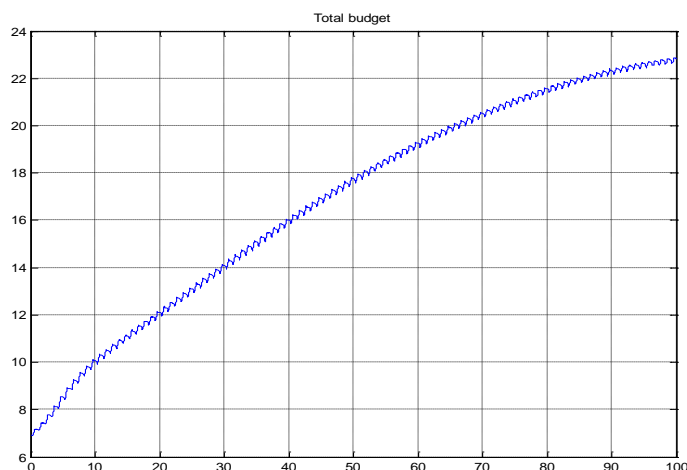


Рис. 2.46. Динаміка сумарного вуглецевого балансу в системі при заміні ріллі дубовим лісом (вісь  $X$  – рік, вісь  $Y$  –  $\text{кгC}/\text{м}^2$ )

## 2.4 Дослідження впливу невизначеності параметрів моделі на динаміку вуглецевого балансу лісу при залісненні

### 2.4.1. Опис чисельного експерименту

При розробці проекту заліснення, важливо оцінити кількість вуглецю, яка може накопичуватися в екосистемі протягом певного періоду часу, і ризик не досягти бажаного результату, враховуючи невизначеності оцінок параметрів моделі, мінливість навколишнього середовища в якому буде рости ліс. Прогностичне моделювання може допомогти в отримати наближену оцінку значень накопиченого вуглецю і продемонструє не тільки невизначеність і ризику, але і вплив мінливості навколишнього середовища.

Для врахування віку деревостану, ми використовуємо динамічну математичну модель вуглецевого балансу екосистеми дубового лісу описану в цьому розділі. Чисельний експеримент полягає в тому, що дубовий ліс посаджений на місці орних земель. Результати моделі балансу вуглецю орних земель [346, 353] були використані для забезпечення початкових даних про вуглець, що зберігається в компонентах екосистеми (фітомасі, підстилці та ґрунті). При моделюванні також було використано середньомісячну температуру повітря, опади, сонячне випромінювання і концентрацію діоксиду вуглецю в атмосфері. Моделювання проводили на 20 років.

### 2.4.2. Моделювання невизначеності параметрів моделі

Модель включає в себе ряд параметрів, більшість з яких взяті з опублікованих джерел і базуються на польових експериментах. Ці параметри мають похибки, які, у багатьох випадках, не публікують. Тому для параметрів моделі ми застосовуємо класи невизначеності 10% або 20% стандартного відхилення. Якщо інформація про розподіл випадкових чисел відсутня, то вважаємо, що розподіл є рівномірним. Відносна невизначеність та ймовірнісні розподіли параметра позначаємо наступним чином (U - рівномірний розподіл і N нормальний розподіл; наприклад, 10U означає невизначеність параметра 10% при рівномірному розподілі). Враховуючи введені позначення використовуємо такі невизначеності параметрів моделі: T-10N, T<sub>opt</sub>-10U,  $\alpha$ -10U, C-10N,  $\beta$ -10U, W-10N, k<sub>w</sub>-20U, GS-20N, dM-20N, Ri-20N, ki-20U, Q10-20U і p-20U. Також вважаємо, що початкові умови моделювання є неточними – 20U. Моделювання за методом Монте-Карло було виконано для того, щоб визначити, як впливає невизначеність параметрів результат. Для цього параметри моделюються за допомогою генератора випадкових величин, відповідно, з рівномірним або нормальним розподілом ймовірностей. Система диференціальних рівнянь було розв'язано 650 разів [129,133].

### 2.4.3. Результати чисельного експерименту

Кількість фітомаси зростає від 0.6 кгС/м<sup>2</sup> до 2.7 кгС/м<sup>2</sup> за 20 років, а відносне стандартне відхилення змінюється від 20% на початку експерименту до 37% в кінці (рис. 2.47). Запас вуглецю підстилки (в тому числі листя, гілки, стовбури, грубе коріння і тонкі корені) поступово збільшується від нуля до максимального значення 0.5 кгС/м<sup>2</sup> протягом 6 років, і знижується до 0.2 кгС/м<sup>2</sup> протягом наступних 15 років (рис. 2.48). Динаміку кількості вуглецю підстилки можна пояснити віковими змінами лісу. В цьому випадку відносне стандартне відхилення зростає від 20% на початку експерименту до 83% в кінці.

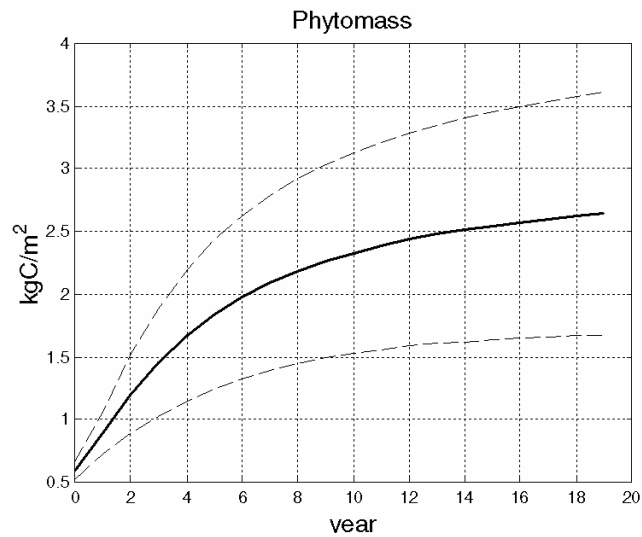


Рис. 2.47. Динаміка запасу вуглецю фітомаси та стандартне відхилення

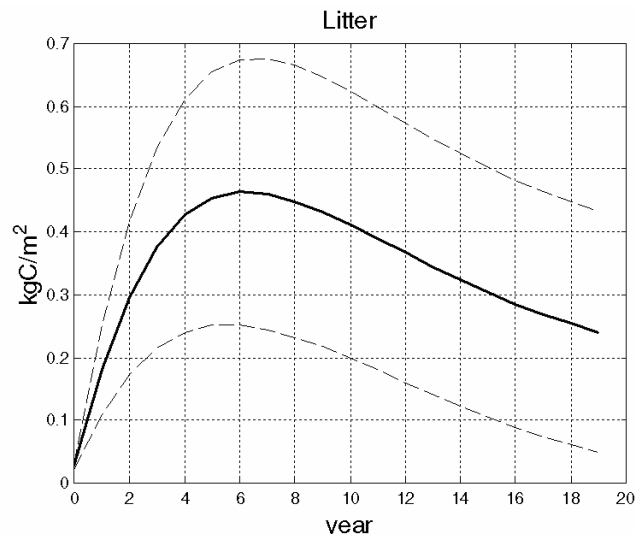


Рис. 2.48 Динаміка запасу вуглецю підстилки та стандартне відхилення

Запас вуглецю органічної речовини ґрунту знижується незначно (протягом перших 2-х років) через невеликий запас підстилки і відповідно повільне утворення гумусу (гумус мінералізується швидше, ніж утворюється), а в наступні роки запас вуглецю органічної речовини ґрунту збільшується від 1.3 до 1.5  $\text{kgC/m}^2$  (рис. 2.49). Проте, відносне стандартне відхилення зменшується від початкового 20% до 15%. Загальна кількість вуглецю, що запасується в компонентах екосистеми збільшується від 1.9  $\text{kgC/m}^2$  до 4.4  $\text{kgC/m}^2$  протягом наступних 20 років (рис. 2.50).

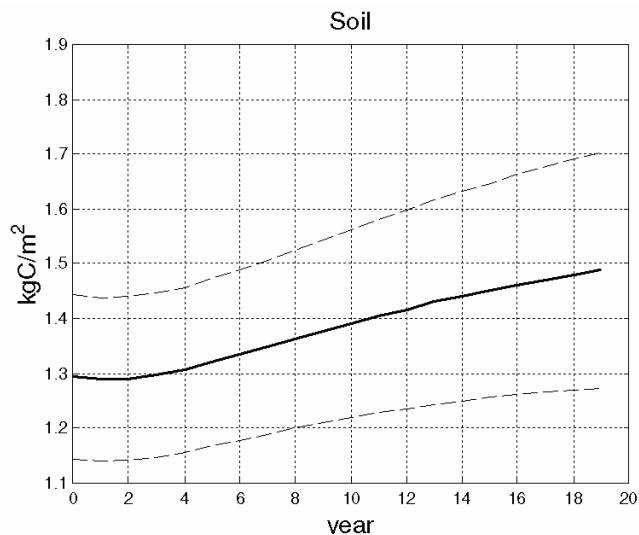


Рис. 2.49. Динаміка запасу вуглецю органічної речовини ґрунту та стандартне відхилення

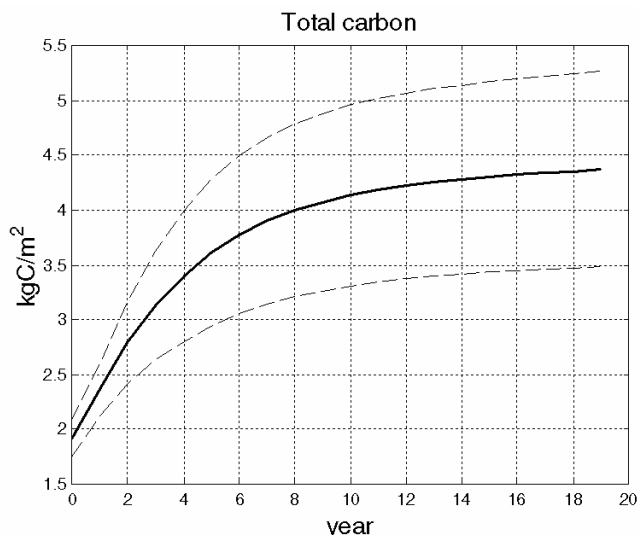


Рис. 2.50. Динаміка загального вуглецю екосистеми і стандартне відхилення

Відносне стандартне відхилення збільшується від 9 до 21%. Гістограма загальної кількості вуглецю у компонентах екосистеми в кінці моделювання показана на рис. 2.51 і графік зміни кількості вуглецю в компонентах екосистеми та відповідні похибки показано на рис. 2.52. Прямокутники на рис. 2.52 - це нижні значення кватилей, медіани кватилей і верхні значення кватилей. Пунктирні лінії на кожній стороні прямокутника містять значення в діапазоні  $\pm 1.5$  відстані між кватиллями. Інші значення ("аномальні") позначено "+". Аномальні значення показують ризик недооцінити або переоцінити кількість вуглецю депонованого у посадженому лісі. Розкид аномальних значень приводить до невеликого завищення середнього значення (близько  $0.1 \text{ kgC/m}^2$ ). З іншого боку, більше аномальних значень розташовані над верхнім кватиллем. Це

означає, що ризик отримання значень поглинання вуглецю більших, ніж верхня межа довірчого інтервалу, вищий, ніж отримання менших значень, ніж нижня межа довірчого інтервалу. Це позитивний результат для проекту в області заліснення.

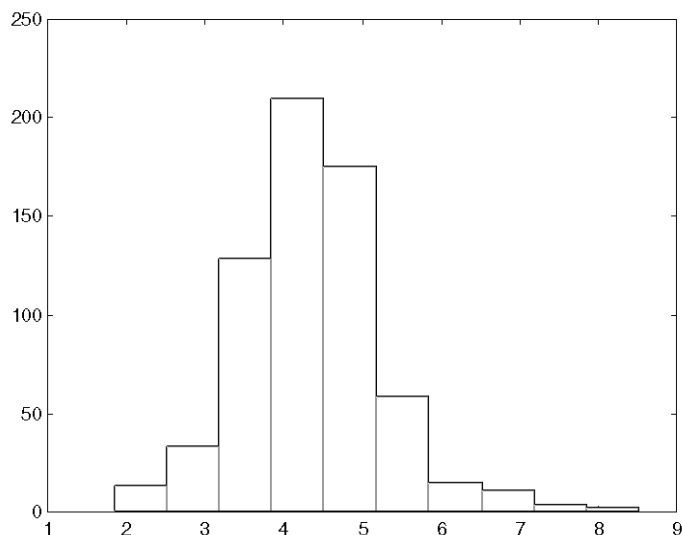


Рис. 2.51. Гістограма загальної кількості вуглецю у компонентах екосистеми в кінці моделювання

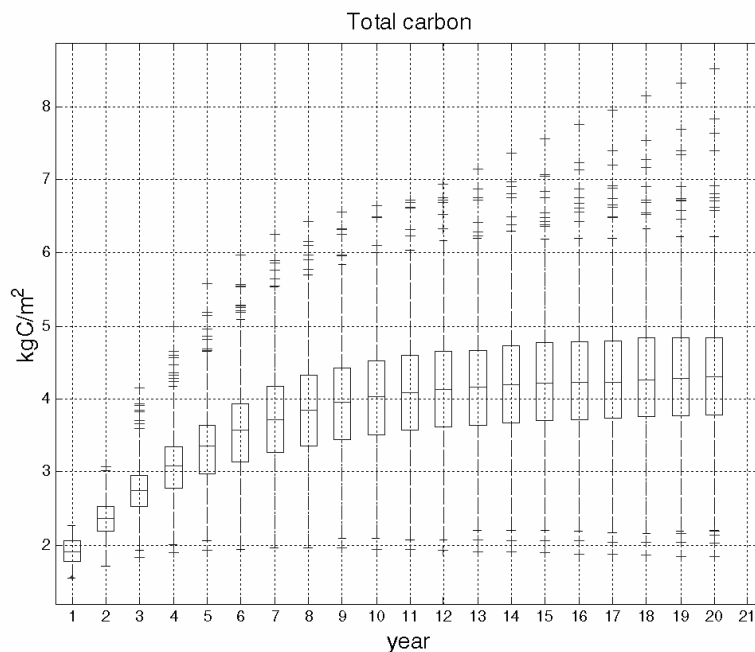


Рис. 2.52. Графік сумарної зміни кількості вуглецю в компонентах екосистеми та відповідні похибки. Прямокутники являють собою нижні значення кватилей, медіани кватилей і верхні значення кватилей. Пунктирні лінії на кожній стороні прямокутника містять значення в діапазоні  $\pm 1.5$  відстані між кватилеями.

"Аномальні" значення позначено "+".

Внесок мінливості параметрів, таких як температура повітря, кількість опадів і концентрація двоокису вуглецю в атмосфері у повну невизначеність є істотним у порівнянні з невизначеністю, викликаною іншими параметрами моделі. Наприклад, відносне стандартне відхилення на 10-му році моделювання для фітомаси зростає в два рази, невизначеність для ґрунту і загального збільшення накопиченого вуглецю зростає майже в 1.4 рази, в той час як невизначеність для підстилки залишається практично на тому ж рівні (таблиця 2.12). Кількість аномальних значень також збільшується.

Таблиця 2.12. Депонований вуглець і його стандартне відхилення після 10 років моделювання методом Монте-Карло, без кліматичних параметрів і концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері, а також з кліматичними параметрами і атмосферним CO<sub>2</sub>

	Фітомаса, кгС/м <sup>2</sup>		Підстилка, кгС/м <sup>2</sup>		Ґрунт, кгС/м <sup>2</sup>		Сума, кгС/м <sup>2</sup>	
	Середнє значення	Стандартне відхилення	Середнє значення	Стандартне відхилення	Середнє значення	Стандартне відхилення	Середнє значення	Стандартне відхилення
Без кліматичних параметрів та CO <sub>2</sub>	2.1	0.5 22%	0.4	0.2 43%	1.4	0.2 12%	4.0	0.7 16%
Включаючи кліматичні параметри та CO <sub>2</sub>	2.3	1.0 44%	0.4	0.2 44%	1.4	0.3 16%	4.1	0.9 22%

Невизначеність проекту залісення, описаного в статті, не перевищує невизначеності, яку опубліковано в [213] для залісення, лісовідновлення та знезліснення (50-100%, 95% довірчий інтервал).

## 2.5. Висновки до Розділу 2

1. Розроблено метод моделювання вуглецевого балансу лісової екосистеми, який поєднує процеси кругообігу вуглецю та таксаційні параметри деревостану. Завдяки такому поєднанню можливо врахувати вікову динаміку деревостану при моделюванні його вуглецевого балансу. Запропонований метод використано при розробці математичних моделей вуглецевого балансу букових, дубових та ялинових лісів.
2. Вдосконалено структуру математичної моделі вуглецевого балансу лісової екосистеми з врахуванням наявних даних про лісові екосистеми в Україні,

зокрема, враховано зміну запасів вуглецю у компонентах лісових екосистем із віком деревостану. Запропоновано ввести додаткові резервуари вуглецю, розділивши фітомасу деревостану на частини, використовуючи регресійні рівняння, та потоки вуглецю відповідно до доданих резервуарів вуглецю. Вдосконалення структури математичної моделі уможлиблює врахування залежності інтенсивності біохімічних процесів кругообігу вуглецю від розміру частин дерев (та неявно від їх хімічного складу).

3. Інтенсивність фотосинтезу у деревостанах, у тому числі, залежить від кількості листя. Розроблено математичну модель фенологічних процесів у букових та дубових лісах, які базуються на даних спостережень, враховують часовий зсув цих процесів при зміні клімату та дають можливість точніше відтворити сезонну динаміку процесів кругообігу вуглецю.
4. На території України у холодний період року значна кількість води утримується у вигляді снігу. Сніг, який тане зі збільшенням температури повітря, забезпечує екосистеми більшою кількістю вологи і впливає на інтенсивність процесів кругообігу вуглецю. Метод моделювання вуглецевого балансу екосистем України отримав подальший розвиток шляхом врахування процесів накопичення та танення снігу, що збільшило точність відтворення сезонної динаміки процесів кругообігу вуглецю.
5. Використовуючи вищезгаданий метод моделювання, вдосконалену структуру моделі, модель фенологічних змін та модель накопичення і танення снігу розроблено математичні моделі вуглецевого балансу букового, дубового та ялинового лісу. Всі моделі параметризовані для регіонів України, які представляють основні географічні зони (Полісся, Лісостеп, Степ, Українські Карпати). Сформовано сценарії зміни клімату (мінімальних змін, середніх змін, максимальних змін та нестационарний) для регіонів України. З використанням розроблених математичних моделей вуглецевого балансу лісових екосистем досліджено динаміку вуглецевого балансу лісових екосистем у регіонах України за теперішнього клімату та за різних сценаріїв зміни клімату. Показано, що у Карпатському регіоні України сумарний вуглецевий баланс екосистем ялинових лісів є більш чутливий до зміни клімату у порівнянні з буковими та дубовими лісами; екосистеми

дубових лісів є найбільш вразливими у лісостепу при всіх сценаріях зміни клімату. Проаналізовано динаміку вуглецевого балансу лісових екосистем при залісненні та знелісненні.

6. З використанням розробленої математичної моделі вуглецевого балансу екосистеми дубового лісу проаналізовано вплив невизначеностей параметрів моделі, включаючи параметри, які характеризують навколишнє середовище (температура повітря, кількість опадів і концентрація двоокису вуглецю в атмосфері) на результат моделювання. Показано, що реалізація проекту заліснення характеризується високою невизначеністю майбутніх результатів проекту – кількості накопиченого вуглецю в екосистемі. Накопичення вуглецю підстилки характеризується найбільшою невизначеністю, оскільки відносне стандартне відхилення зростає від 20% на початку експерименту до 83% в кінці. Підстилка, однак, становить невелику частину в загальному запасі вуглецю в екосистемі і, таким чином, не має істотного впливу на загальну невизначеність. Відносне стандартне відхилення кількості вуглецю фітомаси змінюється з 20% на початку експерименту до 37% в кінці; відносне стандартне відхилення вуглецю ґрунту є найменшим і навіть зменшується від початкового 20 до 15%. Відносне стандартне відхилення кількості загального вуглецю, накопиченого в екосистемі, зростає від початкових 9% до 21% протягом 20 років. Невизначеність температури повітря, кількості опадів і концентрації атмосферного вуглекислого газу істотно впливають на загальну невизначеність накопиченої кількості вуглецю. За 10 років моделювання відносне стандартне відхилення фітомаси зростає у два рази, невизначеність кількості депонованого вуглецю ґрунту і загальне збільшення депонованого вуглецю зростає майже в 1.4 рази, а невизначеність кількості депонованого вуглецю підстилки залишається майже на тому ж рівні. Кількість аномальних значень також збільшується. Таким чином, мінливість клімату і зростання  $\text{CO}_2$  в атмосфері необхідно враховувати при прогнозуванні ефективності проекту заліснення.



## **Розділ 3. Математичне моделювання процесів лісокористування та зміни землекористування**

### **3.1. Структурна схема моделі**

У працях [29-40, 343-348, 367,375, 394] розроблено геопросторовий ієрархічний підхід до побудови кадастрів парникових газів, а в працях [306, 354,365, 366, 384-386] розроблено підхід до просторового аналізу процесів емісії та стоку вуглекислого газу у лісовому господарстві. Згідно цих підходів моделювання процесів емісій парникових газів відбувається на трьох геопросторових рівнях – елементарних ділянок, адміністративних утворень (районів, областей) та на рівні країни. Використання елементарних ділянок дає можливість врахувати локальні особливості процесів, виводити результати моделювання на різних рівнях агрегації, і застосовувати результати для підтримки прийняття природоохоронних рішень як на локальному так і національному рівнях. Ми використали ці підходи при розробленні геопросторової математичної моделі процесів лісокористування та змін землекористування.

Комплексна геопросторова модель процесів лісокористування та змін землекористування (у публікаціях відома як Global Forest Model - G4M) тематично складається з чотирьох частин - екологічна (природні умови і параметри лісу), економічна (оцінка локальних – в межах клітинки растру – цін на деревину і сільськогосподарську землю, чистих приведених вартостей (ЧПВ) сільського та лісового господарств, обсягу заготівлі деревини і витрати на посадку дерев на місці зрубаних), прийняття рішень (рішення про параметри заготівлі деревини та зміни землекористування) і оцінки емісій вуглекислого газу, спричинених зміною землекористування та заготівлею деревини. Блок-схема моделі показана на рис. 3.1.

Для того щоб врахувати вплив торгівлі сільськогосподарськими товарами та товарами з деревини на локальні ціни на деревину і сільськогосподарські землі, G4M поєднана з глобальною економічною моделлю оптимізації біомаси GLOBIOM ([www.globiom.org](http://www.globiom.org), [138]). Для узгодження роботи моделей, площа

лісів, кількість біомаси та сортименти деревини, яку потенційно можна заготовляти у лісах, обчислені у G4M, передаються для ініціалізації GLOBIOM. У свою чергу до G4M від GLOBIOM передається інформація про площу землі, яка необхідна для сільського господарства для кожної клітинки растру, на кожному десятирічному періоді оптимізації моделі GLOBIOM (2001-2010, 2011-2020, 2021-2030,...), а також ціна деревини та сільськогосподарської землі у регіонах, або країнах [123].

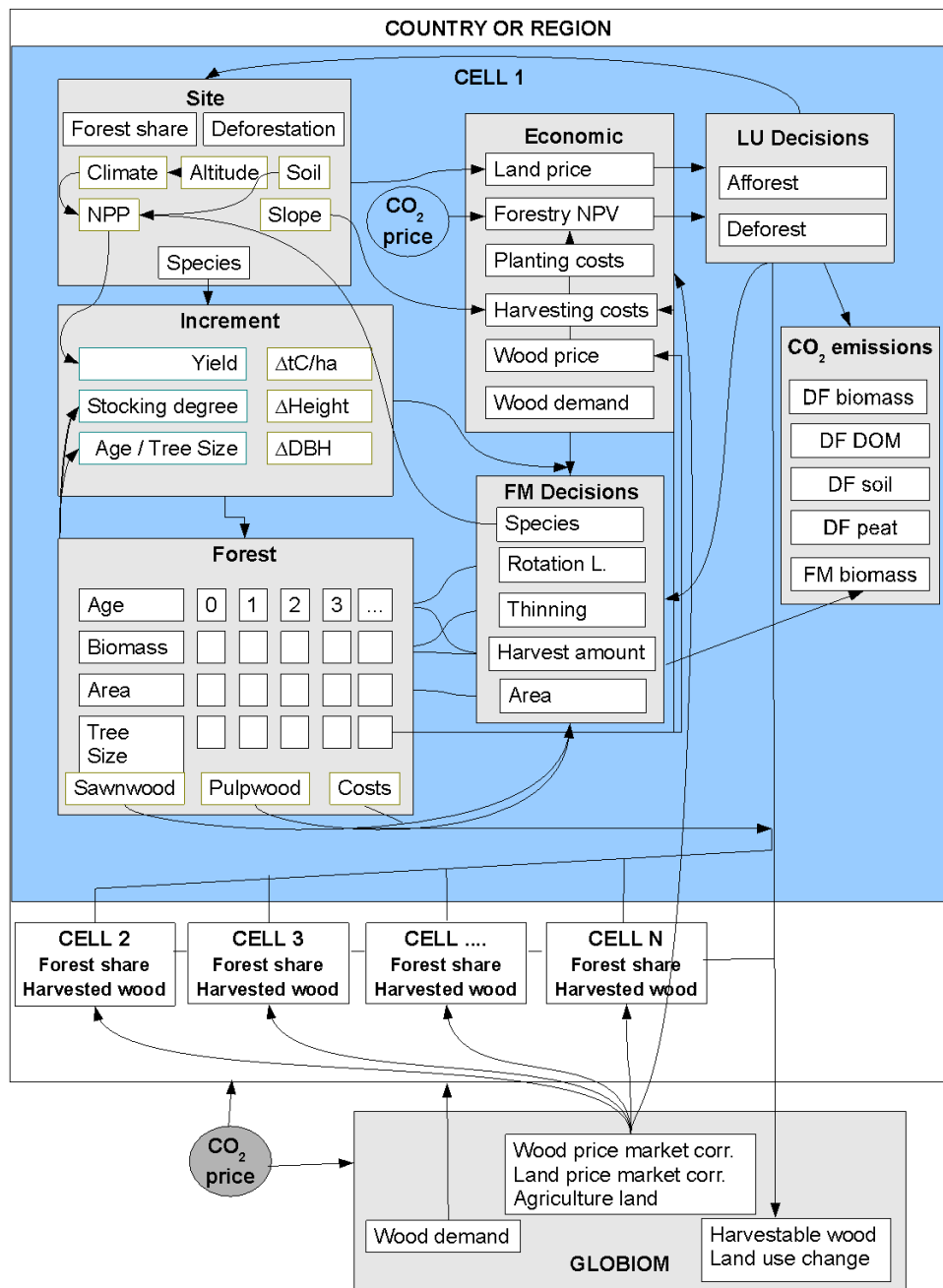


Рис.3.1. Структура моделі G4M

Модель G4M складається з шести основних модулів (рис. 3.2): віртуальний ліс (VT), ініціалізація параметрів віртуального лісу (Forest initialization), прийняття рішень з управління лісовим господарством (Forest management decisions), прийняття рішень зі зміни землекористування (Land use change decisions), динаміка віртуального лісу (Forest dynamics) і вивід результатів у графічний інтерфейс користувача (GUI output).

Модуль віртуального лісу імітує ріст лісів і лісокористування у масштабі лісового господарства на площі, приблизно 50x50 км (0.5x0.5 градуса). Модуль віртуального лісу використовується в інших модулях. Ініціалізація параметрів віртуального лісу виконується тільки один раз на самому початку моделювання. Цей модуль створює два типи віртуального лісу в кожній клітинці растру (ліс, який існує з 2000 року (під назвою «старий ліс») і ліс, який був посаджений після 2000 року (під назвою «новий ліс»)) і встановлює основні параметри віртуального лісу у клітинках відповідно до спостережень (статистичні дані, дані інвентаризації лісів, дані міжнародних організацій (ФАО (Food and Agriculture Organization - FAO) та МКЗЛЄ (Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe – MCPFE)), геопросторові дані на основі супутникових даних та ін.). Модуль прийняття рішень з управління лісовим господарством виконується на кожному кроці моделювання, у цьому модулі визначається вік рубки лісу (або оборот рубки) і режим рубок догляду, щоб задовольнити попит на деревину на рівні країни або регіону з урахуванням стратегії поглинання вуглецю. Модуль прийняття рішення щодо зміни землекористування виконується щороку для оцінки ЧПВ сільського та лісового господарств, з тим щоб встановити кожному клітинку растру в один з трьох станів – заліснення, знеліснення, або відсутність змін землекористування, а також визначити швидкість заліснення та знеліснення. Модуль динаміки лісів застосовує параметри управління лісами і зміни землекористування, які були визначені у інших модулях, до віртуальних лісів: заліснення додає ліс до «нового лісу», знеліснення лісів зменшує площу «старого лісу», а параметри лісокористування впливають як на «старий» так і на «новий» ліс. У цьому модулі також обчислюються емісії CO<sub>2</sub> при залісненні, знелісненні і веденні лісового господарства. Зокрема, емісії при зміні землекористування

обчислюються для надземної і підземної біомаси лісів, мертвої органічної речовини, (мінерального) ґрунту і боліт; емісії лісокористування оцінюються з надземної і підземної біомаси. У модулі виведення результатів у користувацький графічний інтерфейс (GUI) формуються географічні карти, зведені таблиці по країнах і регіонах у двійковому форматі, які можна переглядати за допомогою спеціального програмного забезпечення.

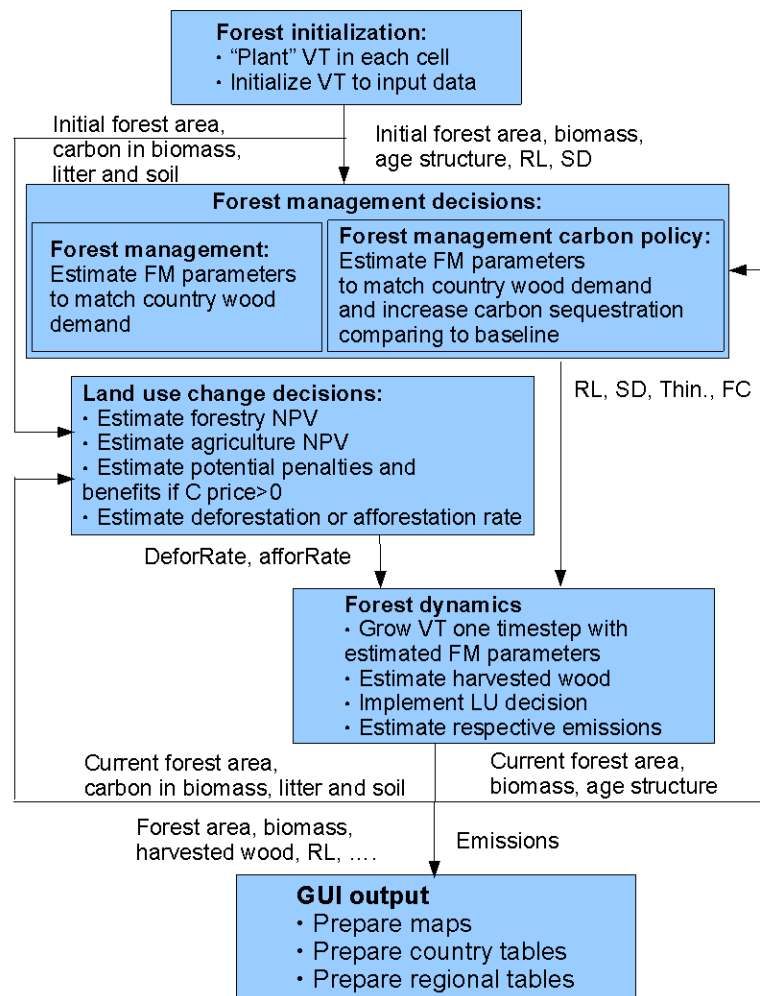


Рис. 3.2. Алгоритмічна структура моделі G4M

## 3.2. Моделювання лісокористування

### 3.2.1. Модель віртуального лісу

Модуль віртуального лісу розроблений Г.Кіндерманном [178]. Цей модуль імітує лісове господарство в масштабах лісу. Модуль описує ліс з точки зору динаміки стовбурної деревини. Він складається з двох частин: підмодуля росту лісу, де обчислюються приріст висоти стовбура, діаметра стовбура на висоті 1.3м

та біомаси стовбурів дерев для заданого віку; та симулятора вікових когорт, де симулюються рубки головного користування та рубки догляду і обчислюється динаміка зміни параметрів лісу. Зокрема, функції приросту моделюють загальний обсяг продукції вуглецю лісонасадження ( $TCP$ ) у віці  $A$  [178]

$$TCP_A = TCP_{max} \cdot \exp \left\{ k \cdot \left[ \ln \left( \frac{A}{A_{max}} \right) \right]^2 \right\}, \quad (3.1)$$

де  $TCP_{max}$  – це максимальний загальний обсяг продукції вуглецю, яка може бути досягнута деревостаном до віку  $A_{max}$ ,  $k$  визначає форму кривої функції. Діаметр дерев на висоті грудей ( $DBH_{fs}$ ) у деревостанах з повнотою рівною 1 визначається за формулою [178]

$$DBH_{fs} = a_0 \cdot \{1 - \exp[a_1 \cdot (A - A_{h1.3})]\}^{a_2}, \quad (3.2)$$

де

$$a_0 = c_{27} + c_{28} \cdot MAI,$$

$$a_1 = \frac{c_{29}}{(1 + c_{30} \cdot MAI^{c_{31}})},$$

$$a_2 = \frac{c_{32}}{(1 + c_{33} \cdot MAI^{c_{34}})},$$

$A_{h1.3}$  – вік при якому дерева досягають висоти 1.3м:

$$A_{h1.3} = \frac{\ln \left( 1 - \left[ \frac{1.3}{c_{22} \cdot MAI^{c_{23}}} \right]^{\frac{1}{c_{25} \cdot MAI^{c_{26}}}} \right)}{c_{24}}.$$

Тоді діаметр дерев на висоті грудей ( $DBH_{SD}$ ) у деревостанах з повнотою рівною  $SD$  визначають за формулою [178]:

$$DBH_{SD} = DBH_{fs} \cdot (2 - sd^{c_{35}}). \quad (3.3)$$

Висоту дерев у віці  $A$ , визначають за формулою [178]:

$$h_A = c_{22} \cdot MAI^{c_{23}} \cdot [1 - \exp(c_{24} \cdot A)]^{c_{25} \cdot MAI^{c_{26}}}. \quad (3.4)$$

Коефіцієнт  $k$ , який задає форму кривої функції  $TCP_A$  визначають за формулою [178]:

$$k = c_0 + c_1 \cdot \exp(c_2 \cdot MAI^{c_3}).$$

Максимальний вік деревостану, при якому приріст є більшим нуля визначають за формулою [178]:

$$A_{max} = c_4 + \frac{c_5}{1 + \exp(c_6 + c_7 \cdot MAI)}. \quad (3.5)$$

Максимальну продукцію вуглецю ( $TCP_{max}$ ) визначають за формулою:

$$TCP_{max} = MAI \cdot A_{max} \cdot 0.25/k.$$

Вік рубки деревостану, при якому досягається максимальне значення середнього річного приросту визначають за формулою:

$$A_{opt} = A_{max} \cdot \exp(0.5/k). \quad (3.6)$$

Максимальний середній річний приріст ( $MAI$ ) визначають за формулою:

$$MAI = \frac{TCP_{opt}}{A_{opt}}.$$

Стовбурну біомасу у віці  $A$  визначають за формулою [178]:

$$C_{max_A} = TCP_A \cdot \left[ b_0 + b_1 \cdot \ln\left(\frac{A}{A_{opt}}\right) \right] \cdot \left[ 1 - b_2 \cdot \frac{A}{A_{opt}} \right]^{c_{21}}, \quad (3.7)$$

де

$$b_0 = c_8 + \frac{c_9}{1 + \exp(c_{10} + c_{11} \cdot MAI)},$$

$$b_1 = \frac{c_{12}}{1 + \exp(c_{13} + c_{14} \cdot MAI)} + \frac{c_{15}}{1 + \exp(c_{16} + c_{17} \cdot MAI)},$$

$$b_2 = c_{18} + c_{19} \cdot \exp(c_{20} \cdot MAI).$$

Тоді продукцію деревостану з повнотою  $SD$  визначають за формулою [178]:

$$TCP_{SD} = TCP_{opt} \cdot \frac{d_6 - d_6^{d_1}}{d_4}, \quad (3.8)$$

де

$$d_1 = 1 + \frac{A^{c_{36}}}{c_{37}} \cdot \frac{1}{(c_{38} + c_{39} \cdot MAI^{c_{40}})},$$

$$d_2 = 1 + \frac{c_{41}}{\left(1 + c_{42} \cdot A^{c_{43}} \cdot \frac{c_{41}}{c_{44} + MAI^{c_{45}}}\right)},$$

$$d_3 = \left(\frac{1}{d_1}\right)^{\frac{1}{d_1 - 1}},$$

$$d_4 = d_3 - d_3^{d_1},$$

$$d_5 = d_2 \cdot d_3,$$

$$d_6 = \begin{cases} d_3 & \text{if } d_3 \leq SD \cdot d_5 \\ SD \cdot d_5 & \text{if } d_3 > SD \cdot d_5 \end{cases}$$

Значення коефіцієнтів виразів для основних груп деревних порід Європи, визначених за даними таблиць ходу росту, наведено у таблиці Д.3.1 [178] у Додатку А.

Функції росту лісу також дозволяють оцінити оборот рубки, який є оптимальним для отримання максимального середнього річного приросту і максимальної сталої лісозаготівлі кожного року ( $RL_{MAI} = A_{opt}$ ), або для отримання максимальної біомаси ( $RL_{maxBm} = A_{max}$ ), або для збереження сталої наявної біомаси ( $RL_{Bm}$ ) для конкретних умов зростання ( $MAI$ ) і режиму лісокористування (повноти,  $SD$ , та обороту рубок).

Симулятор вікових когорт створює віртуальний ліс у вигляді 4 масивів даних - про площу вікових класів, біомасу, діаметр та висоту дерев у різних вікових класах. Біомаса, висота та діаметр, а також повний приріст біомаси з віком обчислюється у підмодулі функцій росту відповідно до лісорослинних умов ( $MAI$ ), повноти ( $SD$ ), породи дерев та обороту рубки ( $RL$ ). Ліс представляється набором  $N$  ( $N=RL+1$ ) одновікових деревостанів. Ліс, який створюється симулятором вікових когорт, може мати задану вікову структуру, тобто відносну площу деревостанів різного віку, якщо така інформація відома, або мати «нормальну» вікову структуру, тобто всі вікові класи мають однакову площу. На кожному кроці моделювання (можливе використання кроків моделювання від 1 до 10 років) вік деревостанів збільшується на крок моделювання; обчислюється біомаса, яка вирубується під час санітарних рубок, шляхом порівняння наявної біомаси у певному віковому класі та повної продукції у цьому віковому класі, а також враховуючи мінімальний діаметр стовбурів, які доцільно заготовляти; обчислюється заготівля деревини у рубках головного користування шляхом вирубування  $1/RL$  частки площі лісу, що через  $RL$  років приводить ліс до нормального стану.

### 3.2.2. Ініціалізація віртуального лісу

Ініціалізація віртуального лісу необхідна, щоб у кожній клітинці растру, в якій на початку моделювання існує ліс, створити віртуальний ліс з середнім приростом (*MAI*), біомасою і віковою структурою, які відповідають даним спостережень.

Отож, у кожній клітинці растру, де *MAI* та площа землі більші нуля, а умови навколишнього середовища придатні для вирощування лісу, створюють два віртуальні ліси, використовуючи модуль прийняття рішень з управління лісовим господарством - існуючий ліс, параметри якого відповідають спостережуваній надземній біомасі (*abBMmap* – вуглець надземної біомаси, тС/га, якому відповідає вуглець надземної біомаси віртуального лісу, *abBM*) та *MAI*, і новий ліс з нульовою площею, який, ймовірно, буде посаджений під час моделювання (див. рис. 3.3).

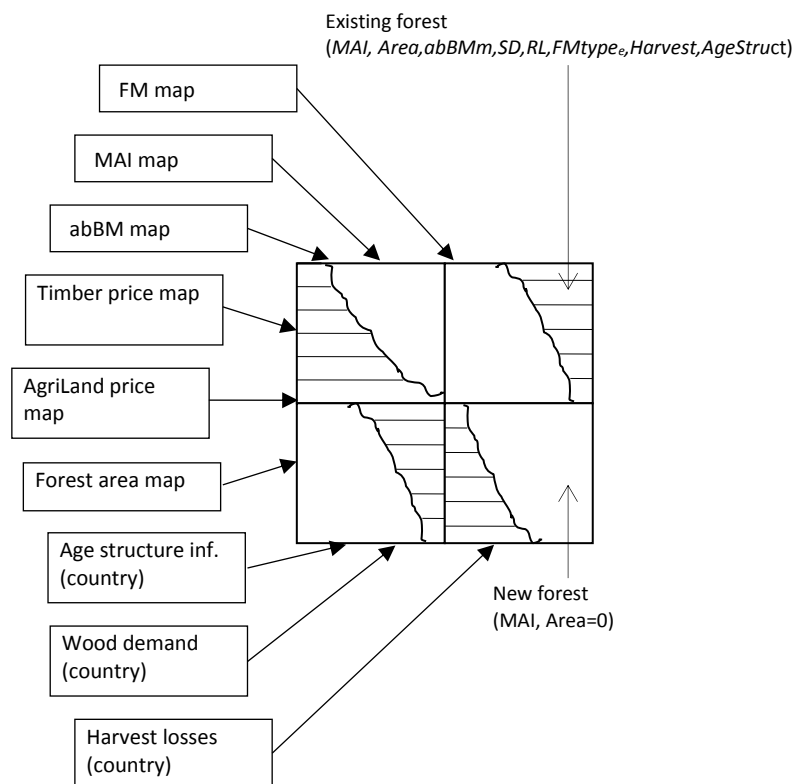


Рис. 3.3. Схематичне зображення ініціалізації віртуального лісу у клітинці растру

Набір параметрів лісу ініціалізується ітераційно, використовуючи геопросторові дані, або дані для країн. Початкове значення відносної повноти модельованого лісу (*SD*) у випадку, коли відомо вікову структуру лісу,



визначається як відношення надземної біомаси модельованого лісу до даних спостережень. Якщо ж вікова структура невідома, то встановлюють  $SD$  рівним 1. Приріст визначається з використанням карти чистої первинної продукції ( $NPP$ ) [176, 177]. Для європейських країн  $MAI$  було модифіковано на рівні країн, щоб приріст відповідав даним, наведеним у звіті [79], або даним, наданим експертами країн. Вікова структура лісу є відомою лише на рівні країни і лише для окремих країн (в основному розвинених країн). Геопросторові дані  $MAI$  та надземної біомаси (біомаса стовбурів у європейській версії моделі) використовуються як додаткова інформація для коригування вікової структури лісу у клітинках растру.

Застосовуємо наступний алгоритм для калібрування вікової структури лісу в кожній клітинці растру. Якщо надземна біомаса лісу, яка моделюється з певною віковою структурою (середньою по країні) в клітинці растру, перевищує 1.05, тоді вікова структура модельованого лісу ітераційно зміщується на кілька вікових класів у бік старих лісів (тобто, збільшується площа старших вікових класів і відповідно зменшується площа молодших вікових класів). Якщо надземна біомаса лісу, яка моделюється з певною віковою структурою (середньою по країні) в клітинці растру, менша ніж 0.5, тоді вікова структура модельованого лісу ітераційно зміщується на кілька вікових класів в сторону молодих лісів (тобто, зменшується площа старших вікових класів і відповідно збільшується площа молодших вікових класів).

Необхідно слідкувати, щоб зміни були симетричними, щоб зберегти середню вікову структуру країни близькою до статистичних даних. Якщо середня по країні вікова структура відхиляється від статистичних даних у бік старших лісів, середній  $MAI$  в такій країні збільшується ітераційно. Якщо ж середня по країні вікова структура відхиляється від статистичних даних у бік молодших лісів, середній  $MAI$  зменшується ітераційно.

Встановлено шість типів лісового господарства ( $FMtype$ ), які впливають на подальші рішення щодо управління лісом [115, 123, 364]:

$$FMtype_i = \begin{cases} -2, & \text{if } FMmap_i = 0 \wedge MAI_i \leq \overline{MAI} \wedge NPVfor_i \leq NPVagr_i \\ -1, & \text{if } FMmap_i = 0 \wedge MAI_i \leq \overline{MAI} \wedge NPVfor_i > NPVagr_i \\ 0, & \text{if } FMmap_i = 0 \wedge MAI_i > \overline{MAI} \\ 1, & \text{if } FMmap_i = 1 \wedge MAI_i \leq \overline{MAI} \wedge NPVfor_i \leq NPVagr_i \\ 2, & \text{if } FMmap_i = 1 \wedge MAI_i \leq \overline{MAI} \wedge NPVfor_i > NPVagr_i \\ 3, & \text{if } FMmap_i = 1 \wedge MAI_i > \overline{MAI} \end{cases}$$

У вищезгаданому виразі  $FMmap$  - це карта, яка вказує на те, чи певна клітинка містить ліс, який використовують для заготівлі деревини, чи не використовують, а  $NPVfor_i$  і  $NPVagr_i$  є чистими приведеними вартостями лісового і сільського господарства, відповідно.  $\overline{MAI}$  - середній річний приріст, усереднений по всіх клітинках растру, які містять «старий ліс» в межах країни, що розглядається.

Ліси з  $FMtype > 0$  використовуються для заготівлі деревини. Тривалість обороту рубки таких лісів встановлюється на рівні  $RL_{MAI}$ ,  $RL_{Bm}$  або  $RL_{maxBm}$  в залежності від того, чи заготівля деревини в країні менша, рівна або більша, ніж попит на деревину ( $RL_{MAI}$  дозволяє забезпечити максимальну сталу щорічну заготівлю деревини і зазвичай є найкоротшим оборотом рубки, який використовується у моделі,  $RL_{Bm}$  дозволяє зберігати поточну біомасу у лісі,  $RL_{maxBm}$  максимізує накопичення біомаси в лісі і зазвичай є найдовшим оборотом рубки, який використовується в моделі). Якщо  $RL_{Bm}$  менше, ніж  $RL_{MAI}$ , ми використовуємо  $RL_{MAI}$ , щоб уникнути ситуації, коли заготівля деревини тимчасового зменшується, навіть якщо тривалість обороту рубки змінено на  $RL_{MAI}$ .

### 3.2.3. Моделювання процесу коригування параметрів лісокористування для заготівлі потрібної кількості деревини на рівні країни

Модуль прийняття рішень з управління лісовим господарством складається з двох підмодулів: параметри лісокористування і управління для секвестрування вуглецю лісами. Підмодуль параметрів лісокористування імітує рішення по

управлінню лісами, якщо не проводяться заходи по секвестрації вуглецю і якщо заходи щодо секвестрації вуглецю (ненульова ціна вуглецю) проводяться.

Управління лісами: На кожному кроці моделювання всі клітинки растру обробляються одна за одною. У вхідному файлі, який містить дані для кожної клітинки растру, клітинки упорядковано відповідно по країнах (або регіонах), а потім по спадаючій по *MAI*, кількості вуглецю в надземній біомасі, площі лісів, щільності населення і придатності до ведення сільського господарства. Таким чином, більш продуктивні ліси, більшої площі і ближче до населених місць обробляються в першу чергу. Заготівля деревини в клітинці є сумою рубок головного користування і рубок догляду. Сума заготовленої деревини в країні (або регіоні) порівнюється з попитом в країні (або регіоні). Якщо попит перевищує пропозицію більш ніж на 1%, тривалість обороту рубки лісів в клітинках (які відносяться до даної країни (або регіону)) зменшується поступово (з кроком 5 років) до  $RL_{MAI}$  одна за одною, поки попит не буде задоволений. Якщо після обробки всіх клітинок в межах країни (регіону), попит перевищує пропозицію на 1%, клітинки, в яких ліс не використовували для заготівлі деревини ( $FM_{type} \leq 0$ ), переводять у стан лісозаготівлі ( $FM_{type} > 0$ ). При цьому, спершу у стан лісозаготівлі переводять клітинки, де щільність населення  $> 0$ , або  $FM_{type} = 0$  або  $FM_{type} = -1$  (рис.Д.3.1 у Додатку А) [115, 359, 393].

Якщо лісозаготівля в країні (регіоні) більша, ніж попит на 1%, тривалість обороту рубки менш продуктивних лісів ( $0 < FM_{type} < 3$ ) поступово (з кроком 5 років) збільшують до  $RL_{maxBm}$ , поки заготівля деревини не буде відповідати попиту. Якщо після обробки всіх клітинок всередині країни, заготівля деревини все ще більша, ніж попит на 2%, тоді оборот рубки лісів в країні (регіоні) з  $FM_{type} > 0$  збільшують поступово до  $RL_{maxBm}$  поки різниця між попитом і пропозицією не буде меншою, ніж 2%. Тип лісоуправління змінюється на ліс, який не використовують для заготівлі деревини, якщо заготівля деревини перевищує попит більш ніж на 3% після попередніх ітерацій ( $FM_{type}: 1, 2 \rightarrow -2, -1$ ), або якщо різниця все ще більша, ніж 5%, продуктивні ліси також переводять в режим невикористання для заготівлі деревини ( $FM_{type} 3 \rightarrow 0$ ).

Для того щоб врахувати поширення населення у клітинки, у яких не було населення, і відповідно врахувати локальний попит на деревину, ми перевіряємо кожні десять років на початку роботи алгоритму зміни управління лісами, чи заготівля деревини відрізняється від попиту більш ніж на  $\pm 12\%$ . Якщо заготівля деревини більша, ніж попит на  $12\%$ , а населення в клітинці растру, яка містить ліс, що використовується для заготівлі деревини, зменшилось до нуля, тоді ліс в цій клітинці переводять у стан невикористання для лісозаготівлі. Тип управління лісами змінюється відповідно ( $FM_{type}: 1, 2, 3 \rightarrow -2, -1, 0$ ). Якщо заготівля деревини менша, ніж попит на  $12\%$ , а клітинка растру, яка містить ліс, що не використовується для лісозаготівлі, була недавно заселена, тоді ліс в цій клітинці переводиться у стан лісозаготівлі. Тип управління лісами в цій клітинці змінюється відповідно ( $FM_{type}: -2, -1, 0 \rightarrow 1, 2, 3$ ).

### 3.2.4. Обчислення емісії CO<sub>2</sub> з біомаси лісів при лісокористуванні

Оскільки G4M використовують для аналізу та підтримки управлінських рішень щодо зменшення емісії парникових газів, тому доцільно імітувати метод обчислення емісій, який рекомендує IPCC для підготовки офіційних звітів країн до РКЗК ООН [1]. Емісії вуглекислого газу від зміни біомаси в лісі у поточному році,  $EmFM_{year}$ , обчислюють за формулою:

$$EmFM_{year} = (BM_{year} - BM_{year-1}) \cdot S_{year} \quad (3.9)$$

де  $BM_{year}$  - біомаса у поточному році на одиниці площі в одиницях вуглецю (зазвичай, використовують тС/га, частка вуглецю у сухій біомасі становить приблизно 0.5 тС/т сухої речовини),  $BM_{year-1}$  біомаса у попередньому році, а  $S_{year}$  площа лісу у поточному році, відповідно. Слід зазначити, що згідно рекомендацій IPCC [1] емісії CO<sub>2</sub> від зміни біомаси в лісі, який посадили в результаті заліснення нелісових ділянок, по замовчуванню перші 20 років враховується у категорії «заліснення». Це одна з причин, чому в моделі створено окремі віртуальні ліси для посаженого лісу. У G4M біомасу лісу у клітинці  $i$  обчислюють сумуючи біомасу у всіх вікових класах,  $BM_{a,i}$ , від нульового (щойно відновлений ліс після рубок) до найстаршого класу віку  $Na$ .

$$BM_{year,i} = \sum_{a=0}^{Na} BM_{a,i}$$

Біомаса  $BM_{a,i}$  відповідає стовбурній біомасі  $Stax_A$  (рівняння 3.7, розділ 3.2.1). Тоді біомаса в країні (чи регіоні) є сумою біомаси в усіх клітинках в межах цієї країни (чи регіону):

$$BM_{year} = \sum_{i=c_0}^{Cn} BM_{year,i}. \quad (3.10)$$

Біомаса включає надземну частину,  $abBM$ , яку визначають у модулі віртуального лісу (рівняння 3.7), та підземну біомасу,  $blBM$ , яка є функцією надземної біомаси та лісової зони (розрізняють тропічні ліси, ліси помірної зони та бореальні ліси [233, Таблиця 3А.1.8]):

$$blBM_i = \begin{cases} 0.18 \cdot abBM_i, & Tropical\ forest \\ 0.22 \cdot abBM_i, & Temperate\ forest \\ 0.25 \cdot abBM_i, & Boreal\ forest. \end{cases} \quad (3.11)$$

### 3.3. Моделювання прийняття рішень щодо землекористування

#### 3.3.1. Імітаційне моделювання процесу прийняття рішень про зміну землекористування

Когнітивна модель прийняття рішення про знеліснення з врахуванням рушійних сил зміни землекористування, які розглянуто в першому розділі, наведена на рис. 3.4 [127]. На рисунку пунктирною лінією зображено фактори, які ми додали до факторів визначених у [176, 177, 118, 128] на основі аналізу досліджень [230, 209, 286, 6, 43].

Рішення про знеліснення або відсутність дії в кожній клітинці растру і на кожний рік приймають на основі порівняння чистої теперішньої вартості лісового господарства  $NPVfor_i$  (визначеного в рівняннях 3.12-3.25), помноженої на калібрувальний пороговий коефіцієнт для кожної країни,  $H_c$ , з чистою теперішньою вартістю сільського господарства  $NPVagr_i$  (визначається в рівняннях 3.26-3.33) плюс дохід від продажу деревини, отриманої при знелісненні, враховуючи податок від втрати вуглецю (якщо ціна вуглецю більша

нуля),  $DV_i$  (рівняння 3.34-3.44), якщо територія не захищена (наприклад, природний заповідник [329]):

$$Defor_i = \begin{cases} True, & NPVagr_i + DV_i > NPVfor_i \cdot H_c \wedge not Protected \\ False, & NPVagr_i + DV_i \leq NPVfor_i \cdot H_c \vee not Protected \end{cases}$$

Рішення про заліснення в кожній клітинці растру,  $i$ , і кожен рік виробляється, якщо є площа для нових лісів (сума відносних площ земель під забудовою та інфраструктурою,  $Bul_i$ , землі, зарезервованої для сільськогосподарських угідь,  $Clr_i$ , та землі під лісом,  $Fs_i$  менше 1), потенційна рослинність є одним з лісових або чагарникових типів, або степ ( $VegType_i$  [245]), або у початковий момент часу в цій клітинці був ліс, територія не захищена, а чиста приведена вартість лісового господарства  $NPVfor_i$  (визначена в рівняннях 3.12-3.25), помножена на калібрувальний пороговий коефіцієнт,  $H_c$ , є більшою, ніж чиста приведена вартість сільського господарства,  $NPVagr_i$  (визначена у рівняннях 3.26-3.33), виглядає наступним чином:

$$Afor_i = \begin{cases} True, & Fs + Bul + Clr < 1 \wedge NPVagr_i < FNPVfor_i \cdot H_c \wedge not Protected \\ False, & otherwise \end{cases}$$

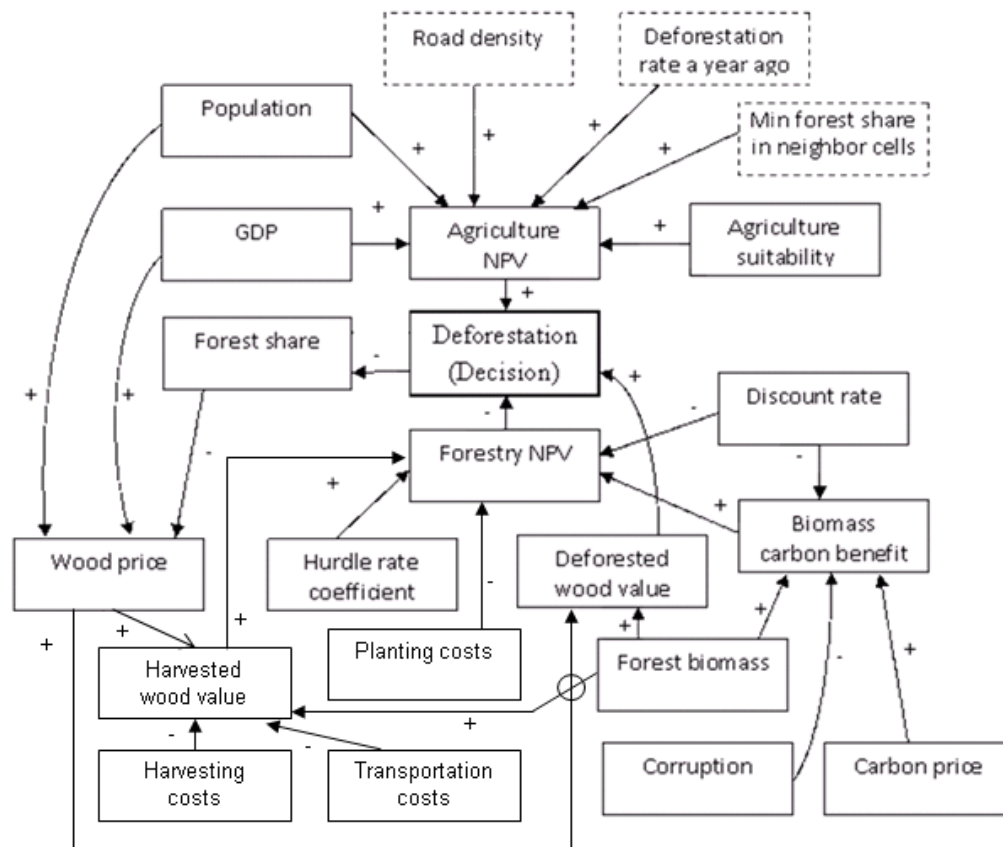


Рис. 3.4. Когнітивна модель прийняття рішення про знеліснення [127]

### 3.3.2. Модель чистої приведеної вартості лісового господарства

Чиста приведена вартість лісового господарства,  $NPVfor_i$ , для багаторазових оборотів рубок  $RL_i$  та коефіцієнта дисконтування, скорегованого з урахуванням ризику [14],  $r_c$ , за умови постійної ціни на деревину та витрат на посадку дерев на місці зрубаних та догляду за лісом визначається наступним рівнянням [15, 176, 177, 318]

$$NPVfor_i = \frac{f_i}{[1+r_c]^{RL_i-1}} \quad (3.12)$$

Якщо потрібно врахувати зміну ціни деревини, або витрат в майбутньому, використовують явний вираз обчислення чистої теперішньої вартості лісового господарства:

$$NPVfor_i = \sum_{RL_i=1}^{\infty} \frac{f_i(RL_i)}{(1+r_c)^{RL_i}} \quad (3.13)$$

На практиці, сумування проводять протягом періоду, який нас цікавить, або поки доданки стають достатньо малими і суттєво не впливають на результат.

У вищенаведених виразах  $f_i$  це чиста теперішня вартість лісу у поточному році (за один оборот рубки) у випадку, коли на ділянці у поточному році уже є ліс стиглого віку. Значення  $f_i$  визначається сумою ціни деревини на корені,  $pw$ , помноженої на об'єм заготовленої деревини,  $V_i$ , витрат на посадку лісу  $cp_i$ , та вартістю секвестрованого вуглецю (у випадку ненульової ціни на вуглець) [176,177]:

$$f_i = -cp_i + pw_i \cdot V_i + B_i \quad (3.14)$$

Якщо розглядаємо різновіковий нормальний ліс (ліс в якому всі вікові класи мають однакову площу) і найстарший віковий клас уже досягнув віку рубки, тоді ліс можна заготовляти щороку об'ємом не більше, ніж приростає за рік, а для дисконтування замість обороту рубки необхідно застосовувати кількість років, скільки буде проводитися заготівля деревини з кроком 1 рік (або використовують крок моделювання).

У випадку, коли розглядають проекти заліснення, господарська діяльність починається з посадки лісу, а перша заготівля деревини відбудеться через  $RL_i$  років, тому дохід від продажу деревини дисконтують [15, 318]:

$$f_i = -cp_i + pw_i \cdot V_i \frac{1}{(1+r_c)^{RL_i}} + B_i \quad (3.15)$$

Витрати на посадку лісу,  $cp_i$ , (\$ / га) визначаються як витрати на посадку у референтній країні,  $cp_{ref}$ , помножену на відношення посадженого лісу до природного поновлення,  $pr_i$ , та індекс цін,  $px_i$ . Відношення посадженого лісу до природного поновлення залежить від середнього річного приросту  $MAIv_i$  (м<sup>3</sup>/(га рік)). Індекс цін визначено як відношення паритету купівельної спроможності [334] у країні, клітинка якої розглядається, до паритету купівельної спроможності референтної країни, якою вибрана Бразилія [176, 177]:

$$cp_i = cp_{ref} \cdot pr_i \cdot px_i, \quad (3.16)$$

$$pr_i = \begin{cases} 0, & MAIv_i < 0 \\ \frac{MAIv_i - 3}{6}, & 3 \leq MAIv_i \leq 9 \\ 1, & MAIv_i > 9, \end{cases} \quad (3.17)$$

$$px_i = \frac{PPP_i}{PPP_{ref}}. \quad (3.18)$$

Ціна деревини у клітинці растру  $i$  складається з локальної ціни, яка визначається через мінімальну та максимальну ціну деревини ( $pw_{min} = 4.4\$/\text{м}^3$ ,  $pw_{max} = 30.8\$/\text{м}^3$ ), стандартизовану щільність населення у клітинці,  $SPd_i$ , індекс дефіциту лісових ресурсів у клітинці,  $SNFs_i$ , індексу ціни,  $px_i$ , [176,177], а також індексу ціни,  $pwGB_{reg}$ , який враховує торгівлю між країнами та регіонами і глобальний попит на деревину [131]:

$$pw_i = pw_{min} - \frac{pw_{max} - pw_{min}}{99} + \frac{pw_{max} - pw_{min}}{99} SPd_i \cdot SNFs_i \cdot px_i \cdot pwGB_{reg} \quad (3.19)$$

Стандартизовану щільність населення обчислюють з врахуванням щільності населення у клітинці,  $Pd_i$  (людей/км<sup>2</sup>, [53, 112], [176,177]):

$$SPd_i = \begin{cases} 1 + \frac{9 \cdot Pd_i}{100}, & Pd_i \leq 100 \\ 10, & Pd_i > 100 \end{cases} \quad (3.20)$$

Індекс дефіциту лісових ресурсів у клітинці визначають за відносною площею лісу в клітинці,  $Fs_i$  [176,177]:

$$SNFs_i = 1 + (1 - Fs_i) \cdot 9 \quad (3.21)$$



Оптимальний оборот рубки,  $RL_i$ , ( $RL_i=RL_{MAI}$ ) визначають за виразом 3.6. Отриманий оборот рубки може бути довшим, ніж той що максимізує чисту приведену вартість, але нас цікавить стале користування лісовими ресурсами, тому ми не дозволяємо заготовляти більше деревини, ніж приростає за такий самий період.

Фактор  $pwGB_{reg}$  враховує зміну локальної ціни деревини у клітинці, спричинену торгівлею деревиною між країнами, чи регіонами [131]:

$$pwGB_{reg}(year) = \frac{pwGBa_{reg}(year)}{pwGBa_{reg}(2000)}, \quad (3.22)$$

де  $pwGBa_{reg}(year)$  та  $pwGBa_{reg}(2000)$  ціна деревини у регіоні  $reg$ , отримана у моделі GLOBIOM, у поточному році та 2000 році, відповідно.

Чиста теперішня вартість вуглецю, що зберігається у надземній лісовій біомасі та лісових продуктах  $B_i$ , визначається наступним виразом [15, 176]:

$$B_i = erc_c \cdot NPP_i \cdot CU \cdot (1 - b_i) \cdot \{r_c^{-1} \cdot |1 - (1 + r_c)^{R_i}| - R_i \cdot (1 - \theta_i) \cdot (1 + r_c)^{R_i}\}, \quad (3.23)$$

де  $b_i$  - базовий рівень поглинання вуглецю,  $\theta_i$  представляє вуглець, що зберігається в короткоживучих ( $frac_{slp}$ ) і довгоживучих ( $frac_{llp}$ ) деревних продуктах [104] та емісії вуглецю в атмосферу, коли ці продукти розкладаються з швидкістю  $dec_{slp}$  і  $dec_{llp}$  ( $0.5$  та  $0.03$  рік<sup>-1</sup> [57], рівняння 3.24). Рівняння також враховує частку площі, де деревину спалюють на місці [176],  $frac_{sb}$ :

$$\theta_i = \left(1 - \frac{dec_{llp} \cdot frac_{llp}}{dec_{llp} + r_c} - \frac{dec_{slp} \cdot frac_{slp}}{dec_{slp} + r_c}\right) \cdot (1 - frac_{sb}) + (1 - frac_{sb}) \cdot frac_{sb}. \quad (3.24)$$

Всі вироби з деревини розділені на короткоживучі та довгоживучі фракції:

$$frac_{slp} = 1 - frac_{llp}. \quad (3.25)$$

Ціна за тону вуглецю, що застосовується як податок на вуглець у випадку знеліснення або виплати за вуглець, що накопичується в лісовій екосистемі (надземній і підземній біомасі, підстилці, відмерлих деревах та ґрунті) та деревних продуктах, якщо висаджено новий ліс, позначається  $pc$ . Фактично, гроші, які власники лісів сплачують як податок за тону втраченого вуглецю, або отримують за тону накопиченого вуглецю,  $erc_c$ , є меншим, ніж ціна на вуглець, оскільки вона зменшується залежно від конкретної країни, враховуючи корупцію та неефективність управління в країнах [124,176,177,330]. Kindermann et al.,

(2006) [176] обчислює корупційний фактор як середній показник відсотка від "політичної стабільності", "ефективності влади" та "контролю за корупцією" на основі даних [169]):

$$epc_c = pc_c \cdot leak_c \quad (3.26)$$

У випадку знеліснення лісів податок, сплачений власником лісу, коригується відповідно до рівняння 3.23.

### 3.3.3. Модель чистої приведеної вартості сільського господарства

Чиста приведена вартість сільського господарства,  $NPVagr_i$ , моделюється за допомогою функціональної форми виробничої функції Кобба-Дугласа з використанням стандартизованої придатності землі до сільського господарства,  $SAgS_i$  (рівняння 3.28; сільськогосподарська придатність  $AgS_i$  - придатність сільського господарства визначається пропорційно до потенційно максимальної продуктивності, яка ґрунтується на рівні альтернативних витрат за [215]), та стандартизованої щільності населення,  $SPd_i$  (рівняння 3.20), параметри  $\alpha$  та  $v_i$  (рівень цін на землю, \$ / га) визначаються рівняннями 3.29 та 3.30 [176]:

$$NPVagr_i = v_{i,2000} \cdot SAgS_i^\alpha \cdot SPd_i^\alpha \cdot RDT_i \cdot DS_i \cdot Dfprev_i \cdot AGB_{reg}, \quad (3.27)$$

$$SAgS_i = \begin{cases} 1 + \frac{9 \cdot AgS_i}{0.5}, & AgS_i < 0.5 \\ 10, & AgS_i \geq 0.5 \end{cases}, \quad (3.28)$$

$$\alpha = \frac{\ln(PL_{max}) - \ln(PL_{min})}{2 \cdot \ln(10)}, \quad (3.29)$$

$$v = PL_{min} \cdot px_i. \quad (3.30)$$

Для врахування розповсюдження вирубки лісу на сусідні клітинки,  $DS_i$  (рівняння 3.31), ми оцінюємо частку лісу в поточній ( $Fs_i$ ) та сусідніх клітинах ( $Fs_{ij}$ ) та співвідносимо вартість сільського господарства зі зміною мінімальної частки лісу в клітинах. Крім того, ми враховуємо, що найближча відстань до місць знеліснення має більш високий вплив на сільське господарство, а в тропічних лісах знеліснення у попередні,  $Dfprev_i$ , роки є одним з найбільш сильних чинників знеліснення у наступні роки (поріг втрати частки лісу 0.00014 визначено на основі аналізу гістограми втрати лісу, рис.3.5) [126]:

$$DS_i = \begin{cases} 2 \cdot (1 - 0.5 \cdot FS_{i,year-1}), & FS_{i,year-1} < \min_{i,j} FS_{i,j} \wedge potVeg \neq Tropic \\ 2 \cdot (1 - 0.5 \cdot \min_{i,j} FS_{i,j}), & FS_{i,year-1} \geq \min_{i,j} FS_{i,j} \vee potVeg = Tropic \end{cases} \quad (3.31)$$

$$Dfprev_i = \begin{cases} 2, & fprev_{i,year-1} > 0.00014 \wedge potVeg = Tropic \\ 1, & Otherwise \end{cases} \quad (3.32)$$

У моделі G4M ми апроксимуємо «відстань» до дороги через щільність доріг [52] у клітинках растру,  $RD_i$  (рівняння 3.33). Наклавши карту щільності доріг на карту втрати лісового покриву [134] отримаємо залежність втрати лісового покриву від щільності доріг. Середня втрата лісового покриву на 20% вища, якщо розглядати лише ті клітинки, де щільність доріг більше нуля. З аналізу виключаємо клітинки з високою щільністю доріг (більше 0.15), оскільки така щільність доріг зустрічається у містах, густонаселених районах, або місцях, де проводять лісозаготівлю, а також клітинки з швидкістю втрати лісового покриву більше 0.00103, де відбувається різке зменшення кількості клітинок із втратою лісового покриву (рис 3.5). В подальшому швидкість втрати лісового покриву не значно зростає із збільшенням щільності доріг:

$$RDT_i = 1.2 + 0.0044 \cdot RD_i. \quad (3.33)$$

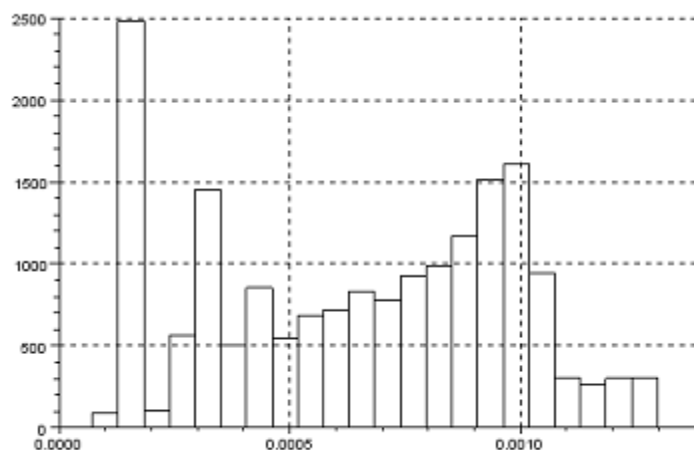


Рис.3.5 Гістограма втрати лісового покриву.

Фактор  $AGB_{reg}$  враховує зміну локальної ціни сільськогосподарської землі у клітинці, спричинену торгівлею сільськогосподарськими товарами між країнами, чи регіонами [131]:

$$AGB_{reg}(year) = \frac{AGBa_{reg}(year)}{AGBa_{reg}(2000)}, \quad (3.34)$$

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

### 3.3.4. Модель вартості деревини, отриманої при знелісненні

Вартість деревини, отриманої при знелісненні,  $DV_i$ , враховує дохід від продажу заготовленої деревини та сплати коштів за втрати вуглецю у випадку знеліснення (доповнено рівняння [177]):

$$DV_i = BM_i \cdot pw_i \cdot C2W \cdot (1 - HL_i) \cdot (1 - frac_{sb}) - epc_c \cdot [ProdLoss_i + LitterLoss_i + SOCLoss_i + blBMLoss_i + BM_i frac_{sb} + Dead_i] \quad (3.35)$$

Вартість деревини при знелісненні також враховує емісії вуглецю, пов'язані з розкладанням виробів з дерева, дисконтовані протягом нескінченного часового горизонту [15]:

$$ProdLoss_i = BM_i \cdot (1 + r_c) \cdot \left( \frac{dec_{ulp} \cdot frac_{ulp}}{dec_{ulp} + r_c} + \frac{dec_{slp} \cdot frac_{slp}}{dec_{slp} + r_c} \right) \cdot (1 - frac_{sb}) \quad (3.36)$$

розкладання фракцій лісової підстилки (вважаємо, що деревна фракція складає 30%, а трав'яна 70%), які розкладаються зі швидкістю  $dec_{wli}$  та  $dec_{hli}$ , відповідно (аналогічно до виразу розкладання виробів з деревини, визначеного у [15], але з іншими коефіцієнтами розкладання):

$$LitterLoss_i = Litter_i \cdot (1 + r_c) \cdot \left( \frac{dec_{wli} \cdot frac_{wl}}{dec_{wli} + r_c} + \frac{dec_{hli} \cdot frac_{hl}}{dec_{hli} + r_c} \right); \quad (3.37)$$

розкладання органічного вуглецю ґрунту з швидкістю  $dec_{soci}$  (аналогічно до виразу розкладання виробів з деревини [15]):

$$SOCLoss_i = (1 + r_c) \cdot \frac{SOC_i \cdot dec_{soci}}{dec_{soci} + r_c}; \quad (3.38)$$

спалювання пнів та товстого коріння зрубаних дерев (70% підземної біомаси,  $blBM_i$ , пропорційна надземній біомасі, рівняння 3.11) та розкладання тонких

коренів, залишених на місці (30% підземної біомаси) із швидкістю розкладу  $dec_{hli}$  (аналогічно до виразу розкладання виробів з деревини [15]):

$$blBMLoss_i = blBM_i \cdot \left[ 0.7 + (1 + r_c) \cdot \frac{0.3 \cdot dec_{hli}}{dec_{hli} + r_c} \right]; \quad (3.39)$$

а також спалювання сухих дерев  $Dead_i$ , що знаходились в лісі (тС/га, отримані в [175] за даними статистики ФАО), та частини надземної біомаси дерев,  $BM_i frac_{sb}$ .

Швидкість розкладання  $dec_{wli}$  (рівняння 3.40),  $dec_{hli}$  (рівняння 3.43) та  $dec_{soci}$  (рівняння 3.46) є функціями довготривалої середньорічної температури,  $T_i$ , та опадів,  $P_i$ , в кожній клітинці ( $i$ ) растру, обчислені за виразами з [74] та кліматичною базою даних [332]:

$$dec_{wli} = \min\{FT_{wli}, FP_{wli}\}, \quad (3.40)$$

де

$$FT_{wli} = 0.037 \cdot \exp[0.0522(T_i + 31.63)] - 0.0348, \quad (3.41)$$

$$FP_{wli} = \left[ \frac{0.1927}{0.021 + \exp(8.53 - 0.0095 \cdot P_i)} + 4.9352 \right] \cdot \left[ \frac{0.126}{1.51 + \exp(0.003 \cdot P_i - 4.65)} + 0.05 \right] \cdot [1 - \exp(-0.001 \cdot P_i)]; \quad (3.42)$$

$$dec_{hli} = \min\{FT_{hli}, FP_{hli}\}, \quad (3.43)$$

де

$$FT_{hli} = 0.1063 \cdot \exp[0.0926(T_i + 6.41)] + 0.2365, \quad (3.44)$$

$$FP_{wli} = \left[ \frac{0.4436}{0.0215 + \exp(4.2 - 0.0053 \cdot P_i)} + 5.944 \right] \cdot \left[ \frac{0.094}{0.7 + \exp(0.0023 \cdot P_i - 5.05)} + 0.076 \right] \cdot [1 - \exp(-0.001 \cdot P_i)]; \quad (3.45)$$

$$dec_{soci} = 0.01 \cdot dec_{hli}. \quad (3.46)$$

### 3.3.5. Швидкість зміни землекористування

Швидкість вирубки лісів ( $Fdec_i$ ) визначається рівняннями 3.47-3.51 [176,177, 118, 123]. Вводиться специфічний для країни параметр  $DefRate_c$  для калібрування моделі відповідно до статистики ФАО (розділ 3.5.2). Початкова частка лісу в кожній клітинці взята з GLC 2000 [303], ВВП взято з бази даних [100] та з урахуванням ВВП 1995 року.

$$Fdec_i = \begin{cases} 0, & Defor_i = False \\ Fs_i, & Ftdec_i > Fs_i \wedge Defor_i = True \\ Ftdec_i, & Ftdec_i \leq Fs_i \wedge Defor_i = True \end{cases}, \quad (3.47)$$

де

$$Ftdec_i = \begin{cases} 0, & Fs_i = 0 \vee AgS_i = 0 \\ x_i, & Fs_i > 0 \wedge AgS_i > 0 \wedge x_i \leq Fs_i, \\ Fs_i, & x_i > Fs_i \end{cases} \quad (3.48)$$

де (вираз [176,177]) доповнюємо параметрами  $DefRate_c$  та  $DefRateCell_i$  для калібрування швидкості знеліснення на рівні країн та клітинок, відповідно)

$$x_i = \frac{0.05 \cdot DefRate_c \cdot DefRateCell_i}{1 + \exp\left(-1.799 + \frac{0.22}{Fs_i} + \frac{0.1663}{AgS_i} - 0.04029 \cdot Pd_i + 5.305 \cdot 10^{-4} Pd_i^2 + 1.282 \cdot 10^{-4} \cdot GDP_i\right)}, \quad (3.49)$$

У 2000 році для клітинок, які містять тропічні ліси ( $VegType=1,2$ ), проводимо додаткове калібрування швидкості знеліснення відповідно до значень карти втрати лісів [134]:

$$DefRateCell_i = \begin{cases} \frac{DefRateHansen_i}{x_i}, & year = 2000 \wedge x_i > 0 \wedge DefRateHansen_i > 0 \wedge VegType_i = \overline{1,2} \\ \frac{0.000139}{x_i}, & year = 2000 \wedge x_i > 0 \wedge DefRateHansen_i = 0 \wedge VegType_i = \overline{1,2} \\ 1, & VegType_i > 2 \end{cases} \quad (3.50)$$

Лінійно зменшуємо вплив цих коефіцієнтів після 2010р., щоб не обмежувати поширення знеліснення в інші клітинки:

$$DefRateCell_{i,year} = \begin{cases} DefRateCell_{i,year-1} + \frac{1 - DefRateCell_{i,year-1}}{2100 - year}, & year > 2010 \wedge VegType_i = \overline{1,2} \\ 1, & otherwise \end{cases} \quad (3.51)$$

Частка «старого лісу» у клітинці растру  $i$  у поточному році обчислюється за формулою:

$$Fs_i(year) = Fs_i(year - 1) - Fdec_i. \quad (3.52)$$

Швидкість заліснення,  $Faff_i$ , визначається рівняннями 3.53 і 3.54. Це функція сільськогосподарської придатності,  $AgS_i$ , що визначає природні умови посадки

дерев, та валовий внутрішній продукт, ВВП, який апроксимує стан розвитку транспортної інфраструктури та технічних можливостей у клітинці растру. Параметр,  $AffRate_c$ , вводиться, щоб налаштувати швидкість заліснення відповідно до статистики ФАО (див. розділ 3.52).

$$Faff_i = \begin{cases} 0, & Affor_i = False \\ 1 - (Fs_i + Bul_i + Crl_i), & Ftaff_i > (Fs_i + Bul_i + Crl_i) \wedge Affor_i, \\ Ftaff_i, & Ftaff_i \leq (Fs_i + Bul_i + Crl_i) \wedge Affor_i \end{cases} \quad (3.53)$$

де (аналогічно до швидкості знеліснення [176])

$$Ftaff_i = \frac{0.01 \cdot AffRate_c}{1 + \exp\left(\frac{0.1}{AgS_i} + \frac{1000}{GDP_i}\right)}. \quad (3.54)$$

Частка «нового лісу» у клітинці растру  $i$  у поточному році обчислюється за формулою:

$$Fsn_i(\text{year}) = Fsn_i(\text{year} - 1) + Faff_i. \quad (3.55)$$

### 3.3.6. Моделювання процесів емісій CO<sub>2</sub> при знелісненні

Вважаємо, що знеліснення відбувається при розширенні населених пунктів, розбудові інфраструктури та збільшенні площі орних земель. У таких випадках при знелісненні втрачається вуглець, акумульований у біомасі дерев, яку частково спалюють, а частково використовують у промисловості та будівництві; вуглець сухих дерев, які спалюють; лісової підстилки та частково ґрунту, оскільки зменшується кількість опаду.

Ми розглядаємо наступні емісії вуглекислого газу, викликані вирубкою лісів: емісії від розкладання деревних виробів ( $EmProduct_i$ , рівняння 3.56), емісії від розкладання підстилки ( $EmLitter_i$ , рівняння 3.57), емісії від розкладання органічного вуглецю ґрунту ( $EmSOC_i$ , рівняння 3.58), емісії від розкладання тонкого коріння ( $EmFRoot_i$ , рівняння 3.59), емісії від спалювання грубих коренів ( $EmCRoot_i$ , рівняння 3.60), емісії від спалювання сухих дерев ( $EmDead_i$ , рівняння 3.61) і емісії від спалювання відходів біомаси при вирубуванні лісів ( $EmSlashBurn_i$ , рівняння 3.62):

$$Em_i = EmProduct_i + EmLitter_i + EmSOC_i + EmFRoot_i + EmCRoot_i + EmDead_i + EmSlashBurn_i$$

В окремих випадках приймають, що при знелісненні весь вуглець біомаси дерев перетворюється у емісії CO<sub>2</sub>. Тоді замість  $EmProduct_i$ ,  $EmFRoot_i$  та  $EmCRoot_i$ , обчислюють  $EmBm_i$ .

Для оцінки емісії CO<sub>2</sub> від розкладання продуктів деревини, підстилки, тонкого коріння та ґрунту в кожній клітинці растру ми розглядаємо когорти,  $k$ , що характеризуються віком знеліснених ділянок клітинки. Максимально можливий вік найстаршої когорти,  $CA$ , дорівнює кількості років, що проходять від початкового часу моделювання до поточного року обчислень.

Емісії CO<sub>2</sub> від розкладання продуктів деревини визначають за формулою:

$$EmProduct_i = \sum_{k=1}^{CA} (Prodll_{i,k} \cdot dec_{llp} + (Prodsl_{i,k} \cdot dec_{slp})), \quad (3.56)$$

де

$$Prodll_{i,k} = BM_{i,k} \cdot frac_{llp} \cdot (1 - frac_{sb}),$$

$$Prodsl_{i,k} = BM_{i,k} \cdot frac_{slp} \cdot (1 - frac_{sb}).$$

Емісії CO<sub>2</sub> від розкладання підстилки визначають за формулою:

$$EmLitter_i = \sum_{k=1}^{CA} Litter_{i,k} \cdot (frac_{wl} \cdot dec_{wli} + frac_{hli} \cdot dec_{hli}). \quad (3.57)$$

Емісії CO<sub>2</sub> від розкладання ґрунту визначають за формулою:

$$EmSOC_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^{CA} SOC_{i,k} \cdot dec_{sosi}, & SOC_{i,k} \geq 0.6 \cdot SOC_{i,year=2000} \cdot Fdec_{i,k} \cdot Area_i \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3.58)$$

Емісії CO<sub>2</sub> від розкладання тонкого коріння визначають за формулою:

$$EmFRoot_i = \sum_{k=1}^{CA} FRoot_{i,k} \cdot dec_{hli}. \quad (3.59)$$

Емісії від спалювання товстого коріння та пнів визначають за формулою:

$$EmCRoot_i = 0.7 \cdot blBM_i \cdot Fdec_{i,year} \cdot Area_i. \quad (3.60)$$

Емісії від спалювання сухих дерев визначають за формулою:

$$EmDead_i = Dead_i \cdot Fdec_{i,year} \cdot Area_i. \quad (3.61)$$

Емісії від спалювання частини знеліснених стовбурів дерев визначають за формулою:

$$EmSlashBurn_i = BM_i \cdot frac_{sb} \cdot Fdec_{i,year} \cdot Area_i. \quad (3.62)$$



Щороку обчислюють нові значення резервуарів вуглецю, які повільно розкладаються (вирази 3.63-3.67):

$$Prodll_{i,k,year} = Prodll_{i,k,year-1} \cdot (1 - dec_{llp}), \quad (3.63)$$

$$Prodsl_{i,k,year} = Prodsl_{i,k,year-1} \cdot (1 - dec_{slp}), \quad (3.64)$$

$$Litter_{i,k,year} = Litter_{i,k,year-1} \cdot [frac_{wli} \cdot (1 - dec_{wli}) + frac_{hli} \cdot (1 - dec_{hli})], \quad (3.65)$$

$$FRoot_{i,k,year} = FRoot_{i,k,year-1} \cdot (1 - dec_{hli}). \quad (3.66)$$

Вважаємо, що знеліснення приводить до втрати до 40% органічного вуглецю ґрунту [62]:

$$SOC_{i,k,year} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{CA} SOC_{i,k,year-1} \cdot (1 - dec_{soci}), & SOC_{i,k,year-1} \geq 0.6 \cdot SOC_{i,2000} \cdot Fdec_{i,k} \cdot Area_i \\ 0.6 \cdot SOC_{i,2000} \cdot Fdec_{i,k} \cdot Area_i, & otherwise \end{cases} \quad (3.67)$$

Болотисті ґрунти містять велику кількість органічного вуглецю, який швидко вивільняється при осушуванні боліт. В деяких країнах, наприклад Індонезії, при вирубуванні лісів на болотистих ґрунтах з подальшим осушуванням боліт та веденні сільського господарства викиди CO<sub>2</sub> з ґрунту співмірні з втратою біомаси лісів, які вирубують на території всієї країни (100-300 МтCO<sub>2</sub>/рік). Існуючі локальні дослідження, які базуються на моделюванні процесів зміни рівня води в болотах та розкладу органічної речовини, не можуть бути використані у глобальній моделі через відсутність необхідних вхідних даних та наявною структурою G4M.

Розроблено алгоритм для оцінки емісій CO<sub>2</sub> з боліт при вирубуванні лісів та осушуванні для глобальної моделі лісу G4M, з допомогою якого можна отримати оцінку та прогноз емісій [363]. Цей алгоритм враховує структуру моделі, наявні дані та рекомендації IPCC [143, 144].

Для обчислень емісії CO<sub>2</sub> використовуємо метод Tier-1 або Tier-2 з [143] залежно, які дані наявні для кожної країни. Формуємо файли з вхідними даними, а саме, факторами емісій CO<sub>2</sub> для різних періодів після осушування, зокрема, для перших п'яти років, *peatEmF5*, та наступних років, *peatEmF*, площу боліт в

кожній клітинці,  $peatS_i$ , середню глибину боліт,  $peatThickness$ , та швидкість розкладання по природних зонах та країнах (при наявності),  $peatSubsidense_c$ .

Алгоритм:

Для кожної клітинки моделі:

Якщо початковий рік (1990) і площа боліт у клітинці більша площі лісу, визначаємо площі боліт, на яких ліс був вирубаний до початку моделювання (1990-2000pp.):

$$peatDeform_0_i = \begin{cases} peatS0_i - Fs_i, & peatS0_i > Fs_i \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (3.68)$$

обчислюємо емісії CO<sub>2</sub> після осушування:

$$peatEm_0_i = \begin{cases} peatDeform_0_i \cdot peatEmF, & peatThickness_0_i \geq 5.1 \\ peatDeform_0_i \cdot peatEmF \cdot \frac{peatThickness_0}{5.1}, & peatThickness_0_i < 5.1' \end{cases} \quad (3.69)$$

обчислюємо зменшення товщини болота на задану величину і зменшення площі боліт:

$$peatThickness_i = \begin{cases} peatThickness_0_i - 5.1, & peatThickness_0_i > 5.1 \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (3.70)$$

$$peatS_i = \begin{cases} peatS0_i - Fs_i, & peatS0_i > Fs_i \\ peatS0_i, & peatS0_i \leq Fs_i \end{cases} \quad (3.71)$$

Всі наступні роки після 1990, обчислюємо площу знелісненого і осушеного болота:

$$peatDeform_{i,k=0} = \begin{cases} Fdec_i, & peatS_i \geq Fdec_i \\ peatS_i, & otherwise' \end{cases} \quad (3.72)$$

а також емісії CO<sub>2</sub> з осушеного болота для перших 5 років:

$$peatEm_{i,k} =$$

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^4 \begin{matrix} k=0 \\ peatThickness_{i,k} \geq 5.1 \end{matrix} peatDeform_{i,k} \cdot peatEmF5, & peatThickness_{i,k} \geq 5.1 \\ peatDeform_{i,k} \cdot peatEmF5 \cdot \frac{peatThickness_{i,k}}{5.1}, & peatThickness_{i,k} < 5.1 \end{cases}, \quad (3.73)$$

Знаходимо нові значення площі неосушеного болота та товщини болота:

$$peatS_{i,year} = \begin{cases} peatS_{i,year-1} - peatDeform_{i,k=0}, & peatS_{i,year-1} > peatDeform_{i,k=0} \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (3.74)$$

$$peatThickness_{i,k} = \begin{cases} peatThickness_{i,k} - 5.1, & peatThickness_{i,k} > 5.1 \\ 0, & otherwise \end{cases}. \quad (3.75)$$

Знаходимо емісії у клітинці із боліт, знеліснених і осушених більше 5 років тому:

$$peatEm_{i,k} = \begin{cases} \sum_{k=5}^{\infty} peatDefor_{i,k} \cdot peatEmF, & peatThikness_{i,k} \geq 5.1 \\ peatDefor_{i,k} \cdot peatEmF \cdot \frac{peatThikness_{i,k}}{5.1}, & peatThikness_{i,k} < 5.1 \end{cases} \quad (3.76)$$

Також на кожному кроці моделювання знаходимо нове значення товщини болота:

$$peatThikness_{i,k} = \begin{cases} peatThikness_{i,k} - 5.1, & peatThikness_{i,k} > 5.1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3.77)$$

Обчислення (вирази 3.72-3.77) повторюємо на кожному кроці, поки товщина болота більша нуля.

Для Індонезії параметри алгоритму оцінки емісії CO<sub>2</sub> зі знелісненого і осушеного болота є наступними:

- $peatEmF5=179.66$  тCO<sub>2</sub>/(га рік) (метод Tier2 [146]),
- $peatEmF=5.55$  тCO<sub>2</sub>/(га рік) (метод Tier2 [146]),
- $peatSubsidence=5.1$  [315],
- $peatThikness=4.5$  [156].

### 3.3.7. Моделювання процесів емісій CO<sub>2</sub> при залісненні

Якщо висаджується ліс, вуглець накопичується в біомасі дерев ( $EmBMAff_i$ , рівняння 3.78-3.80), підстилці ( $EmLitterAff_i$ , рівняння 3.81) та ґрунті ( $EmSOCAff_i$ , рівняння 3.82), створюючи від'ємні емісії CO<sub>2</sub> (або стік CO<sub>2</sub>):

$$EmAff_i = EmBMAff_i + EmLitterAff_i + EmSOCAff_i$$

Оскільки клітинки растру заліснюються поступово, в кожній клітинці, де відбувається заліснення, ми розглядаємо вікові когорти,  $k$ . Динаміку надземної біомаси лісу у віковій когорті  $k$ ,  $abBMAff_{i,k}$ , отримуємо, використовуючи модуль віртуального лісу (рівняння 3.78). Для цього у нульову вікову когорту додаємо ліс площею, яка відповідає швидкості заліснення у поточному році (на поточному кроці моделювання), визначеній у рівнянні 3.52. Тоді надземна біомаса посадженого лісу у клітинці у поточному році (кроці моделювання) буде сумою біомаси у всіх вікових когортах:

$$abBMAff_i = \sum_{k=1}^{CA} abBMAff_{i,k} \quad (3.78)$$

Кількість підземної біомаси залежить від кількості надземної і відрізняється у тропічних лісах, лісах помірної зони та бореальних лісах [233, Таблиця 3А.1.8]:

$$blBMAff_i = \begin{cases} 0.18 \cdot abBMAff_i, & \text{Tropical forest} \\ 0.22 \cdot abBMAff_i, & \text{Temperate forest} \\ 0.25 \cdot abBMAff_i, & \text{Boreal forest} \end{cases} \quad (3.79)$$

Швидкість накопичення вуглецю у біомасі лісу кожного року (на кожному кроці моделювання) обчислюють як різницю біомаси поточного року (кроку моделювання) та біомаси попереднього року (кроку моделювання):

$$EmBMAff_i = (abBMAff_{i,year} - abBMAff_{i,year-1}) + (blBMAff_{i,year} - blBMAff_{i,year-1}) \quad (3.80)$$

Згідно з [62] вуглець у підстилці накопичується з максимальною швидкістю 0.95 тС/га за рік, швидкість накопичення вуглецю також залежить від біомаси у вікових когортах, а кількість накопиченого вуглецю може досягати значень 5тС/га (функція залежності від біомаси вибрана таким чином, що при біомасі 35тС/га досягається 90% максимального значення) [118]:

$$EmLitterAff_i = \begin{cases} -0.95 \cdot \sum_{k=1}^{CA} \{ [1 - \exp(-0.1 \cdot abBMAff_{i,k})]^3 \cdot Faff_{i,k} \} \cdot Area_i, & LitterAff_{i,k} \leq 5 \cdot Faff_{i,k} \cdot Area_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.81)$$

Вуглець в ґрунті накопичується до 140% від початкового значення (майже максимальне значення за даними [62], яке досягається при максимальній кількості накопиченої підстилки). Максимальна швидкість накопичення для хвойних лісів ( $VegType = 4,6$ ) становить 0.04 тС/(га рік), 0.2 тС/(га рік) для мішаних лісів ( $VegType = 8$ ) та 0.35 тС/(га рік) для листяних лісів ( $VegType = 1-4,7$ ; див. Табл. 1) [62] (якщо  $SOCAff_{i,k} \leq Faff_{i,k} \cdot Area_i$ ) [118]:

$$EmSOCAff_i = \begin{cases} -0.04 \cdot \sum_{k=1}^{CA} \{ [1 - \exp(-1.2 \cdot LitterAff_{i,k})]^3 \cdot Faff_{i,k} \} \cdot Area_i, & (VegType = 4 \vee 6) \\ -0.2 \cdot \sum_{k=1}^{CA} \{ [1 - \exp(-1.2 \cdot LitterAff_{i,k})]^3 \cdot Faff_{i,k} \} \cdot Area_i, & (VegType = 8) \\ -0.35 \cdot \sum_{k=1}^{CA} \{ [1 - \exp(-1.2 \cdot LitterAff_{i,k})]^3 \cdot Faff_{i,k} \} \cdot Area_i, & (VegType = 1 - 3 \vee 5 \vee 7) \end{cases} \quad (3.82)$$

Після обчислення емісій, перераховують нові значення кількості вуглецю підстилки та ґрунту для кожної вікової когорти:

$$LitterAff_{i,k,year} = LitterAff_{i,k,year-1} - EmLitterAff_{i,k,year-1}, \quad (3.83)$$

$$SOCAff_{i,k,year} = SOCAff_{i,k,year-1} - EmSOCAff_{i,k,year-1}. \quad (3.84)$$

### 3.4. Моделювання прийняття рішень щодо зменшення емісій CO<sub>2</sub> при лісокористуванні та зміні землекористування

Вважаємо, що кожен власник лісу намагається отримати чисту приведену вартість (NPV) близьку до максимальної. Тому при виникненні нових обставин, а саме появи ціни на вуглець, який запасається або втрачається з біомаси лісу у порівнянні з базовим сценарієм лісокористування, власник лісу буде змінювати параметри лісокористування, щоб максимізувати чисту приведену вартість. Якщо при нових параметрах лісокористування вуглець буде накопичуватись, тоді власник отримає додаткові кошти, а якщо ж вуглець буде втрачатись - тоді власник лісу заплатитиме за втрачений вуглець. Ці додаткові кошти закладені у змінній  $B_i$  виразів 3.14 та 3.15 (позначимо її  $Bfm_i$ ):

$$Bfm_i = epc_c \cdot [(BM_{i,year} - BM_{i,year-1}) - (BMbau_{i,year} - BMbau_{i,year-1})]. \quad (3.85)$$

Перший параметр, який власник лісу буде змінювати – це оборот рубки ( $RL$ ). Оборот рубки, який максимізує NPV для заданої ціни на вуглець та ціни деревини ( $RL_{maxNPV}$ ), знаходимо методом золотого поділу. Обороти рубки дозволені у моделі з точки зору сталого лісокористування знаходяться між  $RL_{MAI}$  та  $RL_{maxBM}$ . На цьому проміжку при збільшенні обороту рубки біомаса лісу зростає, відповідно  $B_i > 0$  (третій доданок виразів 3.14 та 3.15), але разом з тим зменшується обсяг заготовленої деревини (другий доданок виразів 3.14 та 3.15). При високій ціні вуглецю і низькій ціні деревини власнику лісу вигідніше проводити заготівлю деревини лише у деревостанах, які з віком перестають накопичувати біомасу, тобто вибрати оборот рубки  $RL_{maxBM}$ . При середніх цінах на вуглець і деревину оптимальний оборот рубки буде знаходитись між  $RL_{MAI}$  та  $RL_{maxBM}$ , але буде довшим, ніж при нульовій ціні вуглецю. Такий вибір параметрів

лісокористування власниками лісів значно скорочує обсяг заготовленої деревини у країні, чи регіоні, тому ціна деревини має зрости, щоб заготівля деревини задовільнила попит [125].

Щоб скорегувати параметри лісокористування при ненульовій ціні вуглецю, необхідно зробити наступні кроки:

1. Для кожної клітинки растру, де є ліс, кожен рік (крок моделювання) записати значення чистої приведеної вартості лісового господарства при нульовій ціні вуглецю ( $NPV_{bau}$ ) і кількості біомаси при нульовій ціні вуглецю ( $BM_{bau}$ ).
2. Для кожної клітинки растру, де є ліс, для заданої ціни деревини та ціни вуглецю знайти тривалість обороту рубки ( $RL_{maxNPV}$ ), яка максимізує чисту приведену вартість ( $NPV_{wc}$ ).
3. Обчислити обсяг заготовленої деревини у країнах та регіонах з новим оборотом рубки.
4. Застосувати стандартний алгоритм корегування параметрів лісокористування (розділ 3.2.3), додатково вимагаючи, щоб  $NPV_{wc} \geq NPV_{bau}$ .
5. Якщо заготівля деревини не задовольняє попит, збільшити ціну деревини (поступово від 1 до 2500) і повторити п.4.

### 3.5. Вхідні дані моделі та калібрування

#### 3.5.1. Основні рівняння моделі G4M

Підсумовуючи наведене у розд. 3.1 – розд. 3.4 можемо записати основні рівняння моделі G4M. У моделі є 4 змінні, які визначають стан кожної  $i$ -ї клітинки растру у поточному році ( $year$ ):  $Fs$  – відносна площа «старого» лісу (ліс, який існував у клітинці до 2000 року),  $Fsn$  – відносна площа «нового» лісу (посадженого після 2000 року),  $abBm$  – біомаса на одиниці площі (гектарі) старого лісу,  $abBmAff$  – біомаса на одиниці площі нового лісу.

Динаміку відносних площ старого і нового лісу представляємо системою таких рівнянь і нерівностей:

$$\begin{aligned}
& F_{S_{i,year}} \\
& = F_{S_{i,year-1}} \\
& - fd(F_{S_{i,year-1}}, dF_{S_{i,year-1}}, F_{S_{j,year-1}}, AgS_i, Pd_{i,year}, GDP_{i,year}, RD_i, MAI_i, r_c, AGB_{reg}, pwGB_{reg}, pc_c, leak_c), \\
& F_{Sn_{i,year}} = F_{Sn_{i,year-1}} + fa(AgS_i, Pd_{i,year}, GDP_{i,year}, MAI_i, r_c, AGB_{reg}, pwGB_{reg}, pc_c, leak_c), \\
& dF_{S_{i,year-1}} = fd_{year-1}, \\
& F_{S_{i,year}} + F_{Sn_{i,year}} + \tau \leq 1, \\
& F_{S_{i,year}} \geq 0, \\
& F_{Sn_{i,year}} \geq 0, \\
& 0 \leq fd \leq 0.05, \\
& 0 \leq fa \leq 0.02,
\end{aligned}$$

де  $\tau \geq 0$  – параметр із заданим значенням, який відображає частку землі, зарезервовану для будівель, доріг та/або сільськогосподарських земель (див. вираз (3.53)),

$j=1..4, j \neq i$  – чотири клітинки растру, які прилягають до клітинки растру  $i$ ,

$AgS_i, Pd_{i,year}, GDP_{i,year}, RD_i, MAI_i, r_c, AGB_{reg}, pwGB_{reg}, pc_c, leak_c$  – вхідні дані (описані в розд. 3.3),

$fd(\cdot)$  та  $fa(\cdot)$  – функції, які визначають швидкість знеліснення та заліснення, відповідно, складові цих функцій задані виразами (3.12)-(3.55),

$dF_{S_{i,year-1}}$  – швидкість знеліснення у попередньому році (значення функції  $fd(\cdot)$  на попередньому кроці моделювання),

$c$  – індекс країни,  $reg$  – індекс регіону (група країн).

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

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

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

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

$$Bm_{i,year} \geq 0,$$

$$abBmAff_{i,k} \geq 0,$$

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

$$RLmai_i > 0,$$

$$RLmaxbm_i > 0,$$

де  $MAI_i$ ,  $\overline{MAI}_{reg}$ ,  $wd_{reg,year}$  – вхідні дані;

$fbm(\cdot)$  та  $fbmn(\cdot)$  – функції, які визначають зміну біомаси у старому та новому лісі, відповідно, складові цих функцій задані виразами (3.1)-(3.8);

$RL$  – оборот рубки, який визначається згідно алгоритму, описаному у розд. 3.2.3.

Опис вхідних даних:

$AgS_i$  – придатність землі для ведення сільського господарства у клітинці,

$Pd_{i,year}$  – щільність населення у клітинці,

$GDP_{i,year}$  – ВВП у клітинці,

$RD_i$  – щільність транспортних шляхів (автомобільні дороги, залізниця, водні шляхи),

$r_c$  – коефіцієнт дисконтування з врахуванням ризиків у країні,

$AGB_{reg}$  – регіональна корекція ціни сільськогосподарської землі,

$pwGB_{reg}$  – регіональна корекція ціни деревини на корені,

$pc_c$  – ціна емісії вуглекислого газу в країні,

$leak_c$  – міра неефективності державних інститутів,

$MAI_i$  – середній приріст лісу у клітинці,

$\overline{MAI}_{reg}$  – середній приріст лісу у регіоні,

$wd_{reg,year}$  – попит на деревину у регіоні,

$RLmai_i$  – оборот рубки (кількість років між посадкою лісу і рубкою головного користування), при якому середній річний приріст є максимальним,

$RLmaxbm_i$  – оборот рубки, при якому біомаса дерев у лісі є максимальною,

$k$  – вік деревостану,

$CA$  – кількість років, які минули від посадки лісу.



### 3.5.2. Стійкість моделі

Дослідимо стійкість моделі G4M. Оскільки функції  $fd(\cdot)$ ,  $fa(\cdot)$ ,  $fbm(\cdot)$  та  $fbmn(\cdot)$ , які знаходяться в правій частині системи рівнянь моделі є досить складні, а програмна реалізація моделі розрахована на розв'язок моделі протягом 110 років (1990-2100 рр.), тому будемо досліджувати технічну стійкість моделі на скінченному інтервалі часу [374] по відгуку виходу моделі на заданий імпульс у вхідних даних.

Проведемо наступний експеримент. Вхідним параметрам моделі:

$wd_{reg,year}$  – попит на деревину у регіоні,

$AGB_{reg}$  – регіональна корекція ціни сільськогосподарської землі,

$pwGB_{reg}$  – регіональна корекція ціни деревини на корені,

$Pd_{i,year}$  – щільність населення у клітинці,

$GDP_{i,year}$  – ВВП у клітинці

задамо нульові значення у 2000, 2005, 2015,.....2100 роках, а у 2010 році – достатньо великі значення (більші за максимальні значення, які вони можуть мати протягом інтервалу моделювання). Інші вхідні параметри мають стандартні початкові значення протягом всього часу моделювання. Будемо контролювати основні змінні моделі ( $Fs$  – відносна площа «старого» лісу (ліс, який існував у клітинці до 2000 року),  $Fsn$  – відносна площа «нового» лісу (посадженого після 2000 року),  $Bm$  – біомаса на одиниці площі (гектарі) старого лісу,  $abBmAff$  – біомаса на одиниці площі нового лісу) та їх похідні.

Графіки динамік похідних площ нового лісу та старого лісу зображено на рис. 3.6. Похідні площ нового лісу та старого лісу прямують до нуля після припинення дії збурення.

Графіки динамік площ нового лісу та старого лісу зображено на рис. 3.7. Площі нового лісу та старого лісу не повертаються у початковий стан, але їх значення стабілізуються.

Графіки динамік похідних біомаси нового лісу помноженої на площу нового лісу та біомаси старого лісу помноженої на площу старого лісу наведено на рис. 3.8. Похідні наближаються до нуля дуже повільно, це пояснюється тим, що

процеси росту в лісах відбуваються 10-300 років. Після початкового збурення біомаса лісу досягне нового рівноважного стану після 2100 року.

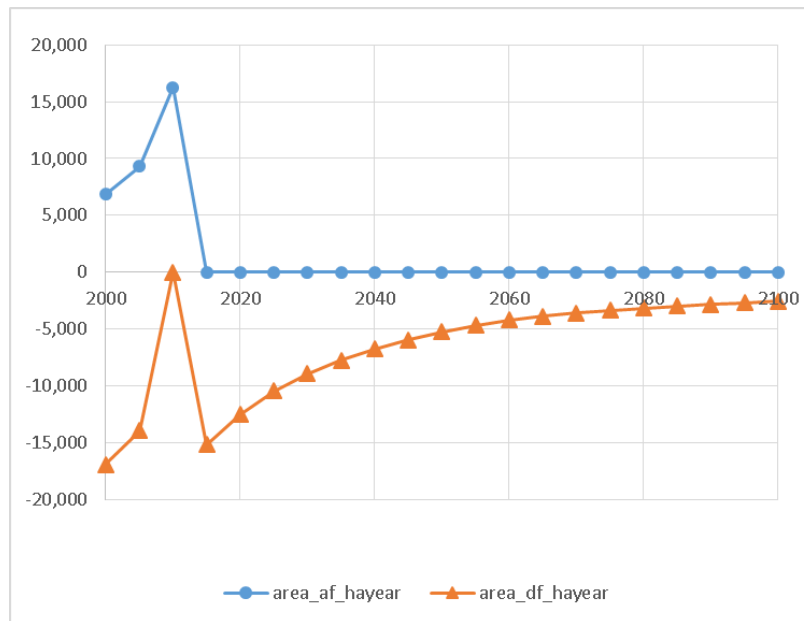


Рис. 3.6. Графіки динамік похідних площ нового лісу (area\_af\_hayear) та старого лісу (area\_df\_hayear) (сума по всіх клітинках), вісь абсцис – рік, вісь ординат - кг/рік.

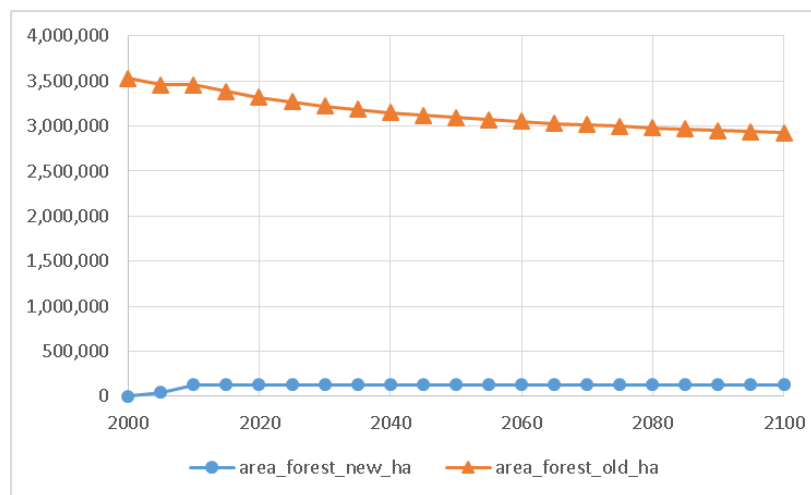


Рис.3.7. Графіки динамік площ нового лісу (area\_forest\_new\_ha) та старого лісу (area\_forest\_old\_ha) (сума по всіх клітинках), вісь абсцис – рік, вісь ординат - га

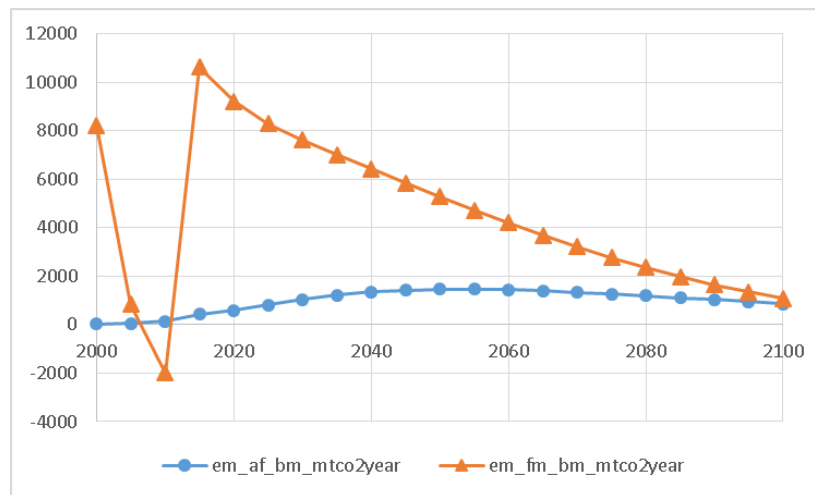


Рис.3.8. Графіки динамік похідних біомаси нового лісу помноженої на площу нового лісу ( $em\_af\_bm\_mtco2year$ ) та біомаси старого лісу помноженої на площу старого лісу ( $em\_df\_bm\_mtco2year$ ) (сума по всіх клітинках), вісь абсцис – рік, вісь ординат –  $MtCO_2/рік$

Графіки динамік біомаси нового лісу помноженої на площу нового лісу та біомаси старого лісу помноженої на площу старого лісу наведено на рис. 3.9. Біомаси нового лісу та старого лісу не повертаються у початковий стан, але їх значення стабілізуються.

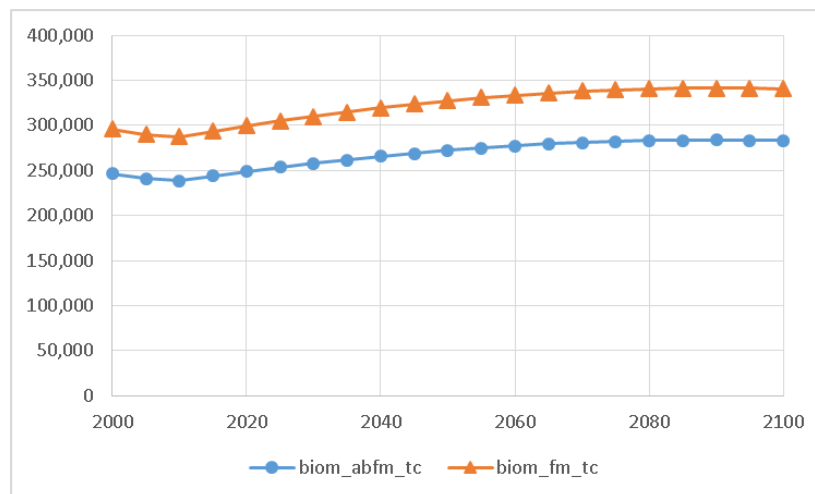


Рис. 3.9. Графіки динамік біомаси нового лісу помноженої на площу нового лісу ( $biom\_afbm\_tc$ ) та біомаси старого лісу помноженої на площу старого лісу ( $biom\_fm\_tc$ ) (сума по всіх клітинках), вісь абсцис – рік, вісь ординат –  $MtCO_2$

Беручи до уваги те, що похідні змінних моделі прямують до нуля після припинення дії збурення, відхилення змінних при збуренні на вході моделі є обмеженими, змінні не повертаються у початковий стан після припинення дії збурення, а стабілізуються на нових значеннях, можна зробити висновок, що модель є нейтрально стійкою, щонайменше, протягом часу моделювання.

### 3.5.3. Вхідні дані моделі

Швидкість заліснення та знеліснення у моделі G4M калібрують для кожної країни відповідно до середніх значень за період 2000-2010 років згідно опублікованих джерел, таких як, наприклад, FAO FRA 2015 [106], або даних, отриманих з офіційних звітів країн до РКЗК ООН [219]. Основним джерелом даних про зміну площі лісів є звіти ФАО про лісові ресурси (FAO FRA [102-107]), оскільки в цих звітах проводять оцінку лісових ресурсів згідно однієї методики для всіх країн. У FAO FRA найбільш достовірною є інформація про площі лісів та зміну площ лісів, яка оцінена для всіх країн. Швидкості заліснення та знеліснення наявні лише для невеликої кількості країн, крім того, сума заліснення і знеліснення не завжди відповідають зміні площі лісів, тому ми не можемо їх використовувати. У моделі використано наступні дані FAO FRA [106] для калібрування:

- загальна площа лісів у країнах;
- площа захищених лісів;
- площа природних лісів
- швидкість заліснення;
- швидкість знеліснення;
- зміна площі природних лісів.

Для більшості країн ми використовуємо дані ФАО [106] про зміну лісових площ, що включає зміну площі лісових насаджень (плантацій) та зміну природних лісових масивів, оскільки ці дані наявні для всіх країн та узгоджуються зі зміною лісових площ для більшості країн. Зростання площі лісонасаджень та природних лісових масивів за звітний період ми вважаємо залісненням, а зменшення площ насаджень та природних лісів ми вважаємо знелісненням. Наше припущення є наближенням, оскільки збільшення лісової площі може включати природне (з і без втручання людей) поширення лісів, заліснення і знеліснення (якщо це знеліснення є менше, ніж природне

розширення лісів + лісонасадження); зменшення площі лісу може включати знеліснення (спричинене людьми або обумовлене іншим фактором), а також лісорозведення та природне розширення лісу (якщо вони менші, ніж вирубка лісу).

Для більшості країн, які входять у додаток 1 Кіотського протоколу (Annex-1) ми використовуємо дані, отримані зі звітів цих країн до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, у вигляді таблиць CRF (формат загального звітування) та NIR (Національний звіт про інвентаризацію). Починаючи з 2015 року, CRF був змінений, зокрема, таблиця 4.1, яка повинна бути заповнена річними даними про зміну землекористування. Нажаль, багато країн заповнювали таблиці 4.1 неправильно. США не подали свої таблицю CRF у 2015 та 2016 роках, тому нам довелося оцінювати щорічні дані з декількох таблиць, що містять 20-річні накопичені зміни землекористування у звіті 2014 року. Канада не подала свої таблиці CRF у 2015 році, тому ми використали звіт 2016 року. Дані для ЄС-28 були надані Об'єднаним дослідницьким центром (JRC). Дані, зазначені як площа земель, перетворених в лісові угіддя, використовуються для оцінки річного обсягу заліснення. Дані, представлені як лісові угіддя, перетворені в інше землекористування, використовуються для оцінки знеліснення. Якщо країна звітує річні значення зміни землекористування, ці значення використовуються безпосередньо. Якщо ж країна повідомляє про 20-річну накопичену зміну землекористування, то ми ділимо ці значення на 20 і отримуємо 20-річне ковзне середнє значення швидкості зміни землекористування. Для того, щоб зрозуміти, які дані внесено у таблицю 4.1 CRF, ми порівнюємо ці дані із значеннями в інших таблицях зміни землекористування, у яких країни повідомляють 20-річну накопичену зміну землекористування, а також, при необхідності, аналізуємо звіти до РКЗК ООН (National Inventory Report - NIR) відповідної країни та порівнюємо з даними FAO FRA 2015 [106].

Існує ряд відмінностей в даних щодо заліснення та знеліснення за оцінками звітів FAO про лісові ресурси [106] та даних зі звітів країн до РКЗК ООН:

- звіти країн у РКЗК ООН включають зміну землекористування, пов'язану з діяльністю людей, тоді як дані ФАО [106] можуть включати також зміну землекористування внаслідок інших чинників;
- якщо таблиця CRF містить 20-річну накопичену конверсію землі, то ми можемо оцінити 20-тирічні середні ковзні зміни землекористування, тоді як дані ФАО [106] містять 5-річні середні значення (за винятком періоду 1990-2000 років);
- різні державні агенції можуть відповідати за підготовку відповідних звітів до ФАО та РКЗК ООН, внаслідок чого звіти можуть бути засновані на різних джерелах даних та використовувати дані різних років.

Інші джерела даних, які використовуються у моделі, наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Джерела даних, що використовуються у моделі G4M.

Дані	Рік	Посилання
<i>Растр</i>		
Покрив землі	2000	[303]
Чиста первинна продукція лісу	-	[60]
Надземна і підземна біомаса дерев	2000-2005	[175]
Земля під забудовою	2010-2050	[307]
Густота розміщення населення	1990-2015	[53]
Густота розміщення населення	1990-2050	[112]
<i>Дані для країн</i>		
Валовий внутрішній продукт в паритетних цінах	2005	[334]
Частка довгоживучих продуктів	2000-2005	[177]
Рівні дисконтування	2004	[14]
Коефіцієнт корупції	2005	[176] на основі даних [169]
Втрати при заготівлі деревини	-	[81, 89]
Приріст лісу	-	[177]

### 3.5.4. Калібрування швидкості зміни землекористування у моделі G4M

Калібрування моделі проводиться таким чином, щоб встановити змодельовану швидкість зміни площі лісів (швидкість заліснення мінус швидкість знеліснення) якомога ближче до опублікованих даних, враховуючи додаткові обмеження на мінімальну швидкість заліснення, мінімальну швидкість знеліснення і тенденції зміни площі лісів (різниця між середньою швидкістю зміни площі у 2000-2005 рр. та 2005-2010 рр.) [127].

Для калібрування швидкості заліснення і знеліснення у G4M є три параметри для кожної країни [118, 123, 127]:

- пороговий коефіцієнт,  $H_c$ , який є множником чистої приведеної вартості лісового господарства. Він використовується для врахування у моделі існуючих заходів регулювання зміни землекористування у країні та корекції неточності у різниці цін на сільськогосподарські землі та деревину. Цей коефіцієнт, зокрема, використовується для корекції тенденції зміни землекористування.
- коефіцієнт знеліснення,  $deforCoeff_c$ , є мультиплікатором швидкості знеліснення, який використовується для регулювання швидкості знеліснення в клітинках, де відбувається знеліснення.
- коефіцієнт заліснення,  $afforCoeff_c$ , є мультиплікатором швидкості заліснення, який використовується для регулювання швидкості заліснення в клітинках, де відбувається заліснення.

Підчас калібрування спершу визначають  $H_c$  шляхом мінімізації різниці між трендом зміни площі лісів, що спостерігається (опублікованим) і змодельованим, з коефіцієнтами знеліснення,  $deforCoeff_c$ , та заліснення,  $afforCoeff_c$ , рівними 1 (вираз 3.86). Тоді, коефіцієнти швидкості заліснення та знеліснення визначають шляхом мінімізації спостережуваних і прогнозованих змін площі лісів, вимагаючи, щоб прогнозована швидкість заліснення та знеліснення дорівнювали відповідним (мінімальним, у випадку даних з ФАО) опублікованим швидкостям (вираз 3.87; прогнозовані швидкості заліснення та знеліснення можуть перевищувати опубліковані швидкості, якщо різниця опублікованих швидкостей

заліснення та знеліснення не відповідає опублікованій швидкості зміни площі лісів):

$$|TrendNetDeforc - TrendNetDeforG4M_c| \rightarrow \min_{H_c, afforCoeff_c = deforCoeff_c} \quad (3.86)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} |NetDeforc - (AfforG4M_c - DeforG4M_c)| \rightarrow \min_{H_c, afforCoeff_c, deforCoeff_c} \\ AfforG4M_c \geq minAfforc \\ DeforG4M_c \geq minDeforc \end{array} \right. \quad (3.87)$$

Приклад результатів калібрування моделі для Бразилії наведено на рис. 3.10, де порівнюються середні значення швидкості заліснення, знеліснення та зміни площі лісу, а також тренд зміни площі лісу, отримані зі звіту ФАО [106] та змодельовані з допомогою G4M.

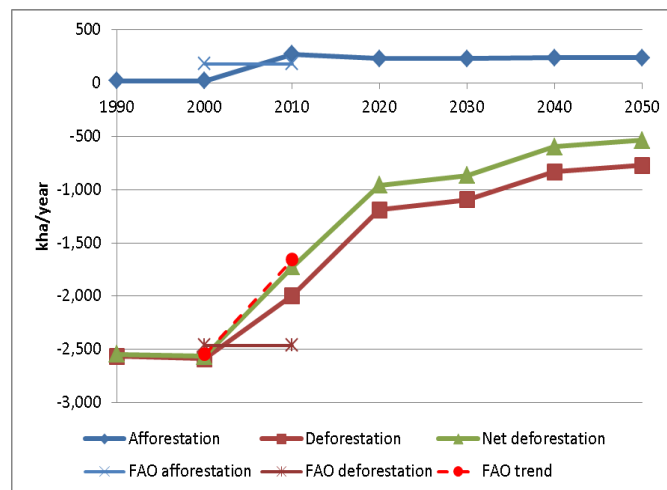


Рис. 3.10. Порівняння результатів моделювання та даних [106], які використано для калібрування моделі

### 3.5.3. Калібрування стоку вуглецю у біомасу лісів у моделі G4M

У лісах, які не використовують для заготівлі деревини, середня тривалість життя дерев визначається порушеннями (вітровали, шкідники, пожежі та ін.). У моделі G4M ця тривалість життя дерев визначається тим же параметром, що й оборот рубки ( $RL$ ), але деревина при цьому залишається в лісі. При ініціалізації моделі визначається  $RL$  для кожної клітинки растру, який відповідає спостережуваній біомасі. У такому випадку у клітинках, які не використовують



для заготівлі деревини, створюється віртуальний нормальний ліс (всі вікові класи, які містять дерева віком від 0 років до  $RL$  років, мають однакову площу) у стані рівноваги, тобто біомаса лісу не змінюється з часом – відмерлі дерева замінюються новими. Якщо в такому віртуальному лісі не змінюються параметри росту та тривалість життя дерев, то емісії вуглекислого газу від лісокористування (forest management emissions, FL-FL) з біомаси є рівними нулю.

Якщо біомаса лісу, а також вікова структура (для клітинок растру, які використовують для заготівлі деревини) були достатньо добре визначені у початковий момент часу, і відомо дані про заготівлю деревини, тоді підбираючи параметр  $RL$  для лісів, які не використовують для заготівлі деревини, можна отримати зміну біомаси лісу в межах країни, яка буде відповідати даним спостережень (наприклад, ФАО [106], або звіти країн до РКЗК ООН [219]).

Оскільки у багатьох дослідженнях, в яких застосовують G4M, необхідно прогнозувати емісії вуглекислого газу з біомаси лісів, які виникають при лісокористуванні, у моделі реалізовано опцію автоматичного калібрування. При моделюванні, у 2000 році створюють копії лісів кожної клітинки в межах країни і обчислюємо емісії вуглекислого газу з біомаси лісів, проводячи імітаційне моделювання динаміки лісу з поточними параметрами  $RL$  протягом періоду, для якого є дані спостережень емісій,  $N_{years}$  (наприклад, протягом 10 років, з 2000р. до 2010р.). Тоді на першому етапі визначаємо середні емісії вуглекислого газу з біомаси лісів в межах країни з поточними значеннями  $RL$ :

$$EmFM_{country} = \frac{1}{N_{years}} \cdot \sum_{i \in country} (BM_{N_{years},i} - BM_{2000,i}) \quad (3.88)$$

де  $BM_{N_{years},i}$  та  $BM_{2000,i}$  біомаса лісу у клітинці  $i$  на початку імітаційного моделювання та в кінці, біомасу визначаємо, використовуючи модуль віртуального лісу, вираз 3.10.

На другому етапі поступово змінюємо параметр  $RL$  у клітинках, які не використовують для заготівлі деревини, щоб максимально наблизити середнє змодельоване значення емісій до спостережуваного значення.

### 3.6. Регіональні версії моделі, які враховують наявні додаткові дані

#### 3.6.1. Додаткові дані про ліси, які наявні для європейських країн

Для окремих регіонів наявні більш детальні дані про лісові ресурси, ніж на глобальному рівні. Ці дані дозволяють вдосконалити модель і отримати більш адекватне представлення процесів росту лісу та лісокористування у моделі. Такими даними є, зокрема, карта переважаючих деревних порід у європейських країнах [27] (рис. 3.11), карта обсягу заготівлі деревини у країнах ЄС [325] (рис. 3.12), періодичні звіти країн до РКЗК ООН у вигляді таблиць визначеного формату (CRF) [219], дані національних інвентаризацій лісів, звіт Міністерської конференції по захисту лісів у Європі (МКЗЛЄ; Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe – Forest Europe) [79].



Рис.3.11. Переважаючі деревні породи [27], приведені до растру роздільної здатності 0.5x0.5 град.: 1 - *Abies* spp; 2 - *Alnus* spp; 3 - *Betula* spp; 4 - *Carpinus* spp; 5 - *Castanea* spp; 6 - *Eucalyptus* spp; 7 - *Fagus* spp; 8 - *Fraxinus* spp; 9 - *Larix* spp; 10 - Broadleaved misc; 11 - Conifers misc; 12 - *Pinus* misc; 13 - *Quercus* misc; 14 - *Picea* spp; 15 - *Pinus pinaster*; 16 - *Pinus sylvestris*; 17 - *Populus* spp; 18 - *Pseudotsuga menziesii*; 19 - *Quercus robur* & *Quercus petraea*; 20 - *Robinia* spp.

Наявність карти переважаючих деревних порід дає можливість застосувати спеціалізовані параметри функцій росту, аліметричні рівняння для визначення фракцій біомаси дерев. Наявність карти заготівлі деревини дає можливість ініціалізувати просторове розміщення клітинок растру, в яких проводиться заготівля деревини. Додаткові дані зі звіту МКЗЛЄ, зокрема, приріст стовбурної деревини, обсяг звалених дерев та заготовленої деревини дали можливість скоректувати параметри росту деревостанів, а також визначити втрати деревини при заготівлі. Додаткові дані з національних інвентаризацій, зокрема, дані про середні розміри дерев у різному віці дали можливість уточнити алгоритм та параметри моделювання процесу лісокористування.

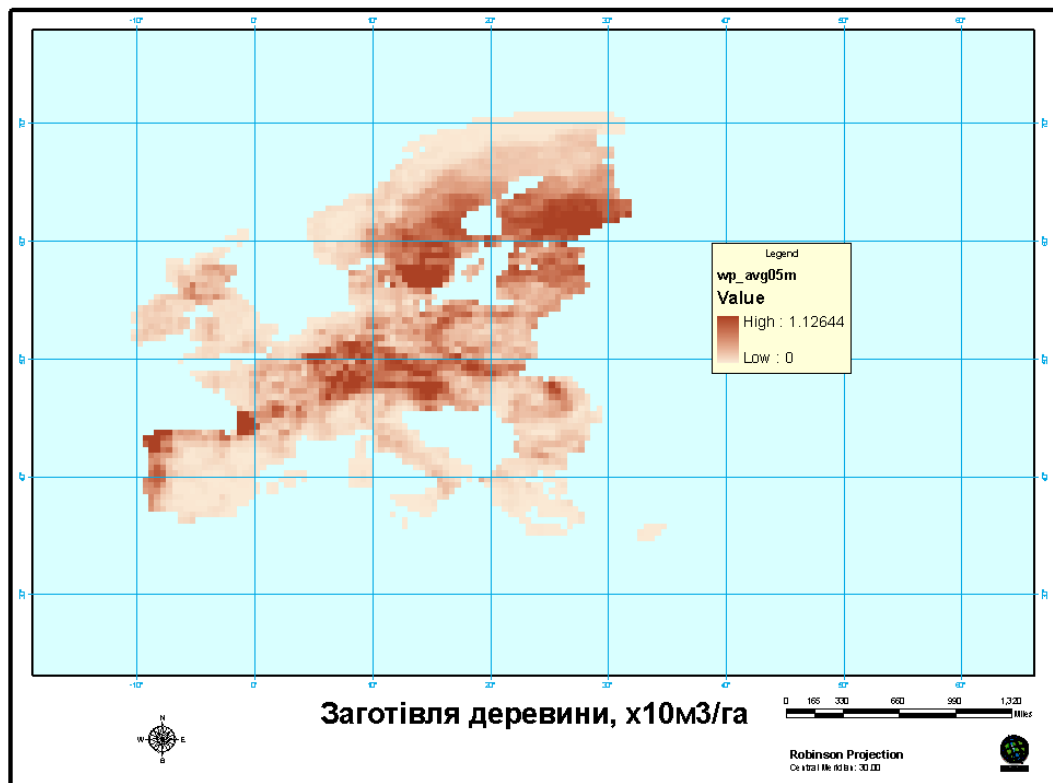


Рис.3.12. Заготівля деревини,  $\times 10\text{м}^3/\text{га}$ , усереднена за 2000-2010рр. [325],  
приведено до растру роздільної здатності  $0.5\times 0.5$  град.

### 3.6.2. Вдосконалення представлення лісу у моделі з врахуванням даних про геопросторове розміщення переважаючих деревних порід

Знаючи переважаючу деревну породу у клітинці растру, ми застосовуємо параметри функції росту (параметри  $c_1$ - $c_{45}$  у виразах 3.1-3.8), визначені для цієї деревної породи (Таблиця Д.3.1 у Додатку А). Оскільки у модулі віртуального лісу моделюють динаміку стовбурної біомаси ( $BM_{stem}$ ), а карта біомаси лісів країн Європейського Союзу [98] містить повну надземну біомасу, необхідно застосувати регресійні рівняння для знаходження повної надземної біомаси (їх ще називають Biomass Expansion Factors - BEF):

$$abBM_i = BM_{stem_i} \cdot BEF(BM_{stem}, species). \quad (3.89)$$

Ми використовуємо регресійні рівняння, опубліковані у [302], таблиця 3.2.

Таблиця 3.2. Регресійні рівняння для знаходження повної надземної біомаси (BEF) [302] для основних порід дерев, які розглядають у регіональних версіях G4M

Група деревних порід	BEF
Ялиця (fir)	$BEF = 1.069 + \frac{1.919}{GS^{0.524}}$ min GS=12, max GS=1294
Ялина (spruce)	$BEF = 1.204 + 0.903 \cdot \exp(-0.009 \cdot GS)$ min GS=0, max GS=1050
Сосна (pine)	$BEF = 0.949 + \frac{3.791}{GS^{0.501}}$ min GS=0, max GS=735
Береза, вільха (birch, alder)	$BEF = 1.105 + \frac{9.793}{GS}$ min GS=5, max GS=348
Бук (beech)	$BEF = 1.197 + 0.386 \cdot \exp(-0.009 \cdot GS)$ min GS=24, max GS=754
Дуб (oak)	$BEF = 1.202 + 0.422 \cdot \exp(-0.013 \cdot GS)$ min GS=2, max GS=600
Модрина (larch)	$BEF = 1.023 + \frac{2.058}{GS^{0.508}}$ min GS=0.5, max GS=965

### 3.6.3. Вдосконалення алгоритму лісокористування з врахуванням додаткових даних

Розрізняємо три типи лісів: ліс призначений для заготівлі деревини, ліс, який має інше основне призначення, і ліс, який знаходиться у захищених місцях (наприклад, природні заповідники). Цей третій тип лісу вважаємо нейтральним з точки зору емісії вуглекислого газу, тому його не розглядаємо в моделі.

Вважаємо, що в країнах Європейського союзу заготівля деревини має бути прибутковою для власників лісу, але, разом з тим, лісокористування має бути сталим, тому ліс, який призначений для заготівлі деревини, експлуатується з оборотом рубки, який максимізує приріст ( $RL_{MAI}$ ). Ліси, основне призначення яких не є заготівля деревини, доглядають (забирають відмерлі дерева, розчищають завали та ін.) і частина деревини поступає на ринок [364].

Враховуючи дані з карти заготівлі деревини [325], ми сортуємо клітинки растру в межах кожної країни за кількістю заготовленої деревини (середнє за 2000-2010pp.; від більшого до меншого). При ініціалізації віртуального лісу знаходимо мінімальну кількість клітинок, яка необхідна для заготівлі потрібної кількості деревини за умови використання обороту рубки  $RL_{MAI}$ , ліс в інших клітинках вважаємо таким, що не призначений для заготівлі деревини.

На наступних кроках моделювання застосовуємо модифікований алгоритм корегування параметрів лісокористування (розділ 3.2.3). Модифікація алгоритму полягає в тому, що зміна тривалості обороту рубки дозволяється лише, якщо ведення лісового господарства з новим оборотом рубки є прибутковою (приведена поточна вартість лісового господарства більша нуля) і не погіршує суттєво прибутковість (приведена поточна вартість лісового господарства не зменшується більш, ніж на 5%):

$$NPVfor(RL_{new}) > 0 \text{ AND } NPVfor(RL_{new}) \geq (0.95) \cdot NPVfor(RL_{old}).$$

### 3.6.4. Моделювання процесу заготівлі відходів деревини у лісах та відповідних емісій CO<sub>2</sub> від втрати вуглецю ґрунту

Зростає інтерес до використання біоенергії, виникає необхідність оцінити обсяг відходів від заготівлі деревини та оцінити емісії вуглекислого газу від втрати вуглецю ґрунту. Ми розробили наступний алгоритм для імітаційного моделювання процесу заготівлі відходів деревини та відповідних емісій вуглекислого газу з ґрунту.

У випадку нульової ціни вуглецю (стандартний сценарій ЄС):

1. У кожній клітинці, в якій заготовляють деревину, оцінити а) кількість гілля та відходів стовбурної деревини, які можна заготовити з точки зору сталого лісокористування (згідно з [251] середня по країні частка відходів, які можна заготовляти становить від 2 до 4%; F.Di Fulvio et al. (2016) [69] розробив карту сталого використання відходів заготівлі деревини, де враховано родючість та потужність ґрунту, ризик ерозії ґрунтів та ін.);

б) кількість гілля, пнів та відходів стовбурної деревини, які можна заготовити з точки зору сталого лісокористування (застосовують такі ж коефіцієнти сталого лісокористування як і у випадку а) [69]).

2. В кожній клітинці, в якій заготовляють деревину, оцінюють втрати вуглецю та відповідні емісії CO<sub>2</sub> окремо для випадків а) та б):

Для випадку а) застосовують специфічні для країни фактори емісій CO<sub>2</sub> в залежності від часу, який минув після початку використання відходів заготівлі деревини (Таблиця 3.4).

Для випадку б) застосовують специфічні для країни фактори емісій CO<sub>2</sub> врахування заготівлі пнів в залежності від часу, який минув після початку використання відходів заготівлі деревини (Таблиця Д.3.2 у Додатку А).

3. В межах кожної країни сортуємо клітинки за витратами на заготівлю відходів деревини на одиницю об'єму ( $chr_i$ ) без врахування пнів (від менших витрат до більших) (вартість заготівлі відходів деревини взято з [69]). Перш за все заготовляють відходи без пнів, оскільки це вимагає мінімальних додаткових затрат (лише зібрати і транспортувати відходи), в той час як екскавація і очистка пнів вимагає більше додаткових коштів. Тоді вибираємо, скільки клітинок з а) і

b) необхідні для економічно ефективного задоволення попиту на відходи деревини і визначаємо емісії CO<sub>2</sub>, просумувавши відповідні значення для кожної задіяної клітинки.

У випадку ненульової ціни вуглецю знаходимо для кожної клітинки і кожного випадку, без пнів (а) і з пнями (б) повну вартість заготівлі відходів ( $cr_i$ ), включаючи виплати за емісії вуглекислого газу ( $Em_{resi} \cdot epc_c$ ), спричинені заготівлею:

$$cr_i = Em_{resi} \cdot epc_c + chr_i. \quad (3.90)$$

Тоді сортуємо клітинки за повною вартістю (від меншої до більшої), а далі вибираємо, скільки клітинок з а) і б) необхідні для економічно ефективного задоволення попиту на відходи деревини і визначаємо емісії CO<sub>2</sub>, просумувавши відповідні значення для кожної задіяної клітинки.

Для аналізу затрат на заготівлю деревини та відходів деревини, реалізовану у [69], у цій версії моделі реалізовано вивід таких результатів для кожної клітинки растру на кожному кроці моделювання:

- Група деревних порід у поточній клітинці;
- Об'єм стовбурної деревини, заготовлений у «старому лісі» та «новому лісі» у поточній клітинці растру на даному кроці моделювання, включаючи втрати при рубанні, для рубок головного користування та прорідження;
- Середній діаметр дерев на висоті 1.3м у старшому віковому класі «старого лісу» та «нового лісу» у клітинках, які призначені для заготівлі деревини;
- Середня висота дерев у старшому віковому класі «старого лісу» та «нового лісу» у клітинках, які призначені для заготівлі деревини;
- Об'єм стовбурної деревини, отриманий при санітарних рубках у «старому лісі» та «новому лісі» у поточній клітинці растру, яка не призначена для заготівлі деревини, на даному кроці моделювання, включаючи втрати при рубанні;

- Середній діаметр дерев на висоті 1.3м у старшому віковому класі «старого лісу» та «нового лісу» у клітинках, які не призначені для заготівлі деревини;
- Середня висота дерев у старшому віковому класі «старого лісу» та «нового лісу» у клітинках, які не призначені для заготівлі деревини.

### **3.6.5. Адаптація моделі для України та вдосконалення моделювання процесу заготівлі деревини**

Оскільки Україна є активним учасником РКЗК ООН, виникають задачі дослідження можливостей лісового сектора України у зменшенні емісії вуглекислого газу, ми розробили метод адаптації глобальної моделі G4M для України [310, 312, 360, 370, 388, 389, 391, 392], також вдосконалили алгоритм імітаційного моделювання заготівлі заданої кількості деревини для G4M шляхом врахування сортиментів деревини [393]. Крім того для моделі GLOBIOM було запропоновано новий метод представлення лісу (з врахуванням вікової структури) і моделювання процесу заготівлі деревини (метод лінійного програмування), адаптований для рекурсивної схеми [311, 388].

Виділено три основні напрями адаптації моделі G4M для України:

- деталізація та локалізація даних;
- вдосконалення алгоритму лісокористування;
- адаптація сценаріїв.

Зокрема, проаналізувавши наявні геопросторові дані про лісові ресурси України, запропоновано за основу взяти карту лісів України з роздільною здатністю 300×300 м [197, 377]. Але враховуючи, меншу просторову роздільну здатність інших даних, велику кількість обчислень у моделі та необхідність проводити моделювання для великої кількості сценаріїв, вибрано роздільну здатність 3х3км.

Запропоновано у моделі розглядати деревину згруповану у два основних сортименти: пиловник і фанерний кряж (ПФК), друга група – інші сортименти деревини. Для сортименту ПФК відбирають лише дерева з мінімальним



діаметром стовбура більше 14см і мінімальною довжиною 2м і більше. Для інших сортиментів деревини підходять також дерева з меншим діаметром і меншої довжини.

Вдосконалений алгоритм складається з двох блоків. Перший блок такий же як у стандартному алгоритмі (розділ 3.2.3), але замість попиту на деревину використовуємо попит на ПФК. Слід зазначити, що підчас заготівлі ПФК також заготовляють і інші сортименти (ті, стовбури, які не відповідають мінімальним вимогам для ПФК). Тому у другому блоці алгоритму, спершу перевіряють об'єм заготовлених інших сортиментів, і якщо попит не задоволений, проводять додаткові рубки (рис. Д.3.2 у Додатку А).

Вдосконалення алгоритму імітаційного моделювання процесу заготівлі деревини покращує адекватність представлення процесу лісокористування у моделі G4M, значно підвищує точність моделювання заготівлі сортиментів деревини (до 43%) у порівнянні з стандартним методом, де сортименти не розглядають. При цьому точність моделювання заготівлі всіх сортиментів є на однаковому рівні при застосуванні обох алгоритмів (1-5% при наявності достатньої кількості лісових ресурсів у країні і незначному знелісненні у порівнянні із заготівлею деревини).

Модель GLOBIOM, яка зв'язана із G4M для обміну даними в процесі моделювання, є рекурсивною оптимізаційною моделлю, що обмежує представлення динаміки лісу, а також врахування майбутнього при поточному плануванні лісокористування. Крок моделювання (рекурсії) становить 10 років. Ліс у GLOBIOM представлено статичним об'єктом, щороку з одиниці площі можна заготовляти однакову кількість деревини, яка визначається середнім приростом. Кількість заготовленої деревини регулюється площею, з якої заготовляють деревину [138, 311].

Таке суттєве спрощення представлення складного динамічного об'єкта, яким являється ліс, приводить невідповідності у попиті на деревину в окремих регіонах, які задає GLOBIOM, і лісових ресурсах, які наявні у G4M у поточний момент часу. Щоб усунути цю неузгодженість між моделями, запропоновано новий метод моделювання процесу заготівлі деревини для оптимізаційних

рекурсивних моделей. Цей метод передбачає представлення лісу в декількох вікових когортах і використанні функцій втрати прибутку при передчасних рубках і запізнілих рубках [311, 388].

Функція втрати прибутку від передчасної заготівлі деревини (\$/га) має наступний вигляд [311, 388]:

$$LE(t)_{pia} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } FV_{pia} \geq FV_{p+1ia+1} \\ FV_{pia} - FV_{p+1ia+1}, & \text{якщо } FV_{t,i,a} < FV_{p+1ia+1} \end{cases} \quad (3.91)$$

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

$p$  – період моделювання;

$i$  – ідентифікатор елемента сітки;

$a$  – ідентифікатор класу віку.

Вираз 3.91 означає наступне, якщо вартість лісу в поточному періоді ( $p$ ) є вищою ніж в наступному періоді ( $p+1$ ), тоді власнику лісу вигідно провести рубки зараз. Якщо вартість лісу є вищою у наступному періоді, то при проведенні рубки у поточному періоді він втратить прибуток у порівнянні з майбутнім періодом.

Функція втрати прибутку від запізнілої заготівлі деревини (\$/га) має наступний вигляд [311; 388]:

$$LL(t)_{pia} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } FV_{pia} < FV_{p+1ia+1} \\ FV_{pia} - FV_{p+1ia+1}, & \text{якщо } FV_{pia} \geq FV_{p+1ia+1} \end{cases}, \quad (3.92)$$

де  $FV_{pia}$  – вартість 1 га лісу у класі віку  $a$  у періоді моделювання  $p$  (\$/га);

$p$  – період моделювання;

$i$  – ідентифікатор елемента сітки;

$a$  – ідентифікатор класу віку.

Вираз 3.92 означає наступне, якщо вартість лісу в поточному періоді ( $p$ ) є нижчою, ніж в наступному періоді ( $p+1$ ), то власник лісу не втратить прибуток, якщо відтермінує рубки. Якщо ж вартість лісу в наступному періоді є нижчою, ніж в поточному то вважаємо, що власник лісу втратить прибуток, якщо відтермінує рубки.

Задача лінійного програмування виглядає наступним чином [311, 388]:

$$\begin{aligned}
 FR_p(SH_{pia}) = & \sum_{i=1}^m \sum_{a=1}^n (SH_{pia} \cdot FV_{pia} - SH_{pia} \cdot LE_{pia} - (SF_{pia} - SH_{pia}) \\
 & \cdot LL_{pia}) \xrightarrow{SH_{pia}} \max, \\
 & \sum_{i=1}^m \sum_{a=1}^n (SH_{pia} \times B_{ia}) \geq D_p, \\
 & \sum_{i=1}^m \sum_{a=1}^n (SH_{pia} \times B_{ia}) \leq D_p \times k, \\
 & SH_{pia} \times B_{ia} \leq SF_{pia} \times B_{ia}, \\
 & SH_{pia} \geq 0,
 \end{aligned} \tag{3.93}$$

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

$FV_{pia}$  – вартість 1 га лісу у класі віку  $a$  (\$/га);

$LE_{pia}$  – прибуток від продажу деревини, вирубаного на 1 га лісу у класі віку  $a$ , який не буде отримано у випадку передчасної заготівлі деревини (\$/га);

$LL_{pia}$  – прибуток від продажу деревини, вирубаного на 1 га лісу у класі віку  $a$ , який буде втрачено у випадку запізненої заготівлі деревини (\$/га);

$P$  – вартість  $1\text{ м}^3$  деревини на продаж (\$/м<sup>3</sup>);

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

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

$B_{ia}$  – обсяг стовбурної біомаси доступної для лісозаготівлі у класі віку  $a$  (м<sup>3</sup>);

$SH_{pia}$  – площа лісу вирубаного у класі віку  $a$  (га);

$SF_{pia}$  – площа лісу у класі віку  $a$  (га);

$p$  – період моделювання;

$i$  – ідентифікатор елемента сітки;

$a$  – ідентифікатор класу віку;

$k$  – коефіцієнт обмеження попиту на деревину.

Результати моделювання порівнювали із результатами, отриманими за допомогою моделі G4M. Обидві моделі демонструють схожу динаміку площі деревостанів у однакових вікових класах у лісах, які використовують для заготівлі деревини.

### 3.7. Висновки до розділу 3

1. Розроблено метод геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні, який, на відміну від відомих, враховує взаємний вплив цих процесів, а також процесів торгівлі та переміщення заготовленої деревини, процесів заліснення та знеліснення, що дає можливість сумісно аналізувати і прогнозувати ці процеси у залежності від економічної ситуації та встановлених обмежень на емісію парникових газів.
2. Розроблено глобальну геопросторову математичну модель процесів заліснення, знеліснення, заготівлі деревини та відповідних емісій вуглекислого газу (модель G4M). У моделі процеси прийняття рішень щодо зміни землекористування та параметрів лісокористування розглядаються з точки зору власників ділянок землі, які знаходяться у клітинках растру 0.5x0.5 градуса.
3. Розроблено ітераційний метод моделювання процесу просторового поширення знеліснення для глобальної геопросторової моделі G4M шляхом врахування інтенсивності знеліснення в даній клітинці растру на попередньому кроці моделювання та мінімальної площі лісу у сусідніх клітинках, а також транспортної мережі, що дає можливість точніше відтворити просторову структуру знеліснення.
4. Розроблено метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни чи регіону, для геопросторової моделі G4M, який дає можливість поєднувати інформацію на різних геопросторових рівнях (регіони, країни та окремі клітинки растру).
5. Розроблено метод моделювання процесу прийняття рішень щодо зменшення емісій CO<sub>2</sub> при лісокористуванні та зміні землекористування при збереженні заготівлі заданої кількості деревини для геопросторової моделі G4M, який ґрунтується на принципі максимізації чистої приведеної вартості, що дає можливість проводити імітаційне моделювання процесів впровадження природоохоронних стратегій.
6. Розроблено метод ідентифікації параметрів геопросторової моделі G4M, які відповідають за моделювання процесів зміни землекористування, за даними

ФАО та звітів країн до РКЗК ООН на національному рівні, що дало можливість відтворити історичні емісії вуглекислого газу країн у секторі лісового господарства та зміни землекористування та прогнозувати емісії за різних сценаріїв соціально-економічного розвитку та податку на емісії парникових газів.

7. Розроблено алгоритм моделювання процесу емісії CO<sub>2</sub> з біомаси, підстилки, ґрунту та боліт при зміні землекористування для глобальної геопросторової моделі G4M, який відповідає рекомендаціям Міжнародної групи експертів зі зміни клімату, що дає можливість використовувати модель для оцінювання і прогнозування відповідних емісій CO<sub>2</sub> у секторі РКЗК ООН «Землекористування, зміни землекористування та лісове господарство» для окремих країн.
8. Розроблено версію геопросторової математичної моделі процесів лісокористування та зміни землекористування для території Європейського Союзу, у якій додатково використано геопросторові дані про переважаючі деревні породи, геопросторові дані про заготівлю деревини у 2000-2010рр., а також дані про вікову структуру лісу, зміну землекористування та емісії CO<sub>2</sub> з біомаси лісів, що дало можливість вдосконалити метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни та метод калібрування емісій CO<sub>2</sub> з біомаси лісів.
9. Запропоновано параметри та дані, які необхідні для адаптації геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування для України. Вдосконалено метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини для України з врахуванням сортиментів деревини, що збільшило точність моделювання процесу заготівлі кількості сортиментів деревини на 40%, при цьому точність моделювання процесу заготівлі сумарного обсягу деревини залишилась на рівні 99% як і у базовому методі. Запропоновано підхід до моделювання процесу заготівлі деревини для рекурсивної оптимізаційної моделі, який враховує вікову структуру лісу і втрату вартості лісу при передчасних або запізнілих рубках, що дало можливість більш адекватно представити динаміку лісу у рекурсивній моделі.

## Розділ 4. Валідація математичної моделі G4M

### 4.1. Особливості валідації математичних моделей, які використовують для проведення інтегральної оцінки

Моделі інтегральної оцінки є складними комп'ютерними моделями, які включають в себе компоненти моделювання біофізичних та економічних процесів, а також поведінки людей. Ці компоненти можуть бути об'єднані в одній моделі (менш детально, наприклад, AIM/CGE (Asia-Pacific Integrated Assessment/Computable General Equilibrium) [94], International Futures (<http://pardee.du.edu/node/484>)), або у вигляді комплексу зв'язаних між собою більш детальних моделей (наприклад, комплекс моделей інтегральної оцінки Міжнародного інституту прикладного системного аналізу [93]). Враховуючи те, що компоненти моделей об'єднані і виникають зворотні зв'язки, валідація окремих компонентів моделей не буде гарантувати валідації моделі (чи комплексу моделей) в цілому. Загальноприйнятим є твердження, що валідація моделі тісно пов'язана з призначенням моделі. Nguyen (2005) [220] аналізуючи праці, в яких розглядають валідацію IAM, виділяє такі проблеми валідації моделей цього типу:

Відсутність загальноприйнятих визначень таких понять як

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

V. Hughes [149], один з розробників моделі International Futures, використовує концепцію верифікації-валідації та акредитації (VVA). Розрізняють валідацію концептуальної моделі (або валідацію структури моделі - перевірка того, що теорії та припущення, які використано у концептуальній моделі, є раціональними, враховуючи призначення моделі), валідацію поведінки

моделі (або операційну валідацію – перевірка того, що поведінка результатів моделювання має достатню точність відповідно до призначення моделі), валідацію даних (перевірка того, що дані, необхідні для розробки моделі та проведення модельних експериментів є адекватними та коректними) та верифікацію (перевірка того, що концептуальна модель переведена у комп'ютерну модель коректно, без помилок) [263] (рис. 4.1).

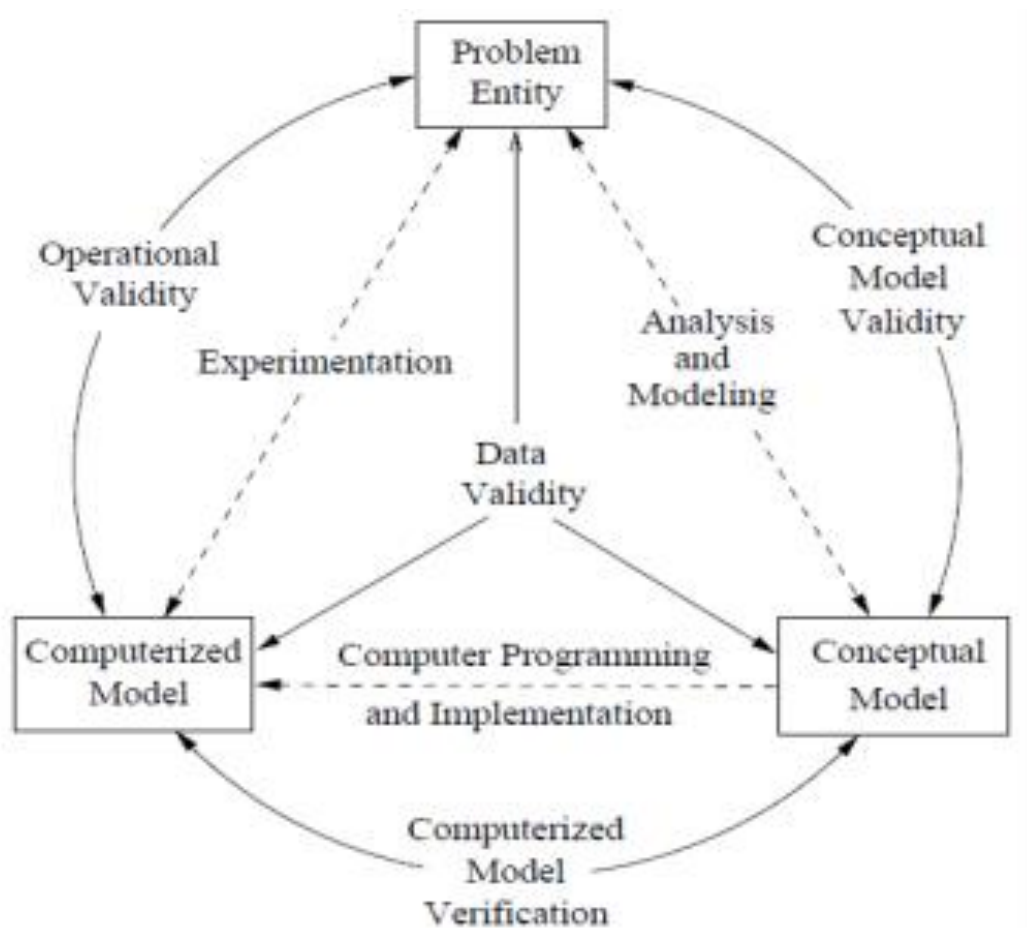


Рис. 4.1. Схематичне зображення процесу моделювання за [263].

Враховуючи вищенаведені проблеми валідації складних моделей, такі моделі, практично, не валідують. В тому числі це стосується моделей інтегральної оцінки в сільському господарстві [25] та лісовому господарстві. Натомість, визначають, чи модель підходить для певних цілей, - «акредитація» згідно [263] і чого притримується В. Hughes [149] при валідації моделі International Futures. Така «акредитація», в тому числі, може відбуватись через процес використання моделі у різних проектах із залученням до рецензування моделі та результатів моделювання незалежних експертів, замовників

результатів аналізу з використанням моделі та зацікавлених осіб (тих, кого можуть стосуватись результати моделювання, чи політичні рішення, на які можуть вплинути ці результати моделювання) [25, 149, 316]. При наявності відповідних даних «спостережень» порівнюють результати моделювання з цими даними. При наявності інших моделей проводять порівняння результатів різних моделей як для історичного періоду так і майбутнього періоду (наприклад, [177, 236]). Також важливо проводити дослідження чутливості моделі до зміни окремих параметрів (для визначення тих параметрів, які мають суттєвий вплив на результат моделювання, а також вимірювання цього впливу), а також, при можливості, аналіз поширення похибок в моделі (наприклад, методом монте-карло). [122, 130, 358].

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

## **4.2. Чутливість моделі до неточностей параметрів**

### **4.2.1. Невизначеності вхідних даних**

Оцінка лісових ресурсів ФАО (FRA) є основним джерелом даних на глобальному та національному рівнях. FRA надає глобальні оцінки для зміни площі лісів з 1980-х років. В основному оцінки лісових ресурсів базуються на даних, наданих країнами. Крім того використовують дані досліджень дистанційного зондування тропічних лісів, які були використані в FRA 2000 та FRA 2005 та FRA 2010 [250] та 2015р. Для окремих країн, які не подали звіти, у ФАО проводять самостійні дослідження. Останній звіт про лісові ресурси FRA [106] містить дані за 1990, 2000, 2005, 2010 та оцінку для 2015 років.

Швидкості заліснення та знеліснення можна оцінити за звітними даними в рамках Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (РКЗК ООН) чи Кіотського протоколу, використовуючи такі категорії, як лісові земля (FL), інші землі (L) та лісові землі, перетворені в інші землі (як знеліснення) та інші землі перетворені у лісові землі (заліснення). Дані про зміни в землекористуванні, отримані з звітів до РКЗК ООН, не є добре узгодженими між усіма країнами так як дані оцінки



лісових ресурсів ФАО, тому що країни звітують за різні періоди, а також обмежена кількість країн регулярно представляють звіти (в основному, країни Додатку 1 до Кіотського протоколу). Однак, для тих країн, для яких дані є перевіреними, це достовірне джерело даних.

Grainger (2008) [110] проаналізував невизначеність даних про лісовий покрив, представлені в серії оцінок лісових ресурсів ФАО. Зокрема він звернув увагу на суттєві виправлення даних про площі природних лісів, які були опубліковані в серії звітів ФАО [102, 103, 107]. У багатьох випадках виправлення не можна розглядати як поліпшення, а швидше як альтернативні оцінки.

Hansen et al. (2010) [134] опублікували глобальну карту втрат лісового покриву за 2000-2005 роки з роздільною здатністю 18.5x18.5 м км. Дослідники використовували комбінацію MODIS (Spider-матричний спектрометр з помірною роздільною здатністю) та ETM+ (Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus). Ліс визначається як дерева з перекриттям крон на 25% або більше при 30x30 м пікселів для дерев, висота яких перевищує 5 м. Карта показує втрати лісового покриву без урахування причин втрати (наприклад, лісозаготівлі, лісові пожежі, тощо). Лише у тропіках (крім басейну Конго) втрати лісового покриву протягом періоду спостереження (2000-2005 рр.) зумовлені, головним чином, перетворенням лісової землі в сільськогосподарські угіддя, тобто вирубки лісу [134]. Високоякісні просторові дані щодо вирубки лісів на більш тривалий період також доступні для Амазонки [63].

Існує кілька проблем, які ускладнюють використання геопросторових даних для перевірки Г4М на національному або геопросторовому рівнях: 1) визначення лісу є більш вузьким, ніж визначення ФАО або РКЗК ООН; 2) Дані містять інформацію про земельний покрив, але не про землекористування. Однак ці дані можуть бути використані для калібрування або перевірки моделі лише в деяких регіонах (наприклад, в тропічних лісах), де зміна покриву землі близька до зміни землекористування.

ВВП у базовому році визначено на рівні країн за статистичними даними і може розглядатися як добре відоме. Розподіл ВВП в межах країн проводився з урахуванням відмінностей у містах та сільській місцевості [112] з невідомою

невизначеністю. ВВП для клітинок між сценаріями IPCC SRES відрізняється на 160% у 2050 році.

Комбінована щільність деревини та вміст вуглецю у деревині (*ftimber*) залежить від виду дерев, віку дерева та умов навколишнього середовища. У країнах ЄС середній показник для параметра *ftimber* становить від 3.5 до 4.8 м<sup>3</sup>/тС (-13% та 20% навколо значення за замовчуванням 4 м<sup>3</sup>/тС). Ми вважаємо, що геопросторова мінливість є вищою. Детальні дані (включаючи геопросторові дані) для оцінки параметра *ftimber* недоступні в багатьох країнах.

Ми розглядаємо три геопросторові набори даних чистої первинної продукції (NPP), які використовувались в G4M - середнє результатів 17 моделей проекту порівняння моделей рослинності [60], результат моделі TsuViMo [3] та NPP, отримане з даних дистанційного зондування [260]. Середня різниця між оцінками NPP для клітинок растру становить близько 50% для [60] та [3]; 105% для [60] і [260] та 518% для [3] і [260]. Частка чистої первинної продукції, яка зберігається у деревині (*fcuptake*), визначає швидкість накопичення вуглецю в лісі. У моделі використовується постійне значення.

Ми вважаємо, що невизначеність даних про геопросторове розміщення людей у базовому році є досить хорошою, але прогнози (сценарії SRES) у середньому відрізняються на 1000% до 2050р.

Для оцінки невизначеності даних про біомасу лісів розглянемо публікацію Mitchard et al. (2013) [211], де порівнювали дві пантропічні карти надземної біомаси рослинного покриву, отримані за даними дистанційного зондування, які були опубліковані у [261] (позначено SA2011, роздільна здатність 463м) та [12] (позначено BA2012, роздільна здатність 1000м). Ці карти широко використовують у проектах REDD + на регіональному та національному рівнях. Mitchard et al. (2013) [211] порівнювали ці дві карти між собою, а також на рівні країн з даними зі звіту ФАО про лісові ресурси 2010 року [105]. Крім того, проводили порівняння з картою біомаси з високою роздільною здатністю (100 м), створеною для частини басейну р. Амазонка у Колумбії. Існують суттєві відмінності між картами SA2011 та BA2012 як на національних так і на регіональних рівнях (як правило, у великих тропічних країнах), зокрема в

центральної Амазонії, басейні Конго, південній Папуа-Новій Гвінеї, африканських лісах Майомбо і південноамериканських сухих лісах та савані. Дві карти, SA2011 та BA2012, були більш схожими одна з одною на рівні країн, ніж з оцінкою зі звіту ФАО [105]. Типові відмінності між картами біомаси досягають локально до 50тС/га у басейні Амазонки, що становить приблизно 20% різниці. Загальна біомаса у всіх тропічних країнах складає 95 PgC в BA2012 і 105 PgC в SA2011. Знак різниці відрізняється між Південною Америкою, Африкою та Азією. Порівняння на рівні країни показує кращу згоду, ніж на рівні окремих пікселів, з квадратичним середнім значенням відхилення для 92 країн 23.1тС/га (середня різниця – 8.7% на рівні країни). При порівнянні з картою роздільною здатністю 100м, отриманою з допомогою Лідара, для Колумбії виявилось, що обидві глобальні карти мають систематичну похибку 23% для BA2012 та 42% для SA 2011.

Ціни на деревину та сільськогосподарську землю у G4M представляють дві економічні альтернативи конкурентного землекористування - лісове господарство для виробництва деревини, або сільське господарство для виробництва продуктів харчування, технічних культур та енергетичних культур. Згідно з аналізом кількісної оцінки ІАМ Спільних соціально-економічних шляхів (SSP) проведеним Fricko et al. (2017) [93], різні сценарії можуть призвести до зміни цін на сільськогосподарські товари від -60% до + 50% до 2100 р. порівняно з 2005 р. Крім того, заходи по зменшенню емісій ПГ можуть призвести до збільшення цін на сільськогосподарські товари на 110-570%.

У свою чергу, корупція є однією з головних загроз ефективності програм REDD, і вона присутня в країнах, де реалізуються програми REDD [272]. Коефіцієнт корупції, який використовується в G4M, обчислено в [176] як середній показник відсотка від "політичної стабільності", "ефективності влади" та "контролю за корупцією" [169]. Відносна невизначеність оцінок компонентів коефіцієнта корупції коливається від декількох відсотків до значно більше 100% для деяких країн, де важко отримати достовірну інформацію (наприклад, Північна Корея, Афганістан).

#### 4.2.2. Аналіз даних про швидкість заліснення та знеліснення, отриманих зі звітів ФАО та РКЗК ООН для окремих країн

Австралія

Відповідно до даних, поданих Австралією до ФАО [9], звіт про лісові ресурси ФАО [106] для Австралії щодо оцінки швидкості заліснення, знеліснення та площі лісів базується на звіті про національну інвентаризацію парникових газів Австралії, представленому у РКЗК ООН у 2013 році (ANGGI2013) [10]. Площа землі, конвертованої в лісові угіддя, та лісові угіддя, перетворені в інші типи землекористування, у звіті про національну інвентаризацію парникових газів Австралії, представленому у РКЗК ООН у 2015 році (ANGGI2015) [11] (таблиця з оцінкою CRF (ANGGI2015)) суттєво відрізняються від відповідних значень, наданих у 2013 році. Відмінності у звітах в даних про знеліснення та заліснення, ймовірно, з'явилися завдяки оновленим даним дистанційного зондування зміни лісового покриву у ANGGI2015 та кращою здатністю розрізняти зміну земельного покриву, викликаного природними подіями (наприклад, лісовими пожежами та посухою у випадку знеліснення [9]) та зміною землекористування, спричиненого людиною (див. табл. 4.1, табл. 4.2, табл. 4.3).

Дані, наведені у FAO FRA 2015 [106], представлено в таблиці 4.1. Зміни (загальної) лісової площі, площі природних лісів і площі посаджених лісів (кга/рік) в таблиці 4.1 оцінено як різницю в лісовій площі між ближчими звітними періодами, поділену на тривалість відповідного періоду (наприклад, зміна лісової площі, віднесена до 2010 року, дорівнює лісовій площі в 2010 році за мінусом лісової площі в 2005 році, результат розділений на 5).

Значення для 2000 року щодо заліснення та знеліснення, отримані з національних кадастрів інвентаризації в таблиці 4.2 та таблиці 4.3, є середніми показниками за період 1991-2000 рр., значення 2005 та 2010 років є середніми за відповідні 5-річні періоди, щоб відобразити ті ж періоди, що і значення, отримані з FAO FRA 2015. Для оцінки даних ANGGI2013 ми використовували річні показники зміни землекористування, представлені в AFAOFRA2014 [9]. Для оцінки даних ANGGI2015 ми використовували річні показники зміни

землекористування, отримані з сукупних значень, представлених у таблиці 4.1 CRF звіту національної інвентаризації [11].

Таблиця 4.1. Середня загальна площа лісів, середні площі природних лісів та посаджених лісів, а також зміни площ лісів для Австралії за даними FAO FRA 2015 [106]

<b>Рік</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
Площа лісу, кга	128,541	128,841	127,641	123,211
Площа природного лісу, кга			126,013	121,308
Площа лісонасаджень, кга	1,023	1,176	1,628	1,903
Зміна площі лісу, кга/рік		30	-240	-886
Зміна площі природного лісу, кга/рік		0	0	-941
Зміна площі лісонасаджень, кга/рік		15	90	55

Таблиця 4.2. Порівняння середніх швидкостей знеліснення, кга/рік, для Австралії з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2013р. (ANGGI2013) [10] та 2015 р. (ANGGI2015) [11] та обчислених на основі звітів FAO про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015р. (FAO FRA 2015) [106]

<b>Оцінка знеліснення / рік</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
ANGGI 2013	358	954	440
ANGGI 2015	350	353	299
FAO FRA 2015	0	330	941
FAO FRA 2010	N/A	N/A	39

У випадку Австралії значення площі природних лісів у 1990 та 2000 рр. відсутні у звіті FAO 2015 р. [106], тому для 2000 р. ми використовуємо (загальну) зміну площі лісів (-240 кга/рік) та зміну площі посаджених лісів (90 тис.кга/рік) для оцінки знеліснення (-240 - 90 = -330 кга/рік). Зміна площі лісів (загальна) у 2000 р. рівна 30 кга/рік, зміна площі посаджених лісів – 15 кга/рік, а зміни площі природних лісів неможливо оцінити, тому ми вважаємо, що швидкість заліснення у 2000 р. становить 30 кга/рік.

Швидкість знеліснення, яку ми оцінили за даними FAO FRA 2015, досягає максимуму (941 кга/рік) у 2010 році, а швидкість знеліснення у даних ANGGI2013 досягає максимуму у 2005 році (954 кга/рік). Цей зсув пов'язаний з тим, що високий рівень знеліснення в ANGGI2013 повідомляється для 2005 року, це відображається у зменшеній лісовій площі у 2005 році. У звіті Австралії про лісові ресурси для FAO [9] площа лісу для 2010 року оцінено як середнє значення за 2005-2009 роки, тоді як з даних ANGGI2013 ми оцінюємо значення для 2005 року, як середнє швидкостей знеліснення за 2001-2005 роки.

Таблиця 4.3. Порівняння середніх швидкостей заліснення, кга/рік, для Австралії з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2013 р. (ANGGI2013) [10] та 2015 р. (ANGGI2015) [11] та обчислених на основі звітів FAO про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015 р. (FAO FRA 2015) [106]

<b>Оцінка заліснення / рік</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
ANGGI 2013	412	74	424
ANGGI 2015	114	147	183
FAO FRA 2015	30	90	55
FAO FRA 2010	15	90	55

#### Канада

Дані про лісову площу у FAO FRA 2015 для Канади базуються на даних національної інвентаризації лісів, яка почала проводити після 2009 року, тоді як дані FAO FRA 2010 базуються на даних інвентаризації лісів Канади, які складені з багатьох субнаціональних кадастрів [49]. У [49] повідомляють, що швидкість знеліснення у 1990-2010 роках становила близько 56 кга/рік, однак зменшення площі природних лісів становить у 10 разів більше. Площа заліснення становить 476 кга/рік (близько 6 кг/рік заліснення нових площ та 470 кга/рік - лісовідновлення) у всіх звітних періодах (табл. 4.4). У FAO FRA 2010 звітують про майже такий же темп приросту площі посаджених лісів як у FAO FRA 2015, в той час як площа природних лісів та загальна площа лісів залишаються однакові протягом 1990-2010 років (в такому випадку ми вважаємо, що

швидкість зменшення площі лісів має бути рівною швидкості збільшення посаджених лісів, щоб збалансувати загальну площу лісів).

Таблиця 4.4. Середня загальна площа лісів, середні площі природних лісів та посаджених лісів, а також зміни площ лісів для Канади за даними FAO FRA 2015 [106]

<b>Рік</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
Площа лісу, кга	348,273	347,802	347,576	347,302
Площа природного лісу, кга	343,695	338,457	335,866	333,327
Площа лісонасаджень, кга	4,578	9,345	11,710	13,975
Зміна площі лісу, кга/рік		-47	-45	-55
Зміна площі природного лісу, кга/рік		-524	-518	-508
Зміна площі лісонасаджень, кга/рік		477	473	453

Канада не подала звіт про національні емісії парникових газів до РКЗК ООН у 2015 році, тому ми використовуємо дані з канадського звіту про інвентаризацію парникових газів (таблиці CRF), подані у 2016 році (CANNGGI2016) [218], для оцінки швидкостей заліснення та знеліснення. Канада повідомляє про 20-річну накопичену кількість зміни землекористування, тому ми розділяємо значення, отримані з таблиці 4.6 CRF на 20, щоб отримати середні річні значення.

Значення швидкості знеліснення, яке ми оцінили за даними CANNGGI2016 [218], приблизно в 10 разів перевищує значення, отримане за даними FAO FRA 2015. Основна причина полягає в тому, що втрата природних лісів не враховується у CANNGGI2016 [218] (а також не повідомляється як знеліснення у [49]). Середні значення швидкості знеліснення, отримані з Національного звіту про інвентаризацію, поданого до РКЗК ООН в 2016 році [218], CANNGGI2016, FAO FRA 2015 та FAO FRA 2010 представлено в таблиці 4.5.

Оцінка швидкості заліснення, яку ми отримали за даними CANNGGI2016, приблизно в 10 разів перевищує значення, отримані за даними FAO FRA 2015. Основна причина полягає у тому, що основне збільшення площі лісонасаджень у [49] повідомляється як лісовідновлення після вирубування природних лісів. Середні швидкості заліснення, отримані з національного звіту про

інвентаризацію парникових газів, поданого до РКЗК ООН в 2016 році, CANNGGI 2016, FAO FRA 2015 та FAO FRA 2010, представлено в Таблиці 4.6.

Таблиця 4.5. Порівняння середніх швидкостей знеліснення, кга/рік, для Канади з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2016р. (CANNGGI 2016) [218] та обчислених на основі звітів ФАО про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015р. (FAO FRA 2015) [106]

Оцінка знеліснення / рік	1990	2000	2005	2010
FAO FRA 2015		-524	-518	-508
FAO FRA 2010		-446	-446	-183
CANNGGI 2016	-106	-72	-59	-51

Таблиця 4.6. Порівняння середніх швидкостей заліснення, кга/рік, для Канади з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2016р. (CANNGGI 2016) [218] та обчислених на основі звітів ФАО про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015р. (FAO FRA 2015) [106]

Оцінка заліснення / рік	1990	2000	2005	2010
FAO FRA 2015		477	473	453
FAO FRA 2010		446	446	183
CANNGGI 2016	9	8	7	5

### Японія

У звіті про лісові ресурси FAO FRA 2015 для Японії лісові площі та швидкість відновлення лісів базуються на даних національної інвентаризації лісів, наданих Агентством лісового господарства та урядами префектур, в той час як інформація про заліснення та знеліснення не надається [157]. У звіті Японії про лісові ресурси, надісланому до ФАО у 2014р. [157] повідомляють про зменшення площі природних лісів на 12 кга/рік у 1990-2000 роках і збільшення площі на 13 кга/рік у 2000-2010 роках. На відміну від динаміки площі природних лісів, площа посаджених лісів зростала на 4 кга/рік у 1990-2000 рр. та зменшувалася на 1 кга/рік у 2000-2005 рр. та на 6 тис. кга/рік у 2005-2010 рр. (табл. 4.7). У звіті ФАО про лісові ресурси 2010р. [105] вказано таку ж динаміку площі лісонасаджень, що й у звіті ФАО про лісові ресурси 2015р. [106] для 1990-2005 рр., тоді як динаміка площі природних лісів відрізняється.



Таблиця 4.7. Середня загальна площа лісів, середні площі природних лісів та посаджених лісів, а також зміни площ лісів для Японії за даними FAO FRA 2015 [106]

<b>Рік</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
Площа лісу, кга	24,950	24,876	24,935	24,966
Площа природного лісу, кга		14,546	14,611	14,674
Площа лісонасаджень, кга	10,287	10,331	10,324	10,292
Зміна площі лісу, кга/рік		-7	12	6
Зміна площі природного лісу, кга/рік		-12	13	13
Зміна площі лісонасаджень, кга/рік		4	-1	-6

Японія подала таблиці CRF до РКЗК ООН у 2015 році, де надала звіт про щорічну зміну землекористування у таблиці 4.1 [217]. Швидкість знеліснення, отримані нами з таблиць CRF, близькі до значень, які ми обчислили за даними FAO FRA 2015 для 1990-2000 рр. та 2005-2010 рр. Швидкість знеліснення, отримана на основі таблиць CRF, перевищує значення, обчислені з даних FAO [106], для 2000-2005 років (8 кга/рік проти 1 кга/рік), ймовірно, тому що у звіті Японії для FAO [157] не оцінено швидкість знеліснення через відсутність інформації. Середня швидкість знеліснення для Японії, отримана з Національного звіту про інвентаризацію парникових газів, поданого до РКЗК ООН у 2015 році [217], [105] та [106] представлено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8. Порівняння середніх швидкостей знеліснення, кга/рік, для Японії з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2015р. (JPNNGGI 2015) [217] та обчислених на основі звітів FAO про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015р. (FAO FRA 2015) [106]

<b>Оцінка знеліснення / рік</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
FAO FRA 2015		-12	-1	-6
FAO FRA 2010		-11	0	0
JPNNGGI 2015	-34	-16	-8	-7

Швидкість заліснення, отримана нами з таблиць CRF, менша, ніж значення, обчислені нами за даними звіту FAO 2015р. [106] (1 кга/рік проти 4 кга/рік у 1990-2000 рр. та 1 кга/рік проти 13 кга/рік у 2000-2010 рр.), ймовірно, тому що більшість приросту площі природного лісу розглядається як природне

лісовідновлення без зміни землекористування. Середня швидкість заліснення для Японії, отримана з Національного звіту про інвентаризацію парникових газів, поданих до РКЗК ООН у 2015 році [217], а також FAO FRA 2015 та FAO FRA 2010, представлено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9. Порівняння середніх швидкостей заліснення, кг/рік, для Японії з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2015р. (JPNNGGI 2015) [217] та обчислених на основі звітів ФАО про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015р. (FAO FRA 2015) [106]

Оцінка заліснення / рік	1990	2000	2005	2010
FAO FRA 2015		4	13	13
FAO FRA 2010		4	12	9
JPNNGGI 2015	3	1	1	1

### Туреччина

Починаючи з 2004 року інформація про лісові ресурси для Туреччини базується, в основному, на базі даних Управління лісового господарства та планування ENVANIS у Генеральному управлінні лісового господарства (GDF), тоді як інформація за попередні періоди базується на даних лісових кадастрів та іншої супровідної інформації. Це стосується даних надісланих у ФАО (FAO FRA 2015 [106]) [309] та Національний звіт про інвентаризацію парникових газів [216]. Туреччина звітує до ФАО [106] близько 10 мільйонів гектарів, а для інвентаризації парникових газів використовує лісову площу близько 20 мільйонів гектарів, що включає деградовані ліси, де перекриття крон дерев становить менше 10%. У звіті Туреччини до ФАО [309] повідомлено про збільшення кількості природних лісових масивів у 1990-2000 рр. та 2000-2005 рр. (відповідно 10 кг/рік та 48 кг/рік) та зменшення природних лісових площ у 2000-2010 рр. (21 кг/рік). Площа посадженого лісу збільшується протягом трьох періодів, про які повідомлено у звіті: у 1990-2000 рр. - 46 кг/рік, у 2000-2005 рр. – 48 кг/рік, а 2005-2010 рр. – 130 кг/рік (докладніше див. таблицю 4.10). У звіті Туреччини до ФАО [309] не вказано швидкість знеліснення через нестачу інформації.

Таблиця 4.10. Середня загальна площа лісів, середні площі природних лісів та посаджених лісів, а також зміни площ лісів для Туреччини за даними FAO FRA 2015 [106]

<b>Рік</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
Площа лісу, кга	9,622	10,183	10,662	11,203
Площа природного лісу, кга		8,231	8,470	8,363
Площа лісонасаджень, кга	1,495	1,952	2,192	2,840
Зміна площі лісу, кга/рік		56	96	108
Зміна площі природного лісу, кга/рік		10	48	-21
Зміна площі лісонасаджень, кга/рік		46	48	130

Ми використовуємо таблиці CRF, подані Туреччиною до РКЗК ООН у 2015 році [216], для оцінки швидкості заліснення та знеліснення. Туреччина звітує до РКЗК ООН 20-річні акумульовані зміни землекористування, тому ми розділяємо значення, отримані з таблиць 4.6 CRF на 20, щоб отримати середньорічні значення.

У національній інвентаризації парникових газів 2015р. [216] показано нульове знеліснення у 1990-2010 роках. Оцінки швидкості заліснення, які ми отримали за даними інвентаризації парникових газів 2015р. [216], приблизно в 2 рази менші, ніж значення, отримані за даними FAO FRA 2015, для 1990-2000 рр. та в 3 рази менші у 2000-2010 рр. Причиною може бути той факт, що деяке збільшення площі лісу, про яке вказано у звіті до ФАО [309], відбувається через відновлення деградованих лісів, що не звітується як зміна землекористування у інвентаризації парникових газів [216], де як звичайні ліси так і деградовані ліси знаходяться в одній категорії землекористування. Середні швидкості знеліснення та заліснення для Туреччини, отримані за даними Національного звіту про інвентаризацію, поданого до РКЗК ООН в 2015 році [216]), а також за даними FAO FRA 2015 та FAO FRA 2010, наведено в таблиці 4.11 та таблиці 4.12, відповідно.

Таблиця 4.11. Порівняння середніх швидкостей знеліснення, кга/рік, для Туреччини з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2015р. (TURNGGI 2015) [216] та обчислених на основі звітів ФАО про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015р. (FAO FRA 2015) [106]

Оцінка заліснення / рік	1990	2000	2005	2010
FAO FRA 2015		0	0	-21
FAO FRA 2010		-10	0	-41
TURNGGI 2015	0	0	0	0

Таблиця 4.12. Порівняння середніх швидкостей заліснення, кга/рік, для Туреччини з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2015р. (TURNGGI 2015) [216] та обчислених на основі звітів ФАО про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015р. (FAO FRA 2015) [106]

Оцінка заліснення / рік	1990	2000	2005	2010
FAO FRA 2015		56	96	130
FAO FRA 2010		57	119	160
TURNGGI 2015	18	22	35	43

## США

Площа лісів у ФАО FRA 2015 для США базується на даних Інвентаризації та аналізу лісів (FIA) [313]. У звіті США до ФАО [313] повідомляють, що площа лісів збільшується, тоді як про знеліснення інформація відсутня для всіх звітних років. Площа природних лісових масивів скорочувалася у 1990-2000 рр. (середня швидкість -354 кга/рік) та у 2000-2005 роках (середня швидкість -129 кга/рік) і збільшувалась у 2005-2010 рр. (середня швидкість 565 кга/рік) (Таблиця 4.13). Площа посадженого лісу збільшувалась у всіх звітних періодах. У ФАО FRA 2010 повідомляють про менше розширення загальної площі лісів у 2000-2010 роках, ніж у ФАО FRA 2015 (383 кга/рік проти 518 кга/рік) і незменшення площі лісу ні для природних, ні для посаджених лісів.

США не подавали таблиці CRF до РКЗК ООН після 2014 р., тому ми використовуємо дані, отримані у звіті про інвентаризацію парникових газів США (таблиця CRF), подані у 2014 році [154] для оцінки швидкостей заліснення та знеліснення. Інформація про зміну землекористування та використання земель у [154] базується в основному на трьох базах даних: Міністерства сільського

господарства США (USDA), Інвентаризації національних ресурсів (NRI), Лісової служби США (USFS) та базі даних FIA.

Таблиця 4.13. Середня загальна площа лісів, середні площі природних лісів та посаджених лісів, а також зміни площ лісів для США за даними FAO FRA 2015 [106]

<b>Рік</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
Площа лісу, кга	302,450	303,536	304,757	308,720
Площа природного лісу, кга	284,512	280,976	280,332	283,156
Площа лісонасаджень, кга	17,938	22,560	24,425	25,564
Зміна площі лісу, кга/рік		109	244	793
Зміна площі природного лісу, кга/рік		-354	-129	565
Зміна площі лісонасаджень, кга/рік		462	373	228

Представлення національного кадастру парникових газів у 2014 році було підготовлено з використанням попередньої версії таблиць CRF, яка не містить окремої матриці зміни землекористування, тому дані про зміни землекористування були вибрані з окремих таблиць 5А-5F. Значення конвертації землі з одного типу землекористування в інший в цих таблицях є площею землі, тип землекористування якої був змінений протягом останніх 20 років. Щоб оцінити річну швидкість зміни землекористування, ми ділимо значення з таблиць на 20, отримуючи швидкості зміни землекористування в середньому за останні 20 років.

Швидкості знеліснення, отримані за даними звіту FAO про лісові ресурси, FAO FRA 2015, та за даними національної інвентаризації парникових газів, поданої у 2014р., USANGGI 2014 [154], близькі для 2000 року (354 кга/рік проти 340 кга/рік). У 2005 та 2010 рр. розбіжності між оцінками швидкості знеліснення збільшуються: за даними звіту FAO FRA 2015 р. до 129 кга/рік у 2005 р. та 0 кга/рік у 2010 р., тоді як оцінки за даними з національної інвентаризації парникових газів [154] перевищують 400кга/рік після 2000 р. (Таблиця 4.14). Значення, отримані за даними FAO FRA 2015, і значення, отримані за даними [154], можуть відрізнитися, оскільки у [154] значення швидкості зміни

землекористування, зазначене для певного року, зазнає впливу всіх змін землекористування, які відбувались протягом 20 років до цього звітнього року, тоді як значення у FAO FRA представляють середні значення для 5-10 років: значення у 2000 році представляє середній показник за 1991-2000 рр., у 2005 р. - середній показник 2001-2005 рр., а у 2010 р. - середній показник 2006-2010 рр. Разом з тим, швидкості знеліснення, отримані за відповідними даними [106] та [154], є суперечливими, оскільки збільшення швидкості знеліснення, отримане за даними інвентаризації парникових газів [154], у 2005 і 2010 роках у порівнянні з 2000 роком, припускають, що після 1990 року мало б відбуватися знеліснення, а також знеліснення мало б відбуватись після 2000 року, але це не відображено у звіті ФАО про лісові ресурси [106].

Таблиця 4.14. Порівняння середніх швидкостей знеліснення, кг/рік, для США з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2014р. (USANGGI 2014) [154] та обчислених на основі звітів ФАО про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015р. (FAO FRA 2015) [106]

<b>Оцінка знеліснення / рік</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
FAO FRA 2015	-354	-129	0
FAO FRA 2010	N/A	N/A	N/A
USANGGI 2014	-340	-425	-413

Швидкості заліснення, отримані за даними ФАО [106] та за даними інвентаризації парникових газів [154], є більш узгодженими в усі звітні періоди. Ці величини близькі у 2000 році (462 кг/рік проти 456 кг/рік) з більшою різницею у 2005 та 2010 роках (див. таблицю 4.15).

Таблиця 4.15. Порівняння середніх швидкостей заліснення, кг/рік, для США з даних звітів національних інвентаризацій парникових газів, поданих у 2014р. (USANGGI 2014) [154] та обчислених на основі звітів ФАО про лісові ресурси 2010р. (FAO FRA 2010) [105] та 2015р. (FAO FRA 2015) [106]

<b>Оцінка заліснення / рік</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
FAO FRA 2015	462	373	793
FAO FRA 2010	462	373	188
USANGGI 2014	456	648	578

### 4.2.3. Чутливість результатів моделювання до зміни вхідних параметрів моделі

Для того, щоб знайти параметри моделі, які впливають на результати найбільше, проведемо дослідження чутливості моделі до зміни параметрів. Проведемо моделювання, змінюючи кожен параметр по черзі  $\pm 10\%$  навколо його середнього значення за замовчуванням один за іншим і перевіримо як змінюється швидкість заліснення і знеліснення [130]. Результати представлено в Таблиці 4.16.

В результаті аналізу чутливості моделі G4M до зміни окремих параметрів ( $\pm 10\%$  від середнього значення) було виявлено, що результати моделювання швидкості заліснення та знеліснення без впливу податку на вуглець найбільш чутливі до зміни валового внутрішнього продукту, коефіцієнта перерахунку вуглецю у об'єм деревини (комбінація щільності деревини та вмісту вуглецю у деревині), приросту деревини (залежить від чистої первинної продукції), щільності розміщення населення, ціни на деревину, придатності землі для ведення сільського господарства та вартості заліснення (Таблиця 4.16) [130].

Ми також проаналізували чутливість результатів моделювання до одночасної зміни двох параметрів: ціни сільськогосподарської ціни та ціни вуглекислого газу, ціни деревини та ціни вуглекислого газу, а також коефіцієнта корупції та ціни вуглекислого газу [122]. Врахування ціни вуглекислого газу потрібне для оцінки впливу невизначеності вхідних параметрів моделі на криві граничних витрат, що розглядається у наступному підрозділі.

Для досліджуваних країн та у всьому світі реакція емісій  $\text{CO}_2$  на зміну ціни на сільськогосподарську землю дуже висока при ціні  $\text{CO}_2$  3-10  $\$/\text{тCO}_2$  симетрично на негативні та позитивні відхилення параметра (див. рис. 4.2 для глобального випадку).

Таблиця 4.16. Чутливість швидкості заліснення та знеліснення у моделі G4M до мінливості вхідних параметрів моделі. [130].

Параметр моделі, який змінювали ±10% від середнього	Опис параметра	Зміна швидкості знеліснення, %			Зміна швидкості заліснення, %		
		2000	2025	2050	2000	2025	2050
popdence_p10	Щільність розміщення населення	-10.5	-3.3	10.3	-41.8	-1.2	31.1
popdence_m10		0.1	-23.1	-26.6	46.5	-3.1	-13.5
agrosuit_p10	Придатність землі до ведення сільського господарства	5.3	3.6	2.5	1.2	0.4	-0.3
agrosuit_m10		-6.0	-4.0	-2.5	-1.1	-0.5	0.4
discount_p10	Коефіцієнт дисконтування	0.3	0.8	0.7	-0.2	-0.4	-0.3
discount_m10		-0.4	-1.2	-1.0	0.4	0.5	0.4
NPP_p10	Чиста первинна продукція	17.5	15.3	7.2	-5.0	-2.6	1.3
NPP_m10		-17.0	-9.8	-7.7	4.1	0.6	0.0
gdp_p10	Валовий внутрішній продукт	-21.2	15.9	47.9	51.9	-12.6	-16.9
gdp_m10		19.9	35.8	60.2	-59.9	-70.7	-55.6
ftimber_p10	Комбінований коефіцієнт переводу біомаси з одиниць тон вуглецю у м3	19.3	17.7	8.1	-5.0	-2.4	1.8
ftimber_m10		-19.5	-12.1	-9.0	4.1	0.4	-0.2
plantingcosts_p10	Вартість посадки дерев	5.6	3.2	0.5	-2.1	0.1	0.6
plantingcosts_m10		-5.3	-3.3	-0.7	2.9	0.0	-0.2
fcuptake_p10	Частка NPP, яка залишається у деревині	17.5	15.3	7.2	-5.0	-2.6	1.3
fcuptake_m10		-17.0	-9.8	-7.7	4.1	0.6	0.0
biomass_p10	Надземна біомаса	2.6	2.7	1.4	0.0	0.1	0.5
biomass_m10		-2.3	-2.6	-1.8	0.0	-0.2	-0.5
harvloos_p10	Втрати при заготівлі деревини	2.9	2.4	1.5	-1.7	-0.7	-0.9
harvloos_m10		-3.3	-2.5	-1.4	2.3	0.6	0.9
lprice_m10	Вартість сільськогосподарської землі	-1.7	-1.6	-3.6	3.2	1.6	2.7
lprice_p10		1.3	1.7	2.3	-1.2	-1.6	-2.4
wprice_m10	Ціна деревини на корені	7.6	4.9	2.9	-3.6	-1.8	-2.2
wprice_p10		-6.4	-4.0	-5.1	5.3	1.4	2.4

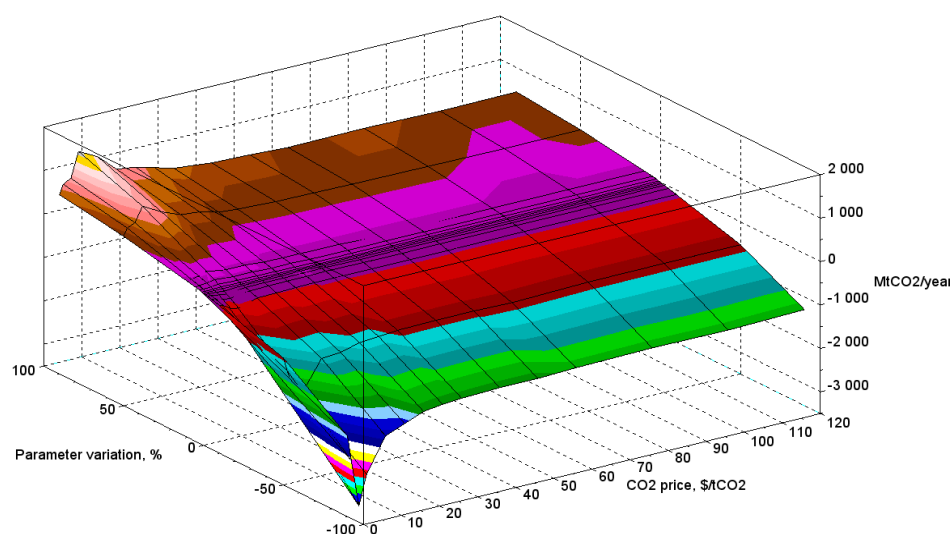


Рис. 4.2. Чутливість загальних емісій CO<sub>2</sub> з біомаси до зміни ціни на сільськогосподарську землю в глобальному масштабі у 2030 році.



Відгук емісій на зміну ціни на деревину має різні поверхні в досліджуваних країнах, тоді як відгук глобальних емісій включає особливості всіх країн (рис. 4.3). У Бразилії чутливість висока при всіх цінах на  $\text{CO}_2$ , але при цінах 1-5  $\$/\text{тCO}_2$  відгук змінює свій знак (з максимумом 10  $\$/\text{тCO}_2$ ). "Аномалія" пояснюється тим, що при деяких цінах на  $\text{CO}_2$  зростання ціни на деревину призводить до збільшення швидкості знеліснення. Це пояснюється тим, що частина деревини, заготовлена при знелісненні, може бути продана, що стимулює перехід від лісового господарства до сільського господарства. Це ефект взаємозв'язку між ціною сільськогосподарської землі, ціною  $\text{CO}_2$  та ціною деревини. Цей ефект впливає з алгоритму симуляції прийняття рішень у моделі G4M: перехід від лісу до сільського господарства базується на найвищому рівні чистої теперішньої вартості (NPV), яку можна досягти за допомогою одного з цих альтернативних варіантів використання землі. У цьому випадку вища вартість деревини недостатня для економічно стійкого лісового господарства але (як одноразовий прибуток від продажу деревини) створює стимул для переходу до сільського господарства (знеліснення) [123]. В Індонезії відгук емісій на зміни в ціні деревини змінюється з цінами  $\text{CO}_2$  з максимальними відхиленнями при ціні  $\text{CO}_2$  3 та 60  $\$/\text{тCO}_2$ . У Мексиці відгук емісій на зміни ціни деревини є симетричним за знаком зміни параметра з максимумом 10-15  $\$/\text{тCO}_2$ . Для Мексики спостерігається такий самий ефект збільшення знеліснення з підвищенням ціни на деревину на рівні 5-10  $\$/\text{тCO}_2$ . На глобальному рівні ми бачимо схожу картину (рис. 4.3): для ціни  $\text{CO}_2$  приблизно 10  $\$/\text{тCO}_2$ , зростання цін на деревину збільшує знеліснення в порівнянні з базовою лінією, що відповідає цій ціні вуглецю (10  $\$/\text{тCO}_2$ ).

Відгук емісій на зміну коефіцієнта корупції має аналогічну форму - з різким максимальним відхиленням емісій при ціні  $\text{CO}_2$  на рівні 3-10  $\$/\text{тCO}_2$ , коли коефіцієнт корупції зростає (див. рис. 4.4 для глобального випадку). Коли коефіцієнт корупції зменшується, чутливість висока при широкому діапазоні цін на  $\text{CO}_2$ , досягаючи максимального значення, якщо корупційний коефіцієнт зменшується на 90%.

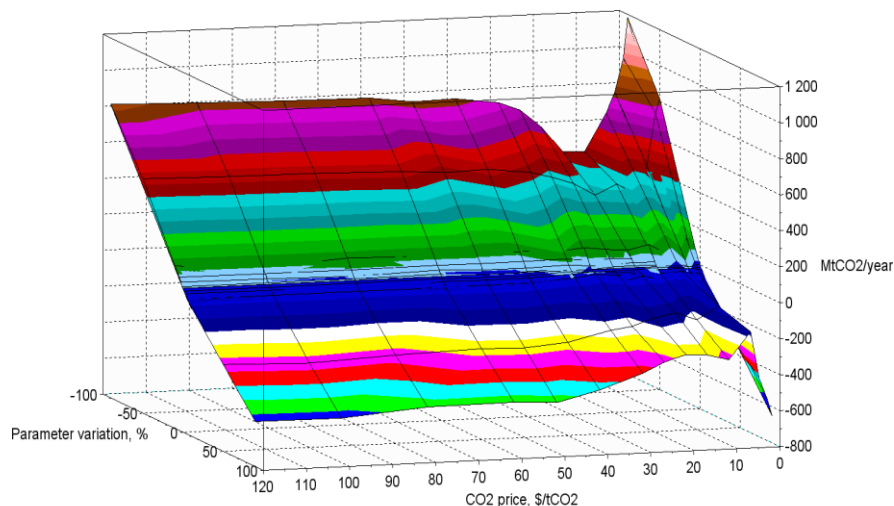


Рис. 4.3. Чутливість загальних емісій CO<sub>2</sub> від біомаси до зміни ціни на деревину в глобальному масштабі у 2030 році.

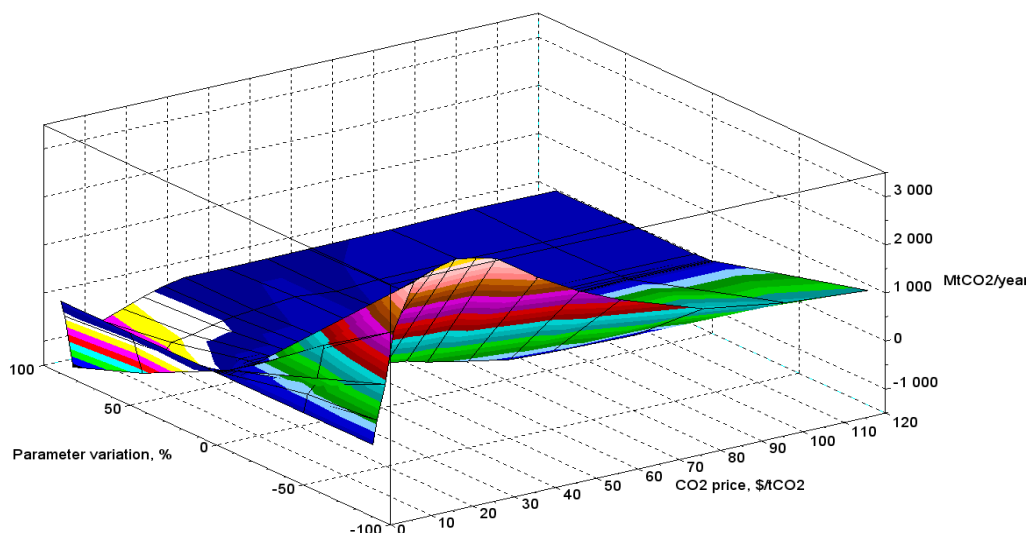


Рис. 4.4. Чутливість загальних емісій CO<sub>2</sub> від біомаси до коефіцієнта корупції у глобальному масштабі до 2030 року (більший коефіцієнт означає підвищення ефективності та меншу корупцію).

Seebach et al. (2012) [271] аналізували чутливість оцінки кількості деревини, яка потенційно може бути заготовлена у країнах ЄС, до вибору карти розміщення лісів, яку використовують у G4M. Автори статті [271] виявили, що вплив є незначним у випадку розгляду агрегованих результатів (на рівні ЄС), але суттєвим у випадку розгляду окремих країн. Якщо результати моделювання будуть використані для аналізу вибору шляху досягнення цілі збільшення вироблення біоенергії на 10%, вибір карти розміщення лісів може мати вплив на

таке рішення. У цьому випадку суттєва різниця між картами вплинула на різницю у результатах моделювання. [271].

Для врахування відмінностей у даних щодо площі лісу, а також швидкості заліснення і знеліснення FAO та UNFCCC було проведено аналіз чутливості результатів оцінки емісій та стоку вуглекислого газу для історичного періоду та прогнозування до 2050 року, без впливу податку на вуглець (BAU; рис. 4.5 – негативні емісії CO<sub>2</sub> від заліснення; рис 4.6 – емісії від знеліснення) та з впливом податку на вуглець (криві граничних витрат на зменшення емісій (MACC), див. секцію 4.4.1).

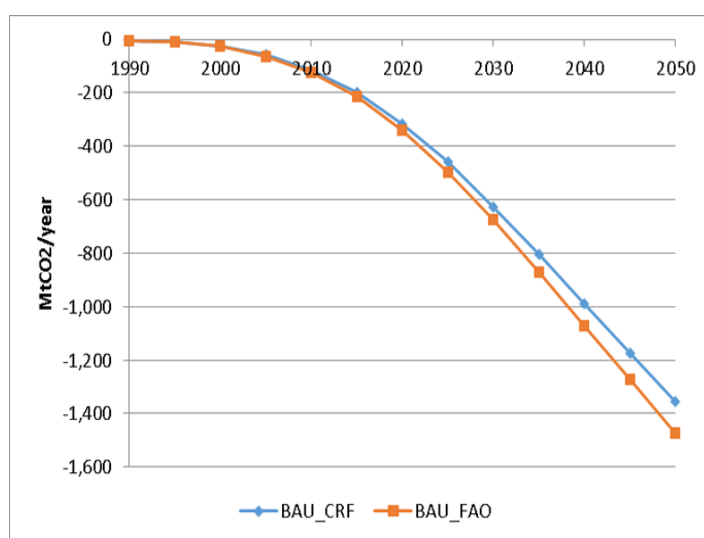


Рис. 4.5. Глобальні емісії CO<sub>2</sub> від заліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі.

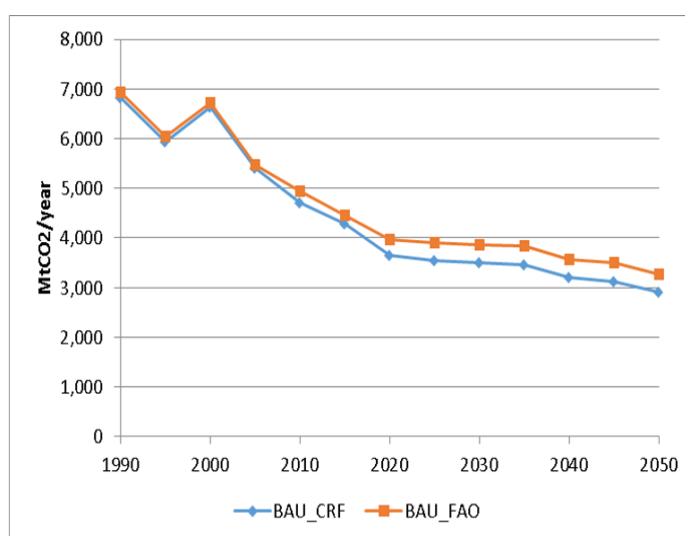


Рис. 4.6. Глобальні емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі.

Глобальні (сума для всіх країн) емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення та заліснення без впливу податку на вуглець практично не відрізняються протягом історичного періоду, але дещо розходяться з часом (до 9% для заліснення та 12% для знеліснення). Глобальний потенціал зменшення емісії CO<sub>2</sub> від заліснення, знеліснення, лісового господарства та сумарний відрізняється максимум на 20% для заліснення. Разом з тим, для окремих країн різниця перевищує 100%.

У випадку Австралії емісії CO<sub>2</sub> при залісненні є більшим, якщо G4M відкалібрувати до рівнів заліснення та знеліснення, отриманих за даними FAO FRA 2015 (див. рис. 4.7). Різниця в емісіях CO<sub>2</sub> починається з 0.1 МтCO<sub>2</sub>/рік у 1990 році і збільшується з часом, досягаючи 6.7 МтCO<sub>2</sub>/рік у 2030 році та 13.0 МтCO<sub>2</sub>/рік у 2050 році, оскільки вуглець накопичується у зростаючій біомасі, мертвій органічній речовині та ґрунті.

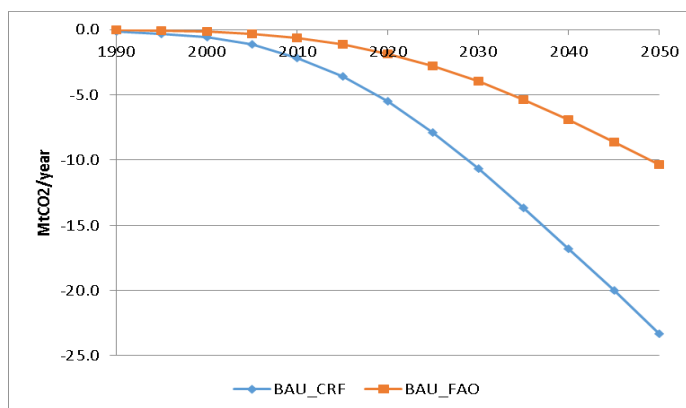


Рис. 4.7. Емісії CO<sub>2</sub> від заліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у Австралії.

Для Австралії емісії CO<sub>2</sub>, спричинені знелісненням, при калібруванні G4M за даними, отриманими з FAO FRA 2015, рівні нулю у 1990-2000 рр. і на 23.1 МтCO<sub>2</sub>/рік нижчі, ніж емісії CO<sub>2</sub> при калібруванні моделі за даними, отриманими зі звітів до РКЗК ООН, у 2005 р. Починаючи з 2010 р., емісії CO<sub>2</sub> при калібруванні G4M за даними, отриманими з FAO FRA 2015, перевершують емісії CO<sub>2</sub> при калібруванні за даними зі звітів РКЗК ООН на 120-185 МтCO<sub>2</sub>/рік, досягаючи максимуму (184.9 МтCO<sub>2</sub>/рік) у 2015 році (див. рис. 4.8).

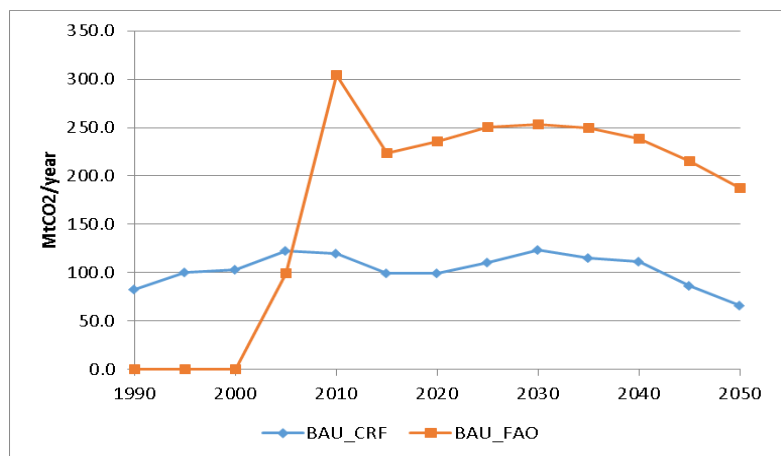


Рис. 4.8. Емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у Австралії.

Модель прогнозує значно більше поглинання CO<sub>2</sub> при залісненні в Канаді у 2030 і 2050 роках, якщо G4M буде відкалібрована за даними, отриманими на основі звіту ФАО [106] (див. рис. 4.9). Різниця у поглинанні при залісненні починається з 0.5 MtCO<sub>2</sub>/рік у 1990 році і збільшується з часом, досягаючи 51.6 MtCO<sub>2</sub>/рік у 2030 році та 108.1 MtCO<sub>2</sub>/рік у 2050 році. Ця різниця у поглинанні вуглецю зумовлена різницею у швидкості заліснення, що при калібруванні за даними РКЗК ООН (таблиці CRF) є у 5-9 разів меншою у 2000-2010 роки (див. таблицю 4.6). Емісії CO<sub>2</sub>, спричинені знелісненням, при калібруванні моделі за даними ФАО FRA 2015 перевищують відповідні емісії, отримані з калібруванням за даними звіту до РКЗК ООН (таблиці CRF) протягом усіх років на 132-250 MtCO<sub>2</sub>/рік, з максимумом (249.5 MtCO<sub>2</sub>/рік) у 2040 році та великим значенням (246.1 MtCO<sub>2</sub>/рік) у 2030 році (див. рис. 4.9).

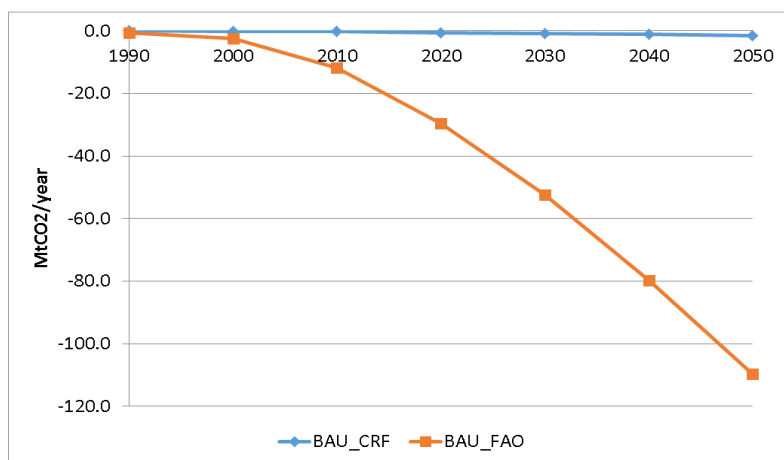


Рис. 4.9. Емісії CO<sub>2</sub> від заліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у Канаді.

Ця різниця у емісіях CO<sub>2</sub> зумовлена різницею у швидкостях знеліснення, що при калібруванні за даними звіту до РКЗК ООН приблизно в 10 разів нижча, ніж при калібруванні за даними FAO FRA 2015 (див. таблицю 4.5).

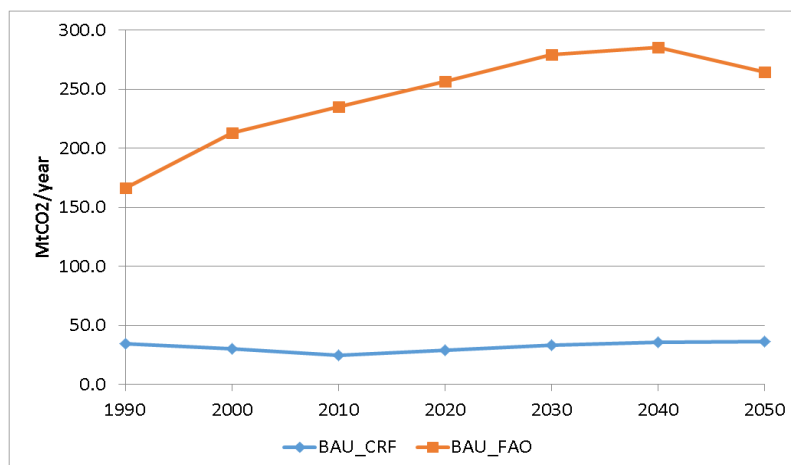


Рис. 4.10. Емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у Канаді.

Результат моделювання стоку CO<sub>2</sub> при залісненні для Японії є приблизно в 3 рази більшим у 2030 році і в 5 разів більшим у 2050 році, якщо G4M відкалібрувати за даними, отриманими зі звіту ФАО [106], порівняно з калібруванням за даними зі звіту до РКЗК ООН (таблиці CRF) (див. рис. 4.11).

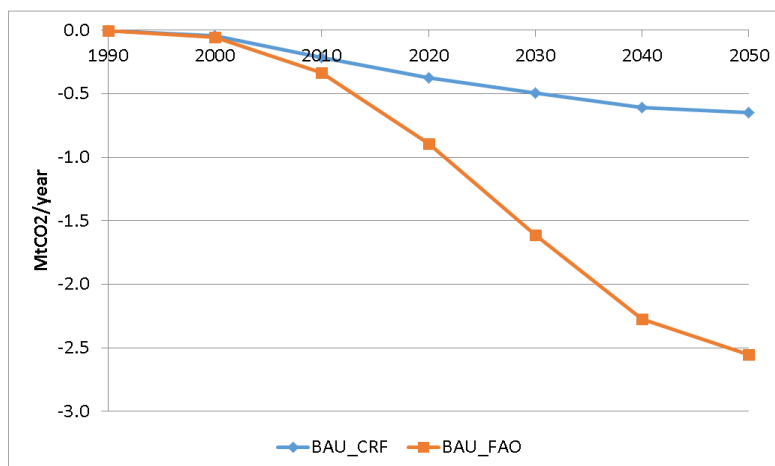


Рис. 4.11. Емісії CO<sub>2</sub> від заліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у Японії.

Різниця у стоках CO<sub>2</sub> при залісненні починається з 0.1 МтСО<sub>2</sub>/рік у 2010 році і збільшується із часом, досягаючи 1.20 Мт СО<sub>2</sub>/рік у 2030 році та 1.9 МтСО<sub>2</sub>/рік у 2050 році. Різниця у стоках вуглецю з двома калібруваннями моделі існує внаслідок різниці у швидкостях заліснення - при калібруванні за даними таблиць

CRF швидкість заліснення в 4 рази менша до 2000 року і в 13 разів менша у 2005 та 2015 роках у порівнянні з калібруванням за даними зі звіту ФАО FRA 2015 (див. таблицю 4.9).

Емісії CO<sub>2</sub> при знелісненні з калібруванням моделі за даними ФАО FRA 2015 є меншими за відповідні емісії з калібруванням моделі за даними таблиць CRF на 0.4-7.4 MtCO<sub>2</sub>/рік у всі роки. Ця різниця є максимальною (7.41 MtCO<sub>2</sub>/рік) у 1990 році і 0.9 MtCO<sub>2</sub>/рік у 2030 році (див. рис. 4.12). Ця різниця в емісіях при знелісненні зумовлена відмінностями у швидкостях знеліснення, отриманими за даними таблиць CRF та звіту FAO FRA 2015 (див. Таблицю 4.8).

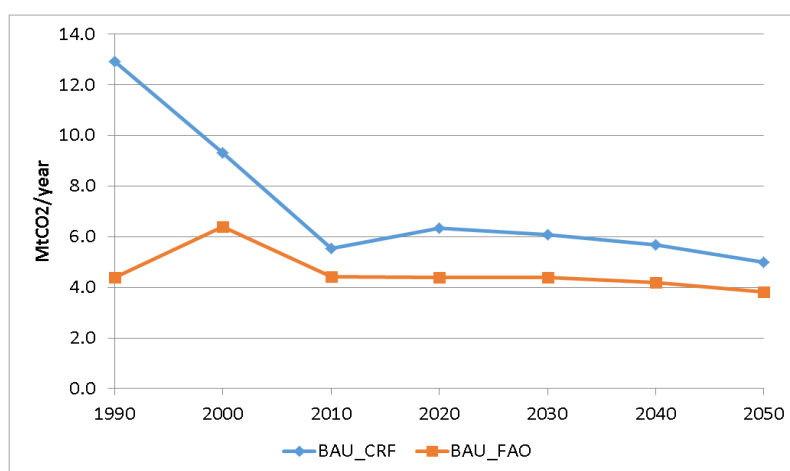


Рис. 4.12. Емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у Японії.

Для Туреччини змодельований стік CO<sub>2</sub> при залісненні приблизно в 3 рази більший в 2030 та 2050 роках, якщо модель відкалібрувати за даними, отриманими зі звіту ФАО [106], у порівнянні з калібруванням за даними з CRF таблиць (див. рис. 4.13).

Різниця у стоках CO<sub>2</sub> починається з 0.05 MtCO<sub>2</sub>/рік у 2000 році і збільшується з часом, досягаючи 7.5 Mt CO<sub>2</sub>/рік у 2030 році та 18.8 Mt CO<sub>2</sub>/рік у 2050 році. Ця різниця у стоках CO<sub>2</sub> спричинена різницею у швидкостях заліснення - при калібруванні моделі за даними CRF таблиць швидкість заліснення в 2 рази менша у 1990-2000 роках та в 3 рази менша у 2005 та 2015 роках у порівнянні з калібруванням моделі за даними, отриманими зі звіту ФАО 2015 року (див. таблицю 4.12).

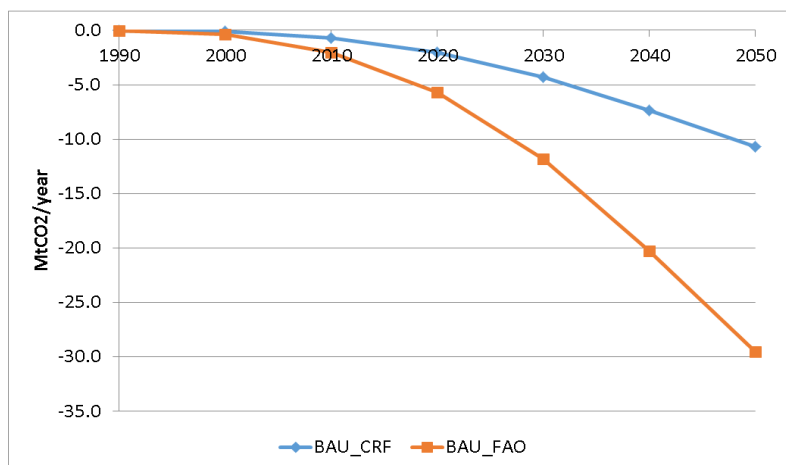


Рис. 4.13. Емісії CO<sub>2</sub> від заліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у Туреччині.

Емісії CO<sub>2</sub> при знелісненні, отримані при калібруванні моделі за даними з CRF таблиць, близькі до нуля, тоді як при калібруванні моделі за даними FAO FRA 2015 емісії перевищують 0.1-11.1 MtCO<sub>2</sub>/рік, досягаючи максимуму у 2010 році; до 2030 року емісії складають близько 6.1 млн. MtCO<sub>2</sub>/рік і 4.8 MtCO<sub>2</sub>/рік у 2050 році (див. рис. 4.14). Ця різниця в емісіях CO<sub>2</sub> при знелісненні зумовлена різницею у даних калібрування, отриманих з CRF таблиць та зі звіту FAO (див. таблицю 4.11).

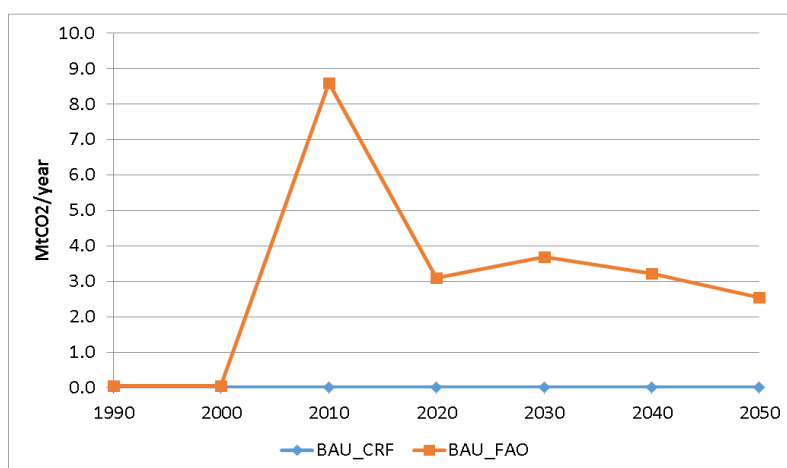


Рис. 4.14. Емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у Австралії.

У випадку США стік CO<sub>2</sub> при залісненні трохи більший у 1990-2030 роках, якщо модель калібрувати до рівнів заліснення та знеліснення, отриманих зі звіту FAO FRA 2015 (див. рис. 4.15). Різниця у стоках починається з 0.3 MtCO<sub>2</sub>/рік у 1990 році і збільшується із часом до максимуму 4.6 MtCO<sub>2</sub>/рік у 2015 році, а



потім знижується до 1.8 МтСО<sub>2</sub>/рік у 2030 році. Після 2030 року стік СО<sub>2</sub> при залісненні з калібруванням моделі за даними з CRF таблиць перевищить стік СО<sub>2</sub> з калібруванням за даними звіту ФАО FRA 2015; різниця у стоках СО<sub>2</sub> збільшується до 12.1 МтСО<sub>2</sub>/рік у 2050 році. Коливання різниці у стоках СО<sub>2</sub> пов'язані з різницею у швидкості заліснення, що при калібруванні моделі за даними з таблиць CRF, вища протягом всіх років, крім 1990-1995 та 2010 років (див. таблицю 4.15).

Емісії СО<sub>2</sub> при знелісненні з калібруванням моделі за даними, отриманими зі звіту ФАО FRA 2015, перевищують відповідні емісії СО<sub>2</sub> з калібруванням моделі за даними з CRF таблиць лише у 1990-1995 роках. Починаючи з 2000 р., емісії СО<sub>2</sub> при знелісненні з калібруванням моделі за даними з CRF таблиць перевищують емісії СО<sub>2</sub>, отримані з калібруванням моделі за даними зі звіту ФАО [106], на 8-181 МтСО<sub>2</sub>/рік з максимумом (180.8 Мт СО<sub>2</sub>/рік) у 2010 році та середнім значенням (36.4 МтСО<sub>2</sub>/рік) у 2030 році (див. рис. 4.16). Різниця емісіях СО<sub>2</sub> при знелісненні при двох калібруваннях моделі спричинена різними швидкостями знеліснення (див. таблицю 4.14).

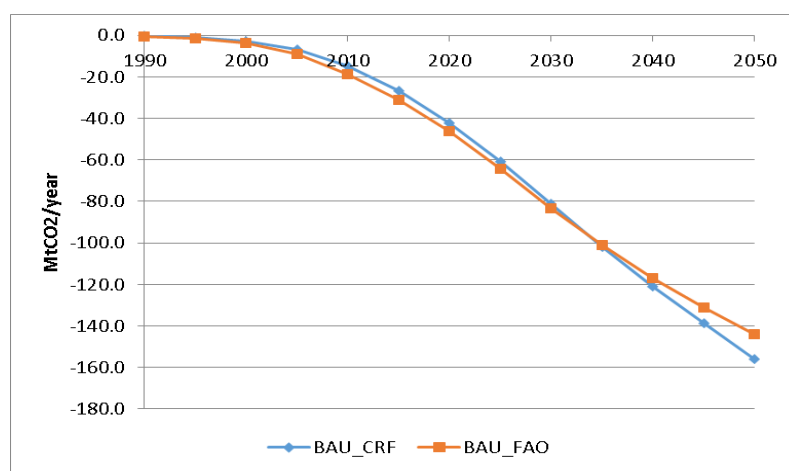


Рис. 4.15. Емісії СО<sub>2</sub> від заліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних ФАО (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у США.

Зважаючи на суттєву відмінність у даних про швидкість заліснення та знеліснення, отриманих з використанням різних джерел, а саме звіт ФАО про лісові ресурси та звіти країн про національні інвентаризації парникових газів, надіслані до РКЗК ООН у формі таблиць CRF, а також значну чутливість результатів моделювання до цих вхідних параметрів, важливо враховувати

призначення результатів моделювання для вибору відповідних вхідних даних (ФАО, чи РКЗК ООН) про площу лісу та швидкості заліснення і знеліснення.

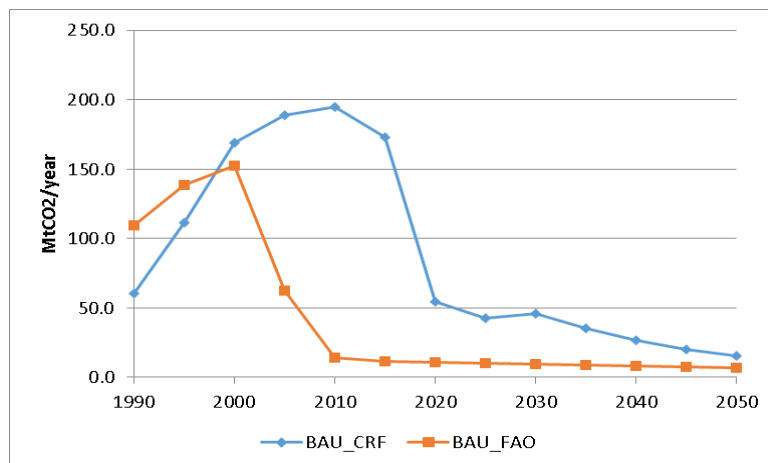


Рис. 4.16. Емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU\_FAO) та UNFCCC (BAU\_CRF) для калібрування моделі у США.

#### 4.4. Вплив чутливості моделі до неточності параметрів на криві граничних витрат на зменшення емісій вуглекислого газу

Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> використовують для аналізу економічної ефективності рішень щодо зменшення емісій CO<sub>2</sub>, а також для підтримки прийняття відповідних рішень [5, 18, 19, 59, 66, 206, 243, 300, 314, 327]. Залучення сектору зміни землекористування та лісового господарства (зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення, а також деградації лісів) у глобальний ринок вуглецю може суттєво знизити кошти зменшення антропогенних емісій парникових газів [5, 7, 18, 19, 66]. Враховуючи потенційний вплив прийнятих рішень на національному та глобальному рівнях важливо знати наскільки невизначеність параметрів моделі, а також невизначеності, які властиві методу моделювання впливають на криві граничних витрат [172]. Зазвичай, дослідники вивчають як зміна базового рівня емісій, чи припущень моделювання впливають на криві граничних витрат [72, 108, 210, 270, 326]. Ми проаналізували наскільки може вплинути використання даних про швидкість заліснення та знеліснення, отримані на основі звіту ФАО про лісові ресурси (розділ 4.4.1), а також звітів країн до РКЗК ООН (розділ 4.4.2) на криві граничних витрат, побудовані з використанням моделі G4M.

#### 4.4.1. Вплив різних даних калібрування моделі

Глобальні (сума для всіх країн) емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення та заліснення без впливу податку на вуглець практично не відрізняються протягом історичного періоду, але дещо розходяться з часом (до 9% для заліснення та 12% для знеліснення). Глобальний потенціал зменшення емісії CO<sub>2</sub> від заліснення, знеліснення, лісокористування та сумарний відрізняються на 7-52% для заліснення (максимальна різниця при низьких цінах вуглецю), 3-14% для знеліснення (максимальна різниця при високих цінах вуглецю, рис. 4.17), 2-5% для лісокористування та 1-7% для сумарного потенціалу (максимальна різниця при високих цінах вуглецю). Разом з тим, для окремих країн різниця перевищує 100%. Тому важливо враховувати призначення результатів моделювання для вибору відповідних даних (ФАО, чи РКЗК ООН) про площу лісу та швидкості заліснення і знеліснення.

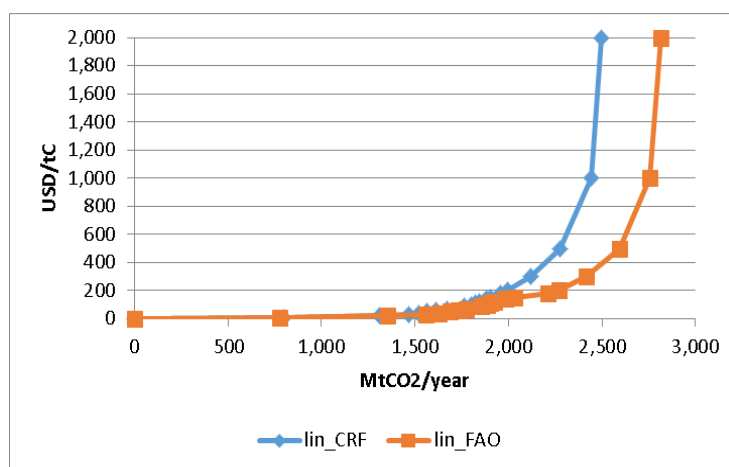


Рис. 4.17. Глобальний потенціал зменшення емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення для різної ціни на вуглець (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р. при використанні даних ФАО (lin\_FAO) та UNFCCC (lin\_CRF) для калібрування моделі.

#### Австралія

Якщо G4M буде відкалібровано за даними зі звіту ФАО про лісові ресурси [106], потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> при залісненні у 2030 році близький до нуля при 10 \$/tC (ціна вуглецю змінюється лінійно від нуля у 2015р. до заданого значення у 2030р.) і більше при більш високих цінах вуглецю. Різниця становить

близько 0.01-0.02 МтСО<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю нижче 50 \$/тС, і близько 0.03 МтСО<sub>2</sub>/рік при більш високих цінах вуглецю (див. рис. 4.18).

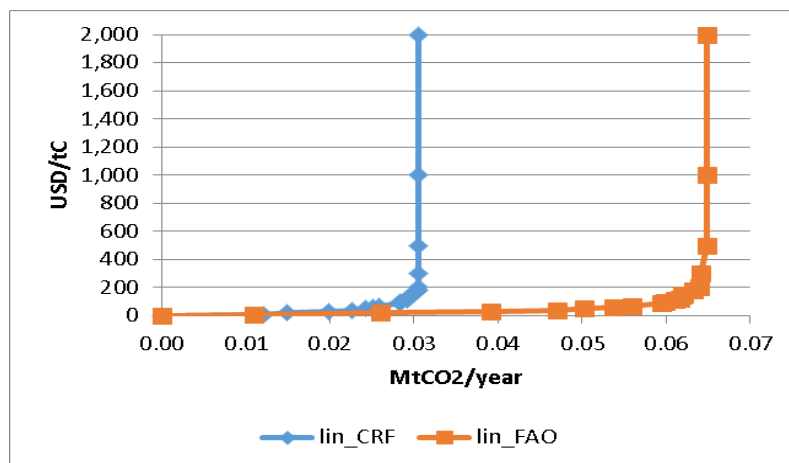


Рис. 4.18. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Австралії

Механізми МАСС для лісонасадження в 2030 році (зверху ліворуч), уникаючи вирубки лісів, МАСС (верхнє праворуч) та загальна лісозаготівельна МАСС (ліворуч нижня частина) для Австралії внаслідок калібрування G4M до даних про зміну використання земель, отриманих від CRF-FAO (синій) та FAO FRA 2015.

Якщо модель G4M буде відкалібровано за даними, отриманими на основі звіту ФАО [106], потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення у 2030 році є більшим при всіх цінах вуглецю, крім ціни 10 \$/тС. Потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення при калібруванні моделі за даними звітів до РКЗК ООН (CRF) при ціні вуглецю 10 \$/тС становить на 18.7 МтСО<sub>2</sub>/рік більше, ніж при калібруванні моделі за даними ФАО FRA 2015. Ця "аномалія" спостерігається лише для деяких траєкторій цін CO<sub>2</sub>. Вона пов'язана з часовими та просторовими ефектами, описаними в секції 5.2. При ціні вуглецю 20-100 \$/тС потенціал зменшення емісій від знеліснення при калібруванні моделі за даними ФАО FRA 2015 перевищує потенціал, отриманий при калібруванні за даними CRF приблизно на 42-120 МтСО<sub>2</sub>/рік, різниця поступово зростає з підвищенням ціни на вуглець і стабілізується на рівні 120.2 МтСО<sub>2</sub>/рік при більш високих цінах (див. рис. 4.19).

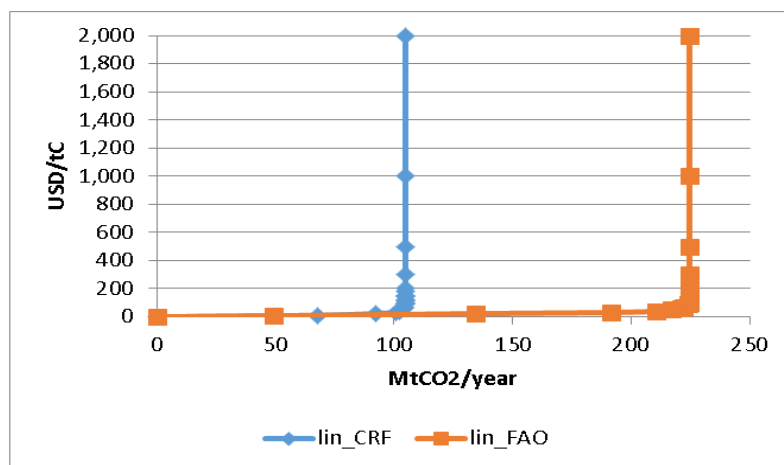


Рис. 4.19. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Австралії

Потенціал зменшення емісій від знеліснення при калібруванні моделі за даними FAO FRA 2015 більший, в основному, через вищу швидкість знеліснення (використовується більше 93% різниці у емісіях від знеліснення при нульовій ціні CO<sub>2</sub>).

Як і у випадку аналізу глобальних емісій, потенціал зменшення емісій від знеліснення у 2030 році визначає сумарний потенціал зменшення емісій. Сумарний потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> є більшим при всіх цінах вуглецю, за винятком ціни 10 \$/tC у випадку, коли G4M калібрують до даних, отриманих зі звіту ФАО FRA 2015 року. Потенціал зменшення сумарних емісій при калібруванні моделі за даними з CRF таблиць на 10 \$/tC на 19.2 MtCO<sub>2</sub>/рік більше, ніж при калібруванні за даними FAO FRA 2015. При цінах вуглецю від 20 до 50 \$/tC, різниця в потенціалах при різних калібруваннях збільшується з 43.4 до 124.2 MtCO<sub>2</sub>/рік, після чого повільно зменшується до 117.2 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю більшій 200 \$/tC (див. рис. 4.20).

#### Канада

Потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> при залісненні у 2030 році близький до нуля при всіх цінах вуглецю, якщо G4M відкалібровано за даними, отриманими на основі таблиць CRF (зі звіту Канади до РКЗК ООН). При калібруванні моделі за даними, отриманими на основі звіту ФАО FRA 2015 потенціал зменшення

емісій збільшується з 0.41 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 10 \$/tC до 1.64 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 2000 \$/tC (див. рис. 4.21).

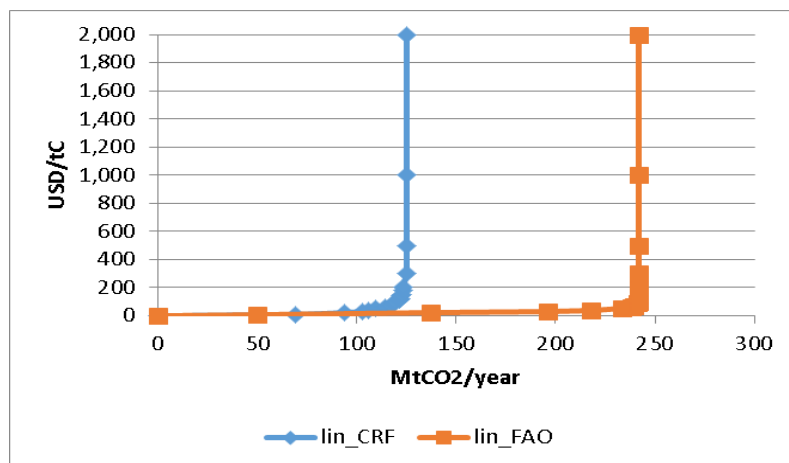


Рис. 4.20. Криві граничних витрат на зменшення сумарних емісій CO<sub>2</sub> (від заліснення, знеліснення та заготівлі деревини) при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Австралії

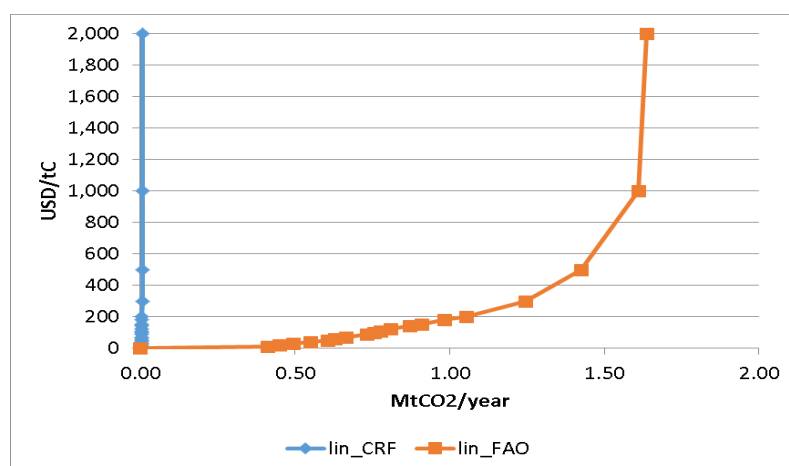


Рис. 4.21. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Канади

Потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення у 2030 році є більшим при цінах вуглецю 20-140 \$/tC в тому випадку, якщо G4M відкалібровано за даними, отриманими на основі таблиць CRF, ніж за даними ФАО FRA 2015. Проте при більш високих цінах вуглецю потенціал зменшення емісій при калібруванні за даними таблиць CRF зростає дуже повільно, стабілізуючись на рівні 28.7 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю більшій за 200 \$/tC, тоді як потенціал зменшення

емісій CO<sub>2</sub> при калібруванні за даними ФАО продовжує стрімко зростати і стабілізується на рівні 238.67 Мт CO<sub>2</sub>/рік при ціні більше 300 \$/тС (див. рис. 4.22). Більш високий потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> при цінах вуглецю менше 150 \$/тС при калібруванні за таблицями CRF пов'язаний з тим, що площа лісу зростає при такому калібруванні, тоді як у випадку калібрування за даними ФАО FRA 2015, площа лісу зменшується. Але набагато інтенсивніше знеліснення при нульовій ціні вуглецю при калібруванні за даними ФАО визначає відповідний потенціал зменшення емісій при вищих цінах вуглецю.

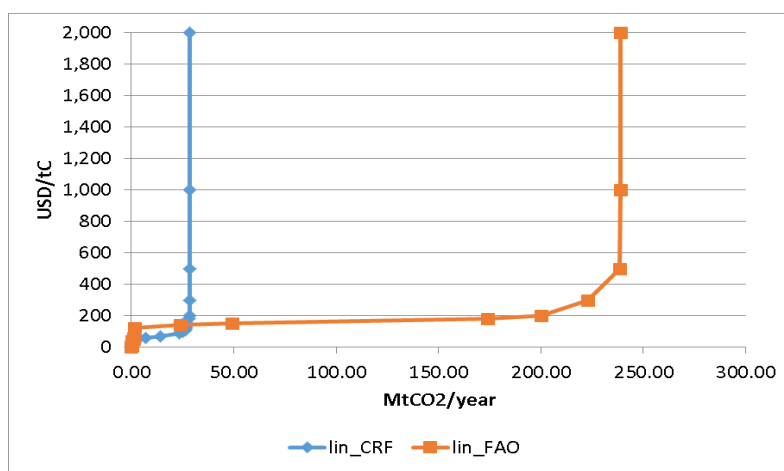


Рис. 4.22. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Канади

У Канаді потенціал зменшення емісій від заготівлі деревини завдяки поліпшенню управління лісовим господарством має такий самий порядок, як і потенціал зменшення емісій від знеліснення, в той час як потенціал зменшення емісій від заліснення рівний нулю у випадку калібрування моделі на основі таблиць CRF, тому потенціали зменшення емісій від знеліснення та заготівлі деревини визначають сумарний потенціал зменшення емісій. Різниця в потенціалах зменшення емісій, пов'язаних із покращенням управління лісовим господарством у двох варіантах калібрування моделі, має такий самий порядок, як і сам потенціал зменшення емісій (див. рис. 4.23). Потенціал зменшення емісій від заготівлі деревини у 2030 році є більшим при всіх цінах вуглецю, за винятком цін 20-40 \$/тС у випадку, якщо G4M відкалібровано за даними таблиць CRF. Потенціал є рівним нулю при ціні вуглецю 10 \$/тС в обох варіантах калібрування.

Потенціал при калібруванні моделі за даними ФАО при ціні вуглецю 20 \$/тС є на 2.85 MtCO<sub>2</sub>/рік більшим, ніж при калібруванні моделі за даними таблиць CRF, різниця зменшується до 0.98 та 0.88 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 30 та 40 \$/тС, відповідно. При ціні вуглецю 30-200 \$/тС потенціал при калібруванні моделі за даними таблиць CRF перевищує пом'якшення ліквідації з калібруванням за даними ФАО приблизно на 1.24-15.7 MtCO<sub>2</sub>/рік з максимальною різницею при ціні 200 \$/тС (див. рис. 4.23).

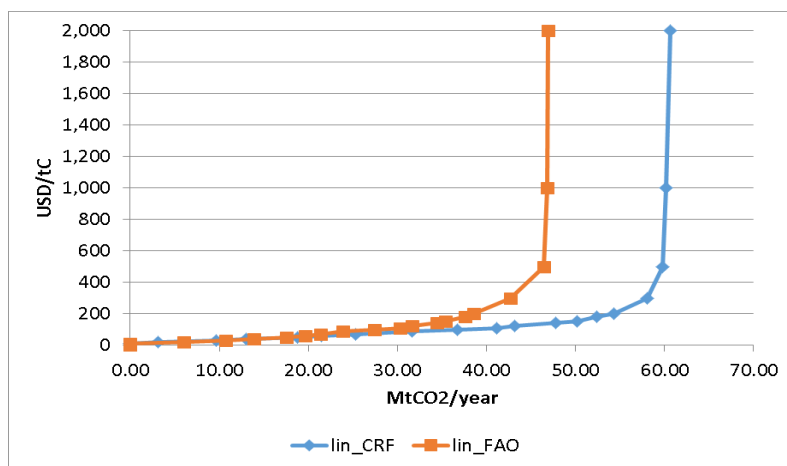


Рис. 4.23. Криві граничних витрат на зменшення сумарних емісій CO<sub>2</sub> від заготівлі деревини при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Канади

При ціні вуглецю нижче 50 \$/тС різниця у загальному сумарних потенціалах зменшення емісій, отриманих при двох варіантах калібрування моделі, визначається різницею потенціалів внаслідок покращення управління лісовим господарством. Сумарний потенціал є більшим, коли ціни на вуглець перевищують 40 \$/тС та нижче 150 \$/тС в тому випадку, якщо G4M відкалібровано за даними таблиць CRF. Потенціал при калібруванні моделі за даними ФАО становитиме на 0.41-1.19 MtCO<sub>2</sub>/рік більше, ніж при калібруванні за даними таблиць CRF при ціні вуглецю на рівні 10-40 \$/тС та на 7.99-198.29 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю більшій 140 \$/тС. При ціні вуглецю 50-140 \$/тС сумарний потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> при калібруванні моделі за даними з таблиць CRF перевищує сумарний потенціал при калібруванні моделі за даними ФАО на 1.16-35.87 MtCO<sub>2</sub> / рік (див. рис. 4.24).



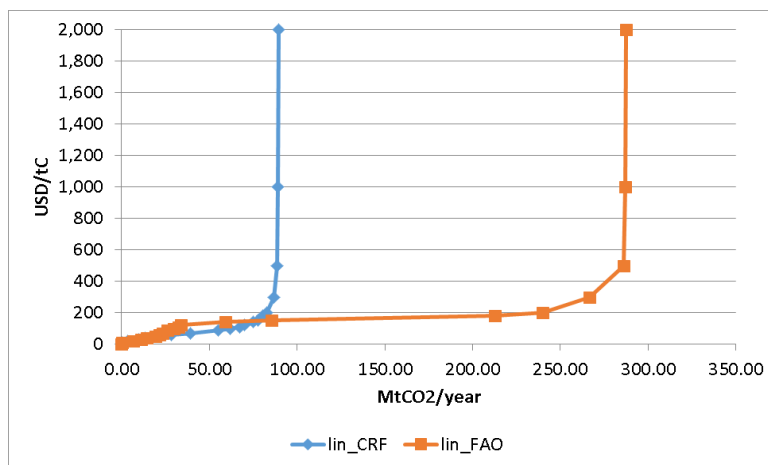


Рис. 4.24. Криві граничних витрат на зменшення сумарних емісій CO<sub>2</sub> (від заліснення, знеліснення та заготівлі деревини) при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Канади

### Японія

Потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub>, пов'язаний із залісненням, у 2030 році є дуже низьким, якщо модель квідкалібровано за даними таблиць CRF. При калібруванні моделі за даними на основі звіту ФАО потенціал зменшення емісій збільшується з 0 MtCO<sub>2</sub>/рік при 20 \$/tC до 0.45 MtCO<sub>2</sub>/рік при 2000 \$/tC. При калібруванні моделі на основі даних таблиць CRF потенціал зменшення емісій від заліснення у 2030 році близький до потенціалу при калібруванні моделі на основі даних ФАО [106] при ціні вуглецю нижче 50 \$/tC. При ціні вуглецю 50 \$/tC, потенціал зменшення емісій з калібруванням моделі за даними на основі таблиць CRF в 2 рази нижчий, ніж при калібруванні за даними на основі звіту ФАО, і різниця зростає дуже швидко до приблизно 6-10 разів при ціні вуглецю більш ніж 90 \$/tC. (Див. рис. 4.25). Різниця в потенціалах зменшення емісій пов'язана з відмінностями в калібруванні моделі.

У Японії потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> внаслідок покращення управління лісовим господарством є значно більшим, ніж потенціали зменшення емісій від заліснення та знеліснення, тому він визначає сумарний потенціал зменшення емісій. Різниця в потенціалах зменшення емісій внаслідок поліпшення управління лісами при двох калібруваннях моделей порівняно невелика порівняно з величиною потенціалу (різниця менше 10%) (див. рис. 4.26), але ця різниця є співмірною з різницею потенціалів зменшення емісій від

ззеліщення. Потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> внаслідок покращення управління лісовим господарством у 2030 році починається з 1.19 при 10 \$/тС і збільшується до 32.64 при 140 \$/тС та більш високих цінах на вуглець.

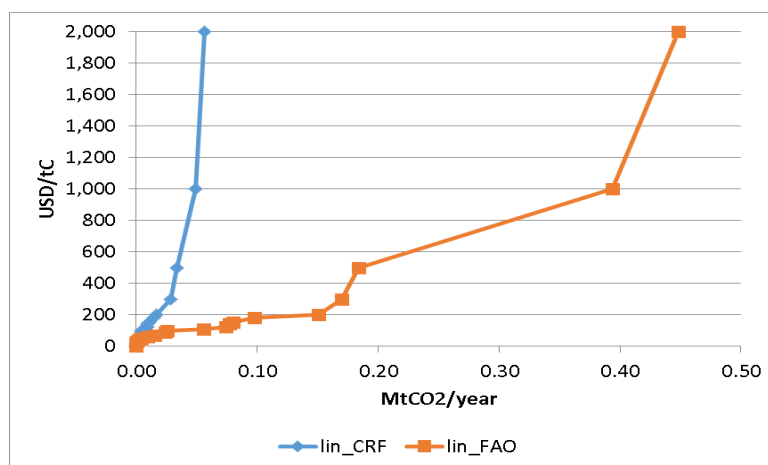


Рис. 4.21. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Японії

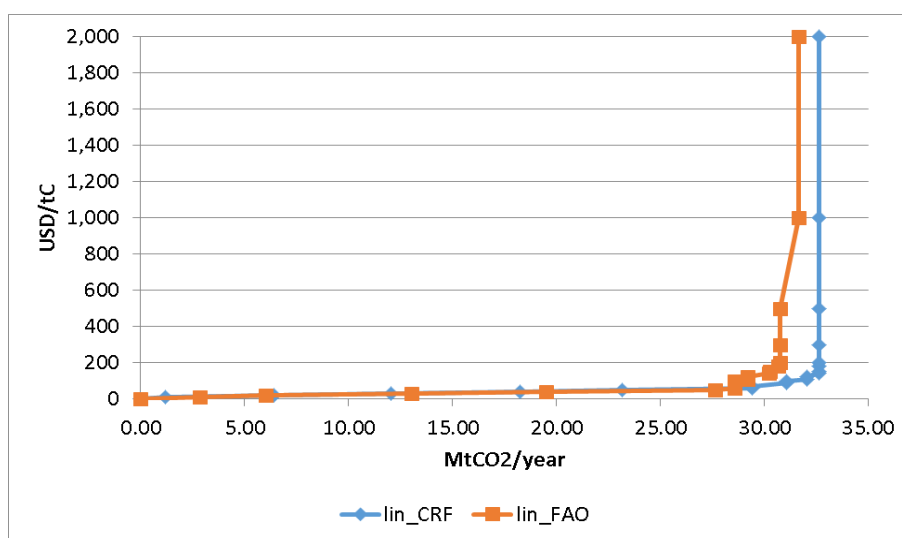


Рис. 4.26. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Японії

У випадку, коли G4M відкалібровано за даними на основі таблиць CRF, потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від ззеліщення у 2030 році є більшим порівняно з калібруванням за даними на основі звіту ФАО [106] у всьому діапазоні цін на вуглець. Потенціал при калібруванні моделі за даними таблиць CRF збільшується з 0.42 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 20 \$/тС до 5.48 MtCO<sub>2</sub>/рік

при ціні вуглецю 2000 \$/тС. Потенціал зменшення емісій при калібруванні моделі за даними на основі звіту ФАО є приблизно на 21% нижчим при ціні вуглецю 20 \$/тС і на 26% нижчим при більш високих цінах вуглецю, у порівнянні з потенціалом при калібруванні моделі за даними на основі таблиць CRF (див. рис. 4.27).

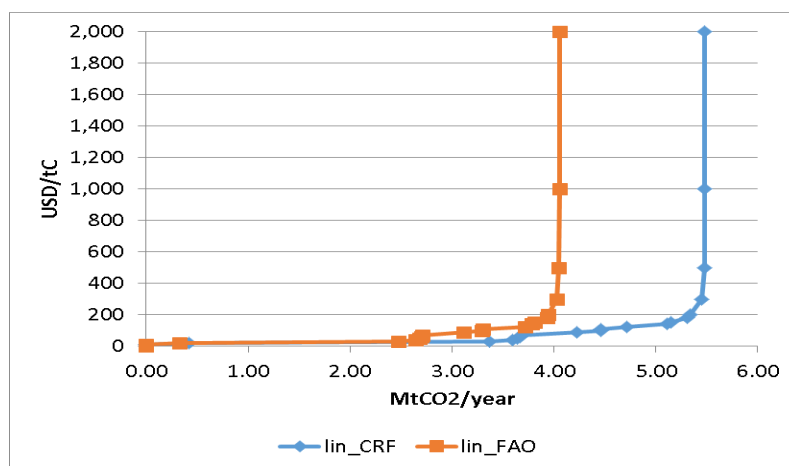


Рис. 4.27. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Японії

Різниця у сумарних потенціалах зменшення емісій CO<sub>2</sub> при двох калібруваннях моделі визначається, головним чином, відмінностями в потенціалах зменшення емісій внаслідок поліпшення управління лісокористуванням та знелісненні. У випадку, якщо G4M відкалібровано за даними на основі таблиць CRF, сумарний потенціал є більшим, ніж потенціал при калібруванні моделі за даними на основі звіту ФАО, при ціні вуглецю 20 \$/тС, а при ціні на вуглець понад 50 \$/тС перевищення становить 0.52-3.98 МтCO<sub>2</sub>/рік (5-11%) з максимумом при ціні вуглецю 110 \$/тС. При ціні вуглецю 30-50 \$/тС потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> при калібруванні моделі за даними на основі звіту ФАО є на 0.09-3.48 МтCO<sub>2</sub>/рік (1-13%) більшим, ніж при калібруванні моделі за даними таблиць CRF. Різниця у сумарних потенціалах має такий самий порядок, як і величина потенціалу (див. рис. 4.28).

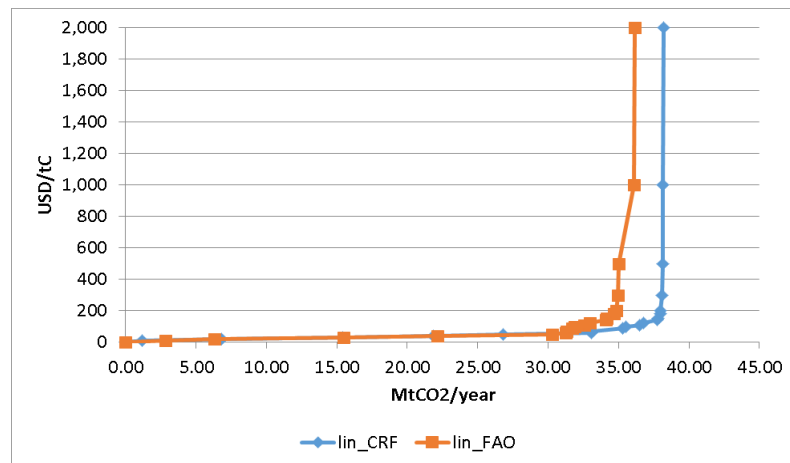


Рис. 4.28. Криві граничних витрат на зменшення сумарних емісій CO<sub>2</sub> при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Японії

### Туреччина

Потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub>, пов'язаний із залісненням, у 2030 році є близький до нуля у випадку, коли G4M відкалібровано за даними на основі таблиць CRF, тоді як при калібруванні моделі за даними на основі звіту ФАО [106] він становить близько 0.09 MtCO<sub>2</sub>/рік при всіх розглянутих цінах вуглецю (див. рис. 4.29).

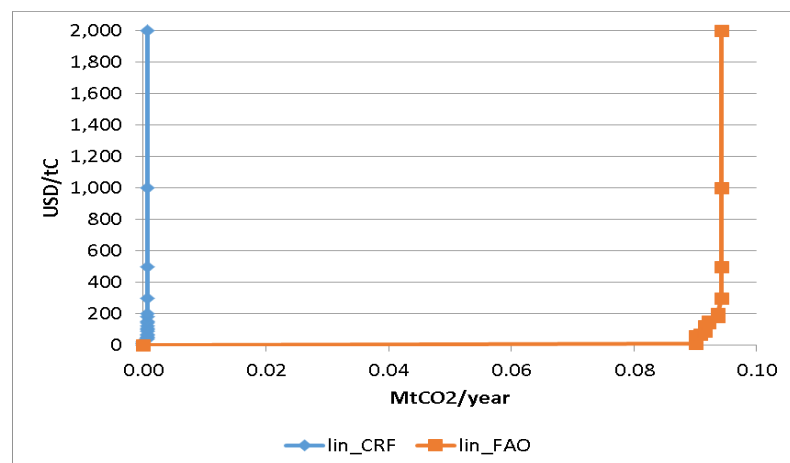


Рис. 4.29. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Туреччини

Потенціал зменшення емісій від знеліснення у 2030 році дуже малий (близько 0.01 MtCO<sub>2</sub>/рік) при всіх цінах вуглецю, якщо G4M відкалібровано за даними на основі таблиць CRF. Потенціал при калібруванні моделі за даними на

основі звіту ФАО збільшується з 0.02 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 10 \$/тС до 5.34 MtCO<sub>2</sub> /рік при ціні вуглецю 180 \$/тС (див. рис. 4.30).

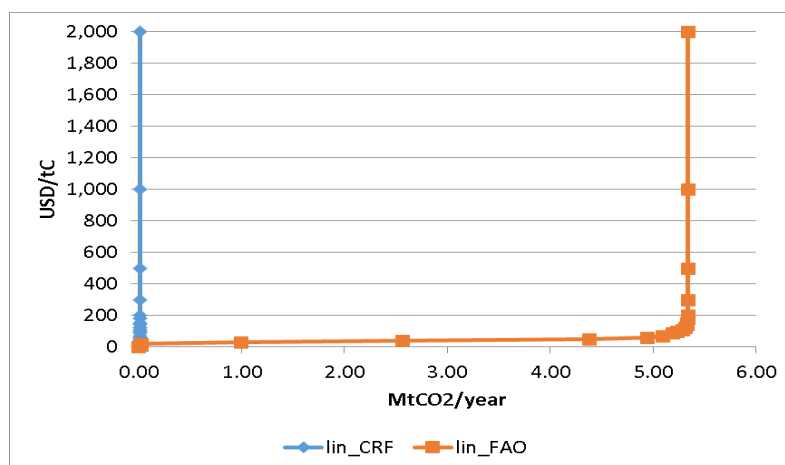


Рис. 4.30. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Туреччини

У Туреччині потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub>, зумовлений поліпшенням лісокористування, домінує у випадку, якщо модель відкалібрована згідно з даними таблиць CRF, і визначає сумарний потенціал. Різниця в потенціалах при двох калібруваннях моделей порівняно невелика порівняно з самим потенціалом (різниця становить менше 10% при ціні вуглецю більш ніж 20 \$/тС) (див. рис. 4.31). Потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> внаслідок поліпшення лісокористування у 2030 році з калібруванням моделі за даними на основі таблиць CRF починається з 0.67 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 10 \$/тС і збільшується до 3.69 при ціні вуглецю 300 \$/тС та вищих цінах вуглецю, тоді як з калібруванням моделі за даними на основі звіту ФАО потенціал змінюється від 0.99 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 20 \$/тС та збільшується до 3.62 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 150 \$/тС та вище.

Сумарний потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> при калібруванні моделі за даними на основі таблиць CRF, в основному, визначається потенціалом покращення лісокористування, тоді як у разі проведення калібрування за даними на основі звіту ФАО сумарний потенціал визначається, головним чином, потенціалами покращення лісокористування та зменшення емісій від знеліснення, які є приблизно однаковими. Внаслідок цього сумарний потенціал

при калібруваннях моделі за даними на основі звіту ФАО є більш ніж у два рази вищим, ніж при калібруванні моделі за даними таблиць CRF при ціні вуглецю більшою ніж 40 \$/тС. Проте, при ціні вуглецю нижче 30 \$/тС, сумарний потенціал при калібруванні моделі за даними на основі таблиць CRF перевищує потенціал на основі даних звіту ФАО. Сумарний потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> при низьких цінах вуглецю визначається потенціалом зменшення емісій внаслідок поліпшення лісокористування (див. рис. 4.32).

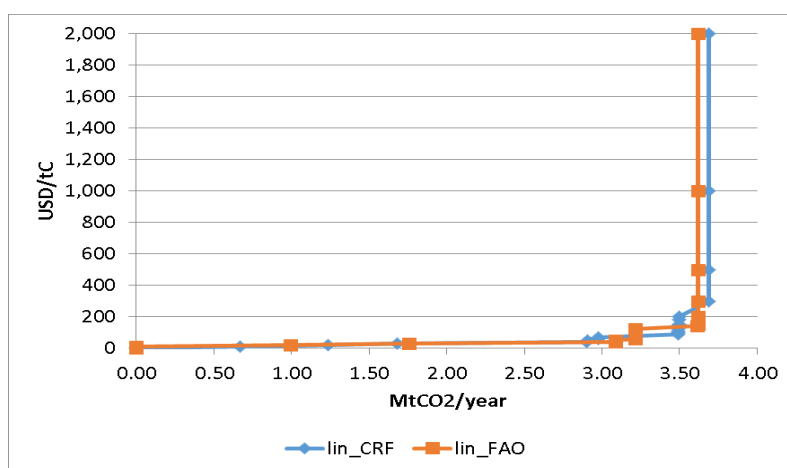


Рис. 4.31. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Туреччини

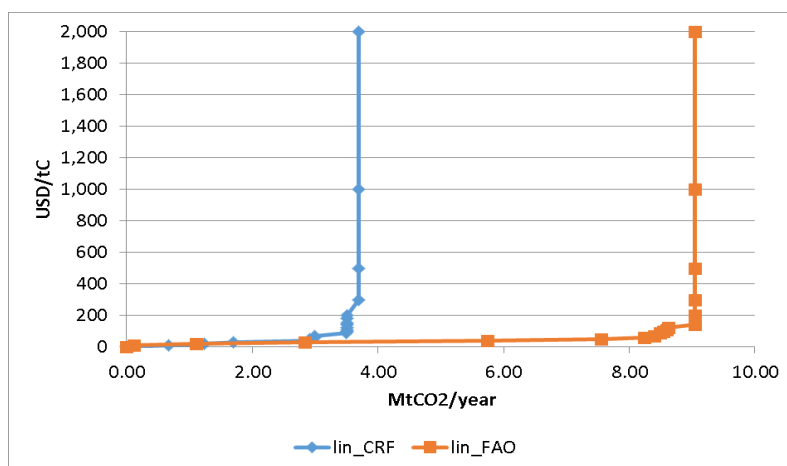


Рис. 4.32. Криві граничних витрат на зменшення сумарних емісій CO<sub>2</sub> при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для Туреччини

## США

Потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення у 2030 році близький до нуля при ціні вуглецю нижче 90 \$/tC у випадку, коли G4M відкалібровано за даними таблиць CRF. Різниця в потенціалах для обох калібрувань моделі, на основі таблиць CRF та звіту ФАО, складає близько 0.11-0.22 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 90 \$/tC і вище (див. рис. 4.33).

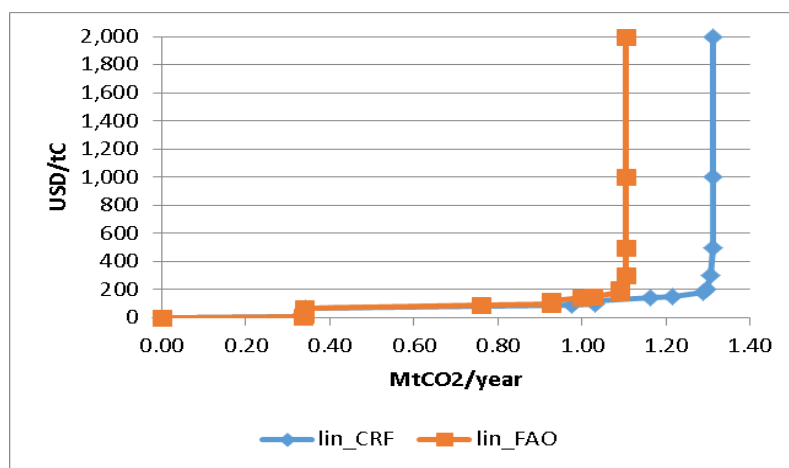


Рис. 4.33. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для США

У випадку, якщо модель відкалібровано за даними на основі таблиць CRF, потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення у 2030 році є більшим, ніж при калібруванні моделі за даними на основі звіту ФАО у всьому діапазоні розглянутих цін вуглецю, за винятком цін 10, 40 та 50 \$/tC. При калібруванні моделі за даними звіту ФАО потенціал при цінах вуглецю 10, 40 та 50 \$/tC є на 0.14-0.37 MtCO<sub>2</sub>/рік більшим, ніж при калібруванні моделі за даними таблиць CRF. Подібна "аномалія" спостерігається для різної динаміки ціни вуглецю і пов'язана з часовими та просторовими ефектами, описаними в розділі 5.2. При цінах вуглецю 20, 30 та 60-2000 \$/tC потенціал при калібруванні моделі за даними на основі таблиць CRF перевищує потенціал на основі калібрування за даними звіту ФАО приблизно на 0.01-26.88 MtCO<sub>2</sub>/рік, різниця поступово зростає з підвищенням ціни вуглецю і стабілізується при 26.88 MtCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 300 \$/tC і більше (див. рис. 4.34). Потенціал зменшення емісій від знеліснення при калібруванні моделі за даними на основі таблиць CRF є більшим

завдяки більшій швидкості знеліснення (використовується біля 74% різниці у емісіях CO<sub>2</sub> при нульовій ціні вуглецю).

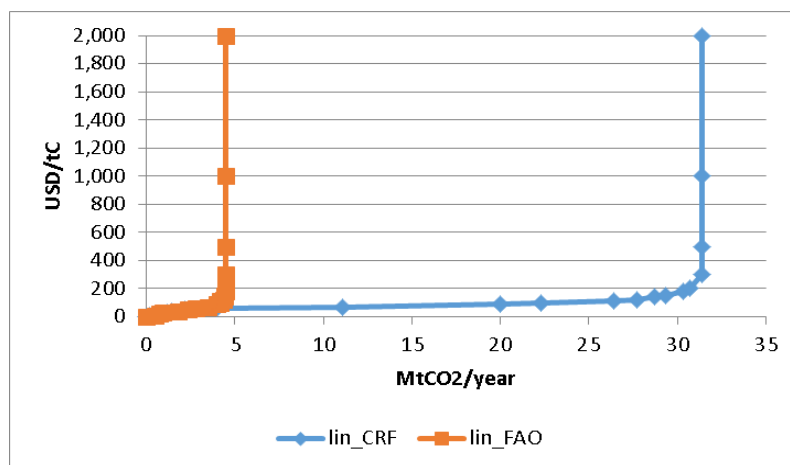


Рис. 4.34. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для США

У США потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> внаслідок поліпшення лісокористування (див. рис. 4.35) визначає сумарний потенціал. Різниця в потенціалах зменшення емісій CO<sub>2</sub> внаслідок поліпшення лісокористування при двох калібруваннях моделі невелика, порівняно з самим потенціалом (див. рис. 4.35), однак величина цієї різниці співмірна з різницею у потенціалах зменшення емісій від знеліснення. Потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> внаслідок поліпшення лісокористування у 2030 році є більшим при всіх цінах вуглецю, за винятком цін 10 та 20 \$/тС в тому випадку, якщо модель відкалібровано за даними на основі таблиць CRF, порівняно з калібруванням моделі за даними на основі звіту ФАО.

Потенціал є рівним нулю при ціні вуглецю 10 \$/тС при обох калібруваннях моделі. При ціні 20 \$/тС потенціал при калібруванні моделі за даними на основі звіту ФАО на 0.95 MtCO<sub>2</sub>/рік більший, ніж при калібруванні моделі за даними на основі таблиць CRF. Ця "аномалія" пов'язана з взаємозалежністю процесів знеліснення, заліснення та лісозаготівлі, а також часовими та просторовими ефектами, описаними в розділі 5.2. При ціні вуглецю 30-200 \$/тС потенціал при калібруванні моделі за даними на основі таблиць CRF перевищує потенціал при калібруванні моделі за даними на основі звіту ФАО на 1.68-12.72 MtCO<sub>2</sub>/рік з максимальним значенням при ціні 90 \$/тС (див. рис. 4.35).



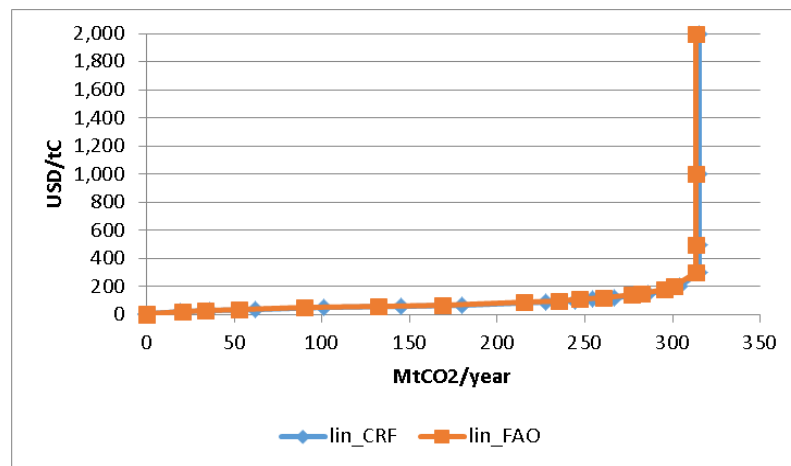


Рис. 4.34. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для США

Сумарний потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> визначається потенціалами зменшення емісій від заліснення та знеліснення лише при ціні 10 \$/тС, а при вищих цінах вуглецю домінує потенціал від покращення лісокористування. Проте різниця в сумарних потенціалах при обох калібруваннях моделі визначається одночасно як потенціалом зменшення емісій від знеліснення так і покращення лісокористування при цінах вуглецю більше 10 \$/тС. У випадку, якщо G4M відкалібровано за даними на основі таблиць CRF, сумарний є більшим, ніж при калібруванні за даними на основі звіту ФАО при всіх цінах вуглецю, за винятком цін 10 та 20 \$/тС. Потенціал зменшення емісій при калібруванні моделі за даними звіту ФАО при цінах вуглецю 10 та 20 \$/тС на 0.29-0.94 MtCO<sub>2</sub>/рік більше, ніж при калібруванні моделі за даними таблиць CRF. При ціні вуглецю в межах від 30 до 70 \$/тС, різниця між потенціалами збільшується з 2.96 до 19.17 MtCO<sub>2</sub>/рік, а починаючи з ціни вуглецю 90 \$/тС, різниця між потенціалами змінюється в межах 27.53-30.19 MtCO<sub>2</sub>/рік (див. рис. 4.36).

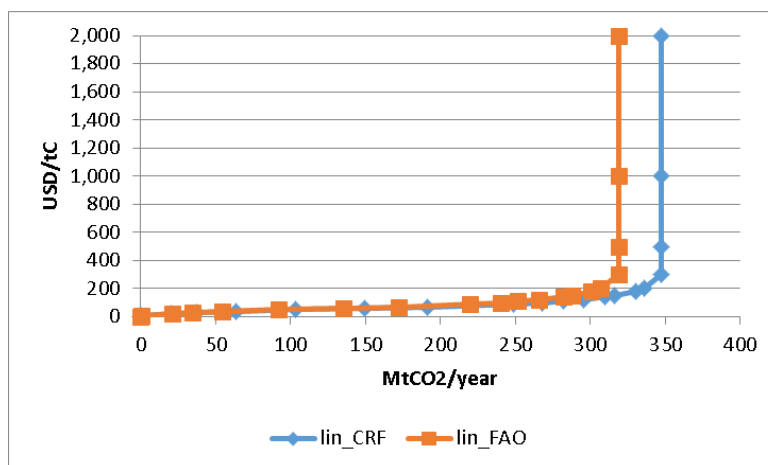


Рис. 4.36. Криві граничних витрат на зменшення сумарних емісій CO<sub>2</sub> при калібруванні моделі за даними зі звіту до РКЗК ООН (позначено lin\_CRF) та звіту ФАО про лісові ресурси [106] (позначено lin\_FAO) для США

#### 4.4.2. Вплив чутливості моделі до невизначеності параметрів на криві граничних витрат

Також проведено дослідження чутливості кривих граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення, знеліснення та лісового господарства до зміни важливих соціально-економічних факторів – коефіцієнта корупції, ціни на деревину та ціни на сільськогосподарську землю [122]. Для цього модель розв'язували для різних сценаріїв лінійної зміни ціни на вуглець (від 0 у 2015 році до 0 – 717 \$/tC у 2030 році). Для кожного сценарію зміни ціни вуглецю змінювали кожен з параметрів на +/- 1, 2.5, 5, 10, 50 та 90% відносно середнього значення. Отримали 12 кривих граничних витрат для кожного параметра (позначення: crpV, crmV, wrpV, wmvV, lrpV та lmvV; cr – коефіцієнт корупції, w – ціна деревини, l – ціна сільськогосподарської землі, p – збільшення параметра, m – зменшення параметра, V – зміна параметра на 1, 2.5, 5, 10, 50 або 90%; рис. 4.37 – рис. 4.39)

При зміні параметрів на 10% глобальна крива граничних витрат є найбільш чутливою, коли ціна вуглецю становить 18 \$/tC. При такій ціні вуглецю зменшення коефіцієнта корупції має найбільший вплив на МАСС – потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> знижується на 230 MtCO<sub>2</sub>/рік (рис. 4.39). Збільшення коефіцієнта корупції має дещо менший ефект на МАСС – потенціал зменшення

емісій CO<sub>2</sub> зростає на 229 МтCO<sub>2</sub>/рік. Зміна ціни на сільськогосподарські землі теж суттєво впливає на МАСС – зменшення ціни на землю приводить до збільшення потенціалу зменшення емісій CO<sub>2</sub> на 172 МтCO<sub>2</sub>/рік (рис. 4.37), а збільшення ціни на землю приводить до зниження потенціалу зменшення емісій CO<sub>2</sub> на 122 МтCO<sub>2</sub>/рік.

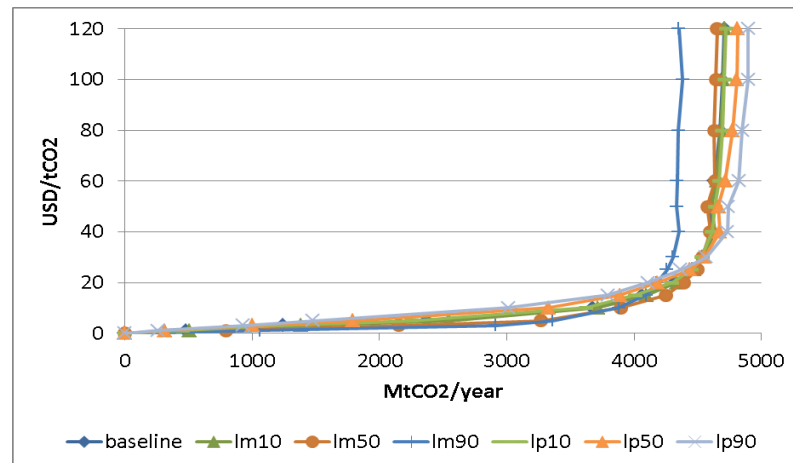


Рис. 4.37. Глобальний потенціал зменшення сумарних емісій CO<sub>2</sub> для різної ціни на вуглець та відхилень ціни на сільськогосподарські землі на +/- 10, 50 та 90% (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р.

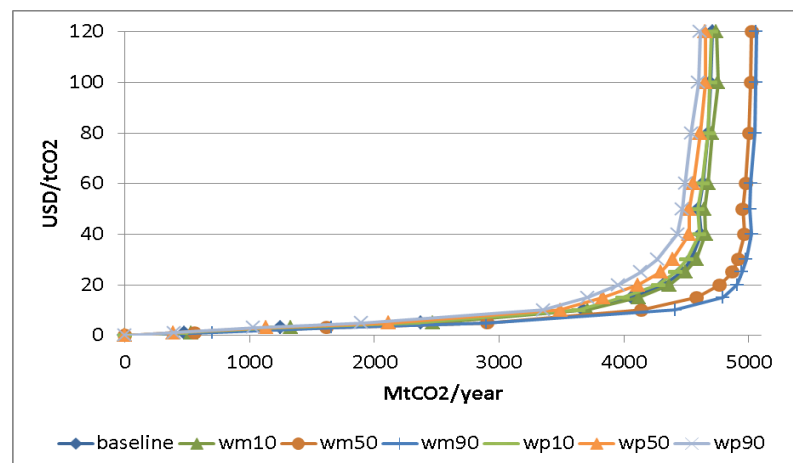


Рис. 4.38. Глобальний потенціал зменшення сумарних емісій CO<sub>2</sub> для різної ціни на вуглець та відхилень ціни на деревину на +/- 10, 50 та 90% (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р.

Зміна коефіцієнта корупції має найбільший вплив на глобальну МАСС у порівнянні з іншими параметрами при цінах вуглецю нижче 180 \$/tC і при ціні 478 \$/tC. Зміна ціни деревини має найбільший вплив на МАСС у порівнянні з

іншими параметрами при ціні вуглецю 239–358 і 597–717 \$/tC. Ціна на деревину досягає свого максимального впливу на МАСС при 90 \$/tC. (рис. 4.38)

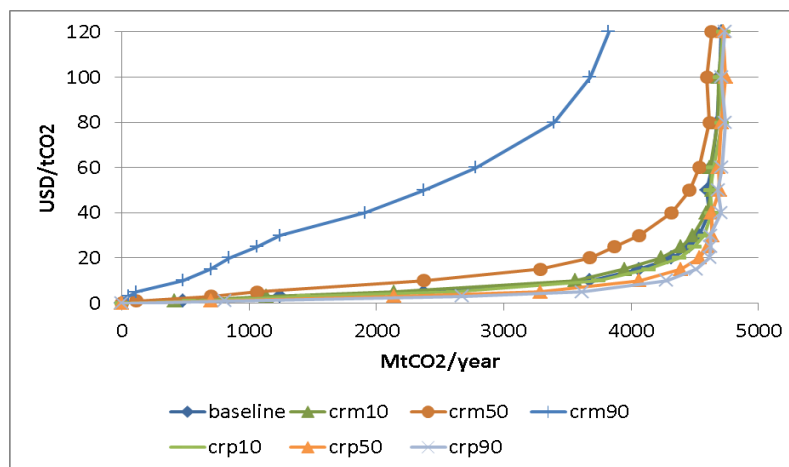


Рис. 39. Глобальний потенціал зменшення сумарних емісії CO<sub>2</sub> для різної ціни на вуглець та відхилень коефіцієнта корупції на +/- 10, 50 та 90% (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р.

При зміні параметрів на 50% глобальна МАСС є найбільш чутливою, коли ціна на вуглець становить 30 \$/tC. При такій ціні на вуглець зменшення коефіцієнта корупції викликає відхилення МАСС на –1310 МтСО<sub>2</sub>/рік (рис. 4.39), а при ціні 717 \$/tC – лише на –75 МтСО<sub>2</sub>/рік. Коефіцієнт корупції має найбільший вплив на МАСС у порівнянні з іншими параметрами при ціні на вуглець 6 і 30-179 \$/tC. Ціна деревини має суттєвий вплив на МАСС при всіх цінах вуглецю з максимальним значенням -582 МтСО<sub>2</sub>/рік при ціні на вуглець 30 \$/tC (рис. 4.38) і має найбільший ефект у порівнянні з іншими параметрами при ціні вуглецю 239-717 \$/tC. Зміна ціни на сільськогосподарські землі має максимальний вплив на МАСС (903 МтСО<sub>2</sub>/рік), а також у порівнянні з іншими параметрами, при ціні на вуглець 18 \$/tC (рис. 4.37).

При зміні параметрів на 90% МАСС є найбільш чутливою при ціні на вуглець 119 \$/tC. При такій ціні на вуглець зменшення коефіцієнта корупції викликає відхилення МАСС на -3477 МтСО<sub>2</sub>/рік (рис. 4.39). Вплив зміни коефіцієнта корупції зменшується повільно і має найбільший вплив на МАСС у порівнянні з іншими параметрами при ціні вуглецю 30-717 \$/tC. Зміна ціни сільськогосподарської землі має менший вплив на МАСС, ніж зміна коефіцієнта корупції, з максимумом при ціні вуглецю 30 U\$/tC (1699 МтСО<sub>2</sub>/рік) (рис. 4.37).

У порівнянні з іншими параметрами, вплив зміни ціни сільськогосподарської землі є найбільшим при ціні вуглецю 6 і 18 \$/tC. Зміна ціни деревини має максимальний вплив на МАСС (733 МтCO<sub>2</sub>/рік) при 60 \$/tC (рис. 4.38).

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

#### **4.5. Порівняння результатів моделювання лісозаготівлі з статистичними даними та емісії CO<sub>2</sub> від лісозаготівлі зі звітами країн**

Для більшості країн ЄС, де інформація про ліси є більш повною, модель досить точно відтворює кількість заготовленої деревини та емісії CO<sub>2</sub> від лісокористування (у порівнянні з даними, які країни звітують у РКЗК ООН). Це, зокрема, стосується більшості країн Європейського Союзу, наприклад, Естонія та Фінляндія, рис. 4.40, рис. 4.41). В середньому за 1999-2015рр. середньоквадратичне відхилення змодельованих значень заготівлі деревини склало 0.5% для ЄС; для більшості країн відхилення становить біля 1%, але для кількох країн більше 7% - для Бельгії, Кіпру, Ірландії, Люксембургу, Нідерландів та Словенії (таблиця 4.17).

У випадку Кіпру та Люксембургу низька просторова роздільна здатність моделі не дозволяє адекватно представити ці країни, що й пояснює велику похибку моделювання. У Бельгії існує невідповідність даних по заготівлі деревини, поданих у ФАО, та МСРФЕ, зокрема за даними ФАО заготівля деревини перевищує об'єм зваленої деревини (без врахування втрат при заготівлі) за МСРФЕ. Оскільки приріст лісу у G4M відкалібровано за даними МСРФЕ, тому не можливо адекватно представити заготівлю деревини. Для Ірландії відсутні дані про приріст та об'єм зваленої деревини у даних МСРФЕ,

тому на даний момент ми не маємо можливості знайти причину відмінності результатів моделювання від статистичних даних. У Нідерландах та Словенії значна частина деревини поступає від знеліснення, що спотворює оцінку кількості деревини, яка має бути заготовлена у лісах (у моделі не відомо наперед, скільки деревини буде отримано від знеліснення).

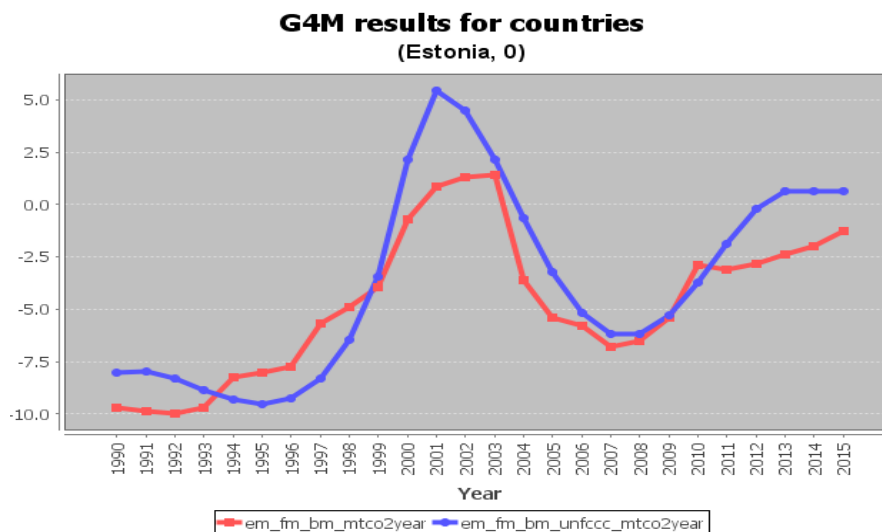


Рис. 4.40. Емісії CO<sub>2</sub> від лісового господарства (FL-FL) у Естонії у 1990-2015рр., подані країною до UNFCCC та змодельовані G4M

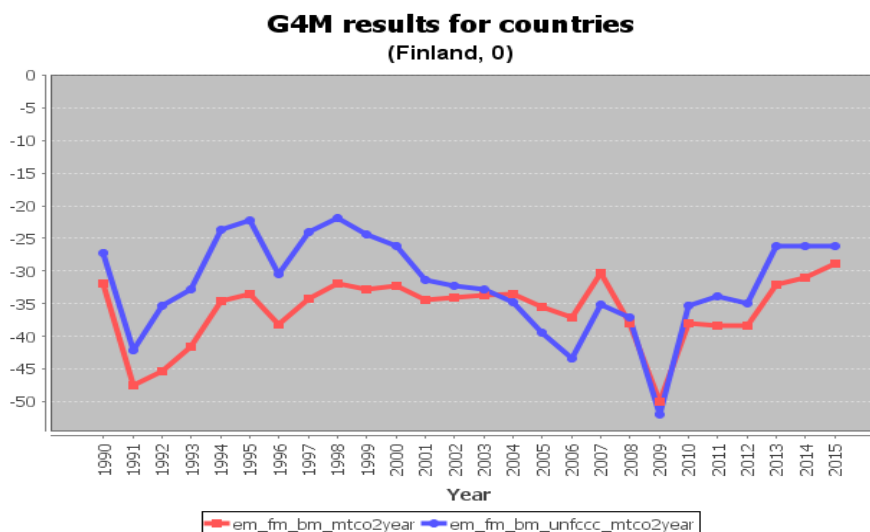


Рис. 4.41. Емісії CO<sub>2</sub> від лісового господарства (FL-FL) у Фінляндії у 1990-2015рр., подані країною до UNFCCC та змодельовані G4M

Досягнення визначених значень емісії CO<sub>2</sub> з біомаси лісів від лісокористування не є ціллю моделювання як у випадку кількості заготовленої

деревини, а похідною величиною. З іншого боку, значення емісій, які країни звітують у РКЗК ООН, не вимірюють, а обчислюють за даними обліку лісів. Тобто, можна вважати, що емісії, отримані за допомогою G4M, та зі звітів РКЗК ООН (таблиці CRF) є альтернативними оцінками. Вхідні дані, які використані для моделювання у G4M, та які використовують у країнах для обчислень емісій лише частково перекриваються. Країни щороку обчислюють ще раз всі емісії назад до 1990 року. Якщо порівняти значення, обчислені в різні роки, то виявимо, що для окремих країн ці значення можуть суттєво відрізнятись (наприклад, Литва) і, відповідно, характеризуються значною невизначеністю. За оцінками інституту Joint Research Center [24] похибка у звітах країн складає біля 35%. Вищенаведене слід брати до уваги, порівнюючи значення емісій, отримані за допомогою G4M, та зі звітів країн до РКЗК ООН.

В загальному для ЄС середньоквадратичне відхилення модельованих значень емісій CO<sub>2</sub> з біомаси від землекористування від значень РКЗК ООН становить 17% (таблиця 4.18). Для таких країн як Болгарія, Чехія, Фінляндія, Італія, Латвія, Румунія, Словачія середньоквадратичне відхилення складає до 30%, а для таких як Австрія, Хорватія, Естонія, Франція, Німеччина, Греція, Нідерланди, Португалія - до 60%. Ще для 7 країн – Бельгії, Угорщини, Литви, Люксембургу, Польщі, Швеції (рис. 4.42) та Великобританії відхилення не перевищує 82%. Для трьох країн – Данії, Кіпру та Ірландії середньоквадратичне відхилення є більшим 90%.

Причиною великої похибки моделювання емісій для Кіпру та Люксембургу є низька роздільна здатність моделі. Для Ірландії відсутні дані у звітах ФАО та МСРФЕ, що не дозволяє нам провести аналіз. У Данії вітровалами, пожежами та комахами було пошкоджено від 1 до 3.5% площі лісів у 2000-2010рр., що спричинило втрату біомаси лісів і, відповідно, емісії CO<sub>2</sub>. Оскільки у нашій моделі порушення безпосередньо не враховуються (порушення враховуються лише опосередковано через деревину, яка була заготовлена при санітарних рубках після порушень), тому існує невідповідність у результатах моделювання. У випадку Бельгії велике значення середньоквадратичного відхилення пояснюється, як і у випадку заготівлі деревини, неузгодженістю даних заготівлі деревини ФАО з даними про приріст лісу. У Литві, Польщі, Швеції та Угорщині значними є

порушення у лісах. Хоча модель адекватно відтворює заготівлю деревини в цих країнах (наприклад, Швеція, рис. 4.43).

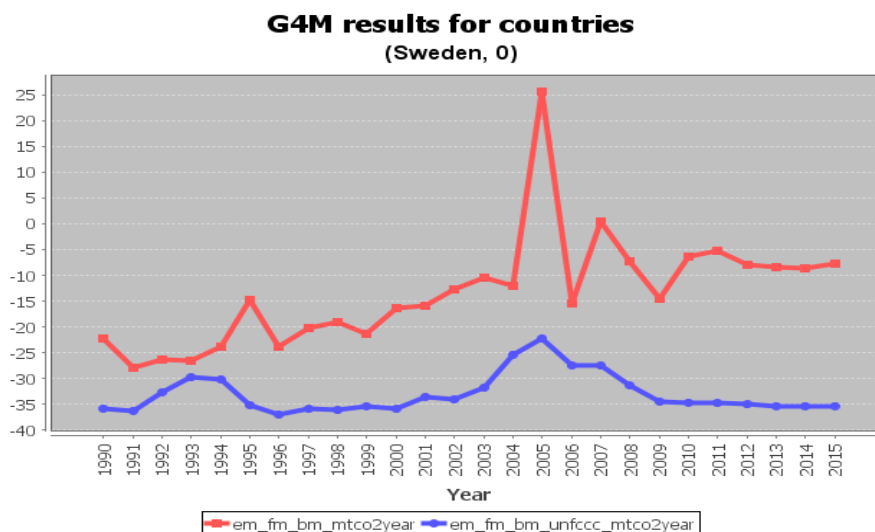


Рис. 4.42. Емісії CO<sub>2</sub> від лісового господарства (FL-FL) у Швеції у 1990-2015рр., подані країною до UNFCCC та змодельовані G4M

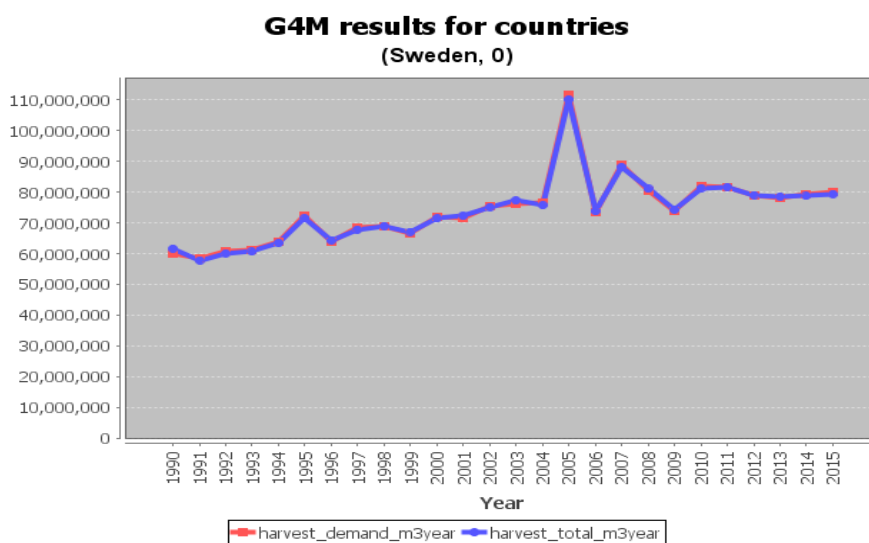


Рис. 4.43. Заготівля деревини у Швеції за даними FAOSTAT (вхідний параметр моделі) та змодельована G4M

Groen та ін. (2013) [111] також проводили аналіз відмінностей між результатами G4M, EFISCEN та оцінками країн надісланих до РКЗК ООН. Автори не знайшли єдиний вхідний параметр, який би дозволив пояснити причину відмінностей у результатах моделювання та національних даних країн. Найбільший вплив має метод, який експерти в країнах використовують для обчислення емісій CO<sub>2</sub> від лісового господарства, що може відрізнитись від того, який використано у моделі. Інші впливові причини – це дані про заготівлю



деревини, втрати при лісозаготівлі, методи, які використовують у країнах, для корекції відсутніх даних у інвентаризації лісів, а також те, що модель не враховує великомасштабні природні порушення лісів (вітровали, пожежі, хвороби).

Таблиця 4.17. Порівняння результатів моделювання заготівлі деревини у країнах ЄС із статистичними даними за 1999-2015рр.

Країна	Статистичні дані, середнє за 1990-2015рр., 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup> /рік	Результати моделювання, середнє за 1990-2015рр., 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup> /рік	RMSE, 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup> /рік	CV, %	N
Австрія	18,492	18,457	195	1.1	25
Бельгія	5,353	5,076	469	8.8	25
Болгарія	5,374	5,377	41	0.8	25
Хорватія	4,322	4,305	86	2.0	25
Кіпр	30	31	5	16.1	25
Чехія	16,217	16,242	92	0.6	25
Данія	2,614	2,600	34	1.3	25
Естонія	6,814	6,841	61	0.9	25
Фінляндія	57,009	57,129	508	0.9	25
Франція	56,820	57,047	500	0.9	25
Німеччина	66,088	65,959	513	0.8	25
Греція	2,074	2,072	15	0.7	25
Угорщина	6,124	6,127	57	0.9	25
Ірландія	2,727	2,403	449	16.4	25
Італія	9,743	9,738	117	1.2	25
Латвія	11,649	11,704	124	1.1	25
Литва	6,377	6,384	55	0.9	25
Люксембург	303	266	103	34.0	25
Мальта	0	0	0	0	25
Нідерланди	1,204	1,229	96	7.9	25
Польща	32,175	32,194	259	0.8	25
Португалія	11,398	11,213	483	4.2	25
Румунія	15,739	15,859	261	1.7	25
Словакія	7,859	7,857	112	1.4	25
Словенія	2,852	2,876	250	8.8	25
Іспанія	17,416	17,430	233	1.3	25
Швеція	74,068	74,016	640	0.9	25
Великобританія	9,453	9,475	61	0.6	25
<b>Загальне</b>	<b>450,294</b>	<b>449,909</b>	<b>2,066</b>	<b>0.5</b>	<b>25</b>

Таблиця 4.18. Порівняння результатів моделювання емісій CO<sub>2</sub> з біомаси лісів при лісокористуванні у країнах ЄС із даними ЗКРК ООН за 1999-2015рр.

Країна	Дані РКЗК ООН, середнє за 1990-2015рр., МтCO <sub>2</sub> /рік	Результати моделювання, середнє за 1990-2015рр., МтCO <sub>2</sub> /рік	RMSE, 10 <sup>3</sup> МтCO <sub>2</sub> /рік	CV, %	N
Австрія	-9.30	-5.51	4.94	53.1	22
Бельгія	-1.97	-0.44	1.62	82.2	22
Болгарія	-11.66	-9.93	2.05	17.6	22
Хорватія	-7.30	-5.29	2.32	31.7	22
Кіпр	-0.64	-0.05	0.59	92.4	22
Чехія	-7.54	-6.44	2.15	28.6	22
Данія	-0.46	-3.47	3.91	852.9	22
Естонія	-4.25	-5.16	2.03	47.7	22
Фінляндія	-32.71	-37.02	6.77	20.7	22
Франція	-47.74	-30.55	22.44	47.0	22
Німеччина	-42.81	-45.28	14.04	32.8	22
Греція	-1.73	-1.32	0.77	44.9	22
Угорщина	-2.38	-3.36	1.91	80.6	22
Ірландія	-1.83	-3.53	2.06	112.9	22
Італія	-24.90	-27.48	4.46	17.9	22
Латвія	-12.59	-12.59	2.23	17.7	22
Литва	-5.68	-5.43	3.86	67.9	22
Люксембург	-0.37	-0.55	0.30	82.4	22
Мальта	0.00	0.00	0.00	0.0	22
Нідерланди	-1.77	-2.33	0.78	44.3	22
Польща	-32.36	-28.39	19.80	61.2	22
Португалія	-6.78	-8.56	2.78	41.0	22
Румунія	-23.95	-19.57	4.75	19.8	22
Словакія	-6.11	-6.98	1.38	22.6	22
Словенія	-6.47	-7.51	2.65	41.0	22
Іспанія	-24.43	-14.89	9.42	38.6	22
Швеція	-32.68	-14.26	20.95	64.1	22
Великобританія	-7.96	-13.64	5.96	74.8	22
<b>Загальне</b>	<b>-358.34</b>	<b>-319.53</b>	<b>59.90</b>	<b>16.7</b>	<b>22</b>

#### 4.6. Порівняння результатів моделювання з результатами інших моделей

Крім порівнянь з історичними даними, також проводили порівняння з відповідними результатами інших моделей. Детальне порівняння для країн ЄС проводили з моделлю лісу EFISCEN [24], для Бразилії з результатами спеціальної версії GLOBIOM для цієї країни [47] (рис.12) та на глобальному рівні у складі комплексу інтегральної оцінки Міжнародного інституту прикладного системного аналізу з моделями IAM, GCAM, IMAGE та REMIND/MAGPIE [236].

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

Тум (2010) [308] порівнював значення приросту, отриманого з допомогою симулятора лісу G4M, з детальними просторовими даними з двох тестових ділянок, однієї у Німеччині та однієї у Австрії. Для першої ділянки (Harz) досліджено 57,800 пікселів розміром 100x100м, з яких 40,000 з хвойними породами і 17,800 з широколистяними породами. Показано, що симулятор лісу G4M досить добре відтворює приріст деревини для хвойних лісів (коефіцієнт детермінації 0.75), та дещо гірше для широколистяних лісів, що автор пояснює більшою кількістю широколистяних порід з різними швидкостями росту. Для другої ділянки (Wienerwald) дослідили 313 пікселів, для яких не можливо було розділити хвойні та широколистяні породи. В результаті симулятор лісу недооцінив приріст деревини на 57%, а коефіцієнт детермінації склав 0.43. В обох випадках модель добре відтворювала геопросторову структуру приросту деревини.

Щодо порівняння прогнозів G4M з іншими оцінками для України Nijnik and Vizikova (2008) [221] повідомляють про 2.3 Мга маргінальних земель, які можуть бути заліснені в Україні. G4M прогнозує збільшення лісових земель на 2.1 Мга, якщо не враховувати ефект торгівлі сільськогосподарськими товарами та деревиною (без об'єднання з GLOBIOM) і 2.6 Мга, якщо ефекти торгівлі враховують, при нульовій вартості вуглецю. У Державній програмі "Ліси України" на 2002-2015 роки було заплановано збільшити площу лісу на 0.3 Мга до 2015 р., тоді як G4M прогнозувала збільшення площі на 0.2 Мга, якщо торгівлю не враховано і 0.5 Мга, якщо торгівлю враховано, при нульовій ціні вуглецю [131].

#### **4.6.1. Порівняння прогнозування емісій CO<sub>2</sub> від землекористування моделями G4M та EFISCEN для ЄС**

На рис. 4.44 наведено порівняння емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування для ЄС-27, отримані зі звітів країн до РКЗК ООН, надісланих у 2010р. для 1990-2009рр. та за допомогою моделей G4M та EFISCEN для двох сценаріїв, базового та

референтного, до 2030р [21, 24]. Обидві моделі вказують на істотне зниження рівня поглинань CO<sub>2</sub> лісами ЄС-27 у 2030 р. Порівняно з 2010 р. зменшення поглинання становитиме близько 20-50%. Модель G4M надає дані за періоди часу 2000-2009 років, для яких також існують дані зі звітів країн. Модель EFISCEN прогнозує емісії CO<sub>2</sub> починаючи з 2010р., оскільки в цій моделі використовують дані останніх національних інвентаризацій лісових ресурсів. Середній за 2000-2009рр. стік CO<sub>2</sub>, оцінений моделлю G4M, становить близько 80% від значень, наданих країнами до РКЗК ООН. За даними країн протягом 1990-2009рр. не спостерігається суттєва зміна емісій, тоді як моделі вказують на швидке зниження поглинання CO<sub>2</sub> лісами. Результати моделювання за допомогою G4M та EFISCEN та звітні дані мають дуже різне походження, що потрібно враховувати при порівнянні. Методи різних країн щодо оцінки емісій значно відрізняються. Деякі країни застосовують складні інструменти і можуть будувати свої оцінки на детальних емпіричних базах даних, інші країни не мають конкретних даних і отримують оцінки більш опосередковано. Тому очевидно, що такий метод (як застосовано в цьому дослідженні за допомогою двох гармонізованих моделей лісового господарства) не може відтворити результати різних підходів окремих країн.

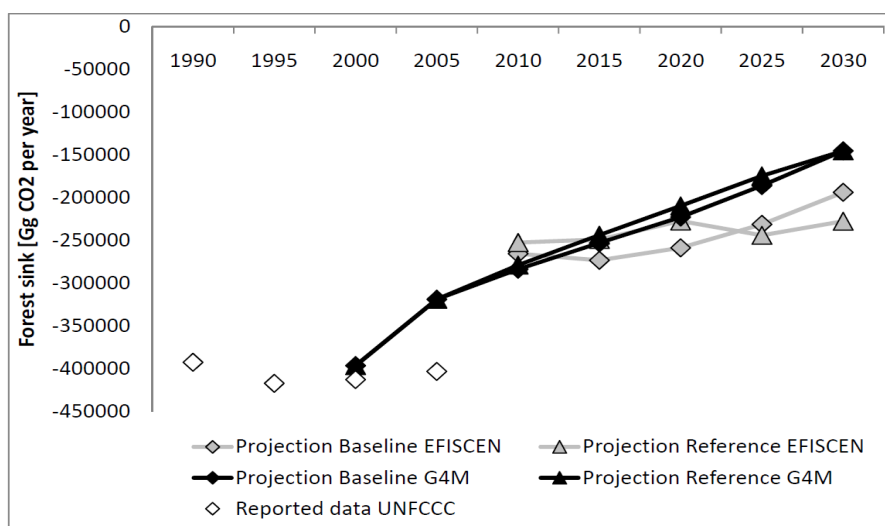


Рис. 4.44. Порівняння результатів моделювання емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування (біомаса лісів) для ЄС-27, отриманих за допомогою моделей G4M та EFISCEN та звітів країн ЄС до РКЗК ООН надіслані у 2010 р. (результати для Кіпру, Мальти та Греції не враховано) [21, стор. 40].

Різниця між результатами двох моделей, незважаючи на відмінності в підходах до моделювання та вхідних даних, не суттєва, з огляду на мінливість даних, які подають країни до РКЗК ООН. Схожість моделей особливо спостерігається у тенденції майбутніх емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування. Незважаючи на однаковий тренд, прогнози до 2030 року відрізняються приблизно на 40 ГгCO<sub>2</sub> (менше 1%). Є різні причини відмінностей між моделями. Наприклад, оборот рубки в EFISCEN ґрунтується на національних рекомендаціях, тоді як в G4M оборот рубки визначається у моделі в залежності від породи дерев, продуктивності лісу та попиту на деревину. Також відрізняється між моделями частка деревини, отримана від рубок догляду та рубок головного користування. Інша відмінність пов'язана з вхідними даними, що використовуються моделями. Наприклад, EFISCEN використовує значення приросту лісу, отримані з даних національних інвентаризацій лісових ресурсів, а G4M використовує карту приростів відкалібровану за даними MCPFE, яка отримана на основі геопросторових даних чистої первинної продукції.

#### **4.6.2. Порівняння прогнозування швидкості знеліснення моделями G4M та спеціальної версії GLOBIOM для Бразилії**

Порівняння швидкості знеліснення базового (без сторонніх впливів) прогнозу G4M проводили з результатами спеціальної версії GLOBIOM для Бразилії для проекту REDD-ПАС [47] (сценарій GLOBIOM IDC\_Amazon: незаконне вирубка лісу не допускається в Амазонці та Мата Атлантика, відновлення лісу відсутнє) (рис. 4.45). Прогнози моделей відрізняються у 2010 році, оскільки G4M відкалібровано за даними FAO FRA 2015, а GLOBIOM використовує інформацію PRODES, крім того, GLOBIOM використовує більш широке визначення поняття "ліс", ніж G4M. Значне зниження швидкості знеліснення в Бразилії є результатом заходів, впроваджених урядом ще до 2005р., які спрямовані на зниження рівня знеліснення. Коли ми калібруємо модель до даних, отриманих внаслідок застосування цих заходів, ми враховуємо ці заходи по зниженню швидкості знеліснення в нашому базовому сценарії.

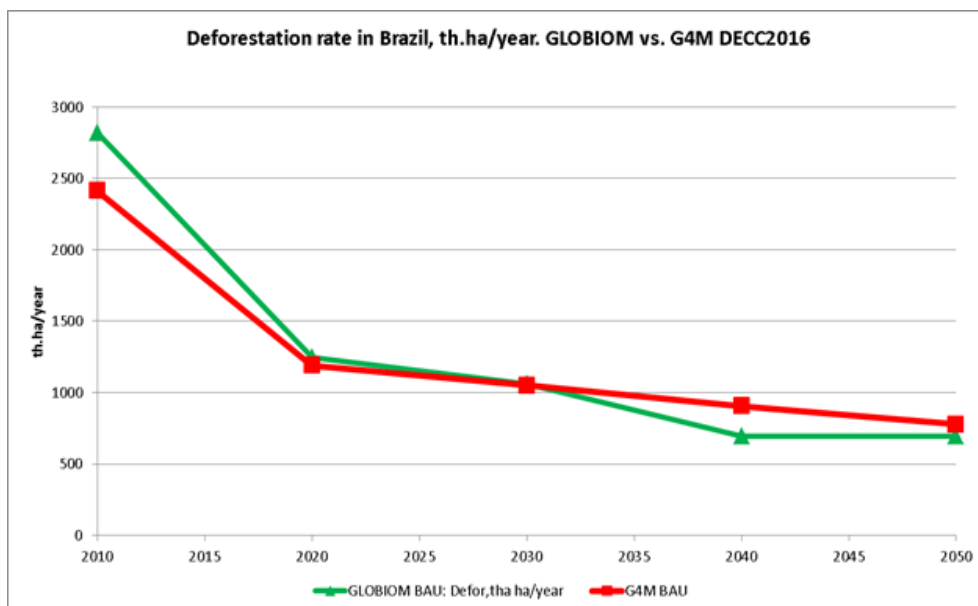


Рис. 4.45. Швидкість знеліснення, кг/рік, у Бразилії у 2000-2050рр. за результатами спеціальної версії GLOBIOM для Бразилії [47] та G4M

#### 4.6.3. Порівняння прогнозування глобальної зміни площі лісу та емісій від зміни землекористування моделями інтегральної оцінки для різних соціально-економічних умов та зміни клімату

У складі комплексу інтегральної оцінки Інституту прикладного системного аналізу (IAM IIASA) [116, 140, 184] G4M використовували для числової оцінки сценаріїв SSP/RCP [93, 236], зокрема для дослідження заліснення, знеліснення, заготівлі деревини та відповідних емісій CO<sub>2</sub> (позначено MESSAGE-GLOBIOM). У базовому сценарії зміни клімату площа лісів, прогнозована G4M до 2100р. знаходиться в межах, які прогнозують інші моделі (ближче до нижнього краю) для сценарію SSP1; біля верхнього краю оцінок, поряд із результатами моделі GCAM4, для сценарію SSP2; також біля верхнього краю оцінок для сценарію SSP3 (рис. 4.46 зліва). Для сценарію зміни клімату не більше 4.5°C площа лісів, прогнозована G4M до 2100р. знаходиться приблизно посередині діапазону значень, які прогнозують інші моделі, для сценарію SSP1, і трохи ближче до верхньої межі для сценарію SSP2; біля верхнього краю оцінок, поряд із результатами моделі GCAM4, для сценарію SSP2; та біля верхнього краю оцінок для сценарію SSP3 (рис. 4.46 посередині). Для сценарію зміни клімату не більше 2.6°C площа лісів, прогнозована G4M до 2100р. знаходиться приблизно

посередині діапазону значень (трохи ближче до верхньої межі), які прогнозують інші моделі, для сценарію SSP1; і біля верхнього краю оцінок, поряд із результатами моделі GCAM4, для сценарію SSP2 (рис. 4.46 справа).

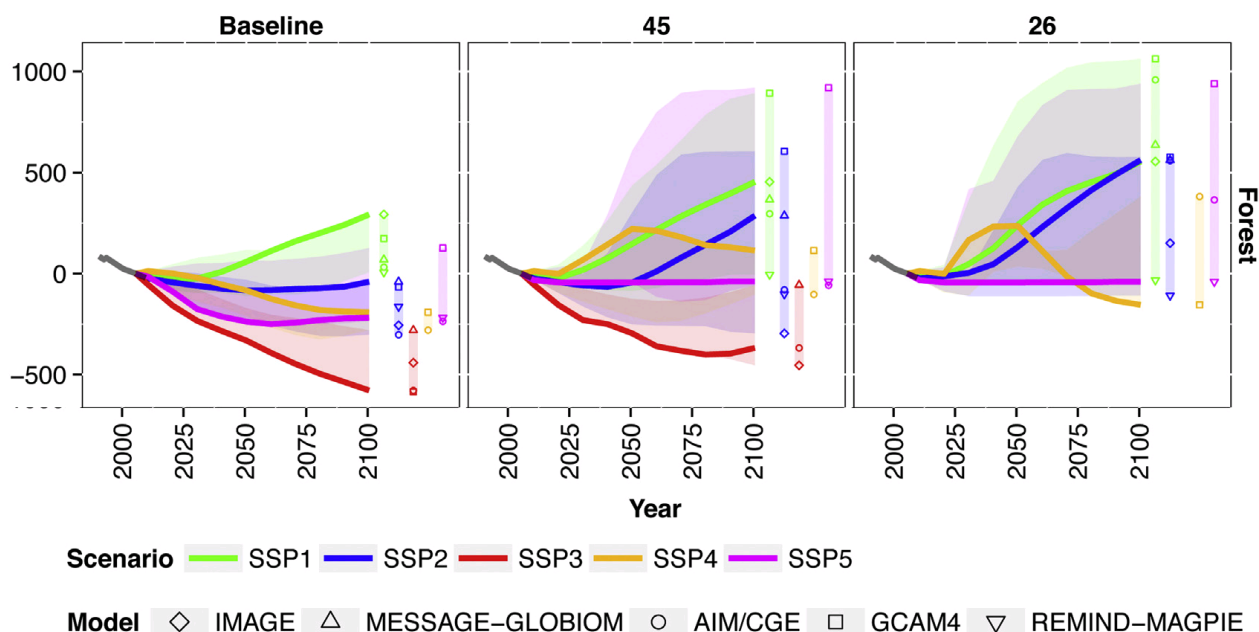


Рис.4.46. Прогнозування зміни глобальної площі лісу, Мга, згідно п'яти сценаріїв SSP для базового сценарію зміни клімату (зліва), RCP4.5 (посередині) та RCP2.6 (справа) за допомогою моделей інтегральної оцінки IMAGE, MESSAGE-GLOBIOM (IAM IIASA), AIM/CGE, GCAM4 та REMIND-MAGPIE. Кольорові лінії позначають результати маркерних моделей для кожного SSP (G4M в складі IAM IIASA була маркерною моделлю для сценарію SSP2). Кольорові смужки вказують діапазон значень для кожного сценарію у 2100 році для всіх моделей. Сіра лінія (приблизно до 2010р.) показує історичні тенденції на основі даних ФАО (модифікований рис. 4 з [236]).

Щодо моделювання глобальних емісій CO<sub>2</sub> від зміни землекористування, то у базовому сценарії зміни клімату кумулятивні емісії, прогнозовані G4M до 2100р. знаходиться біля верхньої межі у порівнянні з результатами інших моделей (близько до результатів моделі AIM/CGE) для сценарію SSP1; трохи ближче до верхнього краю оцінок для сценарію SSP2; та на нижньому краю оцінок, поруч із моделлю IMAGE, для сценарію SSP3 (рис. 4.47 зліва).

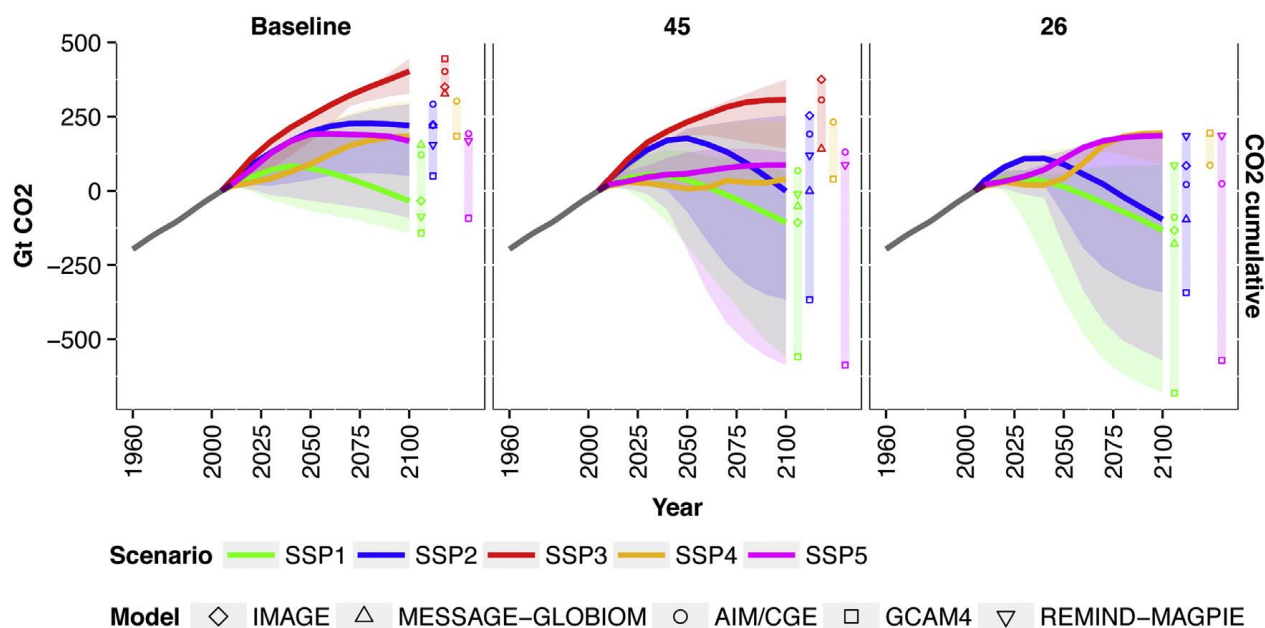


Рис. 4.47. Глобальні кумулятивні емісії від змін у землекористуванні з 2005 року згідно п'яти сценаріїв SSP для базового сценарію зміни клімату (зліва), RCP4.5 (посередині) та RCP2.6 (справа) за допомогою моделей інтегральної оцінки IMAGE, MESSAGE-GLOBIOM (IAM IIASA), AIM/CGE, GCAM4 та REMIND-MAGPIE. Кольорові лінії позначають результати маркерних моделей для кожного SSP (G4M в складі IAM IIASA була маркерною моделлю для сценарію SSP2). Кольорові смужки вказують діапазон значень для кожного сценарію у 2100 році для всіх моделей. Сіра лінія для 1960-2005рр. показує історичні тенденції емісій на основі даних RCP [321] (рис. 6 з [236]).

Для сценарію зміни клімату не більше  $4.5^{\circ}\text{C}$  кумулятивні емісії  $\text{CO}_2$ , прогнозовані G4M до 2100р. знаходяться трохи ближче до верхньої межі діапазону значень, які прогнозують інші моделі, для сценарію SSP1, і майже посередині для сценарію SSP2; та біля нижнього краю оцінок для сценарію SSP3 (рис. 4.47 посередині). Для сценарію зміни клімату не більше  $2.6^{\circ}\text{C}$  кумулятивні емісії  $\text{CO}_2$ , прогнозовані G4M до 2100р. знаходяться трохи ближче до верхньої межі діапазону значень, які прогнозують інші моделі, для сценарію SSP1; і посередині діапазону оцінок для сценарію SSP2 (рис. 4.47 справа). Значення емісій, в принципі, узгоджуються із значеннями зміни площі лісу – зменшення площі лісу означає більші емісії від зміни землекористування [236].



#### 4.6.4. Порівняння прогнозування витрат на зменшення емісій від знеліснення

Оцінка витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення, отримані за допомогою моделі G4M, є близькою до оцінок, наданих іншими дослідженнями (наприклад, див. таблицю 4.19 та огляд Coren et al. (2011) [59] для отримання додаткових даних).

Таблиця 4.19. Витрати на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення, зменшення емісій CO<sub>2</sub> у 2030 році, ГтCO<sub>2</sub>/рік, за результатами моделей DIMA, GCOMAP, GTM (отримані з рис. 3 в [177]) та моделі G4M (наше дослідження); різниця оцінок скорочення емісій CO<sub>2</sub> перших трьох моделей без G4M (Diff 1), ГтCO<sub>2</sub>/рік, і включаючи G4M (Diff 2); максимальне відхилення кривої граничних витрат, ГтCO<sub>2</sub>/рік при зміні вхідних параметрів моделі G4M на 10% (G4M10), 50% (G4M50) та 90% (G4M90)

Ціна CO <sub>2</sub> , \$/тCO <sub>2</sub>	DIMA	GCOMAP	GTM	G4M	Diff 1	Diff 2	G4M10	G4M50	G4M90
5	0.2	0.8	1.7	1.8	1.5	1.6	0.19	1.1	1.8
10	0.6	1.9	2.5	2.9	1.9	2.3	0.08	1.1	2.5
15	0.8	2.1	3	3.2	2.2	2.4	0.1	0.6	2.7
20	1.1	2.3	3.4	3.4	2.3	2.3	0.06	0.5	2.8
25	1.2	2.5	3.5	3.5	2.3	2.3	0.04	0.4	2.7
30	1.5	2.8	3.6	3.6	2.1	2.1	0.04	0.3	2.6
40	1.7	3.2	3.7	3.6	2	2	0.04	0.3	2.1
50	2	3.3	3.8	3.6	1.8	1.8	0.03	0.3	1.8
70	2.1	3.4	3.8	3.7	1.7	1.7	0.03	0.3	1.5
100	2.1	3.4	3.8	3.7	1.7	1.7	0.03	0.3	0.8

У порівнянні з кривими граничних витрат на зменшення емісій від знеліснення, побудованими за результатами трьох моделей: динамічної інтегрованої моделі лісового господарства та альтернативного землекористування (DIMA), яка ґрунтується геопросторовому на механізмі моделювання знеліснення подібно як у G4M, проте вона була відкалібрована лише в глобальному масштабі до глобальної зміни площі лісів за даними звіту ФАО про лісові ресурси 2005р, глобальної динамічної моделі часткової рівноваги GCOMAP (аббревіатура: Generalized Comprehensive Mitigation Assessment Process, імітує процеси заліснення та знеліснення в 10 регіонах світу) та глобальної моделі лісу (GTM; модель динамічної оптимізації, яка оптимізує

площу лісів, розподіл класів віку та лісокористування для 250 типів деревини в усьому світі) [177] встановлено, що G4M оцінює трохи більш високий потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub>, ніж GTM (найбільш оптимістична з трьох моделей) для цін вуглекислого газу нижче 20 \$/тCO<sub>2</sub>. Однією з причин того, що потенціал, отриманий за допомогою G4M, є вищим, ніж при застосуванні інших моделей є те, що в G4M ціна вуглекислого газу зростає 5% за рік у порівнянні з постійною ціною CO<sub>2</sub> у інших дослідженнях.

Різниця між найменшим та найбільшим значеннями, отриманими за допомогою трьох моделей, коливається від 1.5 до 2.3 ГтCO<sub>2</sub>/рік з максимумом при вуглекислого газу 20 та 25 \$/тCO<sub>2</sub> (Diff 1 в таблиці 4.19). Якщо враховано результати G4M, різниця збільшиться лише при ціні вуглекислого газу 5, 10 та 15 \$/тCO<sub>2</sub> на максимум 2.4 Гт CO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглекислого газу 15 \$/тCO<sub>2</sub> (Diff 2 в таблиці 4.19). Відхилення кривої граничних витрат, зумовлені 10% варіацією вхідних параметрів G4M, при ціні 5 \$/тCO<sub>2</sub> на порядок менші і при більш високих цінах CO<sub>2</sub> на два порядки менші, ніж відмінності, зумовлені застосуванням різних моделей. Відхилення кривої граничних витрат внаслідок 50% варіації вхідних параметрів G4M мають такий самий порядок, як і різниці між моделями при цінах CO<sub>2</sub> нижче 15 \$/тCO<sub>2</sub>. У випадку 90% варіації параметрів G4M відхилення кривої граничних витрат більше, ніж розбіжності між моделями при цінах CO<sub>2</sub> нижче 50 \$/тCO<sub>2</sub>. З порівняння можна зробити висновок, що якість вхідних даних може бути такою ж важливою, як застосування декількох різних моделей для побудови кривих граничних витрат. Цей висновок є вірним, принаймні, у випадку з моделлю G4M, а також для дослідження моделювання потенціалу зменшення емісій парникових газів в сільському господарстві та лісовому секторі США згідно роботи Schneider and McCarl (2006) [270], які повідомляють про різницю потенціалу економічного зменшення емісій від від -55 до +85% залежно від припущень моделювання.

Загалом, результати, отримані в нашому дослідженні, узгоджуються з Kesicki (2013) [173], який зробив аналіз чутливості кривих граничних витрат для транспортного сектору Великобританії до цін на викопне паливо, та van Vuuren et al. (2009) [319], який порівнював результати, отримані за допомогою 6 моделей

інтегральної оцінки, статистичного аналізу, що поєднує результати різних модельних досліджень та двох оцінок методом «знизу вверху», що оцінки потенціалу економічного зменшення емісій парникових газів є більш стійкими при вищих цінах вуглекислого газу. Проте, в дослідженні Schneider and McCarl (2006) [270] відхилення величини потенціалу зменшення емісій є більшим при більш високих цінах CO<sub>2</sub>, оскільки при високих цінах діяльність щодо зменшення емісій переходить на заліснення та створення насаджень енергетичних культур, які конкурують за сільськогосподарські землі та спотворюють ринок сільськогосподарських товарів. Причиною протилежних результатів у [270] може бути те, що Schneider and McCarl (2006) розглядали заходи щодо зменшення емісій парникових газів в одній країні, де заходи зменшення емісій у лісовому господарстві є більш дорогими, ніж у сільському господарстві.

Результати нашого дослідження чутливості кривої граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> до зміни параметрів моделі G4M та аналізу результатів інших моделей для порівняння мають значення для розробки заходів зменшення емісій по програмі REDD. Зокрема, середньострокові заходи зменшення емісій, при яких зазвичай застосовують низькі ціни CO<sub>2</sub>, можуть бути більш вразливі до невизначеності інформації про корупцію та якості управління у цільових країнах. Це може статися тому, що оцінки потенціалу економічного зменшення емісій є більш чутливими до фінансової ефективності при низьких цінах CO<sub>2</sub>. Невизначеність вхідних даних та припущень моделі меншою мірою впливають на криві граничних витрат при високих цінах CO<sub>2</sub>, які зазвичай застосовують при розробці довгострокових заходів зменшення емісій. Проте, для підвищення надійності наших висновків необхідні додаткові дослідження, а також застосування інших моделей, оскільки висновки, в даний час, базуються на дослідженні чутливості з використанням єдиної моделі (G4M) і підтримуються аналізом обмеженої кількості досліджень опублікованих іншими авторами.

#### 4.6.5. Верифікація моделювання процесу знеліснення боліт у Індонезії

Згідно огляду, проведеного Busch et al. (2015) [42], оцінки швидкості знеліснення для Індонезії у 2000-2010 роках становлять приблизно від 500 кга/рік до 1400 кга/рік. Опубліковані в огляді значення швидкості знеліснення для 2000-2005рр. складають приблизно від 300 до 1800 кга/рік. Частина оцінок швидкості знеліснення, включаючи значення, отримані нами на основі звіту ФАО про лісові ресурси 2015р. [106] наведено в таблиці 4.20. Модель G4M відкалібровано по середньому значенню за 2005-2010рр. (які представляють середні значення за 2001-2010рр.), отриманими за даними ФАО, що складає 646 кга/рік. Значення для 2001-2010рр., отримані на основі звіту ФАО і використані у G4M, є найменшими у таблиці 4.20 і знаходяться трохи ближче до нижньої межі, опублікованої в огляді [42] для 2000-2010рр. та для 2000-2005рр.

Таблиця 4.20. Порівняння швидкості знеліснення у Індонезії у 1990-2010рр., кга/рік

Джерело/рік	1990	1995	2000	2005	2010
G4M			727	689	603
на основі FAO FRA, 2015 [106]			1,914	578	714
Ministry of Forestry (2008) [249]			703	703	
Busch et al. 2012 [44]; середнє за 2000-2005			687	687	
Busch et al. 2015 [42]; середнє за 2000-2010				1,145	
Ministry of forestry 2008 [249] /DNPI (2010) [153] / ISNC (2010) [152]	1,800		1,100	1,100	
Hansen et al. (2013) [135] (середня втрата лісу у 2000-2012)				1,315	

Оцінки емісій від розкладання боліт після знеліснення і осушування, опубліковані в огляді [42] сягають від 300 до 1900 МтСО<sub>2</sub>екв/рік, а для 2000-2005рр. – від 700 до 1500 МтСО<sub>2</sub>екв/рік. В таблиці 4.21 наведено опубліковані значення емісій від знеліснення боліт, включаючи результати моделі G4M.

Таблиця 4.21. Емісії від знеліснення боліт в Індонезії, МтСО<sub>2</sub>екв/рік

Джерело	2000	2005	2010
G4M, розкладання болота+біомаса+грунт та пожежі перші 5 років	987	1,069	1,031
ISNC (2010) [150] усереднено за 2000-2004рр., включає пожежі		1,451	
ISNC (2010) [150] усереднено за 2000-2004рр., без пожеж		1,105	
Busch et al. 2012 [44]; середнє за 2000-2005, болота+біомаса	592	592	
Busch et al. 2015 [42]; середнє за 2000-2010		859	
Ministry of Forestry (2008) [249], розкладання болота		186	
DNPI 2010 [153], розкладання болота, 2005р.		300	
G4M, розкладання болота та пожежі перші 5 років	664	748	742
Нooijer et al., 2010 [145] (2006, розкладання болота, ймовірне значення; враховано, що болота Індонезії складають 83% всіх ботіт, розглянутих у статті)		525	
Нooijer et al., 2010 [145] (2006, розкладання болота, мінімальне значення; враховано, що болота Індонезії складають 83% всіх ботіт, розглянутих у статті)		295	
Нooijer et al., 2010 [145] (2006, розкладання болота, максимальне значення; враховано, що болота Індонезії складають 83% всіх ботіт, розглянутих у статті)		710	
Нooijer et al., 2010 [145] (2000-2006, розкладання болота включаючи пожежі (без впливу El nino); мінімальне значення; враховано, що болота Індонезії складають 83% всіх ботіт, розглянутих у статті)		529	
Нooijer et al., 2010 [145] (1997-2006, розкладання болота включаючи пожежі (із впливом El nino); максимальне значення; враховано, що болота Індонезії складають 83% всіх ботіт, розглянутих у статті)		1,872	

В таблиці наведено значення як для емісій, які включають лише емісії від розкладання осушених боліт (від 186 МтСО<sub>2</sub>екв/рік), так і емісії, в яких враховано всі резервуари вуглецю та пожежі на осушених болотах (до 1872 МтСО<sub>2</sub>екв/рік). Такий розкид значень, крім невизначеності параметрів, залежить також від того, чи автори включають емісії від пожеж на болотах, чи враховують період з найбільшими пожежами підчас 1997–98 El Nino. У методі, який використано у моделі G4M для обчислення емісій із знеліснених боліт [146], враховано пожежі у перші 5 років після знеліснення і осушування, тому значення емісій, отримані за допомогою моделі (718 МтСО<sub>2</sub>екв/рік - лише болота та 1029 МтСО<sub>2</sub>екв/рік - сумарні емісії від знеліснення в Індонезії в середньому за 2000-2010рр.) є обгрунтованими.

#### 4.6.6. Порівняння геопросторової структури знеліснення у Бразилії

Для вдосконалення моделювання геопросторової структури знеліснення, зокрема, у тропіках нами було запропоновано [126] зміни до алгоритму симуляції прийняття рішень про зміну землекористування (використання карти доріг та відстані до недавно знеліснених ділянок) та ініціалізації швидкості знеліснення за картою втрати лісу [134] (див. розділ 3). Новий підхід дозволяє значно краще відтворити структуру знеліснення як на початку моделювання (рис. 4.48) так і у майбутньому (рис. 4.49) у порівнянні з підходом, який було використано у [118, 123,176,177].

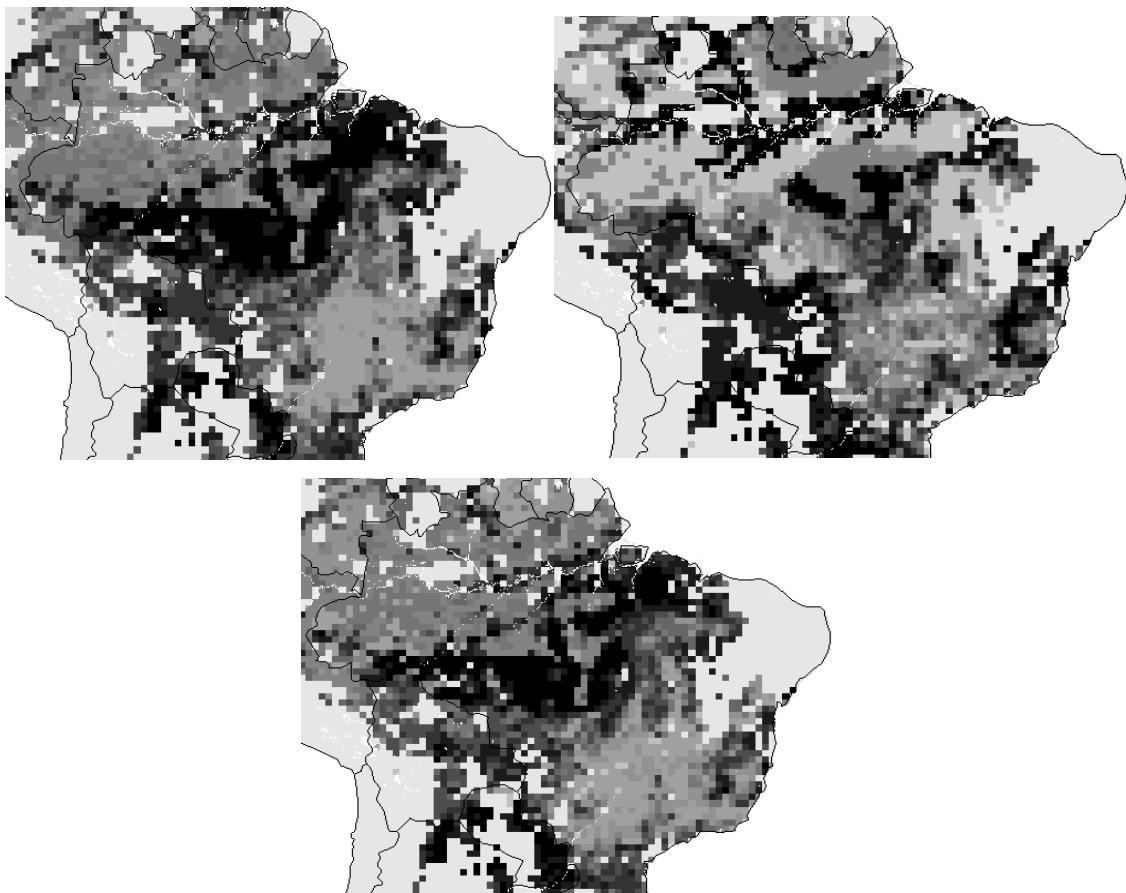


Рис. 4.48. Порівняння просторової структури знеліснення у 2005 році у Бразилії (темніше означає більшу швидкість знеліснення): карта втрати лісу [134] (зліва вверху), швидкість знеліснення G4M до вдосконалення (справа вверху) та швидкість знеліснення G4M після вдосконалення (зліва внизу)

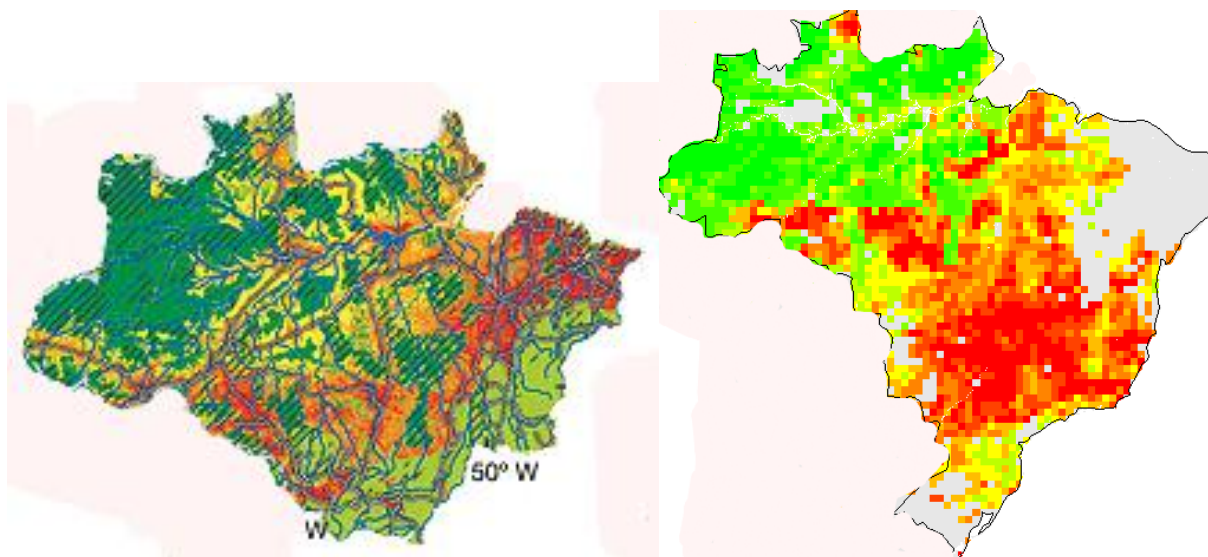


Рис. 4.49. Порівняння просторової структури розміщення лісу у 2050 році у Бразилії (зелене означає більшу частку лісу, червоне - меншу): карта лісу [287] (зліва), карта лісу G4M після вдосконалення (справа).

#### 4.7. Обговорення результатів моделювання з національними експертами та іншими зацікавленими особами

Важливим етапом валідації моделей, які використовують для інтегральної оцінки, є представлення результатів національним експертам, а також тим, кого можуть стосуватись ці результати, та спільний аналіз результатів в режимі питання-відповіді. Ця робота може проводитись віддалено через інтернет та телеконференції, або через організацію спеціальних семінарів [24]. Під час такого аналізу експерти просять пояснити ті, чи інші результати, зазвичай, звертаючи особливу увагу на «аномалії». В результаті такої роботи можуть бути виявлені як проблеми із вхідними даними, так і помилки; обмеження концептуальної моделі, а також помилки програмної реалізації моделі. Розробники моделі і користувачі результатів моделювання можуть узгодити, які вхідні дані краще відповідають для розв'язку поставленої задачі (наприклад, UNFCCC чи FAO). У користувачів результатів моделювання (тих, хто буде приймати рішення, ґрунтуючись на цих результатах, а також ті, кого ці рішення будуть стосуватись) виробляється розуміння роботи моделі, обмеження моделі, невизначеності результатів моделювання і, відповідно, рівень довіри до результатів моделювання.

Більшість таких обговорень відбуваються в усній формі, або через електронну пошту і не публікується. В окремих випадках публікують протоколи зустрічей розробників моделей, які представляють результати, та зацікавлених осіб. Приклад обговорення результатів моделі G4M та з'єднаної з нею моделі GLOBIOM щодо оцінки потенційних впливів політики ЄС щодо біопалива з зацікавленими сторонами наведено в [151]:

Питання:

“In G4M, how do you decide how much feedstock is available for 2nd generation biofuels?”

Відповідь:

“Indeed, this is calculated in a different model, G4M, describing the forestry sector. G4M calculates how much biomass can be harvested for a certain price, depending on information on production cost associated to different managements. G4M main assumptions on data will also be provided in the documentation produced for this project.”

Питання:

«How is roundwood in the G4M model defined and where is the data taken from?»

Відповідь:

«There are a number of different sources, which will be shared with you for comparison with own data.»

Питання:

«What sources of GHG and ILUC emissions do you include for forestry products?»

Відповідь:

«The carbon stock is accounted for in GLOBIOM and change in the management intensity in the G4M model can change forest productivity but also carbon stock. Higher demand of forest products lead to conversion of unmanaged to more managed forest, without further land use change. But land conversion can also produce short rotation plantations with change in carbon stocks (carbon pool releases and carbon sequestration).»



В результаті проведеної роботи було розроблено рекомендації для політиків, на основі результатів моделювання [241].

#### **4.8. Висновки до розділу 4**

1. Проаналізовано особливості валідації складних комп'ютерних математичних моделей, які використовують для проведення інтегральної оцінки. Такі моделі включають компоненти моделювання біофізичних та економічних процесів, а також поведінки людей. Ці компоненти можуть бути представлені в одній моделі (менш детально), або бути у вигляді комплексу зв'язаних між собою більш детальних моделей. Враховуючи те, що компоненти моделей зв'язані між собою і виникають зворотні зв'язки, валідація окремих компонентів моделей не гарантує валідації всього комплексу моделей. Валідація моделі пов'язана з призначенням моделі. Застосовують концепцію Верифікації-Валідації та Акредитації. Розрізняють валідацію концептуальної моделі, валідацію поведінки моделі, валідацію даних та верифікацію. Складні моделі практично не валідують, а визначають, чи модель підходить для певних цілей, – «акредитація». «Акредитація» може відбуватись через процес використання моделі у різних проектах із залученням до рецензування моделі та результатів моделювання незалежних експертів, замовників результатів аналізу з використанням моделі та зацікавлених осіб.
2. Проаналізовано неточності вхідних даних розробленої моделі G4M. Виявлено, що дані, які використовують як вхідні параметри розробленої моделі, характеризуються досить високою невизначеністю, особливо на рівні клітинок растру. Значення валового внутрішнього продукту та розміщення населення для різних сценаріїв можуть відрізнитися на більше, ніж 100% для окремих клітинок растру у 2050 році. Різниця між середніми значеннями трьох глобальних геопросторових наборів даних про чисту первинну продукцію також перевищує 100%. Середня різниця між двома глобальними геопросторовими наборами даних про біомасу лісів складає 20%, хоча, ймовірно, обидві карти мають систематичні похибки 23-42%. Ціни на сільськогосподарські товари у різних сценаріях соціально-економічного

розвитку змінюються у межах від -60 до +50% до 2100 року, а заходи по зменшенню емісій парникових газів можуть спричинити збільшення цін на 110-570%. Корупція є загрозою для реалізації заходів по зменшенню емісій парникових газів від знеліснення та деградації лісів у країнах, що розвиваються, невизначеність оцінок компонентів коефіцієнта корупції, який використовують у моделі, складає від кількох відсотків до більше 100% для країн, де важко отримати інформацію (наприклад, Північна Корея, Афганістан). Дані про швидкість заліснення та знеліснення, визначені за даними звіту ФАО про лісові ресурси та звітів країн до РКЗК ООН у формі таблиць CRF, для окремих країн відрізняються у декілька разів, в основному, через відмінності у визначеннях понять «ліс», «заліснення» та «знеліснення», а також тому, що різні інститути в країнах використовують різні дані для підготовки звітів для ФАО та РКЗК ООН. Тому важливо узгоджувати із усіма зацікавленими сторонами, які дані використовувати в якості вхідних параметрів моделі. Зокрема, вибір карти розміщення лісів у моделі G4M може мати вплив на рішення як краще досягнути цілі збільшення біоенергії на 10% у країнах ЄС.

3. У результаті аналізу чутливості моделі G4M до зміни окремих параметрів (+/- 10% від середнього значення) виявлено, що результати моделювання швидкості заліснення та знеліснення без впливу податку на вуглець найбільш чутливі до зміни валового внутрішнього продукту, коефіцієнта перерахунку вуглецю у об'єм деревини (комбінація щільності деревини та вмісту вуглецю у деревині), приросту деревини (залежить від чистої первинної продукції), щільності розміщення населення, ціни на деревину, придатності землі для ведення сільського господарства та вартості заліснення. Для досліджуваних країн та у всьому світі реакція емісій CO<sub>2</sub> на зміну ціни на сільськогосподарську землю дуже висока при ціні CO<sub>2</sub> 3-10 \$/тCO<sub>2</sub>, причому симетрично на негативні та позитивні відхилення параметра.
4. Для врахування відмінностей у даних ФАО та РКЗК ООН щодо площі лісу, а також швидкості заліснення і знеліснення було проведено аналіз чутливості результатів оцінки емісій та стоку вуглекислого газу для історичного періоду

та прогнозування до 2050 року. Показано, що глобальні емісії CO<sub>2</sub> від заліснення та знеліснення без впливу податку на вуглець практично не відрізняються протягом історичного періоду, але дещо розходяться з часом (до 9% для заліснення та 12% для знеліснення). Глобальний потенціал зменшення емісії CO<sub>2</sub> від заліснення, знеліснення, лісового господарства та сумарний відрізняється максимум на 20 % для заліснення. Разом з тим, для окремих країн різниця перевищує 100%.

5. Досліджено чутливості кривих граничних витрат (МАСС) на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення, знеліснення та лісового господарства до зміни важливих соціально-економічних факторів – коефіцієнта корупції, ціни на деревину та ціни на сільськогосподарську землю. Коефіцієнт корупції має найбільший вплив на МАСС при всіх рівнях зміни параметрів. Зі збільшенням амплітуди зміни параметра максимальний вплив на МАСС зсувається від 30 \$/тС (при змінах на 10 і 50%) до 119 \$/тС (при зміні на 90%). Ціна деревини має відносно рівномірний вплив на МАСС при всіх цінах вуглецю, а ціна на сільськогосподарську землю має два максимуми – більший при низьких цінах вуглецю і менший при високій ціні вуглецю. Збільшення амплітуди зміни параметра до 90% знижує ціну на вуглець, при якій зміна окремих параметрів викликає максимальне відхилення МАСС.
6. Для країн ЄС проведено порівняння результатів моделювання лісозаготівлі з статистичними даними та емісій CO<sub>2</sub> від лісозаготівлі з результатами, які ці країни подають до РКЗК ООН. У середньому за 1999-2015рр. середньоквадратичне відхилення змодельованих значень заготівлі деревини склало 0.5% для ЄС; для більшості країн відхилення становить біля 1%, але для кількох країн більше 7% – для Бельгії, Кіпру, Ірландії, Люксембургу, Нідерландів та Словенії. В загальному, для ЄС середньоквадратичне відхилення модельованих значень емісій CO<sub>2</sub> з біомаси від лісокористування від значень РКЗК ООН становить 17%. Для таких країн як Болгарія, Чехія, Фінляндія, Італія, Латвія, Румунія, Словаччина середньоквадратичне відхилення складає до 30%, а для таких як Австрія, Хорватія, Естонія, Франція, Німеччина, Греція, Нідерланди, Португалія – до 60%. Ще для 7

країн – Бельгії, Угорщини, Литви, Люксембургу, Польщі, Швеції та Великобританії відхилення не перевищує 82%. Для трьох країн – Данії, Кіпру та Ірландії середньоквадратичне відхилення є більшим 90%.

7. Проведено порівняння результатів моделювання з відповідними результатами інших моделей. Детальне порівняння для країн ЄС здійснено з результатами моделі процесів лісокористування EFISCEN, для Бразилії – з результатами спеціальної версії GLOBIOM для цієї країни та на глобальному рівні у складі комплексу інтегральної оцінки Міжнародного інституту прикладного системного аналізу з результатами моделей AIM, GCAM, IMAGE та REMIND/MAGPIE. У зазначених випадках результати G4M є раціональними, а різниця у результатах моделей пояснюється відмінностями у підходах до моделювання відповідних процесів і вхідних даних.
8. Порівнявши чутливість кривих граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення, розроблених з використанням моделі G4M, до вхідних даних моделі, з кривими, отриманими з використанням моделей GCOMAP, DIMA та GTM, можна зробити висновок, що якість вхідних даних може бути такою ж важливою, як застосування декількох різних моделей для побудови кривих граничних витрат. Криві граничних витрат є чутливішими до невизначеності вхідних параметрів моделі G4M при низьких цінах емісій CO<sub>2</sub>. Результати проведеного дослідження чутливості кривої граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> до зміни параметрів моделі G4M та аналізу результатів інших моделей для порівняння мають вагомe значення для розробки заходів щодо зменшення емісій по програмі REDD. Зокрема, середньострокові заходи щодо зменшення емісій, при яких, зазвичай, застосовують низькі ціни емісій CO<sub>2</sub>, можуть бути більш вразливі до невизначеності даних про корупцію та якість управління у цільових країнах. Це може мати місце тому, що оцінки потенціалу економічного зменшення емісій є чутливішими до фінансової ефективності при низьких цінах емісій CO<sub>2</sub>. Невизначеність вхідних даних та припущень моделі меншою мірою впливають на криві граничних витрат при високих цінах емісій CO<sub>2</sub>, які, зазвичай, застосовують при розробці довгострокових заходів зменшення емісій. Проте, для підвищення надійності

таких висновків необхідні додаткові дослідження, а також застосування інших моделей, оскільки висновки, в теперішній час, базуються на дослідженні чутливості з використанням єдиної моделі (G4M) і підтримуються аналізом обмеженої кількості досліджень опублікованих іншими авторами.

9. Проведено порівняння емісії від знеліснення боліт в Індонезії, отримані з допомогою розробленої моделі G4M, із значеннями, опублікованими у науковій літературі. Опубліковані значення емісій у 2000-2010 рр. становлять від 186 МтСО<sub>2</sub>екв./рік до 1451 МтСО<sub>2</sub>екв./рік. Такий розкид значень, крім невизначеності параметрів, залежить також від того, чи автори включають емісії від пожеж на болотах, чи враховують період з найбільшими пожежами під час 1997–98 El Nino. У методі, який використано у моделі G4M для обчислення емісій із знеліснених боліт, враховано пожежі у перші 5 років після знеліснення і осушування, тому значення емісій, отримані за допомогою цієї моделі (718 МтСО<sub>2</sub>екв/рік – лише болота та 1029 МтСО<sub>2</sub>екв/рік – сумарні емісії від знеліснення в Індонезії в середньому за 2000-2010рр.) є обґрунтованими.
10. Проведено порівняння геопросторової структури знеліснення у Бразилії. Продемонстровано, що запропонований підхід дає можливість значно краще відтворити структуру знеліснення у тропічних лісах як на початку моделювання, так і у майбутньому у порівнянні з підходом, який було використано у попередніх дослідженнях.
11. Для «акредитації» моделі важливо обговорювати математичну модель та результати моделювання з національними експертами та іншими зацікавленими сторонами. В результаті такої роботи можуть бути виявлені як проблеми із вхідними даними, так і помилки, обмеження концептуальної моделі, а також помилки програмної реалізації моделі. Розробники моделі і користувачі результатів моделювання можуть узгодити, які вхідні дані краще підходять для розв'язування поставленої задачі (наприклад, РКЗК ООН чи ФАО). У користувачів результатів моделювання (тих, хто буде приймати рішення, ґрунтуючись на цих результатах, а також ті, кого ці рішення будуть

стосуватись) виробляється розуміння роботи моделі, обмеження моделі, невизначеності результатів моделювання і, відповідно, рівень довіри до результатів моделювання. Наведено приклад обговорення результатів моделі G4M та з'єднаної з нею моделі GLOBIOM щодо оцінки потенційних впливів політики ЄС щодо біопалива.

## **Розділ 5. Аналіз лісокористування та зміни землекористування, емісій вуглекислого газу та потенціалу зменшення емісій з використанням моделі G4M**

### **5.1. Типові приклади застосування моделі G4M**

Модель G4M є засобом для аналізу лісокористування, знеліснення, заліснення, емісій вуглекислого газу, спричинених цими процесами, а також потенціалу зменшення емісій вуглекислого газу та коштів необхідних для цього.

Прикладами застосування моделі G4M є:

- визначення референтного рівня емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування у країнах ЄС [21, 24, 80, 296-299, 355];
- розробка референтних сценаріїв емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування та змін землекористування у країнах ЄС [50, 51, 88, 89, 266, 356];
- аналіз синергії від заходів щодо зменшення швидкості знеліснення та збереження видів тварин у країнах, що розвиваються [294];
- визначення оптимальних місць для впровадження заходів по зменшенню втрати вуглецю лісами [68];
- інтегральна оцінка потенціалу зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування та змін землекористування для всіх країн та різних сценаріїв соціально-економічного розвитку [20, 22, 23, 65, 87, 90, 91, 93, 116-118, 131, 139, 140, 184, 227, 228, 236, 278, 360-362];
- аналіз потенціалу заготівлі деревини та відходів від заготівлі деревини для різних сценаріїв соціально-економічного розвитку [69, 83];
- аналіз сценаріїв використання біоенергії [84-86, 182, 183, 310, 391];
- Аналіз емісій вуглекислого газу в секторі лісового господарства України [310, 359, 360, 389, 392].

## 5.2. Варіанти зменшення емісій вуглекислого газу у моделі G4M та створення кривої граничних витрат на зменшення емісій

Для аналізу потенціалу зменшення емісій вуглекислого газу модель розв'язують для нульової ціни вуглецю (або вуглекислого газу), а також для ряду цін вуглецю з невеликим кроком. Якщо для вибраного року відняти від значення емісій при ненульовій ціні вуглецю значення емісій при нульовій ціні вуглецю, отримаємо додаткове зменшення емісій при певній ціні вуглецю. Якщо таку процедуру зробити для всіх результатів емісій, отриманих при ненульових цінах вуглецю, отримаємо криву граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> (по осі абсцис відкладають значення емісій, яке може бути скорочене, а по осі ординат – ціна вуглецю). Таку процедуру роблять як для емісій від окремих видів діяльності так і для сумарних емісій (рис. 5.1).

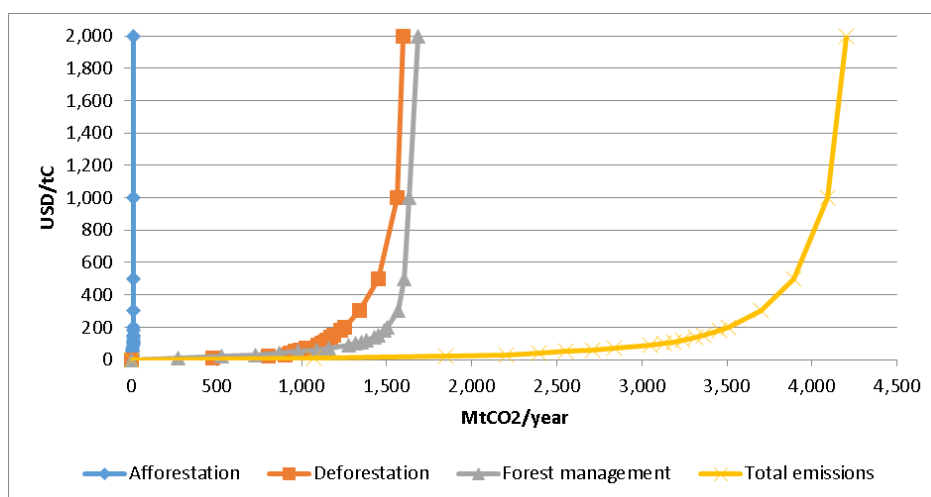


Рис. 5.1. Глобальні криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення, знеліснення та лісозаготівлі у 2050р.

Глобальний потенціал загального зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення, знеліснення та лісозаготівлі оцінюється шляхом впровадження ціни на вуглець із використанням моделі G4M. Вводячи ціни вуглецю у моделі G4M ми симулюємо ситуацію, коли власник лісу отримує кошти за вуглець, який зберігається у біомасі лісу вище базового рівня, або власник лісу платить податок, якщо вуглець біомаси лісу стає нижчим базового рівня. Базовий рівень вуглецю в біомасі лісу визначається при моделюванні з нульовою ціною вуглецю.



У моделі G4M розглянуто такі заходи для зменшення емісій вуглекислого газу:

- зменшення площі знеліснення,
- збільшення площі заліснення,
- зміна тривалості обороту рубки існуючих експлуатаційних лісів у різних місцях,
- зміна співвідношення рубок догляду та рубок головного користування.

Ці заходи є взаємозалежними. Впровадження ціни вуглецю збільшує вартість лісу за рахунок вуглецю, який накопичується у біомасі лісу. Зростання вартості лісу після впровадження ціни вуглецю змінює баланс чистих теперішніх вартостей лісового та сільського господарств, який визначає зміну типу землекористування (заліснення, якщо теперішня вартість лісу більша за теперішню вартість сільського господарства, і знеліснення, якщо навпаки). Загалом, тому передбачається, що введення ціни вуглецю призводить до зменшення знеліснення та збільшення заліснення. Однак це не може відбуватися з однаковою інтенсивністю протягом довгого часу. Зменшення знеліснення збільшує дефіцит землі, і тому може призвести до зменшення заліснення у порівнянні з базовим сценарієм (рис. 5.2).

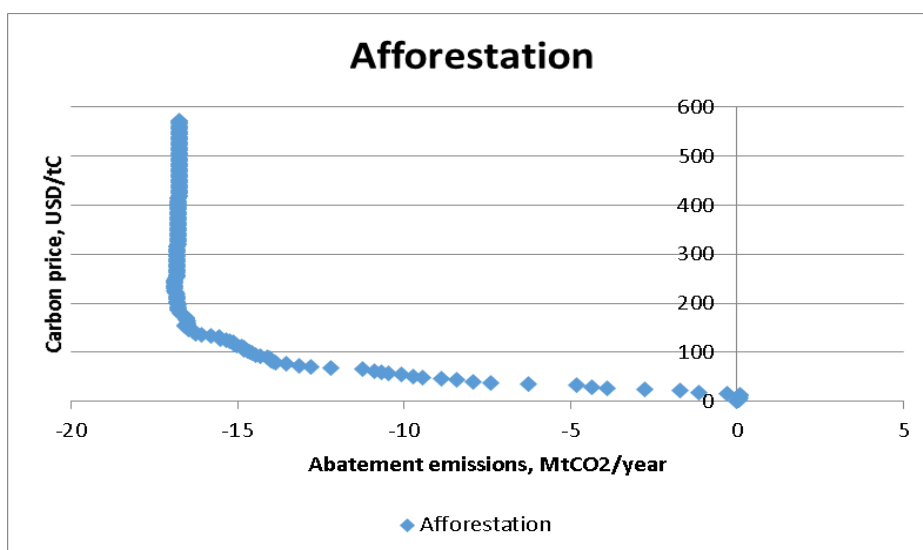


Рис. 5.2. Приклад залежності поточних емісій вуглекислого газу від заліснення у 2050р. від ціни вуглецю, коли впровадження ціни збільшує дефіцит землі

При збільшенні ціни вуглецю тривалість обороту рубки високопродуктивних лісів зростає і одночасно заготівля деревини поширюється у менш продуктивні ліси, щоб забезпечити необхідний об'єм лісозаготівлі. При зменшенні знеліснення менше деревини, заготовленої при знелісненні, потрапляє на ринок, тому об'єм деревини заготовленої в лісі зростає, що в деяких випадках може привести до зниження біомаси лісу і, відповідно, більших емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування у порівнянні з базовим сценарієм. Такий ефект, зазвичай, спостерігається при низьких цінах вуглецю, якщо процес знеліснення дуже чутливий до ціни вуглецю (рис. 5.3).

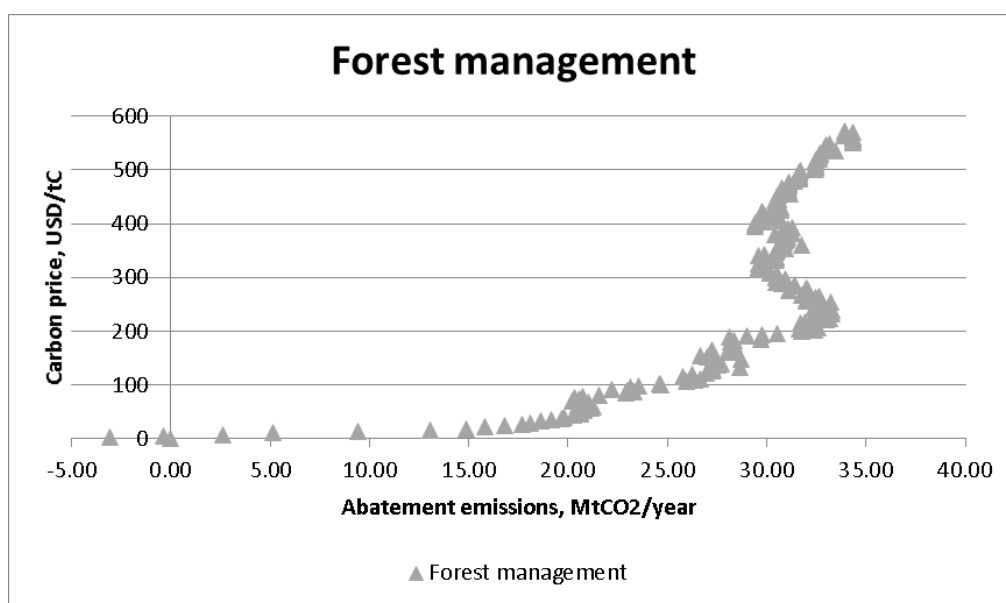


Рис. 5.3. Приклад залежності потенціалу зменшення поточних емісій вуглекислого газу від лісокористування у 2050р. від ціни вуглецю, коли впровадження ціни зменшує кількість деревини, яка поступає від знеліснення, і збільшує емісії від лісокористування у порівнянні з нульовою ціною вуглецю (при низьких цінах вуглецю)

Якщо оборот рубки експлуатаційного лісу був збільшений в результаті впровадження ціни вуглецю, то його біомаса зростає. Якщо ж у майбутньому цю ділянку землі буде знеліснено, то втрати біомаси і, відповідно, емісії від знеліснення будуть вищими у порівнянні з базовим сценарієм (рис.5.4).

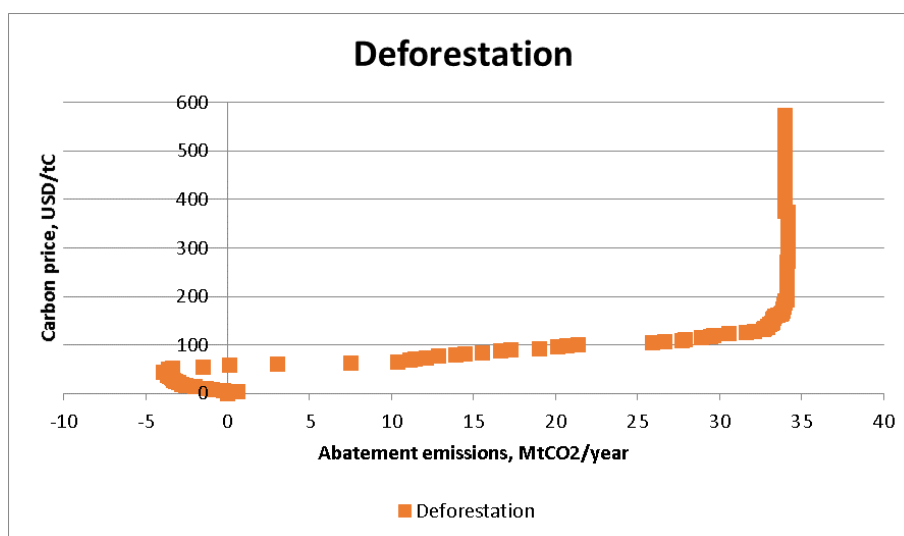


Рис. 5.4. Приклад залежності потенціалу зменшення поточних емісій вуглекислого газу від знеліснення у 2050р. від ціни вуглецю, коли впровадження ціни збільшує біомасу лісу, який у наступні роки вирубується, і збільшує емісії від знеліснення у порівнянні з нульовою ціною вуглецю (при низьких цінах вуглецю).

Крім взаємозалежності процесів заліснення, знеліснення і лісозаготівлі існують ще й часові ефекти, які проявляються, якщо нас цікавить поточний ефект зменшення емісій  $\text{CO}_2$  у певному році. Наприклад, нас цікавить потенціал зменшення емісій  $\text{CO}_2$  у 2050 році. При нульовій ціні вуглецю ділянка землі була заліснена у 2030 році і у 2050 році цей ліс поглинав 5  $\text{MtCO}_2$ /рік (негативні емісії). А при ненульовій ціні вуглецю ця ділянка буде заліснена вже у 2020 році і у 2050 році цей ліс, будучи старшим на 10 років, буде поглинати 4  $\text{MtCO}_2$ /рік. В результаті отримаємо, що впровадження ціни вуглецю збільшує поточні емісії від заліснення у 2050р. Такий же часовий ефект можливий і з емісіями від лісокористування. Наприклад, при вищій ціні вуглецю оборот рубки стає довшим раніше, тому ефект від цієї зміни зникає швидше, оскільки ліс знаходиться ближче до рівноважного стану (рис. 5.5).

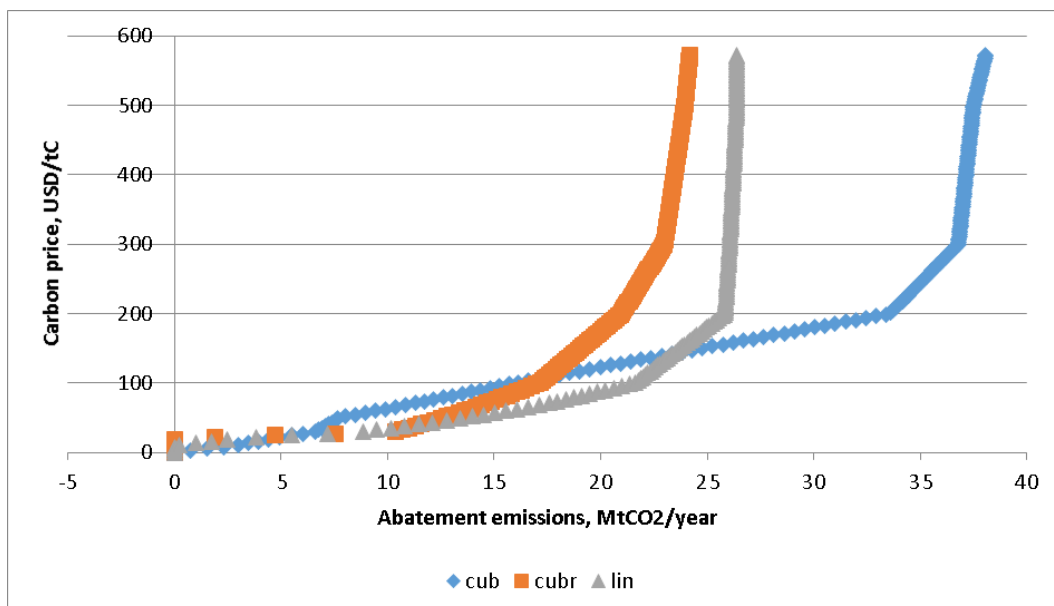


Рис. 5.5. Приклад залежності потенціалу зменшення поточних емісій вуглекислого газу від лісокористування у 2050р. від ціни вуглецю для різних траєкторій зростання ціни, коли повільніше зростання ціни дозволяє досягнути більшого ефекту

### 5.3. Схеми зв'язку моделі G4M з іншими моделями для аналізу емісій вуглекислого газу

Найчастіше модель G4M застосовують у поєднанні з економічною моделлю GLOBIOM, для того щоб врахувати вплив торгівлі деревиною і продуктами сільського господарства на локальні ціни деревини та сільськогосподарської землі, або у рамках більш складного комплексу моделей інтегральної оцінки ПАСА (ПАСА IAM) для чисельного аналізу сценаріїв SSP/RCP, чи комплексу моделей для розробки та аналізу референтних сценаріїв для країн ЄС.

#### 5.3.1. Взаємодія моделей G4M та GLOBIOM

У першому, найпростішому випадку застосовують схему моделювання, зображену на рис. 5.6. Модель GLOBIOM (описано у розділі 1) використовує зовнішні сценарії соціально-економічного розвитку (представлені через валовий внутрішній продукт та кількість населення) та використання біоенергії для регіонів світу. Для базового сценарію та сценаріїв політик щодо зменшення емісій парникових газів у моделі GLOBIOM моделюються процеси виробництва та споживання, чистого експорту та цін на деревину та сільськогосподарську

продукцію. Ця інформація по секторах економіки з моделі GLOBIOM використовується у моделі G4M для прогнозування швидкості заліснення, швидкості знеліснення, заготівлі деревини та відповідних емісій та абсорбції вуглекислого газу для різних варіантів управління земельними ресурсами. Від моделі G4M до GLOBIOM передається геопросторова інформація про потенціал лісозаготівлі, середні розміри дерев (що необхідно для моделювання процесів виробництва товарів з деревини), вартість заготівлі деревини та ціну деревини у початковий момент моделювання.

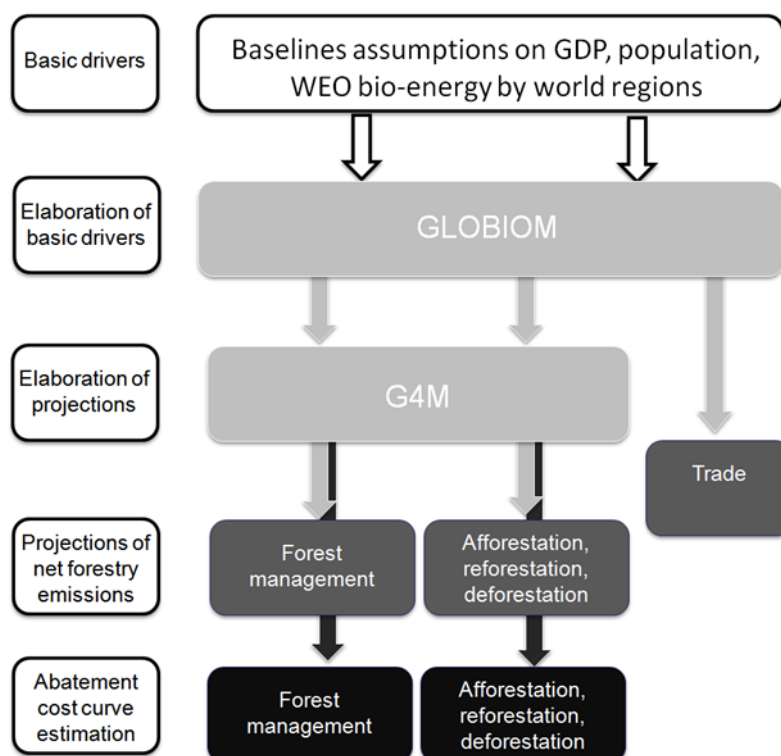


Рис. 5.6. Схема моделювання сценаріїв лісокористування та зміни землекористування з моделями G4M та GLOBIOM

У двох наступних комплексах інтегральної оцінки ця зв'язка моделей GLOBIOM та G4M зберігається, але вони разом включаються у більш складні структури. Крім того, від GLOBIOM до G4M на кожному кроці моделювання передається не лише ціна деревини, ціна сільськогосподарської землі та потреба у деревині для кожного регіону, а також кількість землі, яку у моделі GLOBIOM потрібно мати, щоб забезпечити функціонування сільського господарства. Додатково синхронізується ціна вуглецю у обох моделях.

### 5.3.2. Комплекс моделей інтегральної оцінки IIASA

Комплекс моделей інтегральної оцінки IIASA складається з шести взаємопов'язаних моделей (рис. 5.7): MESSAGE (оптимізація енергетичної системи), MACRO (макроекономічна оптимізація), MAGICC (відповідь кліматичної системи на антропогенні емісії парникових газів), GLOBIOM-G4M (землекористування, зміна землекористування, лісове господарство та біоенергетика), GAINS (розробка економічно ефективних стратегій для досягнення екологічних цілей щодо клімату, здоров'я людей та впливу на екосистеми). Комплекс моделей IAM керується відповідними прогнозами населення та ВВП за певними сценаріями соціально-економічного розвитку. [93].

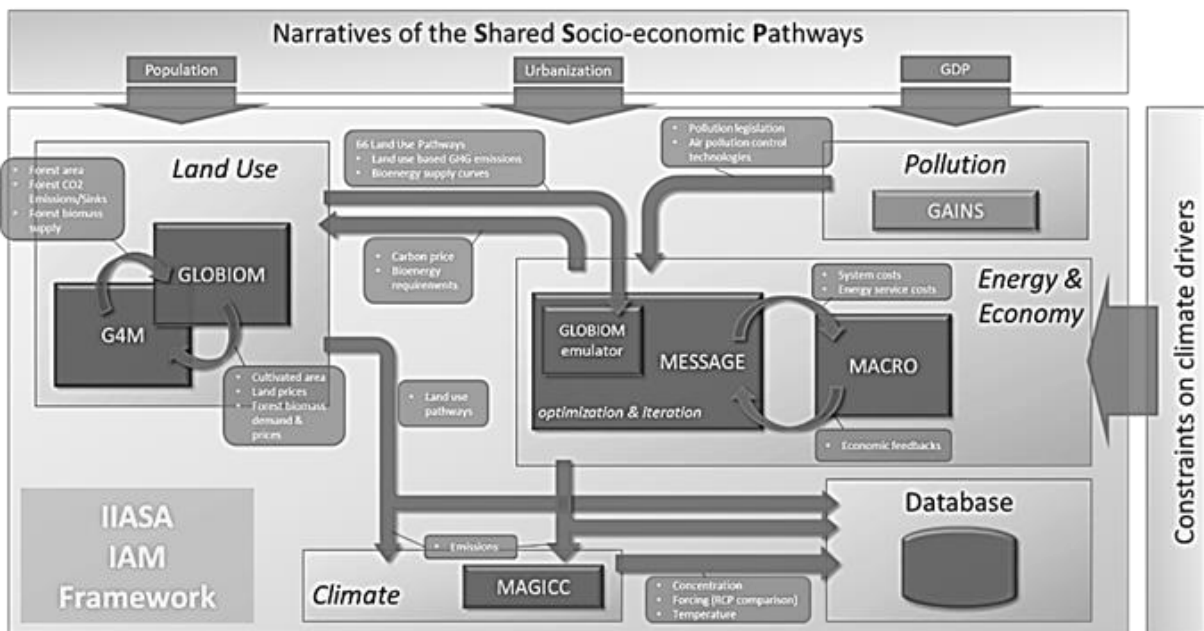


Рис. 5.7. Схематичне зображення комплексу інтегральної оцінки IIASA (IIASA IAM) [93]

В IIASA IAM енергетичної системи моделюється за допомогою моделі MESSAGE (модель для альтернатив стратегії постачання енергії та їхні загальні впливи на навколишнє середовище). Це глобальна модель оптимізації інженерних систем, яка використовується для планування довго- та середньострокових енергетичних систем [253]. У моделі MESSAGE світ розділено на 11 регіонів, у кожному з яких детально представлено енергетичну систему. Модель оптимізує частки різних варіантів постачання енергії в часі, щоб задовольнити визначені регіональні потреби в енергії за найнижчих

загальних витратах. MESSAGE має дуже широкий спектр технологій генерації енергії, що охоплюють технології видобутку ресурсів, перетворення палива, генерування електроенергії та тепла, а також технологій кінцевого використання енергії. Також у моделі MESSAGE обчислюють відповідні антропогенні емісії парникових газів, які можуть бути включені у цільову функцію оптимізації. [93].

Вплив забруднення повітря на екосистеми та здоров'я людей моделюють за допомогою моделі GAINS (Впровадження газоподібних газів - Впровадження забруднення повітря та синергія). Модель GAINS дозволяє розробляти економічно ефективні стратегії контролю викидів для досягнення екологічних цілей щодо клімату, здоров'я людини та впливу екосистем до 2030 року [4]. Ці впливи розглядаються у контексті комплексного забруднення рядом хімічних сполук та малих часток. У моделі враховано сполуки діоксиду сірки, оксидів азоту, аміаку, неметанові летючі органічні сполуки та викиди твердих часток, а також вуглецеві частинки. [93]

Модель MACRO використовують для моделювання макроекономіки. Модель MACRO ґрунтується на максимізації функції міжчасової корисності єдиного представника-виробника-споживача у кожному регіоні світу через оптимізацію. Результатом є послідовність оптимальних рішень щодо грошових збережень, інвестицій та витрат на споживання. Основними змінними моделі є кількість капіталу, наявна робоча сила та витрати енергії, які разом визначають загальний обсяг виробництва економіки, який визначають за допомогою виробничої функції з постійною еластичністю заміщення. [93]

Вплив парникових газів на цикл вуглецю та клімат моделюється за допомогою моделі MAGICC (Модель для оцінки зміни клімату, викликані парниковими газами). MAGICC – це модель енергетичного балансу зменшеної складності, яка включає підмоделі глобальної кліматичної системи та циклу вуглецю. У моделі обчислюють концентрації парникових газів в атмосфері на основі даних про емісії цих газів, підсилення радіаційного впливу, глобальну температуру поверхні землі, поглинання теплоти океаном. [93]

У IIASA IAM завданням моделі MESSAGE є оптимізація енергетичної системи таким чином, щоб вона могла задовольняти задані енергетичні потреби

за найнижчих витрат. Для цього MESSAGE взаємодіє ітераційно з макроекономічною моделлю MACRO, яка забезпечує оцінку реакції макроекономічного попиту на витрати на енергетичну систему та послуги, обчислені за допомогою моделі MESSAGE. Модель MACRO коригує корисний попит на енергію ітераційно, поки дві моделі не досягнуть рівноваги. Ця ітераційна процедура відображає підвищення цін на енергію, що відбувається при збільшенні цін на енергоносії. GLOBIOM та G4M надають моделі MESSAGE інформацію про землекористування, кількість та вартість біоенергії, потенціал та вартість зменшення емісій парникових газів в секторі сільського господарства, лісового господарства та інших типів землекористування. Щоб зменшити обчислювальні затрати, модель MESSAGE не взаємодіє безпосередньо з GLOBIOM та G4M підчас багатокрокової оптимізаційної процедури, а використовує дані з багатомірної таблиці (для різних цін вуглекислого газу та різних рівнів попиту на біоенергію), яку моделі GLOBIOM та G4M обчислюють наперед. Після того як за допомогою моделей MESSAGE і MACRO знайдено оптимальний розв'язок, знову використовують моделі GLOBIOM та G4M із заданим попитом на біоенергію та обмеженнями на емісії парникових газів, виражені через ціни на вуглекислий газ. [93]

Вплив забруднення повітря на екосистеми та здоров'я людей, спричиненого енергетичною системою, оптимізованою за допомогою моделі MESSAGE, обчислюється шляхом застосування коефіцієнтів забруднення навколишнього середовища, отриманих з моделі GAINS. Після цього, сумарні емісії парникових газів від землекористування, енергетики та промисловості, отримані за допомогою моделей MESSAGE, GLOBIOM і G4M, подаються на вхід моделі кліматичної системи та циклу вуглецю MAGICC, з допомогою якої обчислюють концентрації парникових газів в атмосфері, радіаційний вплив цих концентрацій і глобальне середнє підвищення температури поверхні землі. [93].



### 5.3.3. Комплекс моделей для аналізу референтних сценаріїв для країн Європейського Союзу

У випадку аналізу референтних сценаріїв для країн Європейського Союзу взаємодіють такі моделі [51, 75, 212] (рис. 5.8): глобальна стохастична модель енергетики PROMETHEUS, макроекономічна модель GEM-E3, модель енергетики країн ЄС PRIMES-Energy System, моделі постачання біомаси для енергетичних потреб PRIMES Biomass Supply, економетричної транспортної моделі PRIMES-TAPEM та транспортної моделі PRIMES-TREMOVE, економічної моделі часткової рівноваги CAPRI (сектор сільського господарства), а також моделі GAINS, GLOBIOM та G4M, розглянуті вище.

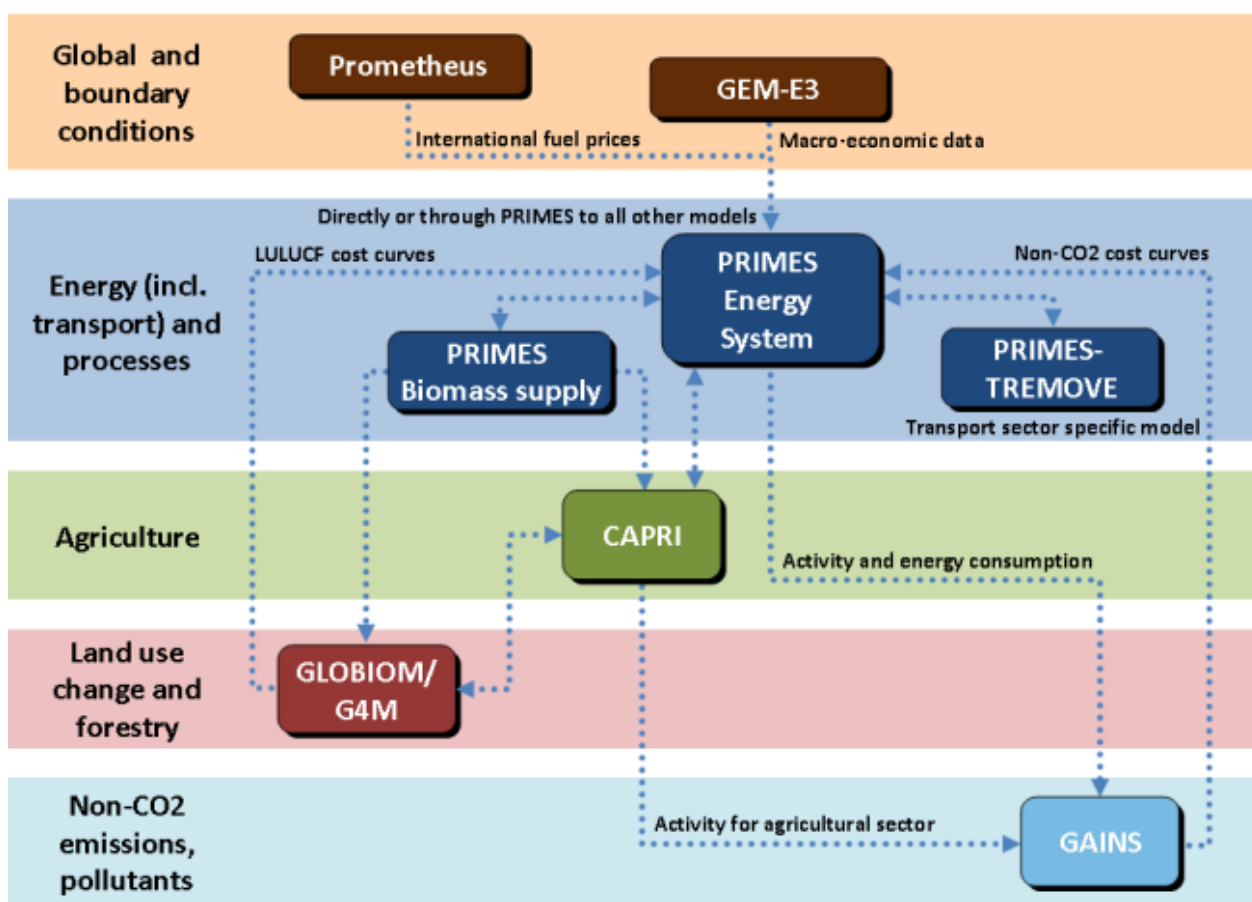


Рис. 5.8. Схематичне зображення взаємодії моделей у комплексі моделей для інтегральної оцінки референтних сценаріїв для країн Європейського Союзу [51].

PROMETHEUS - це стохастична модель світової енергетики, яка використовується для оцінки невизначеностей та ризиків, пов'язаних із економічним зростанням та доступністю енергетичних ресурсів, а також

впливом політичних рішень. Модель прогнозує ціни на енергію, пропозицію та попит на енергію, а також емісії парникових газів для десяти світових регіонів. Траєкторії світової ціни на викопні енергоносії використовують для визначення імпорتنих цін на енергоносії для референтного сценарію для ЄС та сценаріїв політик [75, 212, 240].

Модель GEM-E3 - це економічна модель загальної рівноваги, яка одночасно представляє світову економіку, її основні регіони та 28 країн-членів ЄС, пов'язані через внутрішні двосторонню торгівлю та взаємодію через навколишнє середовище. У моделі враховано взаємодію між економікою, енергетичною системою та навколишнім середовищем. Це комплексна модель економіки, виробничих секторів, споживання, ціноутворення товарів, робочої сили та капіталу, інвестицій та динамічного зростання. У моделі використовують дані ЄВРОСТАТ та країн ЄС, а також дані Проекту аналізу глобальної торгівлі (Global Trade Analysis Project – GTAP) [50]. У цій схемі інтегрального аналізу модель GEM-E3 використовують для прогнозування макроекономічних параметрів для референтного сценарію та сценаріїв політик, які використовують у інших моделях, включаючи G4M та GLOBIOM.[51, 75]

Модель PRIMES - це модель енергетичної системи ЄС, яка імітує споживання енергії та систему енергопостачання. PRIMES є моделлю часткової рівноваги енергетичного ринку в Європейському Союзі та кожній країні ЄС. У моделі враховують ціну емісій вуглекислого газу в енергетичному секторі та промисловості. У моделі є підмодулі для детального моделювання транспортної системи (PRIMES-TAPEM та PRIMES-TREMOVE) та постачання біомаси (PRIMES Biomass Supply). Модель калібрують за даними ЄВРОСТАТ [239]. Для врахування емісій інших парникових газів, а також кривих граничних витрат на зменшення цих емісій модель об'єднують із моделлю GAINS. До моделей G4M та GLOBIOM передається інформація про попит на біоенергію (зокрема біомасу як джерело енергії), а отримують емісії парникових газів від лісокористування, сільського господарства та зміни землекористування, а також криві граничних витрат на зменшення цих емісій.[212]

CAPRI - це економічна модель часткової рівноваги, яку використовують для підтримки прийняття рішень стосовно Спільної сільськогосподарської політики та екологічної політики ЄС, пов'язаної з сільським господарством. Це модель з відкритим кодом, яка розробляється і використовується пан-європейською мережею науковців [26]. У цій схемі інтегральної оцінки модель використовують для розробки узгоджених прогнозів діяльності у сільському господарстві.[51, 212]

У цій схемі інтегральної оцінки застосовують спеціальні версії G4M та GLOBIOM для Європейського Союзу. У G4M, зокрема, використано геопросторову інформацію про заготівлю деревини у 2000-2010рр., про переважаючі деревні породи, функції росту для основних груп деревних порід, функції обчислення повної біомаси дерев (див. розділ 3). У GLOBIOM виділяють країни ЄС та агреговані регіони для решти світу [88, 89].

#### **5.3.4. Комплекс моделей для аналізу потенціалу зменшення емісій CO<sub>2</sub>, коштів на зменшення емісій та визначення референтних рівнів емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування для країн ЄС**

Для аналізу потенціалу зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування, сільського господарства та зміни землекористування, відповідних коштів на зменшення емісій, а також визначення референтних рівнів емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування у країнах ЄС використовували модель G4M зв'язану з моделями GLOBIOM та EFISCEN (рис. 5.9). Оскільки у цій схемі використовували глобальну версію моделі GLOBIOM, то для детального моделювання сільського господарства та виробництва біоенергії у країнах ЄС використовували економічну модель часткової рівноваги EUFASOM [269] (яка побудована на таких же принципах як і GLOBIOM) а GLOBIOM для решти світу. Модель процесів росту сільськогосподарських культур EPIC [317, 331] використовували для отримання геопросторової інформації про урожайність різноманітних сільськогосподарських культур. Для надійності результатів аналізу емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування паралельно із G4M застосовували

модель EFSCEN, вхідні параметри якої отримують із детальних національних інвентаризацій лісів. Від моделі G4M до EFSCEN передавали інформацію про швидкості заліснення та знеліснення, а отримували дані про середню щільність деревини та вікову структуру лісу. Обидві моделі отримували через модель GLOBIOM однакову інформацію про попит на деревину у країнах ЄС, а G4M ще додатково отримувала інформацію про ціну деревини і сільськогосподарської землі. Як і в попередній схемі моделювання модель PRIMES використовували для отримання інформації про попит на біоенергію, а модель CAPRI – про функціонування сільського господарства у країнах ЄС. Модель POLES [61, 180] використовували для отримання інформації про попит на біоенергію за межами ЄС [21, 24].

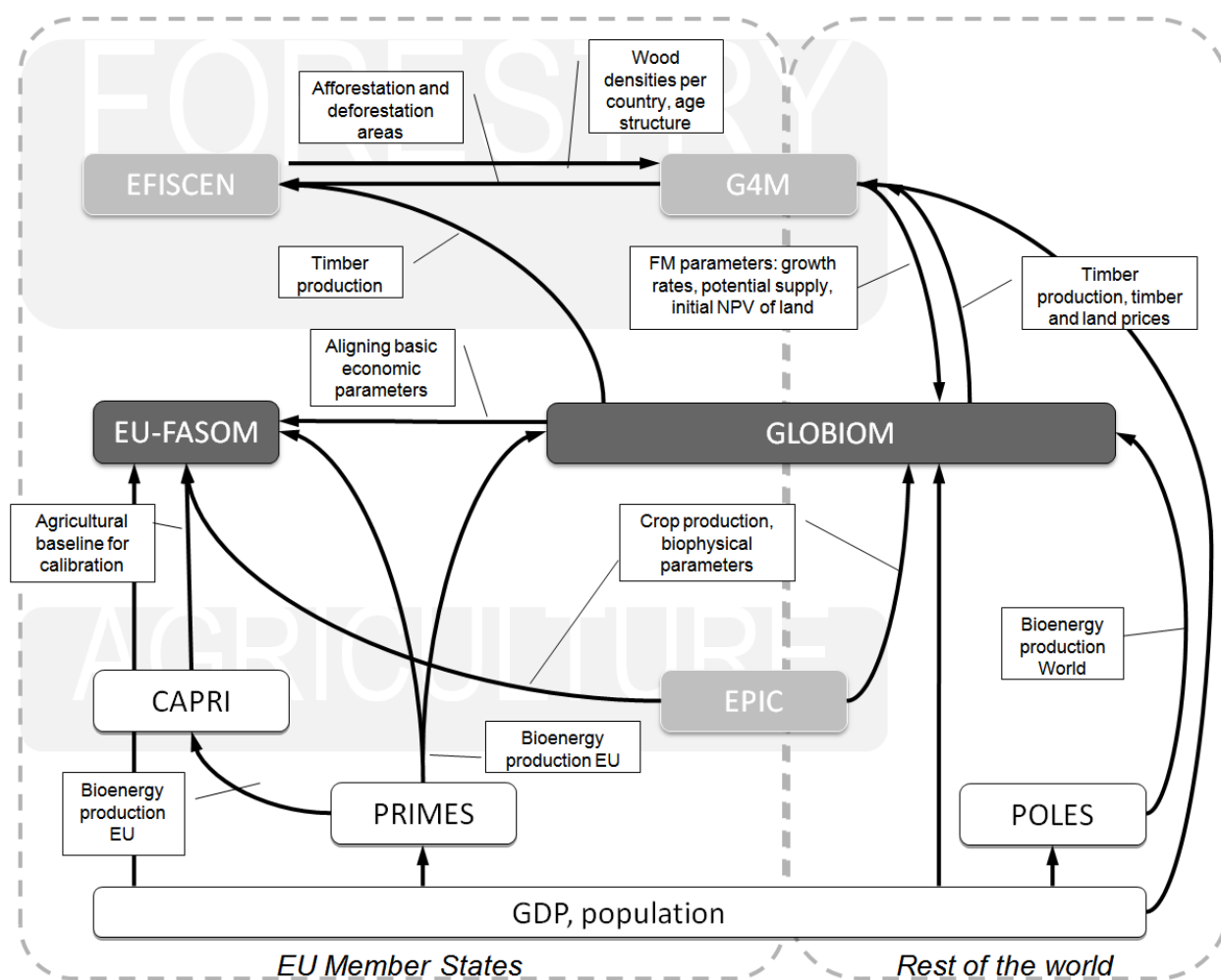


Рис. 5.9. Блок-схема обміну даними між моделями для аналізу потенціалу зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування, сільського господарства та зміни землекористування у країнах ЄС [21, 24]

EFISCEN (European Forest Information Scenario) – це модель, яка оцінює об'єм заготівлі деревини та біомаси з лісів та прогнозує розвиток лісових ресурсів на регіональному та європейському рівнях. У моделі, зокрема, використовують такі дані інвентаризації лісів як: площа (га), середній запас ( $\text{м}^3/\text{га}$ ) та чистий річний приріст ( $\text{м}^3/\text{га}/\text{рік}$ ). Ці дані структуровані за географічним регіоном, власниками лісу, продуктивністю, породами та віковими класами. Стан лісу описується як розподіл площі за класами віку та класами запасу в матрицях. Під час моделювання площа лісу переміщується між елементами матриці, імітуючи різні природні процеси (наприклад, зростання та відпад) та дії людей (наприклад, рубки догляду та головного користування). Динаміка росту імітується зміною пропорцій площі між елементами матриці. У кожному 5-річному періоді часу площа в кожному елементі матриці переміщується на один віковий клас для моделювання старіння лісу. Частина площі елемента матриці також рухається до більш високого класу запасу, тим самим імітуючи приріст запасу. Динаміка росту лісу визначається за допомогою функцій росту, які калібрують за даними інвентаризації лісів. [21, 24, 265]

#### **5.4. Прогноз базових емісій та потенціалу зменшення емісій на глобальному рівні**

##### **5.4.1. Опис чисельного експерименту**

Для отримання узгоджених прогнозів емісій  $\text{CO}_2$  від лісогосподарської діяльності у країнах до 2050 року модель лісового господарства G4M поєднано з моделлю економічного землекористування (GLOBIOM) [20, 116] (схема моделювання 1, розділ 5.3.1). Економічна модель землекористування GLOBIOM використовує базові прогнози на основі результатів моделі енергії POLES [61, 180] для майбутнього попиту на біоенергію та відповідних припущень щодо зростання населення, економічного розвитку (ВВП) та темпів технічного прогресу як макроекономічних факторів. ВВП та прогноз чисельності населення також безпосередньо використано у моделі G4M. Ми застосовуємо метод, опублікований у [116, 20], але використовуємо оновлені дані, зокрема,

результати моделі енергетики POLES та огляд світової енергетики, дані звіту ФАО про лісові ресурси 2015р. [106], а також звіти країн до РКЗК ООН у формі таблиць CRF 2014-2016рр.

Моделі G4M та GLOBIOM використовують три типи джерел вхідних даних, деякі доступні для кожної клітинки растру, окремі для країн та регіонів, а інші - глобальні. Основні джерела даних наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Основні джерела даних

Дані	Рік	Джерело
<b>Геопросторові дані (растр)</b>		
Площа землі	2000	GLC, 2000 [303]
Площа лісу	2010	FAO FRA, 2010 [105]
Чиста первинна продукція	-	[60]
Площа землі під будівлями та інфраструктурою	2010-2050	[307]
Біомаса	2005	[175]
Щільність населення	1990-2020	[53]
Щільність населення	1990-2050	[112]
<b>Дані для країн</b>		
ВВП за купівельною спроможністю	2005	[334]
Коефіцієнти дисконтування, з врахуванням ризиків	2004	[14]
Фактор корупції	2005	[176] на основі даних [169]
Частка довгоживучих продуктів	2000–2010	FAO FRA, 2010 [105]
<b>Сценарії для регіонів</b>		
WEO bioenergy scenario (попит на біоенергію)	2013	WEO, 2013 [336]
POLES	2014	POLES, 2014 [61]

Обидві моделі розв'язують для базового сценарію (при нульовій ціні вуглецю). Модель G4M також розв'язують при цінах вуглецю 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, 100, 110, 120, 140, 150, 180, 200, 300, 500, 1000, 2000, при цьому застосовують три траєкторії зміни ціни вуглецю: кубічно-кореневу, лінійну та кубічну (рис. 5.10). Ціна вуглецю є глобальною, розпочинається з нульового значення у 2015р., а далі змінюється за вибраною траєкторією до максимального значення у цільовому році (2020, 2025, 2030, 2040, 2050). Для кожної траєкторії ціни вуглецю будують криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub>. [20, 116].

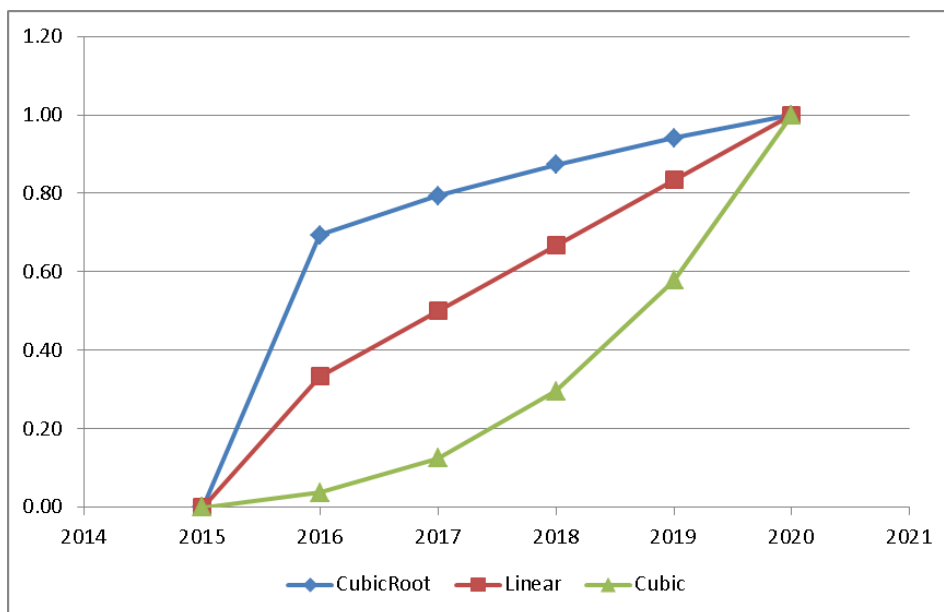


Рис. 5.10. Траєкторії зміни ціни вуглецю (кубічно-коренева, лінійна та кубічна).

#### 5.4.2. Сценарії соціально-економічного розвитку для проведення експериментів

У експерименті використовували сценарій соціально-економічного розвитку та попиту на біоенергію на основі результатів огляду світової енергетики від Міжнародної асоціації енергетики та глобальної моделі енергетичної моделі POLES. В сценарії визначається прогноз ВВП, швидкість зростання кількості населення та попит на біоенергію.

Згідно сценарію POLES глобальний ВВП та кількість населення зростає. Разом з розвитком цих факторів попит на біоенергетику також зростає. У моделі GLOBIOM зміни ВВП та кількості населення впливають на попит на вироби з деревини (пиломатеріали та біомаса), а також на попит на продукти харчування та корм для худоби. Зростання, головним чином, ВВП та населення збільшує попит на вироби з деревини. [192]. Зростання попиту на біоенергетику, в основному, пов'язаний з традиційним джерелом біомаси - лісозаготівля. Попит на біопаливо першого покоління збільшується з часом. Попит на біопаливо другого покоління зростає повільно до 2020 року, а згодом перевершують попит на біопаливо першого покоління (рис. 5.11).

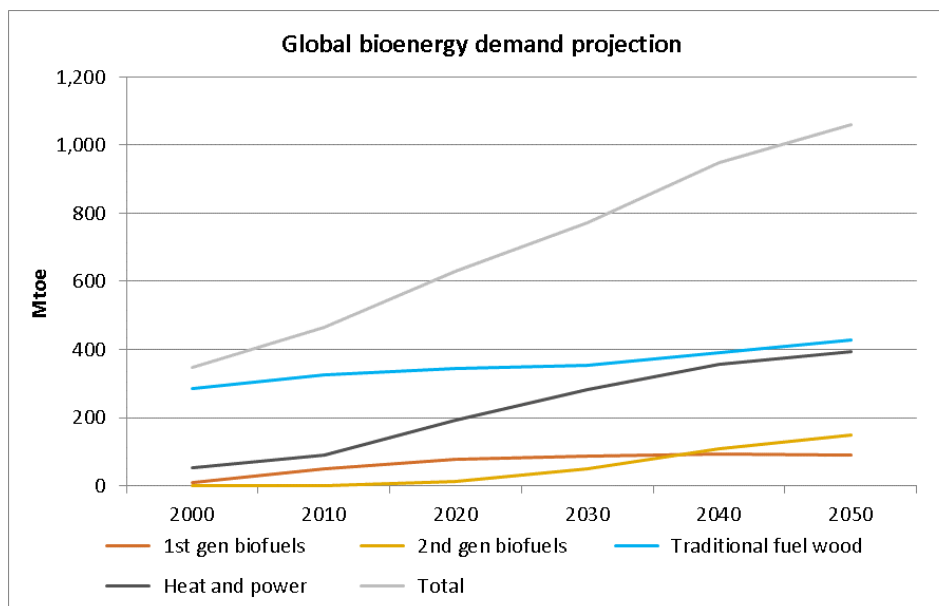


Рис. 5.11. Глобальний попит на біоенергію, МтНе, згідно сценарію POLES [82]

У моделі GLOBIOM інформація про ВВП, кількість населення та попит на біоенергію перетворюється, зокрема, у попит на деревину (включаючи паливну деревину), ціну на деревину та ціну на сільськогосподарську землю. Глобальний попит на деревину збільшується з 1088 Мм<sup>3</sup> у 2010р до 1761 Мм<sup>3</sup> у 2050р. Середня ціна деревини зростає від 42 \$/м<sup>3</sup> у 2010р. до 57 \$/м<sup>3</sup> у 2050р. (рис. 5.12), а середня ціна на сільськогосподарську землю зростає від 282 \$/га у 2010р. до 346 \$/га у 2050р. (рис. 5.13).



Рис. 5.12. Середня глобальна ціна деревини за результатами моделі GLOBIOM



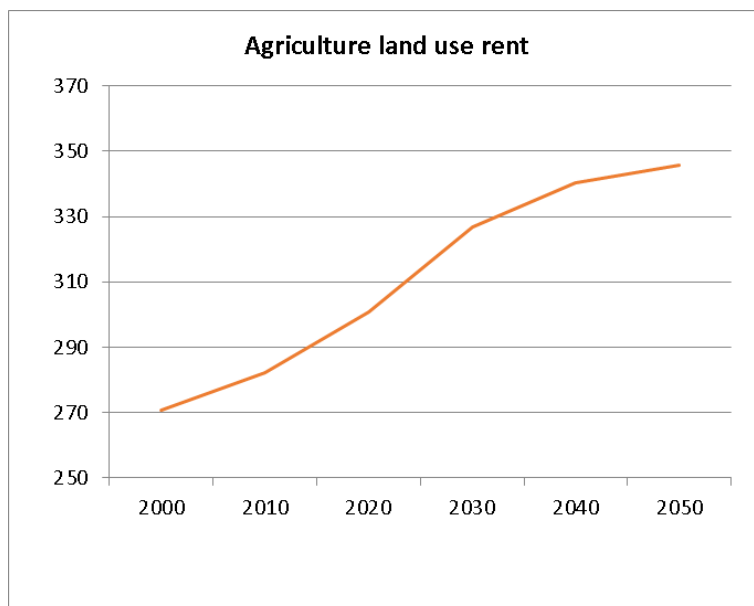


Рис. 5.13. Середня глобальна ціна сільськогосподарської землі за результатами моделі GLOBIOM

Для аналізу потенціалу зменшення емісій розглядаємо сценарії зміни ціни вуглецю за трьома траєкторіями - лінійною, кубічною та кубічно-кореневою, яку запроваджують з 2015р. (див. секцію 5.4.1). [20, 116].

### 5.4.3. Результати дослідження

Глобальними факторами у моделі G4M є прогнози попиту на деревину, ціни на деревину та ціни на сільськогосподарські землі. Відповідно до зміни цих факторів (див. попередню секцію) G4M прогнозує збільшення швидкості заліснення починаючи з 2000 року до максимуму у 2020 році на рівні 6.9 Мга/рік (рис. 5.14). Зростання швидкості заліснення, в значній мірі, обумовлено зростанням цін на деревину від 28 \$/м<sup>3</sup> у 2000 році до 51 \$/м<sup>3</sup> у 2020 році, що саме зумовлено зростанням споживання товарів деревини та збільшенням попиту на біоенергію. Після 2020р. швидкість заліснення зменшуються до 5 Мга/рік у 2030 році і до 3.8 Мга/рік у 2050 році. Зменшення швидкості заліснення, в основному, пояснюється тим, що 1) після 2020 року ціна на сільськогосподарську землю зростають швидше, ніж ціна на деревину; 2) наявністю меншої кількості доступних місць для заліснення, оскільки площа лісів зростає і вступає в конкуренцію за землю з іншим землекористуванням; 3)

значні додаткові обсяги деревини надходять від збільшення лісозаготівлі в існуючих лісах.

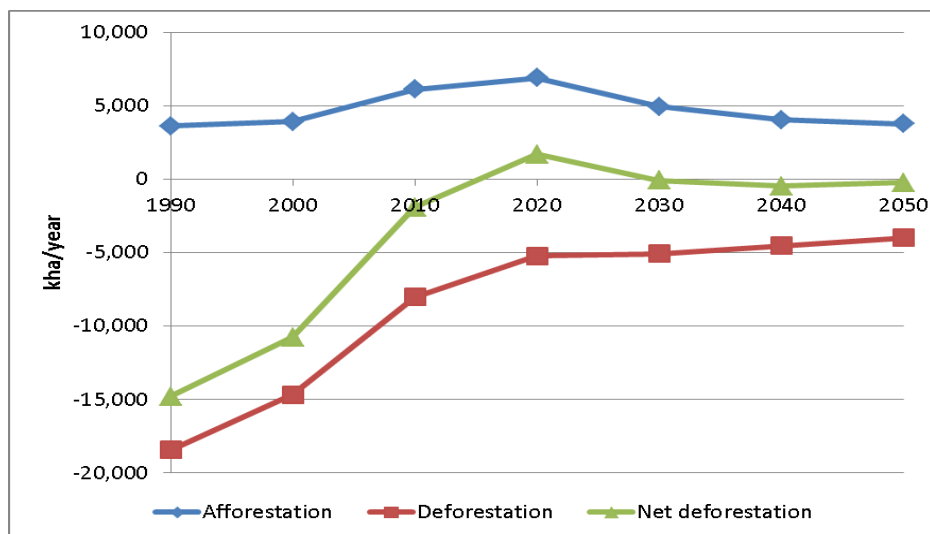


Рис. 5.14. Глобальна швидкість заліснення, знеліснення та зміни площі лісу при нульовій ціні вуглецю

Швидкість знеліснення зменшуються в глобальному масштабі з приблизно 14.7 Мга/рік у 2000 році до менше, ніж 8 Мга/рік після 2010 року і до 4 Мга/рік у 2050 році. Зменшення швидкості знеліснення в глобальному масштабі пояснюється, значною мірою, скороченням загальної площі лісів: чим менше залишок площі лісу, тим менша щорічна втрата лісу, оскільки ціна деревини (а отже і вартість лісу) зростає при скороченні площі лісу. Оскільки модель GLOBIOM прогнозує збільшення попиту на деревину – це призводить до більш швидкого зростання ціни деревини і, відповідно, NPV лісового господарства, особливо в країнах з відносно невеликими лісовими територіями. Зміна площі лісу (різниця між залісненням і знелісненням) в усьому світі зменшується до 2015 року, а потім зростає у 2020-2025 роках, коли швидкість знеліснення стає меншою швидкості заліснення і залишається дещо меншою за нуль у 2030-2050 роках, коли швидкість заліснення зменшується.

Поглинання вуглекислого газу посадженими лісами постійно зростає. Це сукупний ефект збільшення площі нових лісів та того, що посаджені ліси досягають фази росту з більш високим приростом. Але швидкість поглинання вуглекислого газу зменшиться, коли посаджені ліси перейдуть у фазу росту з низьким приростом. З іншого боку, площа знеліснення та емісії від знеліснення

є тісно пов'язаними. Тут емісії виникають безпосередньо від площі лісу, яку знелісняють, плюс емісії з ґрунтів лісів, які знеліснили у попередні роки. Емісії з ґрунту після знеліснення, звичайно, у два-чотири рази нижчі, ніж емісії з біомаси, тому часовий лаг між площею знеліснення та сумарними емісіями від знеліснення є суттєвими величинами в глобальному масштабі (рис. 5.15).

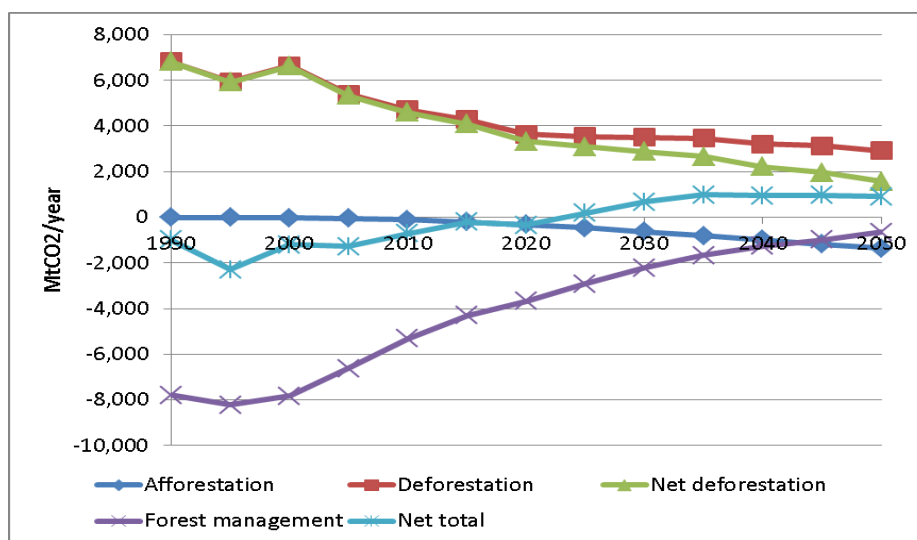


Рис. 5.15. Глобальні емісії від заліснення, знеліснення та лісокористування при нульовій ціні вуглецю

Глобальний потенціал зменшення сумарних емісій (завдяки залісненню, зменшенню знеліснення та оптимізації ведення лісового господарства) змінюється від 3444 МтСО<sub>2</sub>/рік у 2020 році (всі траєкторії ціни вуглецю) до 4416 МтСО<sub>2</sub>/рік у 2050 році, якщо ціна вуглецю зростає за кривою з формою кубічного кореня. Відсутність різниці в потенціалах зменшення емісій між трьома траєкторіями зміни ціни вуглецю у 2020 році пояснюється тим, що, оскільки глобальна версія G4M працює з 5-річним часовим кроком, то у 2020 році ці три траєкторії зміни ціни вуглецю ідентичні (рис. 5.10). Різниця в потенціалах зменшення емісій за різними траєкторіями ціни вуглецю є більшою при нижчих цінах вуглецю з максимумом при ціні вуглецю 30-40 \$/тС. Різниця також збільшується з часом, коли оцінюється потенціал зменшення емісій. При кубічній траєкторії ціни потенціал зменшення емісій є найнижчий, а при траєкторії ціни кубічного кореня є найбільшим. При ціні вуглецю нижче 50 \$/тС у 2025 та 2030 рр. різниця потенціалів зменшення емісій між кубічною та кубічно-кореневою траєкторіями ціни досягає 350 та 593 МтСО<sub>2</sub>/рік відповідно;

при ціні вуглецю 30 \$/тС різниця потенціалів зменшення емісій між кубічно-кореневою та лінійною траєкторіями становлять 132 та 219 МтСО<sub>2</sub>/рік, тоді як при цінах вуглецю більших 200 \$/тС різниця в потенціалах є меншою 50 МтСО<sub>2</sub>/рік. У 2050р. різниця потенціалів зменшення емісій між кубічною та кубічно-кореневою траєкторіями ціни на рівні 2000 \$/тС досягає 332 МтСО<sub>2</sub>/рік (рис. 5.16).

Різниця потенціалів зменшення емісій при різних траєкторіях зміни ціни вуглецю може бути пояснена тим, що деякі процеси емісій СО<sub>2</sub> тривають багато років. Оскільки при кубічній траєкторії ціни вуглецю значення ціни вуглецю зростає повільніше аж до останнього моменту, події, що зупиняють знеліснення, стимулюють заліснення та більш інтенсивне лісокористування (через меншу кількість деревини від знеліснення), відбувається пізніше, ніж при лінійній або кубічно-кореневій траєкторіях. При кубічно-кореневій траєкторії ціни вуглецю зупинка знеліснення, стимулювання заліснення та інтенсивне лісокористування відбуваються раніше, ніж при інших траєкторіях ціни вуглецю. Крім того, існує низка цін вуглецю (в середньому 10-40 \$/тС), при яких процеси зупинки знеліснення та стимулювання заліснення найбільш чутливі до зміни ціни вуглецю (різниця в ціні вуглецю завдяки різним траєкторіям зміни ціни має максимальний ефект).

Потенціал зменшення емісій (збільшення поглинання) від заліснення при зміні ціни вуглецю за кубічно-кореневою траєкторією є найбільшим тому, що більше лісів садять протягом більш ранніх періодів часу (оскільки ціна вуглецю зростає швидше), що призводить до більшого накопичення вуглецю в біомасі, підстилці та ґрунті. Швидкість росту лісу залежить від віку і зростає, коли ліс досягає віку, коли приріст є найбільшим (цей вік залежить від породи дерев та умов зростання).

Потенціал зменшення емісій від знеліснення при кубічно-кореневій траєкторії ціни є найбільшим через повільне розкладання порушених ґрунтів. Якщо знеліснення зупинити раніше, менші емісії з порушеного ґрунту спостерігаються в наступні роки (якщо клітинки з однаковою кількістю вуглецю та швидкістю розкладання ґрунту будуть знеліснені).

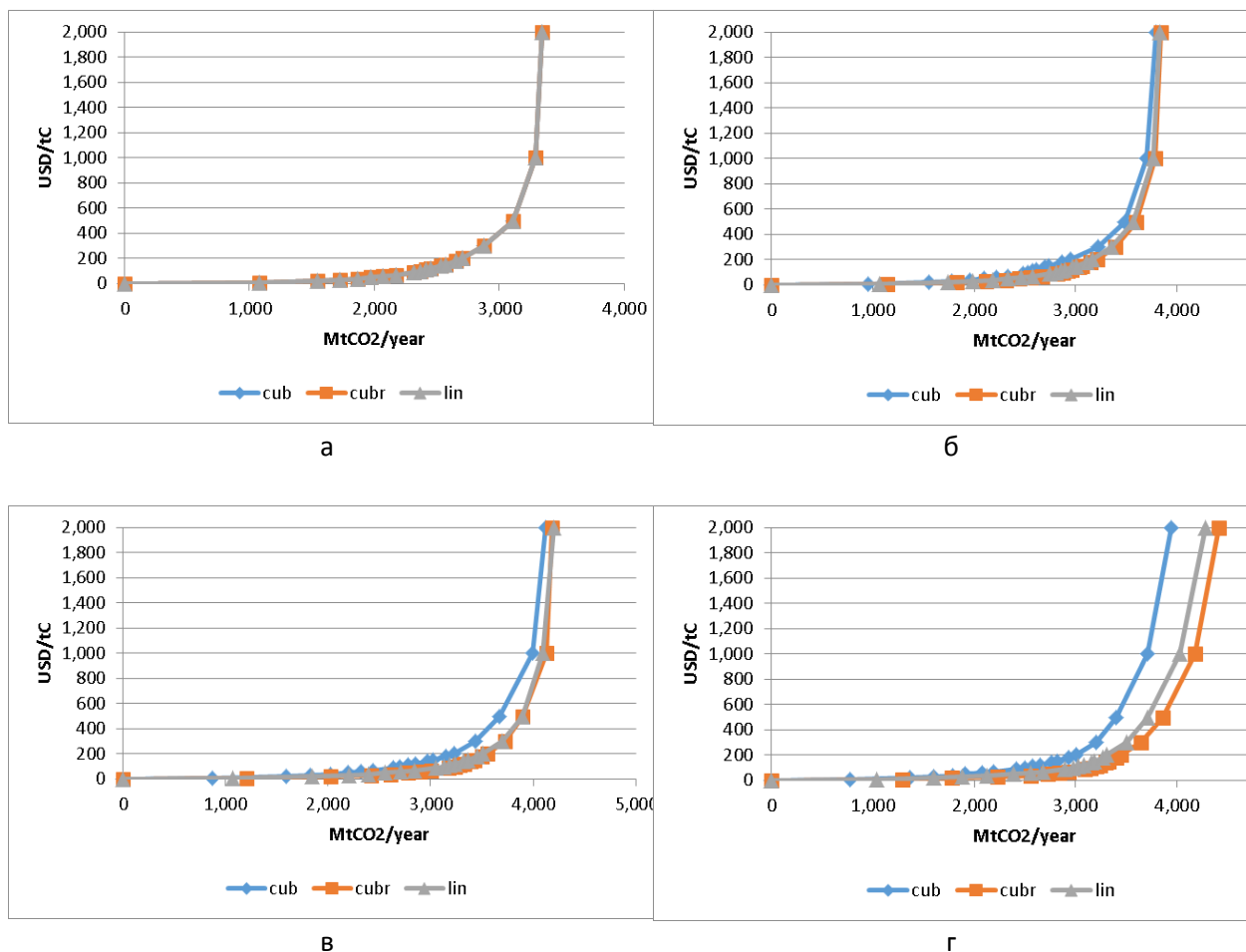


Рис. 5.16. Глобальні сумарні потенціали зменшення емісій для трьох траєкторій зміни ціни вуглецю у 2020 (а), 2025 (б), 2030 (в) та 2050 (г) роках, MtCO<sub>2</sub>/рік.

Потенціал зменшення емісій від лісозаготівлі залежить від часу впровадження зміни у параметри лісокористування. Існують чотири взаємозв'язані процеси, пов'язані з ненульовою ціною вуглецю: 1) продовження часу обороту рубки, що призводить до накопичення біомаси (тобто, поглинання CO<sub>2</sub>), зменшення лісозаготівлі, старіння лісу та, як наслідок, уповільнення швидкості накопичення біомаси з часом; 2) залучення нових посаджених лісів до процесу лісозаготівлі для компенсації зменшення лісозаготівлі, що призводить до втрати біомаси (тобто емісій CO<sub>2</sub>); 3) скорочення знеліснення, що призводить до скорочення кількості деревини, отриманої внаслідок знеліснення, що повинно компенсуватися збільшенням лісозаготівлі (збільшення лісозаготівлі призводить до втрати біомаси, тобто емісій CO<sub>2</sub>), і 4) збільшенням швидкості заліснення, що через деякий час у майбутньому сприятиме лісозаготівлі з посадженого лісу та відповідно зменшенню лісозаготівлі у старому лісі. Залежно від частки кожного

з процесів, більш ранні терміни зміни параметрів лісокористування дають менший або більший ефект зменшення емісій. У більшості країн зміна ціни вуглецю за кубічно-кореневою траєкторією дозволяє отримати найбільший ефект пом'якшення наслідків.

Потенціал збільшення негативних емісій (поглинання) від заліснення у 2030 році становить менше 1% у загальному обсязі скорочення емісій (рис. 5.17). Це пов'язано, в основному, з відносно низькими темпами росту посаджених лісів (в середньому у глобальному масштабі) та високою швидкістю заліснення при нульовій ціні вуглецю (див. рис. 5.14).

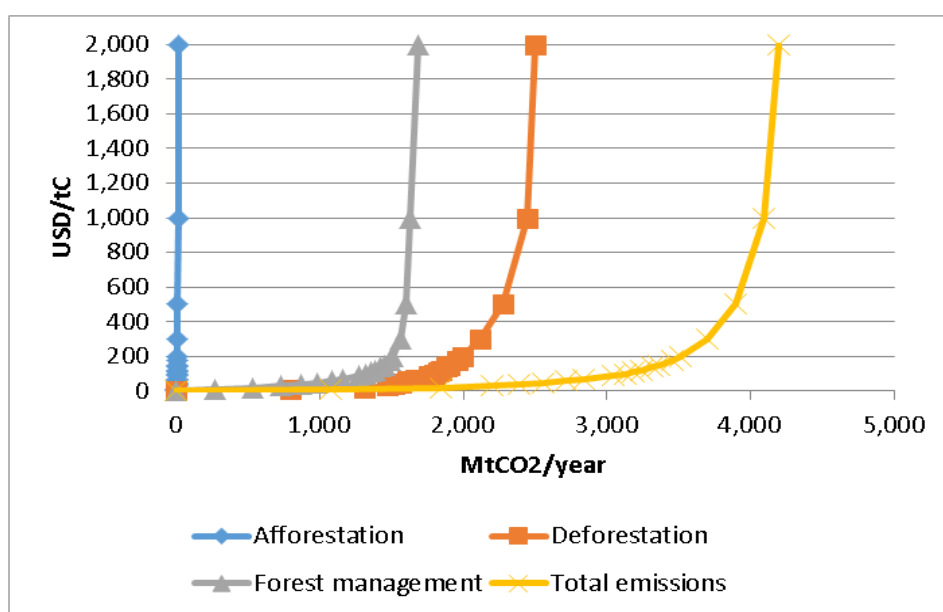


Рис. 5.17. Глобальні потенціали зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення, знеліснення, лісокористування та сумарний у 2030р, МтCO<sub>2</sub>/рік при лінійній траєкторії зміни ціни вуглецю.

Крім того, уникнення знеліснення зменшує кількість землі, доступної для альтернативного землекористування, і тому обмежує потенціал лісонасадження. Навпаки, потенціал зменшення емісій від знеліснення є порівняно високим (приблизно 70% сумарного потенціалу при ціні вуглецю нижче 30 \$/тC і приблизно 60% при більш високих цінах вуглецю). У 2030 році потенціал зменшення емісій становить приблизно 1993 МтCO<sub>2</sub>/рік при ціні вуглецю 200 \$/тC (для заліснення та знеліснення розглядаємо емісії з біомаси, мертвої органічної речовини та ґрунту, а для лісозаготівлі - лише емісії з біомаси; при лінійній траєкторії зміни ціни вуглецю) із збільшенням до 2499 МтCO<sub>2</sub>/рік при

2000 \$/тС. Потенціал зменшення емісій від лісокористування становить приблизно 30% від сумарного потенціалу при ціні вуглецю нижче 30 \$/тС, і приблизно 40% при більш високих цінах на вуглецю.

## 5.5. Дослідження сценаріїв спільних соціально-економічних шляхів та репрезентативних шляхів зміни концентрації парникових газів в атмосфері (SSP/RCP)

### 5.5.1. Опис чисельного експерименту

Для дослідження сценаріїв спільних соціально-економічних шляхів (Shared Socio-economic Pathways - SSP) та репрезентативних шляхів зміни концентрації парникових газів в атмосфері (Representative Concentration Pathways - RCP) використовували схему моделювання, описану у розділі 5.3.2. Розробку сценаріїв розпочали у 2011 році, зокрема, в рамках роботи над 5 звітом IPCC (Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC AR5) [93, 236, 255]. Взагалі, розроблено 5 SSP сценаріїв та ряд RCP сценаріїв. Сценарії накладаються один на одного, формуючи матрицю (рис. 5.18) для дослідження можливостей зменшення емісій парникових газів та концентрації парникових газів в атмосфері і, відповідно, стабілізації кліматичної системи на заданих рівнях при різних шляхах соціально-економічного розвитку [255, 322].

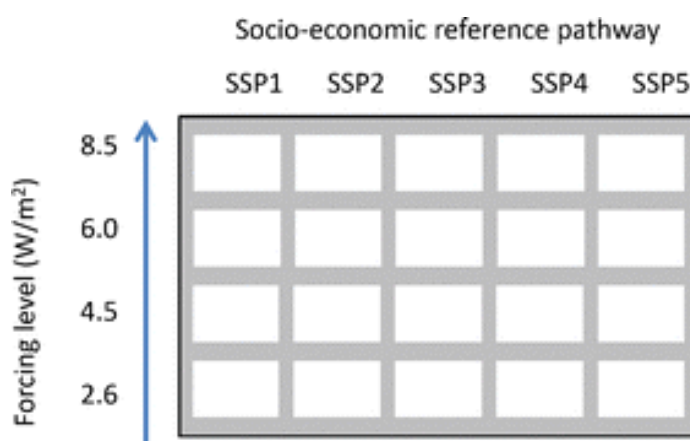


Рис. 5.18. Комбінація сценаріїв соціально-економічного розвитку, SSP1-SSP5, та сценаріїв шляхів репрезентативних концентрацій парникових газів, RCP [322].

На другому етапі проводили роботу по числовій оцінці сценаріїв, для чого було сформовано 5 дослідницьких груп, кожна з яких відповідала за один з

сценаріїв SSP та додатково для порівняння проводила моделювання інших сценаріїв, якщо їх моделі дозволяли це робити. Результати моделювання були поміщені у спеціальну базу даних сценаріїв IIASA [236, 255]. Модель G4M у складі комплексу моделей інтегральної оцінки IIASA (IIASA IAM) (схема моделювання 2, розділ 5.3.2) використовувалась для чисельної оцінки сценаріїв SSP2 та додатково сценаріїв SSP1 та SSP3 (рис. 5.19.) [93, 255].

	AIM	GCAM	IMAGE	MESSAGE-GLOBIOM	REMIND-MAgPIE	WITCH-GLOBIOM
SSP1-Reference	X	X	M	X	X	X
SSP1-6.0	NR	NR	NR	NR	NR	X
SSP1-4.5	X	X	M	X	X	X
SSP1-3.4	X	X	M	X	X	X
SSP1-2.6	X	X	M	X	X	X
SSP2-Reference	X	X	X	M	X	X
SSP2-6.0	X	X	X	M	X	X
SSP2-4.5	X	X	X	M	X	X
SSP2-3.4	X	X	X	M	X	X
SSP2-2.6	X	X	X	M	X	X
SSP3-Reference	M	X	X	X	NR	X
SSP3-6.0	M	NR	X	X	NR	X
SSP3-4.5	M	NR	X	X	NR	X
SSP3-3.4	M	NR	X	X	NR	X
SSP3-2.6	No solution	NR	No solution	No solution	NR	No solution
SSP4-Reference	X	M	NR	NR	NR	X
SSP4-6.0	NR	M	NR	NR	NR	X
SSP4-4.5	X	M	NR	NR	NR	X
SSP4-3.4	X	M	NR	NR	NR	X
SSP4-2.6	X	M	NR	NR	NR	X
SSP5-Reference	X	X	NR	NR	M	X
SSP5-6.0	X	X	NR	NR	M	X
SSP5-4.5	X	X	NR	NR	M	X
SSP5-3.4	X	X	NR	NR	M	X
SSP5-2.6	X	X	NR	NR	M	No solution

Рис. 5.19. Сценарії SSP/RCP та моделі, за допомогою яких проводили чисельну оцінку цих сценаріїв (позначено синім та зеленим кольором); синій M означає групу сценаріїв, для яких задана модель була основною (Marker); сірий означає групу сценаріїв, для якої задану модель не використовували; червоний означає групу сценаріїв, умови яких є недосяжними для заданої моделі [255].

Вхідні дані, які використовували у моделі G4M наведено у таблиці 5.2.



Таблиця 5.2 Основні джерела даних

Дані	Рік	Джерело
<b>Геопросторові дані (растр)</b>		
Площа землі	2000	GLC, 2000 [303]
Площа лісу	2010	FAO FRA, 2010 [105]
Чиста первинна продукція	-	[60]
Площа землі під будівлями та інфраструктурою	2010-2050	Tubiello and Fischer (2007) [307]
Біомаса	2005	[175]
Щільність населення	1990-2020	[53]
Щільність населення	1990-2100	SSP database [290]
Земля для сільського господарства	200-2100	GLOBIOM
<b>Дані для країн</b>		
ВВП за купівельною спроможністю	2005	[334]
Коефіцієнти дисконтування - 5%		
Фактор корупції	2005	[176] на основі даних [169]
Частка довгоживучих продуктів	2000–2010	FAO FRA, 2010 [105]
<b>Сценарії для регіонів</b>		
ВВП для сценаріїв SSP1, SSP2, SSP3	2013	SSP database [290]
Ціни деревини, сільськогосподарської землі, вуглекислого газу; попит на деревину - для сценаріїв SSP1, SSP2, SSP3 та RCP-1.8, RCP-1.9, RCP-2.0, RCP-2.6, RCP-3.7, RCP-4.5	2000-2100	GLOBIOM

Спочатку за допомогою моделей G4M та GLOBIOM формують криві граничних витрат на зменшення емісій парникових газів від лісокористування, зміни землекористування та сільського господарства, криві постачання біомаси для вироблення біоенергії для кожного з трьох сценаріїв SSP1, SSP2 та SSP3 і рівнів використання біоенергії (BIO00, BIO01, BIO02, BIO03, BIO04, BIO05, BIO06 та BIO0N). Для формування кривих граничних витрат моделі розв'язують для таких цін вуглецевого газу ( $\$/tCO_2$ ): 0, 5, 10, 20, 40, 50, 100, 200, 400, 600, 1000, 2000. При цьому моделі G4M та GLOBIOM повністю узгоджено – для кожної комбінації SSP/BIO/ $pCO_2$  GLOBIOM обчислює для моделі G4M динаміку попиту на деревину, цін на деревину та сільськогосподарську землю для регіонів, а також потреби у сільськогосподарській землі для клітинок растру. Розроблені криві граничних витрат використовують у моделі енергетики MESSAGE для ітеративного знаходження наближеного оптимального розв'язку для досягнення обмежень сценаріїв RCP (див. розділ 5.3.2), після чого результати оптимального використання біоенергії та цін на вуглекислий газ у регіонах для кожного

SSP/RCP сценарію передається до GLOBIOM, де формують вхідні дані для G4M як і у попередньому випадку, але ще додається ціна вуглекислого газу по регіонах. Результати G4M та GLOBIOM – землекористування, зміна землекористування, постачання біоенергії та відповідні емісії парникових газів знову передають до IAM для остаточного обчислення параметрів енергетичної системи, впливу на кліматичну систему. [93]

### 5.5.2. Сценарії SSP/RCP

У цьому дослідженні розглянуто три з п'яти сценаріїв соціально-економічного розвитку. Нижче наведено короткий опис сценаріїв [64, 255].

SSP1: сталий розвиток – рух по зеленій дорозі (незначні проблеми з адаптацією та зменшенням емісій парникових газів). Згідно цього сценарію світ розвивається поступово, переходячи на принципи сталого розвитку. Зростають інвестиції у освіту та охорону здоров'я, кількість населення збільшується лише в першій половині століття і потім зменшується (рис.5.20), продовжується економічне зростання (див. динаміку ВВП на рис.5.21.), споживання спрямоване на низький матеріальний ріст і зниження ресурсоемності та енергоемності.

SSP2: середина шляху (середні проблеми з адаптацією та зменшенням емісій парникових газів). Згідно цього сценарію світ розвивається, продовжуючи історичні тренди. Розвиток та зростання доходів відбуваються нерівномірно між країнами. Зростання кількості населення є середнім у першій і зупиняється у другій половині століття (рис. 5.20). Зміна глобального ВВП є близькою до сценарію SSP1 (рис. 5.21).

SSP3: конкуренція регіонів – кам'янистий шлях (великі проблеми з адаптацією та зменшенням емісій парникових газів). Згідно цього сценарію країни зосереджуються на національних та регіональних проблемах через відродження націоналізму, турботу про конкуренцію між країнами та регіонами та безпеку, а також конфлікти. Країни зосереджуються на досягненні цілей енергетичної та продовольчої безпеки. Цей сценарій характеризується повільним економічним розвитком, інтенсивним споживанням ресурсів та енергії, високою нерівністю, малим зростанням населення у розвинених країнах та високим у

країнах з низьким розвитком, відсутністю міжнародної співпраці у розв'язуванні глобальних проблем навколишнього середовища. Глобальна кількість населення зростає найбільше у порівнянні з SSP1 та SSP2 (рис. 5.20), а ВВП є найменшим (рис. 5.21).

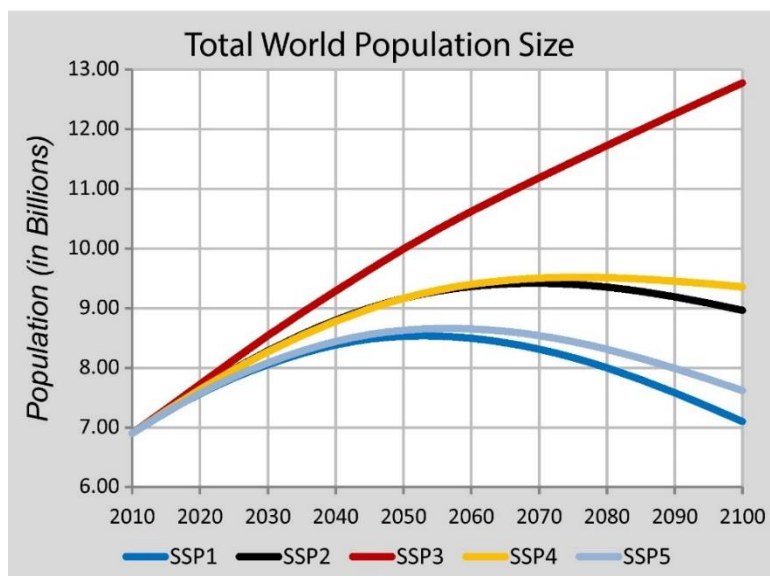


Рис. 5.20. Зміна чисельності населення у сценаріях SSP [170].

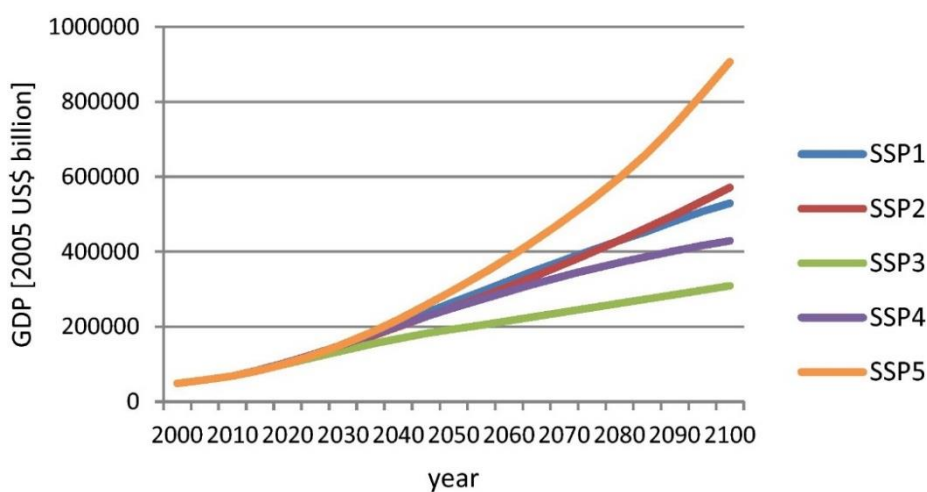


Рис. 5.21. Динаміка глобального валового внутрішнього продукту для сценаріїв SSP [195].

Сценарії впливу на кліматичну систему через антропогенні емісії парникових газів, RCP, означають наступне: RCP8.5 – зростаючий радіаційний вплив на кліматичну систему до  $8.5 \text{ Вт/м}^2$  до 2100 року (приблизно відповідає концентрації парникових газів в атмосфері  $1370 \text{ ppm CO}_2\text{екв}$ ); RCP6.0 - стабілізація та не перевищення радіаційного впливу на кліматичну систему до  $6 \text{ Вт/м}^2$  до 2100 року (приблизно відповідає концентрації парникових газів в атмосфері  $850 \text{ ppm CO}_2$ ).

екв); RCP4.5 - стабілізація та не перевищення радіаційного впливу на кліматичну систему до  $4.5 \text{ Вт/м}^2$  до 2100 року (приблизно відповідає концентрації парникових газів в атмосфері  $650 \text{ ppm CO}_2$  екв); RCP2.6 - максимум радіаційного впливу до  $3 \text{ Вт/м}^2$  перед 2100 р. (приблизно відповідає концентрації парникових газів в атмосфері  $490 \text{ ppm CO}_2$  екв) та зниження до  $2.6 \text{ Вт/м}^2$  до 2100р. [320].

Зростання ВВП, зміна кількості населення та обмеження на емісії парникових газів транслюються у вхідних параметрах G4M у різний попит на деревину та ціни деревини і сільськогосподарської землі (рис. 5.22-5.24), а також потребу у землі сільськогосподарського призначення (рис. 5.25). Наприклад, для сценарію соціально-економічного розвитку SSP2 при ціні вуглекислого газу менше  $1000 \text{ \$/тC}$  ціна сільськогосподарської землі зростає у першій половині століття і стабілізується, або трохи зменшується до 2100р. Більший рівень попиту на біоенергію також приводить до зростання ціни сільськогосподарської землі при всіх цінах вуглекислого газу, що пояснюється конкуренцією за землю між лісовим господарством, традиційним сільським господарством та енергетичними культурами (рис. 5.22).

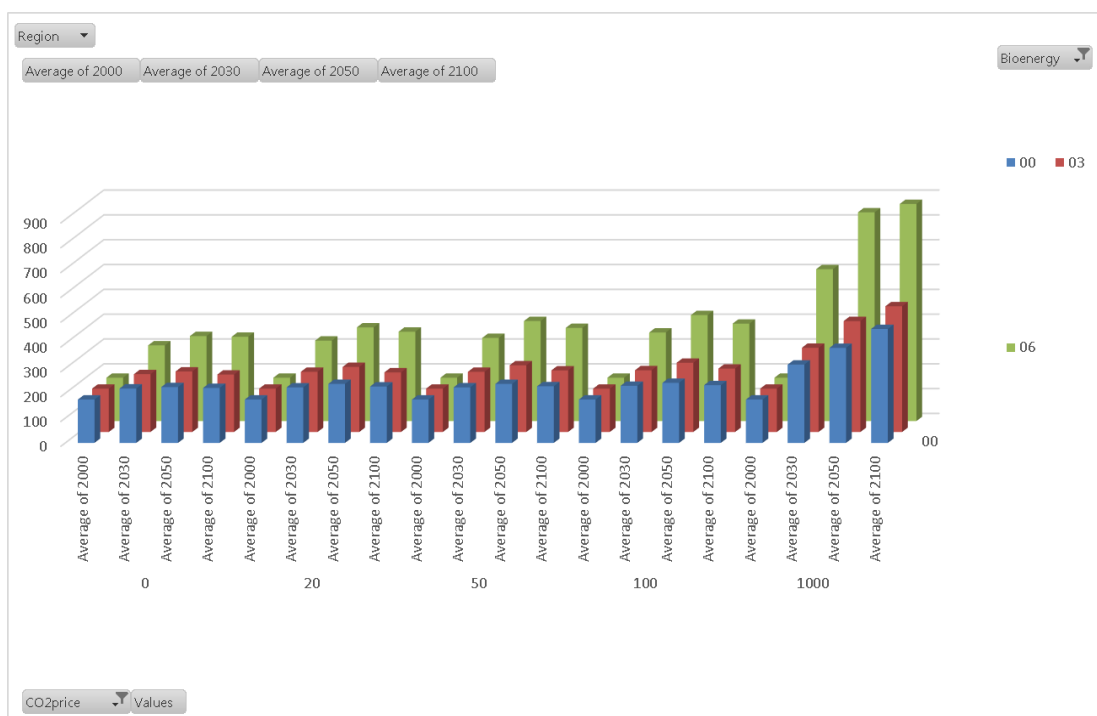


Рис. 5.22. Середня глобальна ціна сільськогосподарської землі,  $\text{\$/га}$ , для різних рівнів попиту на біоенергію (0, 3 та 6) та ціни вуглекислого газу (0, 20, 50, 100 та 1000  $\text{\$/тCO}_2$ ) для сценарію SSP2.

Попит на деревину приблизно повторює траєкторію зміни кількості населення при базовому рівні попиту на біоенергію (00), але зростає більше, ніж

в 4 рази при високому рівні попиту на біоенергію і мало залежить від ціни вуглекислого газу (рис. 5.23).

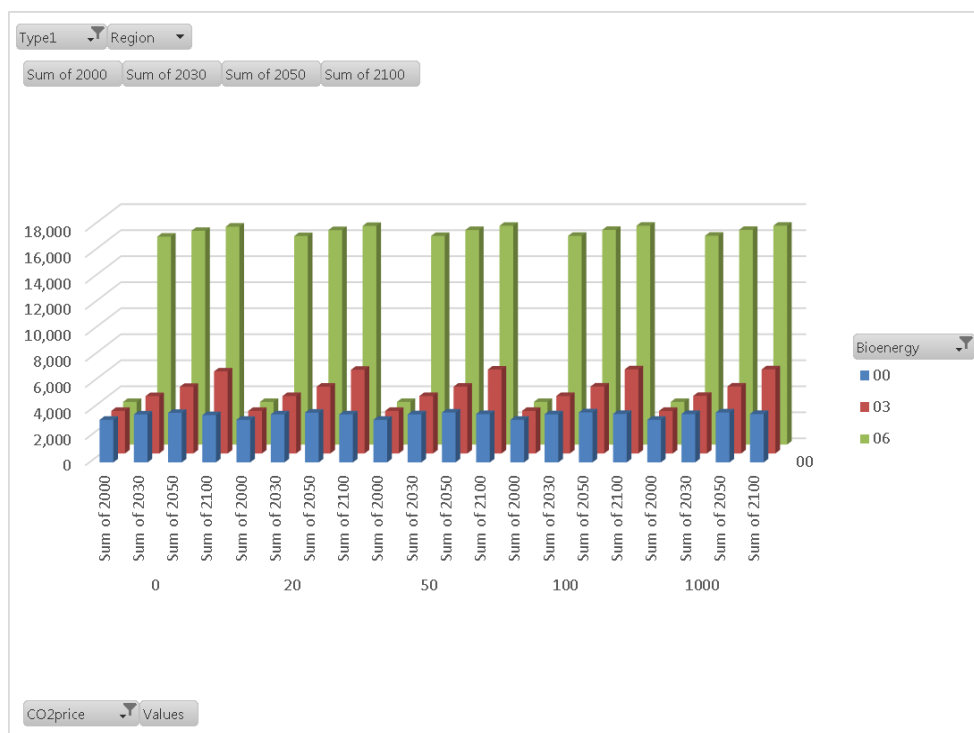


Рис. 5.23. Глобальний попит на деревину, Мм<sup>3</sup>, для різних рівнів попиту на біоенергію (0, 3 та 6) та ціни вуглекислого газу (0, 20, 50, 100 та 1000 \$/тCO<sub>2</sub>) для сценарію SSP2.

Ціна на деревину залежить як від попиту на деревину так і при зміні ВВП, тому зростає з часом при всіх рівнях попиту на біоенергію (рис. 5.24).

Потреба у сільськогосподарській землі зростає з часом при ціні вуглекислого газу до 50 \$/тCO<sub>2</sub>, а при вищих цінах вуглецю – зменшується з часом, але при вищих рівнях попиту на біоенергію знову дещо зростає у 2100р. Також потреба у сільськогосподарській землі зростає з рівнем попиту на біоенергію (рис. 5.25). Зростаюча потреба у сільськогосподарській землі може спричинити знеліснення, а також зменшувати землю доступну для заліснення.

Знайшовши оптимальний розв'язок, модель MESSAGE генерує ціну вуглекислого газу, а також попит на біоенергію, які у моделі GLOBIOM транслуються у попит на деревину, ціни деревини та сільськогосподарської землі, а також необхідну кількість землі для ведення сільського господарства для кожного SSP/RCP сценарію.

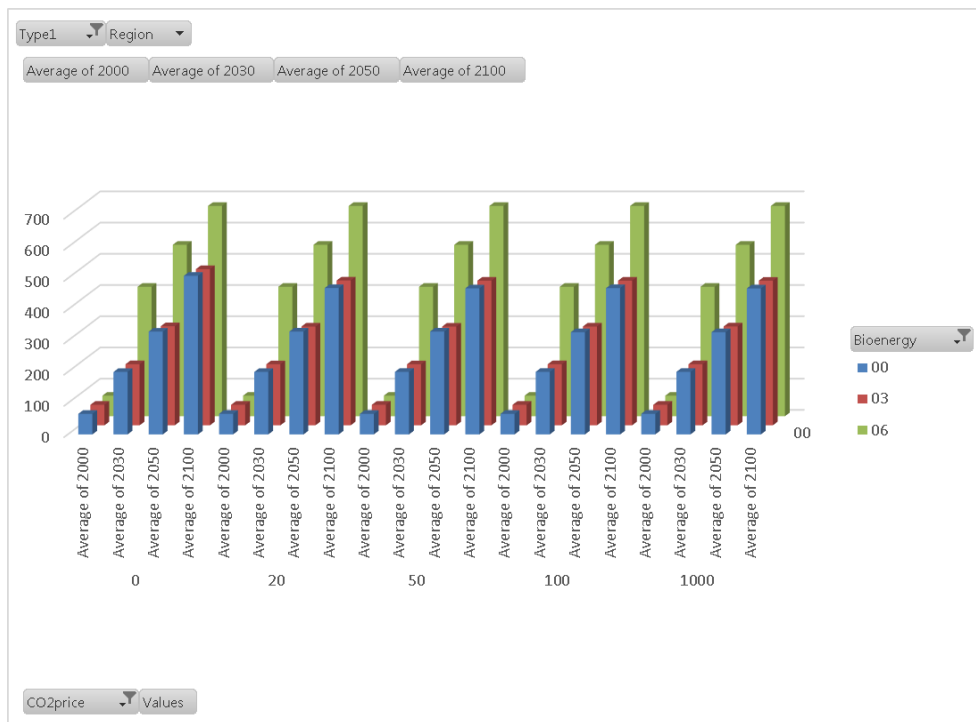


Рис. 5.24. Середня глобальна ціна деревини, \$/м<sup>3</sup>, для різних рівнів попиту на біоенергію (0, 3 та 6) та ціни вуглекислого газу (0, 20, 50, 100 та 1000 \$/тCO<sub>2</sub>) для сценарію SSP2.

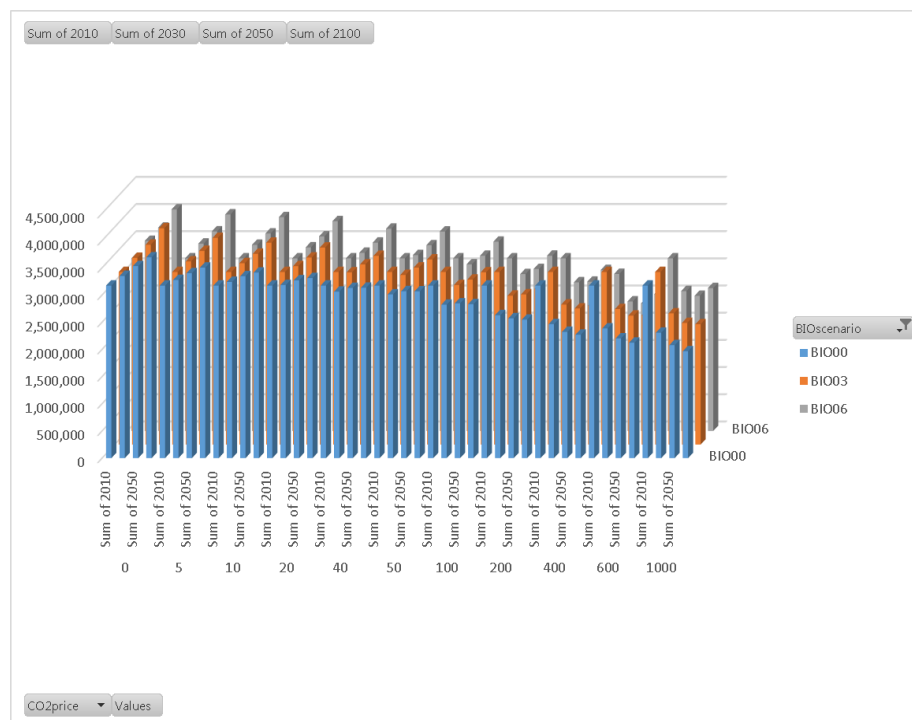


Рис. 5.25. Потреба у сільськогосподарській землі для різних рівнів попиту на біоенергію (0, 3 та 6) та ціни вуглекислого газу (0, 20, 50, 100 та 1000 \$/тCO<sub>2</sub>) для сценарію SSP2.

Наприклад, для сценарію соціально-економічного розвитку SSP2 ціна вуглекислого газу зростає з часом для всіх сценаріїв RCP. Для сценаріїв із більшим обмеженням радіаційного впливу на кліматичну систему (відповідно, більшими вимогами зменшити емісії парникових газів) ціна вуглекислого газу

зростає до 2600 \$/тCO<sub>2</sub> у 2100 році. Зростання ціни вуглекислого газу є суттєво нелінійним, кожна наступна одиниця зменшення радіаційного впливу вимагає все вищої ціни CO<sub>2</sub> (рис. 5.26).

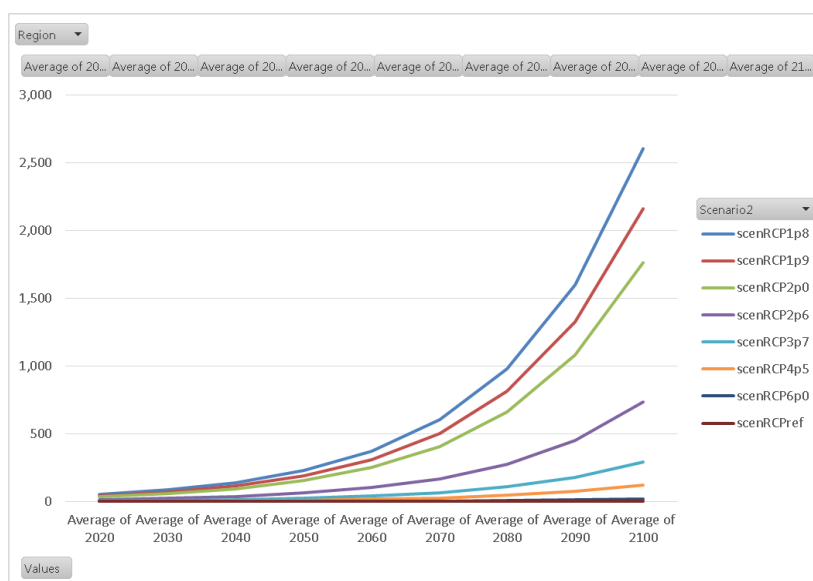


Рис. 5.26. Ціна вуглекислого газу для різних сценаріїв радіаційного впливу на кліматичну систему (RCP) у сценарії соціально-економічного розвитку SSP2, \$/тCO<sub>2</sub>.

Ціна сільськогосподарської землі, практично, повторює динаміку ціни вуглекислого газу (рис. 5.27), що, швидше за все, пов'язано з задоволенням попиту на біоенергію, який зростає зі збільшенням обмежень на радіаційний вплив на кліматичну систему, за рахунок сільськогосподарських енергетичних культур.

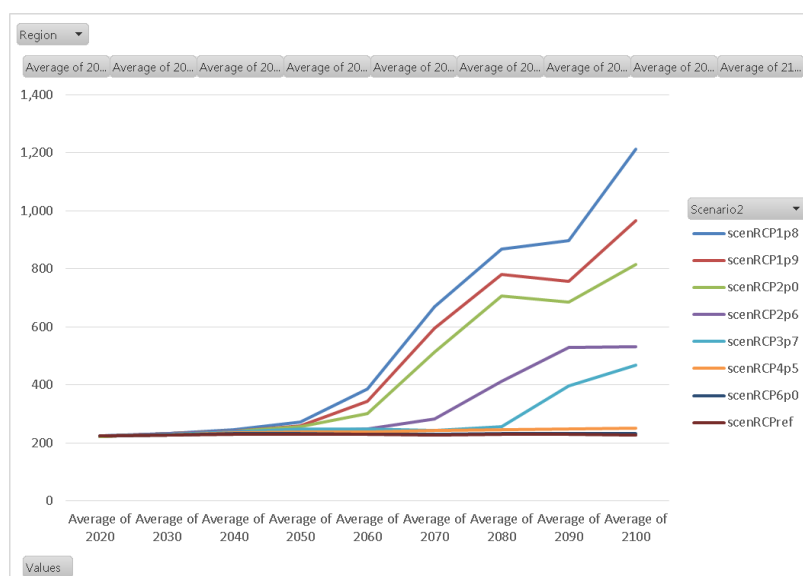


Рис. 5.27. Ціна сільськогосподарської землі для різних сценаріїв радіаційного впливу на кліматичну систему (RCP) у сценарії соціально-економічного розвитку SSP2, \$/га.

Глобальний попит на деревину суттєво зростає з часом для сценаріїв зі значними обмеженнями радіаційного впливу на кліматичну систему (1.8-2.6 Вт/м<sup>2</sup>), але для сценаріїв з меншими обмеженнями радіаційного впливу попит на деревину зменшується після 2070 року (рис. 5.28). Різниця попиту на деревину між сценаріями сягає більше 6 Мм<sup>3</sup> у 2100 році.

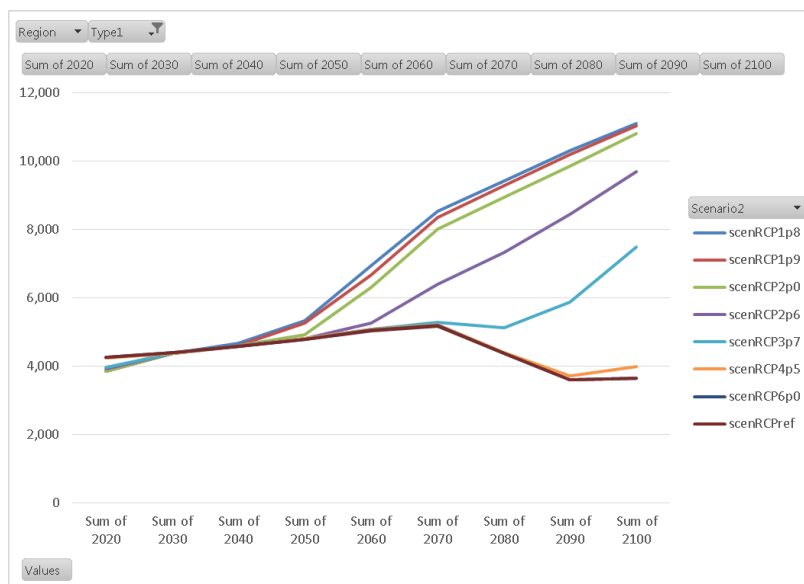


Рис.5.28. Попит на деревину для різних сценаріїв радіаційного впливу на кліматичну систему (RCP) у сценарії соціально-економічного розвитку SSP2, Мм<sup>3</sup>/рік.

Глобальна середня ціна деревини значно зростає у першій половині століття, але згодом стабілізується і навіть зменшується до 2100 року. Ціна деревини слабо залежить від ціни вуглекислого газу та попиту на деревину (рис. 5.29).

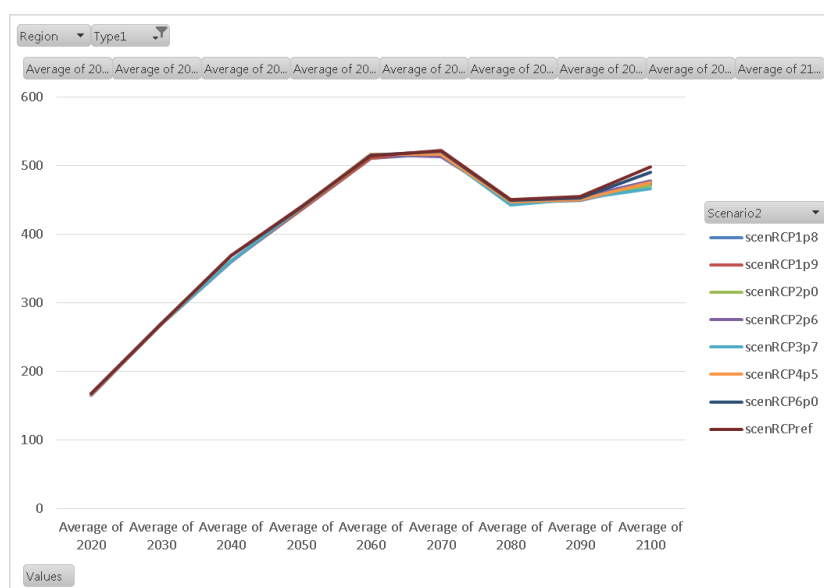


Рис.5.29. Ціна деревини для різних сценаріїв радіаційного впливу на кліматичну систему (RCP) у сценарії соціально-економічного розвитку SSP2, \$/м<sup>3</sup>.



### 5.5.3. Результати дослідження

У випадку сценарію соціально-економічного розвитку SSP2 при нульовій ціні вуглекислого газу і невисокому попиті на біоенергію швидкість заліснення плавно зменшується з часом до 2050 року і знову зростає до попереднього рівня у 2100 році (рис. 5.30). Зменшення швидкості заліснення до середини століття і зростання в кінці століття пояснюється динамікою ціни сільськогосподарської землі (рис. 5.27) та ціни деревини (рис. 5.29). Динаміка заліснення при високому рівні попиту на біоенергію є дещо відмінною. Швидкість заліснення зростає до 2030 року і потім плавно зменшується до 2100 року. При ненульовій ціні вуглекислого газу форма кривої зміни швидкості заліснення з часом є схожою для всіх рівнів попиту на біоенергію (із максимумом у 2030р.), хоча й відрізняється значеннями.

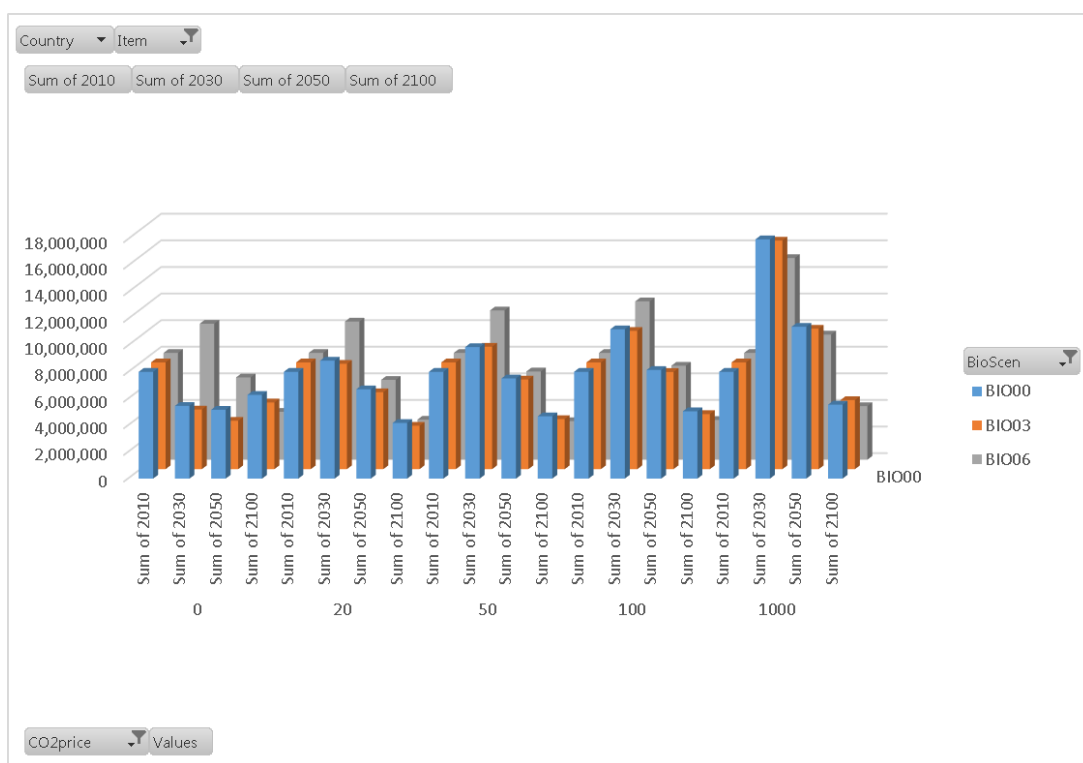


Рис. 5.30. Глобальна швидкість заліснення, га/рік, для різних рівнів попиту на біоенергію (0, 3 та 6) та ціни вуглекислого газу (0, 20, 50, 100 та 1000 \$/тCO<sub>2</sub>) для сценарію SSP2

У випадку сценарію соціально-економічного розвитку SSP2 при нульовій ціні вуглекислого газу швидкість знеліснення плавно зменшується з часом, при цьому вищі рівні попиту на біоенергію характеризуються меншою швидкістю знеліснення (рис. 5.31). При ненульовій ціні вуглекислого газу швидкість знеліснення різко зменшується з часом, при вищій ціні вуглекислого газу зниження швидкості знеліснення є швидшим. Разом з тим, при вищих рівнях попиту на біоенергію швидкість знеліснення залишається більшою, ніж при нижчих рівнях попиту. При ціні вуглекислого газу більше 50 \$/тCO<sub>2</sub> спостерігається локальний максимум швидкості знеліснення. Така форма зміни швидкості знеліснення відповідає зміні ціни сільськогосподарської землі (рис. 5.27).

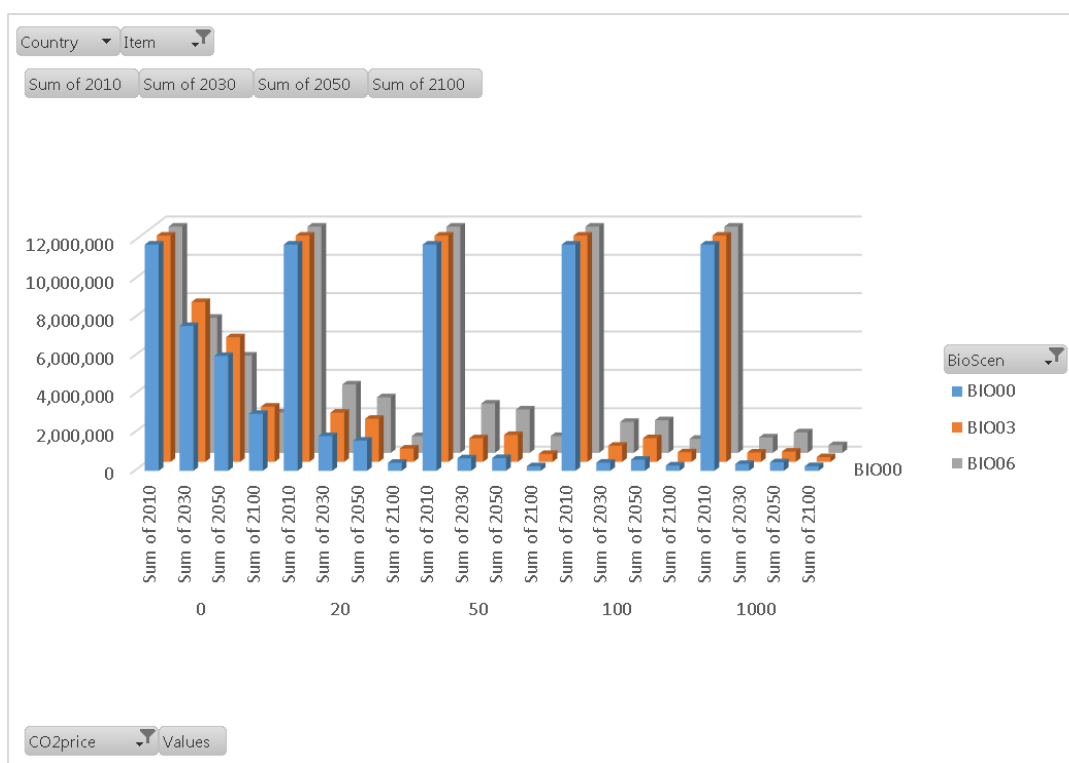


Рис. 5.31. Глобальна швидкість знеліснення, га/рік, для різних рівнів попиту на біоенергію (0, 3 та 6) та ціни вуглекислого газу (0, 20, 50, 100 та 1000 \$/тCO<sub>2</sub>) для сценарію SSP2

Глобальний потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення (збільшення поглинання CO<sub>2</sub>) у 2050 році може досягати більше 1000 МтCO<sub>2</sub>/рік при невисоких рівнях попиту на біоенергію. При високому попиту на біоенергію потенціал приблизно у 2.5 рази менший (рис. 5.32), в основному, через високу

швидкість заліснення при нульовій ціні вуглекислого газу, вищій ціні сільськогосподарської землі та більшій потребі у сільськогосподарській землі.

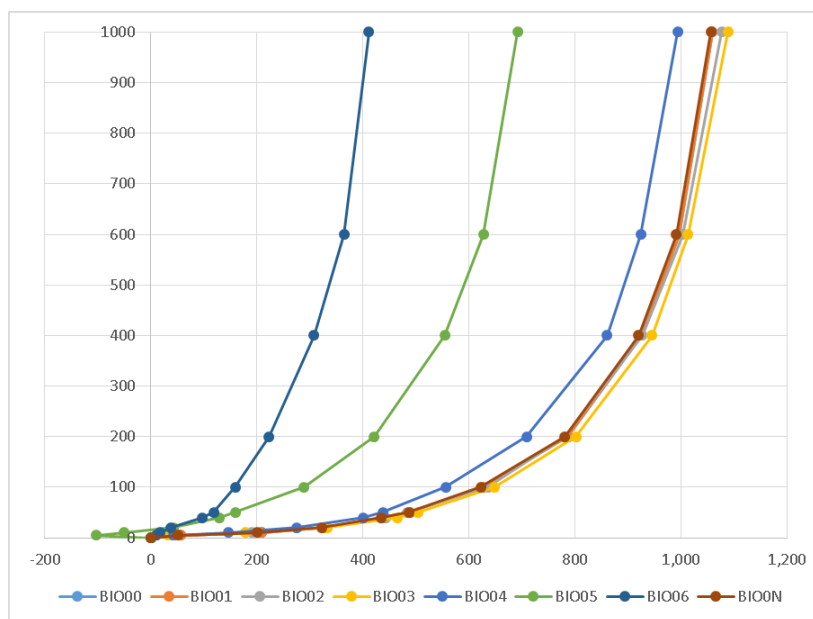


Рис. 5.32. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення (збільшення поглинання CO<sub>2</sub>) для різних рівнів попиту на біоенергію та сценарії соціально-економічного розвитку SPP2 у 2050р. По осі ординат відкладено ціну вуглекислого газу, \$/тCO<sub>2</sub>, а по осі абсцис – потенціал зменшення емісій, МтCO<sub>2</sub>/рік

Глобальний потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення у 2050 році може досягати більше 4000 МтCO<sub>2</sub>/рік при невисоких рівнях попиту на біоенергію. При високому попиті на біоенергію потенціал приблизно у 2 рази менший (рис. 5.33), в основному, через нижчу швидкість знеліснення при нульовій ціні вуглекислого газу, та більшій потребі у сільськогосподарській землі.

Глобальні емісії CO<sub>2</sub> від зміни землекористування (заліснення та знеліснення), обчислені за допомогою моделі G4M, для соціально-економічного розвитку SSP2 та сценаріїв обмеження радіаційного впливу на кліматичну систему RCP1p8, RCP1p9, RCP2p0, RCP2p6, RCP3p7, RCP4p5 RCP6p0 та без додаткових спеціальних обмежень RCPref наведено на рис. 5.34.

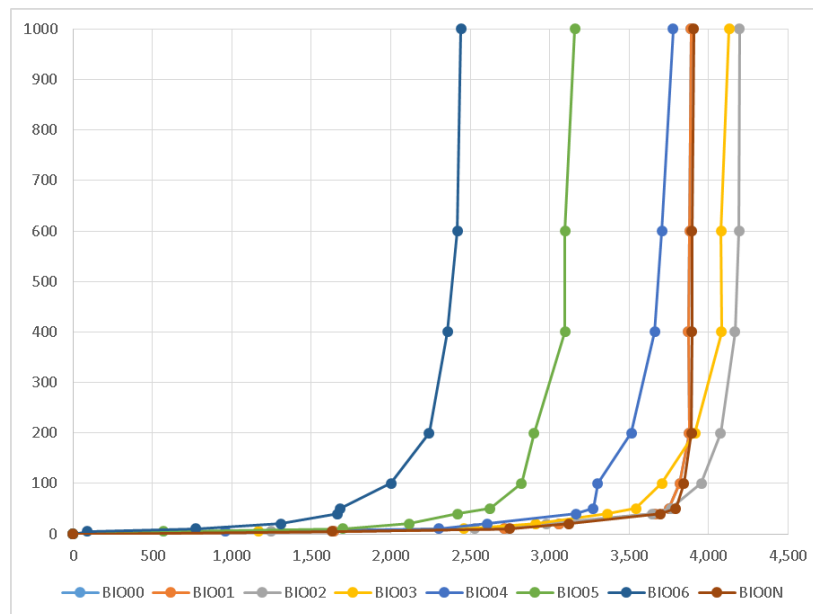


Рис. 5.33. Криві граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення для різних рівнів попиту на біоенергію та сценарії соціально-економічного розвитку SPP2 у 2050р. По осі ординат відкладено ціну вуглекислого газу, \$/тCO<sub>2</sub>, а по осі абсцис – потенціал зменшення емісій, МтCO<sub>2</sub>/рік

При сценарії RCPref (ціна вуглекислого газу рівна нулю) емісії CO<sub>2</sub> повільно зменшуються і після 2070 року стають негативними, тобто ліси починають поглинати вуглекислий газ. Щоб отримати необхідний малий радіаційний вплив на кліматичну систему, відповідно зменшити емісії парникових газів, в тому числі, підвищують ціну вуглекислого газу, що збільшує чисту приведену вартість лісового господарства – підвищує конкурентну перевагу лісового господарства у порівнянні з сільським господарством і, як результат, зменшує знеліснення та стимулює заліснення. Це спостерігається при переході від сценаріїв RCP з вищим допустимим впливом на кліматичну систему до сценаріїв з нижчим допустимим впливом. Так у сценаріях з допустимим радіаційним впливом на кліматичну систему 2 і менше Вт/м<sup>2</sup> ліси починають поглинати вуглекислий газ уже у 2030 році, коли ціна CO<sub>2</sub> для цих сценаріїв перевищує 50 \$/тCO<sub>2</sub>.

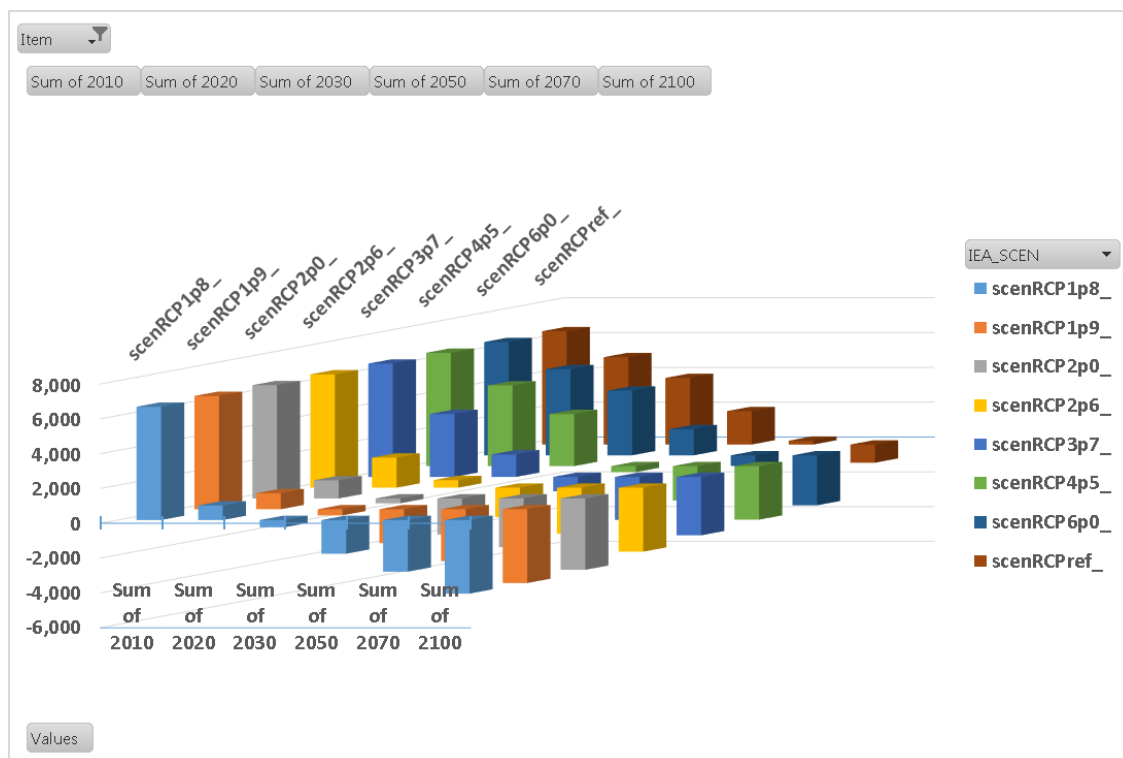


Рис. 5.34. Глобальні емісії вуглекислого газу від заліснення та знеліснення для різних сценаріїв радіаційного впливу на кліматичну систему (RCP) у сценарії соціально-економічного розвитку SSP2, МтCO<sub>2</sub>/рік.

Щодо прогнозування постачання біомаси для промисловості та біоенергії у сценарії без додаткових заходів (RCPref) та сценарії соціально-економічного розвитку SSP2 глобальна заготівля біомаси з лісів та плантацій з коротким оборотом рубки збільшиться на 119% до 2050 року та ще на 49% до 2100, а частка заготовленої біомаси з звичайних лісів буде становити 34% від загальної. Глобальний попит на промислову деревину у сценарії SSP2 збільшиться удвічі до 2100 року, сценарії SSP1 на 5% нижче, а у сценарії SSP3 - на 20% менше. Заготівля промислової деревини та біомаси для вироблення енергії впливає на інтенсивність лісокористування та площу плантацій з коротким оборотом рубки (моделюються у GLOBIOM). У сценарії SSP2 загальна площа лісу (враховуючи заліснення та знеліснення) наприкінці століття відновлюється до початкового значення після повільного зниження на початку століття. Проте, частка площі лісу, що використовується для лісозаготівлі, збільшиться з 19% у 2010 році до 24% у 2100 році. У той же період плантації з коротким оборотом рубки зростуть у 4 рази з 51 Мга до 205 мГа. Загальна площа лісу у сценарії SSP1 - на 2% і у

сценарії SSP3 - на 6% менша, ніж у сценарії SSP2. Частка зменшення емісій парникових газів від лісозаготівлі та зміни землекористування від загального зменшення є невеликою (до 10%) і зменшується від сценарію SSP1 до SSP3, але має важливе значення, оскільки зменшення емісій є дешевшим а ефект від впровадження заходів є швидким, що дає час та кошти для розгортання інших технологій зменшення емісій (рис. 5.35). [93].

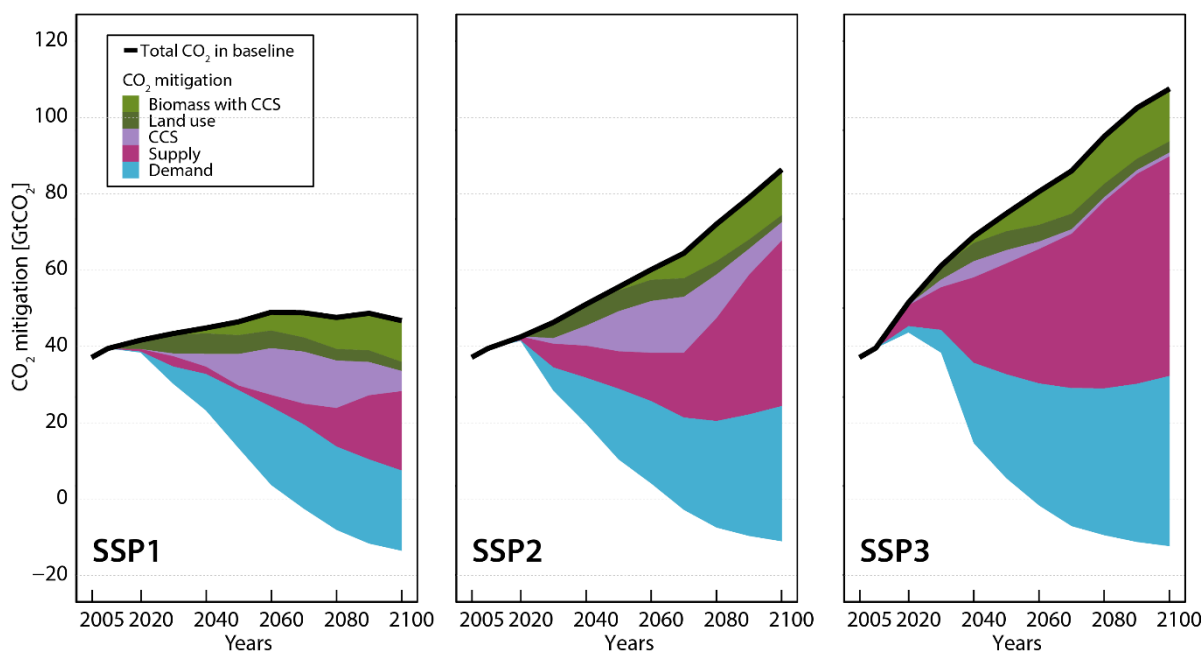


Рис. 5.35. Глобальний потенціал зменшення емісій від референтного значення для різних секторів у сценаріях соціально-економічного розвитку SSP1, SSP2, SSP3 та сценарію впливу на кліматичну систему RCP2p6, обчислений за допомогою IIASA IAM [93]

## 5.6. Дослідження синергії зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення та ризику зникнення видів тварин

### 5.6.1. Опис чисельного експерименту

Розроблену модель G4M використали для дослідження потенційної вигоди від заходів по зменшенню емісій від знеліснення для зменшення ризику зникнення видів тварин у лісах у країнах, які розвиваються, до 2100 року. В цьому дослідженні застосували модель G4M, адаптовану до роботи з растром роздільною здатністю 0.125x0.125 градусів, без зв'язку з іншими моделями. На першому етапі розробили сценарії знеліснення без додаткових заходів, а також додаткові заходи – впровадження ціни вуглекислого газу 0, 3, 7, 10 та 25 \$/тCO<sub>2</sub>

та провели моделювання гепросторової динаміки лісового покриву та емісій CO<sub>2</sub> за розробленими сценаріями (рис. 5.36). Отримані карти лісового покриву наклали на карту розміщення 4514 видів тварин, життя яких залежить від лісу [267, 294, 295] (рис. 5.37.).

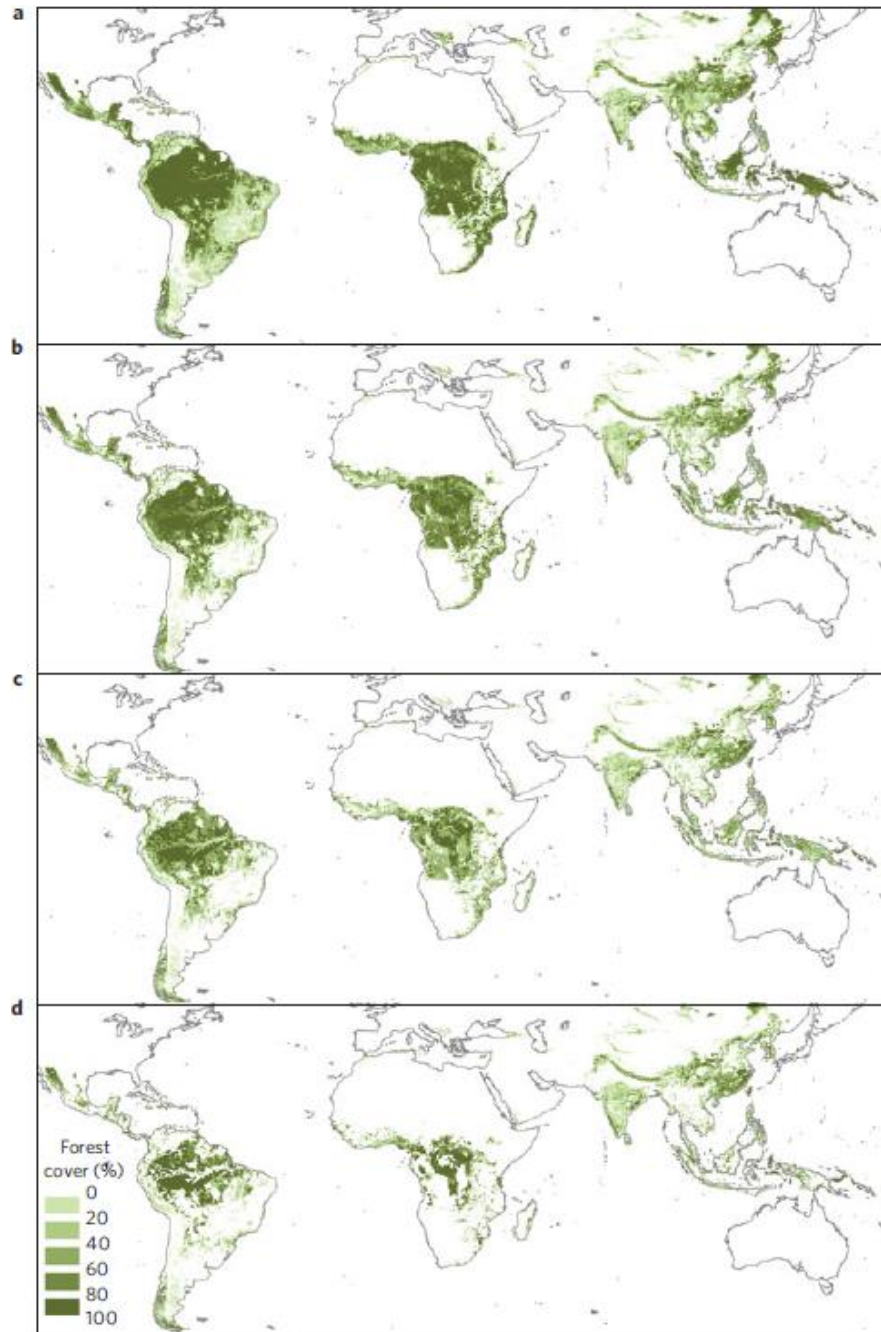


Рис. 5.36. Карти лісового покриву у початковий момент моделювання (2000р) – а) та прогнозованого лісового покриву у 2040р. (b), 2070р. (c) та 2100р. (d) [294]

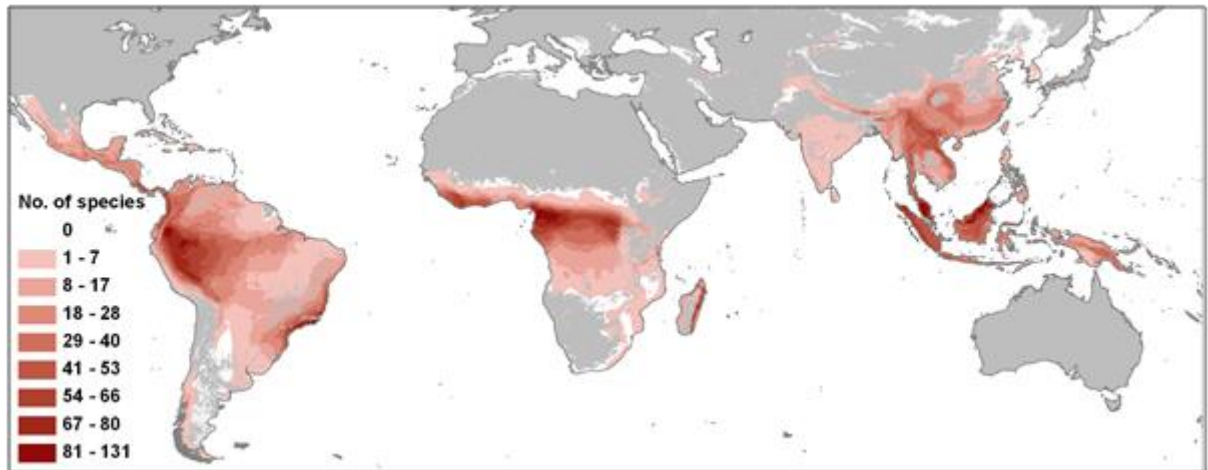


Рис. 5.37. Кількість видів на клітинку для 4514 видів тварин, які залежать від лісу. Клітини сірого кольору не були проаналізовані (або тому, що вони знаходяться за межами зони дослідження, або тому, що в 2000 році не було лісу) [294].

Досліджували вплив заходів по зменшенню емісій від знеліснення на вимирання видів тварин (кожного виду) для кожного сценарію знеліснення, використовуючи три основні методи та два додаткові. При першому консервативному методі вид вважався вимираючим, якщо весь лісовий покрив в межах ареалу цього виду зникає - оцінка бінарного ризику вимирання (дорівнює одиниці, якщо всі ліси були знищені, інакше - нулю). У другому методі, категоріальному, оцінюють ризик вимирання на основі категорій та критеріїв Червоної книги Міжнародного союзу збереження природи (МСЗП) [45, 155].

У третьому методі, неперервному, застосовують взаємозв'язок між видами тварин та територією, щоб продемонструвати, як скорочення ареалу окремих видів (S) впливає на ризик вимирання виду (E) [294, 305]:

$$E = 1 - (S_{\text{Scenario}}/S_{2000})^{0.25},$$

$S_{2000}$  та  $S_{\text{Scenario}}$  - площі лісу в межах ареалу виду у 2000 році та в інші роки для розглянутих сценаріїв знеліснення, обчислені як сума лісової площі у всіх клітинках 0.125 градусів, які перекриваються з ареалом виду. Ризик вимирання набуває значень від 0, коли  $S_{\text{Scenario}} = S_{2000}$ , до 1, коли  $S_{\text{Scenario}} = 0$ .

Четвертий метод використовували для аналізу чутливості. Для цього застосовували окремий набір даних про біорізноманіття, що охоплюють біогеографічні регіони в межах тропічних лісів, що містять значну кількість



ендемичних видів (що становить 67% загальної лісової площі). П'ятий метод - як додатковий аналіз чутливості результату до рівнів знеліснення, повторили всі обчислення для сценаріїв на основі нижчих рівнів знеліснення (рис 5.38), а також, вважаючи, що ліс, захищений законом, є абсолютно невразливими до знеліснення. [294]

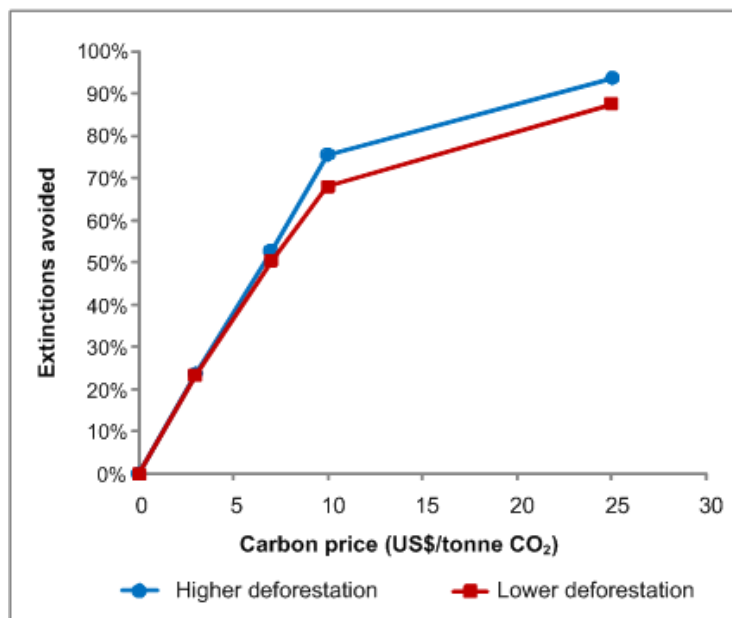


Рис. 5.38. Залежність відносної кількості збережених видів тварин від впровадженої ціни вуглекислого газу для двох базових сценаріїв знеліснення [294]

У всіх випадках площу лісу у 2000 році вважали початковою, індивідуальні значення ризику вимирання різних видів підсумовували, щоб отримати загальну кількість вимирання видів. Початковий лісовий покрив був отриманий з GLC2000, глобальної класифікації земельних покриттів за 2000 рік [303]. Клітинка растру розглядається як лісова, коли вона перекриває одну з наступних класів наземного покриття з GLC2000:

- 1: покрив з дерев, широколистяні, вічнозелені;
- 2: покрив з дерев, широколистяні, листяні, зімкнуті;
- 3: покрив з дерев, широколистяні, листяні, незімкнуті;
- 4: покрив з дерев, голкові, вічнозелені;
- 5: покрив з дерев, голкові, листопадні;
- 6: покрив з дерев, змішаний тип листя;
- 7: покрив з дерев, регулярно затоплюваний, прісна вода;

- 8: покрив з дерев, регулярно затоплюваний, солоня вода;
- 9: Мозаїка: покрив з дерев / інша природна рослинність;
- 17: Мозаїка: рілля / покрив з дерев / інша природна рослинність.

Лісовий покрив всередині кожної клітинки растру розміром 0.125x125 градусів у 2000 році був розрахований як частка клітинки, яка була зайнята лісом, беручи до уваги всі оригінальні пікселі високої роздільної здатності (1 км на екваторі), класифіковані в класах від 1 до 8 як чистий ліс (100%) та пікселі у мозаїці - 50 і 20% лісу для класів 9 та 17, відповідно. Загалом, область дослідження складалася з ~ 227,800 клітинок растру з ненульовим лісовим покривом. [294]

Використали прогнози валового внутрішнього продукту (ВВП) та кількості населення зі сценарію В МГЗК [254 ].

Модель була відкалібрована за даними зміни лісової площі та глобальних рівнів знеліснення зі звіту ФАО про лісові ресурси 2005р. [103] за період 2000-2005 років. Коефіцієнти калібрування (порогові коефіцієнти  $H_c$ , див. секцію 3.5.2) змінювали, щоб генерувати загальне знеліснення на період 2000-2100 рр., що дорівнює сотні років знеліснення з середнім рівнем знеліснення 1990-2005 років. У відповідності з недавнім дослідженням щодо ефективності охоронюваних територій в кожному році темпи знеліснення на всіх охоронних територіях, перелічених у Світовій базі даних про території, що охороняються [335], становили 38% від рівня знеліснення в незахищених клітинках [48; 294]. Згідно цього сценарію внаслідок знеліснення, в цілому, площа лісів в тропіках зменшується на 60% (по відношенню до лісового покриву у 2000 р.) та на 46% - у нетропічних районах. В якості аналізу чутливості ми також застосували сценарій сповільнення знеліснення, що призводить до 49% та 38% втрат лісового покриву у 2000-2100 роках відповідно для тропічних та нетропічних регіонів. [294]

### 5.6.2. Результати дослідження

Оскільки прогнозовані втрати лісового покриву при базовому сценарії знеліснення є суттєвими (рис. 5.36), це може призвести до вимирання від 399 до 1241 виду тварин, які залежать від лісу до 2100 року, в залежності від методу

оцінювання ризику вимирання (рис. 5.39., a, b, c). А на ділянках з високим біорізноманіттям може вимерти більше 36000 видів (рис. 5.39 d). Разом з тим, впровадження навіть невисокої ціни CO<sub>2</sub> (7 \$/тCO<sub>2</sub>) дозволить зберегти більше 50% видів, а ціна 25 \$/тCO<sub>2</sub> дозволила б зберегти більше 80% видів (рис. 5.39, 5.40). [294]

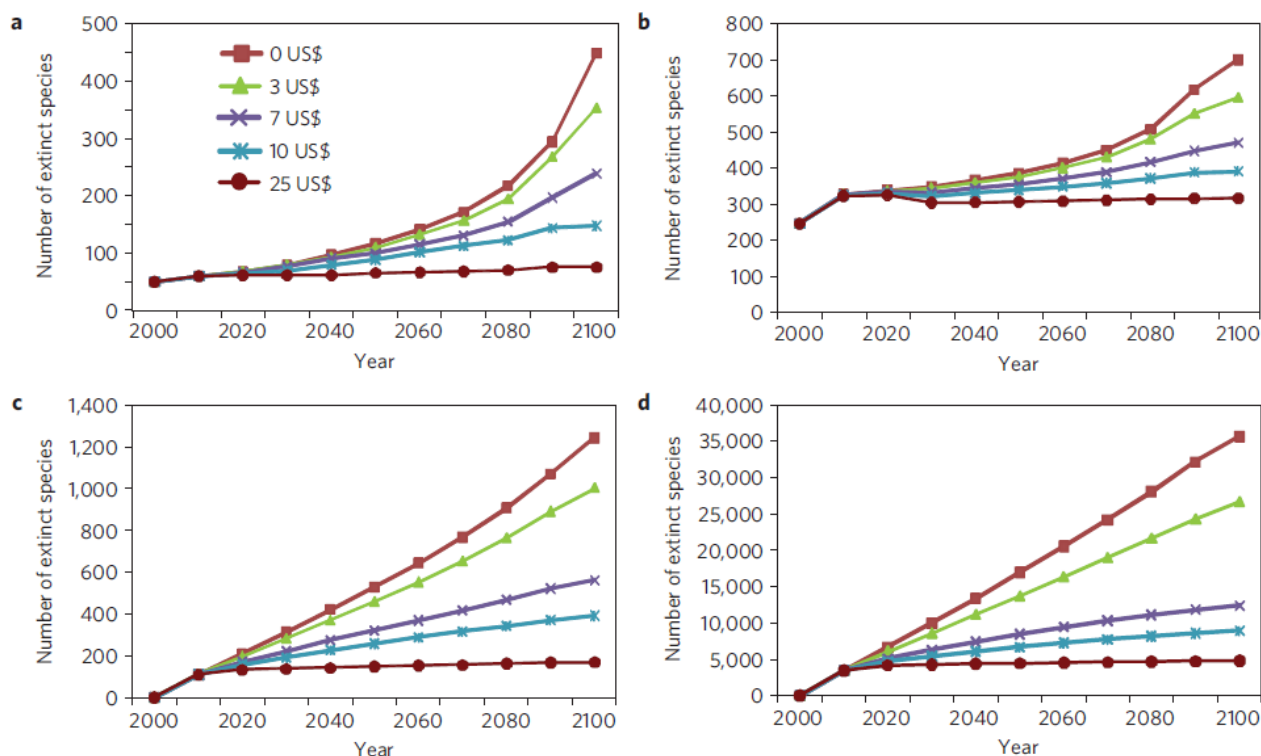


Рис. 5.39. Залежність кількості вмираючих видів тварин від часу при оцінці ризику вимирання бінарним методом (a), категоріальним (b), неперервним (c) та агрегованим методом для рослин та ендемічних видів хребетних тварин на 19 виділених ділянках з високим біорізноманіттям та 4 ділянках з високим біорізноманіттям дикої природи (d) [294].

Знеліснення є нерівномірним (рис. 5.36), найбільше видів може зникнути, якщо будуть знеліснені території з більшою кількістю видів, наприклад, захід басейну Амазонки, південно-східна Азія, атлантичні ліси Південної Америки (рис. 5.41). Знеліснення відбувається досить нерівномірно, зокрема Нова Гвінея може втратити біля 82% лісового покриву до 2100 року, Мадагаскар - 77%, Атлантичний Ліс та Тропічні Анди - 74%, гори південно-західного Китаю - 25%, Гімалаї та Філіппіни - 28%. Взаємозв'язок між знелісненням та кількістю видів тварин з обмеженим ареалом пояснює, що в наших сценаріях, деякі регіони, такі

як Центральна Америка, Анди, Атлантичний Ліс, Нова Гвінея та Мадагаскар можуть втратити дуже велику кількість видів тварин (рис. 5.41). Чим вищий рівень інвестицій у програми зменшення емісій від знеліснення та деградації лісів (REDD), тим менше знеліснення і, відповідно, кількість зниклих видів. [294]

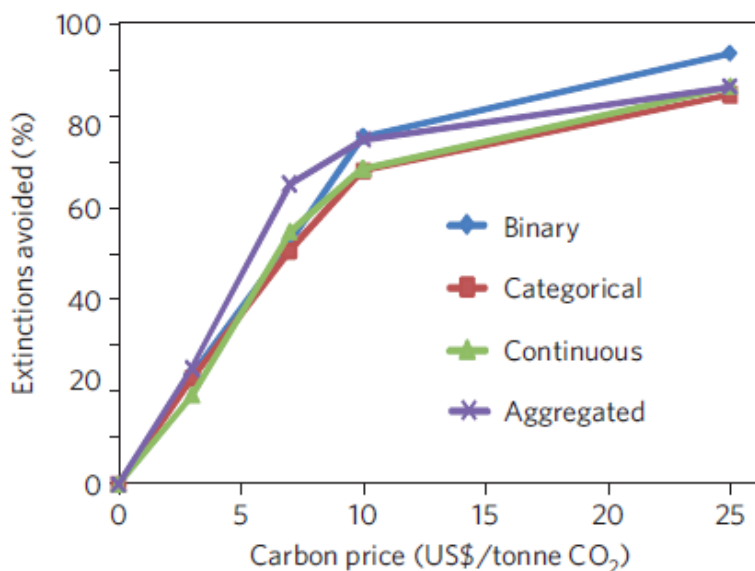


Рис. 5.40. Залежність відносної кількості збережених видів тварин від впровадженої ціни вуглекислого газу для високого базового сценарію знеліснення для різних методів оцінювання ризиків вимирання видів [294]

Крім того, різні економічні умови та сільськогосподарська придатність землі визначають у моделі чутливість до рівня інвестицій у проекти REDD. Наприклад, Нова Гвінея може отримати значну користь від платежів REDD в розмірі 10 \$/тCO<sub>2</sub> (уникнути 90% знеліснення, прогнозованого до 2100 року у базовому сценарії), в той час як регіони атлантичного лісу та Індонезії можуть зменшити знеліснення лише на 35% та 38%, відповідно. Для цін вуглекислого газу 10 \$/тCO<sub>2</sub> і вище в більшості районів Амазонки та Конго можна було б запобігти вимиранню місцевих видів тварин. Проте вимирання залишається значним (хоч і значно нижчим, ніж без впровадження ціни вуглекислого газу) у частині атлантичного лісу та південно-східної Азії та в інших регіонах, важливих для біорізноманіття, таких як Тропічні Анди.

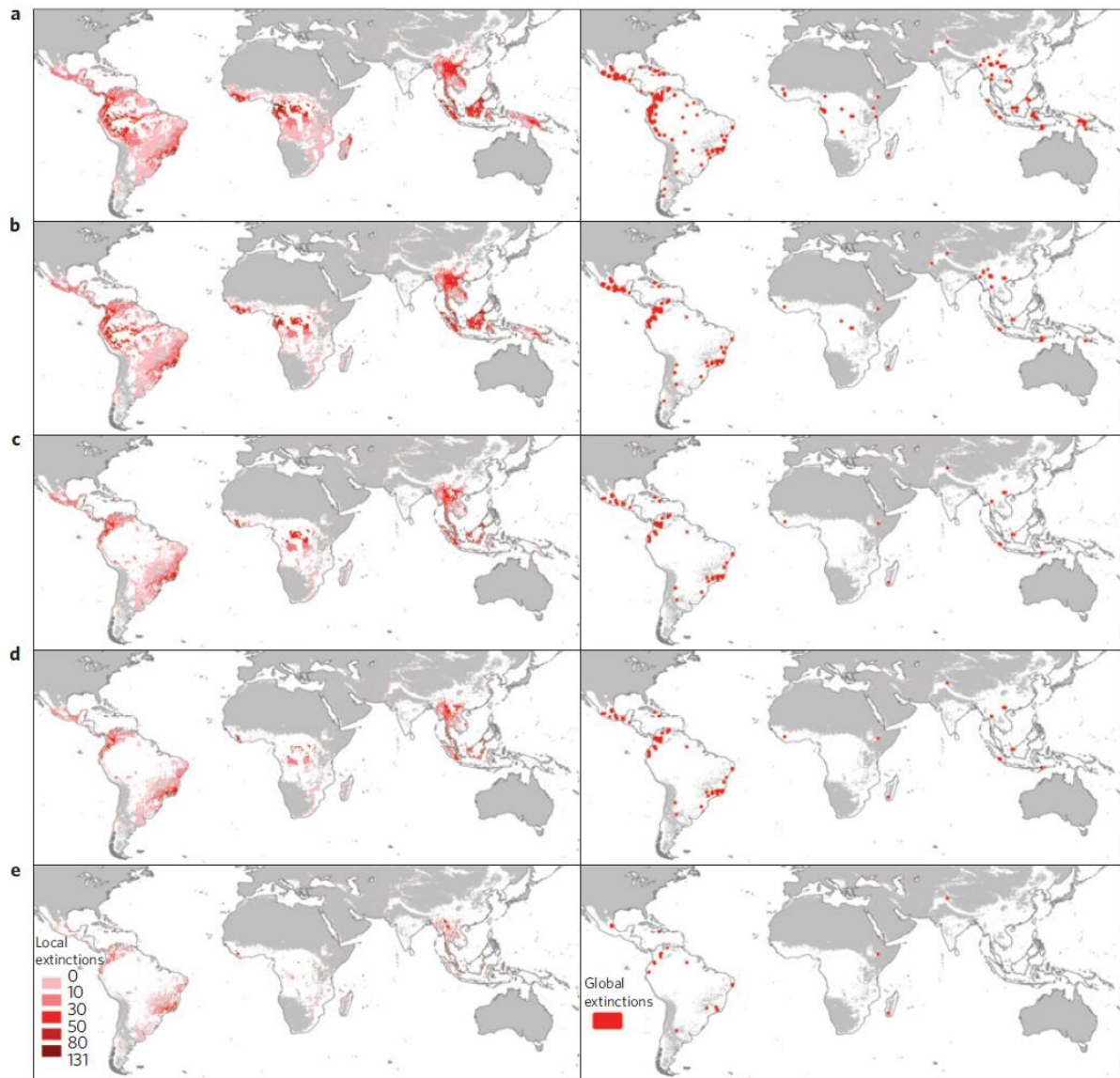


Рис. 5.41. Прогнозування вимирання видів тварин у 2100р. при різних сценаріях (зліва – локальне вимирання, обчислене за категоріальним методом, та справа – глобальне, обчислене за бінарним методом): а) базовий сценарій; б) при ціні вуглецю 3 \$/тCO<sub>2</sub>; в) при ціні вуглецю 7 \$/тCO<sub>2</sub>; г) при ціні вуглецю 10 \$/тCO<sub>2</sub>; д) при ціні вуглецю 25 \$/тCO<sub>2</sub>. [294]

Щоб більш ефективно запобігати зникненню видів можна застосувати підхід запропонований нами у [68], який полягає в тому, щоб створити карти місць, у яких запровадження проектів зменшення знеліснення, матиме найбільший сукупний вплив. Збереження зникаючих видів є додатковою вигодою для проектів REDD, які започатковували для зменшення емісій парникових газів. Зв'язок між ціною вуглекислого газу - рівнем стимулів у проектах REDD - та кількістю збережених видів є досить надійним – він також зберігається для сімейства сценаріїв, що базуються на більш низьких рівнях

базового знеліснення (рис. 5.38), а також при припущенні, що захищені ліси не зазнають знеліснення. [294]

Слід зазначити, що ми зробили певні припущення, по-перше, ми вважали, що вимирання відбувається лише за рахунок прямої втрати середовища проживання, а не від інших загроз (наприклад, кліматичні зміни), або потенційної синергії між ними (що підтверджує консервативність нашого прогнозу про додаткові переваги REDD). По-друге, ми не брали до уваги природного поновлення лісів, яке могло б відновити середовище існування деяких видів. По-третє, ми припускаємо рівномірний механізм REDD, через глобальну ціну вуглекислого газу. Насправді, механізми REDD і ціна вуглекислого газу можуть відрізнятися в різних країнах, а деякі країни взагалі можуть не брати участі в цій програмі, що може спричинити перенесення знеліснення в ці країни і зменшити загальну ефективність заходів по зменшенню емісій від знеліснення та деградації лісів. Крім того програма REDD може мати негативний ефект з точки зору біорізноманіття, якщо будуть заліснюватися території з іншою природною рослинністю (наприклад, луки), або будуть створюватися плантації лісів з невеликою кількістю видів дерев, які мають найбільший потенціал акумуляції вуглецю. Тому необхідно більш детально аналізувати конкретні проекти REDD перед їх провадженням, щоб отримати різносторонню вигоду, а не збитки. Отож, згідно отриманих результатів можна зробити висновок, що продовження історичного рівня знеліснення, ймовірно, призведе до дуже високого рівня вимирання видів. Запровадження адекватного фінансового механізму REDD може суттєво зменшити вимирання видів. [294]

### **5.7. Аналіз емісій вуглекислого газу від лісокористування та зміни землекористування для референтних сценаріїв для ЄС та визначення референтних рівнів емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування**

У Європейському Союзі починаючи з 2003 року розробляють та регулярно оновлюють сценарій розвитку енергетичної та транспортної системи, а також обчислюють відповідні емісії парникових газів [356]. До розробки сценаріїв 2013 року [50, 88, 89] та 2016 років [51, 88, 89] було залучено модель G4M, зокрема, її версію для Європейського Союзу. Модель G4M застосовували для детального

аналізу емісій CO<sub>2</sub> від лісозаготівлі, заліснення та знеліснення, включаючи визначення потенціалу заготівлі деревини та використання відходів деревини при лісокористуванні [69, 83], а також визначення референтних емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування для окремих країн ЄС (Бельгії, Болгарії, Чехії, Естонії, Франції, Угорщини, Італії, Латвії, Литви, Люксембургу, Нідерландів, Румунії, Словачії та Іспанії), які ці країни звітували до РКЗК ООН. [80, 296-299]. Для розробки референтних сценаріїв застосовували схему моделювання, описану в розділі 2.3, а для визначення референтних емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування застосовували схему моделювання, описану в розділі 2.4.

### 5.7.1. Опис чисельного експерименту

Емісії парникових газів лісового сектора (заліснення, знеліснення та лісокористування) моделюють за допомогою G4M, а модель GLOBIOM-ЄС для сільськогосподарського сектора (емісії парникових газів від використання ріллі та пасовищ). Обидві моделі використовують підхід МГЕЗК 3 рівня з урахуванням характеристик ґрунту, біомаси та динаміки вуглецю, пов'язані з різними системами управління. Емісії CO<sub>2</sub> з ґрунту від рослинництва (та лігноцелюлозних культур) базуються на динамічних функціях, оцінених за допомогою моделі EPIC. Емісії CO<sub>2</sub> від продуктів з деревини розраховано за методом МГЕЗК 2 рівня, а емісії з боліт, населених пунктів та інших земель явно не моделюються та зберігаються на рівні 2010 року, використовуючи дані РКЗК ООН. [51, 88, 89]

Емісії CO<sub>2</sub> в категорії «інша земля конвертована у лісову землю» обчислено за допомогою G4M. Приріст біомаси в лісі після 2000 року оцінюється G4M з урахуванням віку насаджень, заходів догляду за насадженнями та особливостей ґрунту. Швидкість заліснення у G4M відкалібровано за даними РКЗК ООН/КП, опрацьованими Об'єднаним дослідницьким центром Європейської комісії (JRC). Майбутня площа лісових насаджень залежить від факторів, отриманих від GLOBIOM-ЄС, тобто прогнозів цін на землю, цін на деревину, а також землі необхідної для ведення сільського господарства. Вік насадження, біомаса та динаміка запасів вуглецю відстежуються для кожної клітинки растру, яку заліснюють, вони відрізняються за рахунок різних швидкостей росту лісу, що визначаються умовами росту та видом дерев. Зміни органічного вуглецю ґрунту,

пов'язані з залісненням, також розглядаються на основі початкового вмісту вуглецю в ґрунті з [175], швидкості накопичення вуглецю в ґрунті від [62.] та надземної біомаси. [51, 88, 89]

Емісії CO<sub>2</sub> в категорії «Лісова земля конвертована в інші землі» обчислюють як суму площ лісових земель, конвертованих в іншу землю в кожній клітинці растру, помножену на запас вуглецю біомаси в цій клітинці, агрегованих до рівня країни після 2000 року. Швидкість знеліснення у G4M калібрують за даними РКЗК/КП, опрацьованими Об'єднаним дослідницьким центром Європейської комісії. Ми припускаємо, що весь вуглець біомаси вивільняється в момент знеліснення, і що до 40% органічної речовини ґрунту втрачається повільно після знеліснення [62]. Швидкість розкладання органічної речовини ґрунту залежить від середньорічної температури та кількості опадів у кожній клітинці растру [332] відповідно до [74].

Для обчислення емісій CO<sub>2</sub> в категорії «лісова земля, яка залишається лісовою землею» використовують G4M. Основними варіантами управління лісовим господарством, що розглядаються у моделі G4M, є рубки догляду (прорідження) та вибір тривалості обороту рубки. Ці заходи ведення лісового господарства можуть збільшити або зменшити запас біомаси в лісі. Прогноз емісій CO<sub>2</sub> обумовлений функціями росту лісових насаджень, розподілом за класами віку, інтенсивністю рубок догляду, тривалістю обороту рубок та лісозаготівлею. Емісії та поглинання CO<sub>2</sub> біомасою лісів, обчислені у моделі, були відкалібровані за попередніми даними країн за період 2000-2010 рр. (в середньому ми збільшили рівень поглинання CO<sub>2</sub> лісами приблизно на 20%). Це забезпечує узгодженість між даними країн та результатами моделі щодо врахування всіх резервуарів вуглецю, неузгодженості вхідних даних та методів обчислення емісій. [51,88, 89]

Дані про площі лісу та приріст біомаси були узгоджені з національними статистичними даними, якщо такі дані були доступні, для забезпечення відповідності національним прогнозам (таблиця 5.3). Модель та вхідні дані були вдосконалені на основі двосторонніх консультацій з представниками країн-членів ЄС у рамках проекту EUCLIMIT [75], який стосувався, головним чином, оновлень даних про інвентаризацію лісу та історичних даних по лісозаготівлі, щоб покращити відповідність до звітів країн до РКЗК ООН. [51,88, 89]



Таблиця 5.3. Вхідні дані для моделі G4M [89]

Країна	Середня за (2000-2013) швидкість [kha/year]		Площа лісу у 2000 [kha]	Втрати при лісозаготівлі	
	заліснення	зnelіснення		значення	Коментар
Австрія <sup>1</sup>	7.7	2.8	3,367	0.13	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [81]
Бельгія	1.3	1.2	663	0.05	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [79]
Болгарія	12.0	0.2	2,258	0.16	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [79]
Хорватія <sup>2</sup>	2.9	0.4	1,749	0.07	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [81]
Чехія	2.6	0.5	2,561	0.09	Надано національними експертами у 2015р.
Данія	4.1	0.3	567	0.15	Значення по замовчуванню
Естонія	1.9	1.3	2,103	0.10	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [79]
Фінляндія	3.8	17.7	20,317	0.09	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [81]
Франція	54.3	43.6	14,465	0.05	Надано національними експертами у 2015р.
Німеччина	18.8	10.8	10,833	0.20	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [81]
Греція	0.9	0.3	3,317	0.15	Значення по замовчуванню
Hungary	12.3	1.4	1,622	0.12	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [81]
Ірландія <sup>3</sup>	9.4	1.1	580	0.15	Значення по замовчуванню
Італія	68.9	2.3	7,396	0.04	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [81]
Латвія	8.0	1.8	3,024	0.11	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [79]
Литва	6.5	0.2	1,756	0.15	Надано національними експертами у 2015р.
Люксембург	0.4	0.3	87	0.15	Значення по замовчуванню
Нідерланди	3.0	2.3	288	0.14	Грунтується на [79]
Польща	35.7	0.6	8,342	0.12	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [79]
Португалія	18.5	9.0	2,229	0.02	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [81]
Румунія	18.6	8.9	5,029	0.02	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [79]
Словакія	1.4	0.3	1,767	0.03	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [79]
Словенія	4.6	3.9	1,157	0.15	Значення по замовчуванню
Іспанія <sup>4</sup>	35.2	16.5	13,804	0.04	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [79]
Швеція <sup>5</sup>	22.3	13.0	23,300	0.07	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [81]
Великобританія	11.4	3.1	2,954	0.14	Грунтується на відношенні звалено/заготовлено з [81]

<sup>1</sup> Площа лісу надана національними експертами

<sup>2</sup> Швидкість заліснення і зnelіснення на основі [105]

<sup>3</sup> використано площу лісу, доступну для заготівлі деревини 2005р., оскільки дані 2000р. не надано у [79]

<sup>4</sup> використано площу лісу, доступну для заготівлі деревини 2005р., оскільки дані 2000р. не надано у [79]

<sup>5</sup> Використано площу продуктивного лісу, надану національними експертами.

Моделі G4M та GLOBIOM-EU пов'язані через ітераційну процедуру. У першій ітерації GLOBIOM-ЄС надає відповідні вихідні змінні (наприклад, ціни на сільськогосподарську землю та деревину, попит на деревину у країнах та потребу у сільськогосподарській землі у клітинках растру) до G4M, у якій моделюють детально процеси лісокористування, заліснення та знеліснення та емісії CO<sub>2</sub> для європейського лісового сектору. Під час другого циклу дані про заліснені площі передаються назад до GLOBIOM-ЄС. У моделі GLOBIOM-ЄС знову моделюють відповідний сценарій та обчислюють рівні активності для аграрного сектору та відповідні емісії. [51, 89].

### 5.7.2. Результати дослідження

У базовому сценарії сектор землекористування, зміни землекористування та лісового господарства (ЗЗЛГ) ЄС продовжує залишатись поглиначем вуглекислого газу до 2030 року, хоча прогнозується, що поглинання зменшиться з -299 MtCO<sub>2</sub> у 2005 році до -288 MtCO<sub>2</sub> у 2030 році і продовжить зменшуватись після 2030 року. Це зниження є результатом діяльності з землекористування з різними тенденціями, для яких лісовий сектор є найважливішим. Загалом, емісії CO<sub>2</sub> від лісозаготівлі зумовлені балансом лісозаготівлі та приросту лісів. Лісозаготівля продовжує зростати з 516 Мм<sup>3</sup> у 2005 році до 565 Мм<sup>3</sup> у 2030 році, що пов'язано зі зростанням попиту на деревину (зумовлене попитом на біоенергію, кількістю населення та зростанням доходів). Приріст лісу внаслідок зменшується з 751 Мм<sup>3</sup>/га в 2005р. до 725 Мм<sup>3</sup>/га в 2030 р. Як наслідок цих двох процесів стік вуглецю у біомасу лісів знижується на 32% у 2030 році. Загальна площа лісу збільшиться з 155 Мга у 2005 році до 159 Мга у 2030 році і 162 Мга у 2050р. [51]

Швидкість заліснення зменшується, але між 2005 та 2030 роками буде створено 7 Мга насаджень і ще 3 Мга до 2050 року. Акумуляування вуглецю плантаціями з часом зростає, оскільки створюються нові насадження, а також молоді ліси, які були створені протягом останніх 20 років, потрапляють у фазу

високої продуктивності. Заліснені території поглинуть 99 МтCO<sub>2</sub> у 2030р. та 123 МтCO<sub>2</sub> у 2050р. (рис. 5.42) [51]

Швидкість знеліснення зменшиться з 160000 га у 2005р. до 43000 га у 2030р. та 17 000 га у 2050р., що призведе до зменшення емісій від 63 МтCO<sub>2</sub> у 2005р. до 20 МтCO<sub>2</sub> у 2030р. і 8 МтCO<sub>2</sub> у 2050р. (рис. 5.42) [51]

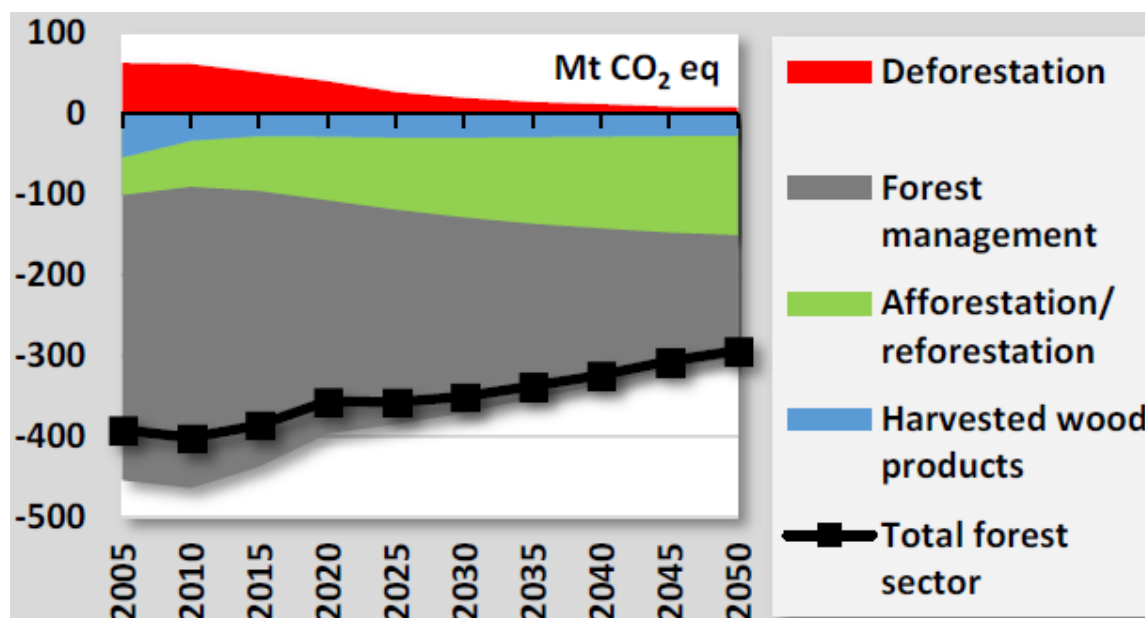


Рис. 5.42. Емісії CO<sub>2</sub> у лісовому секторі Європейського Союзу [51]

Частина заготовленої деревини переробляється на кінцеві вироби з деревини, які мають термін служби декілька років, тому вуглець затримується в них, а стік вуглецю у деревні продукти становив -54МтCO<sub>2</sub> у 2005р, зменшиться до -29 МтCO<sub>2</sub> у 2030р. і до -26 МтCO<sub>2</sub> у 2050р. Зниження рівня стоку вуглецю у лісах, у яких ведеться лісове господарство, частково компенсується збільшенням кількості вуглецю у нових насадженнях, зменшенням швидкості знеліснення та стоком вуглецю у вироби з деревини. (рис. 5.42) [51]

### 5.7.3. Визначення референтних рівнів емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування

У контексті переговорів РКЗК ООН щодо правил обліку емісій і стоків парникових газів в секторі землекористування, зміни землекористування та лісове господарство 27 держав-членів ЄС представили референтні рівні емісій парникових газів в секторі лісового господарства (FMRL) [80], використовуючи

базовий сценарій кількості населення та валового внутрішнього продукту "бізнес як завжди" (BAU) (<http://unfccc.int/bodies/awg-kp/items/5896.php>). 14 держав-членів - Франція, Італія, Іспанія, Люксембург, Бельгія, Нідерланди, Румунія, Болгарія, Чехія, Угорщина, Литва, Латвія, Естонія та Словаччина використовували прогнози, розроблені з використанням двох моделей процесів лісокористування - G4M та EFISCEN за методом узгодженим з Об'єднаним центром досліджень Європейської комісії (JRC).

Для обчислення емісій від лісокористування використовували схему моделювання, описану у розділі 5.3.4. Референтні рівні емісій ґрунтуються на макроекономічних прогнозах ВВП, кількості населення, а також попиту на біоенергію отримані за допомогою моделі PRIMES [51].

Для визначення референтних емісій використовували дві моделі лісових процесів, G4M та EFISCEN, що дозволяє порівнювати прогнозовану динаміку стоку вуглецю і отримати більш надійний результат. Для коректного порівняння результатів двох моделей їх вхідні дані гармонізували. Після гармонізації вхідних даних спостережувані відмінності в результатах можуть бути інтерпретовані як проксі щодо невизначеності, пов'язаної з використанням різних підходів. Використання лише однієї моделі може забезпечити точніші результати (випадкова похибка), але ці результати можуть бути з систематичною похибкою. Для порівняння результатів були розглянуті наступні параметри та набори даних для гармонізації: площа лісу, вікова структура лісу, щільність деревини. Зокрема, за допомогою моделі EFISCEN обчислили середні для країн щільності деревини, які використали у моделі G4M. Коефіцієнти для обчислення повної біомаси були гармонізовані за допомогою використання карт біомаси [98], які базуються на факторах, що використовуються в EFISCEN. Обидві моделі також використовували ті ж історичні та майбутні дані про виробництво деревини, отримані від моделі GLOBIOM. [21, 24]

Подальші коректування моделей та вхідних даних (при збереженні узгодженості між моделями) були зроблені під час робочої зустрічі розробників моделей та представників держав-членів ЄС у 2009р., проведеної в Об'єднаному

дослідницькому центрі Європейської комісії в м. Іспра (Італія), і двосторонніх консультацій у 2009-2011рр. Ці коригування включали оновлення даних щодо інвентаризації лісів, тривалості ротації конкретних видів дерев (лише в EFISCEN) та коефіцієнти обчислення повної біомаси. Інтенсивні консультації з експертами країн та перевірка запропонованого методу та вхідних даних експертами РКЗК ООН дозволили отримати гармонізовані вхідні дані щодо площі лісів та заготівлі деревини, що краще відображало дані "лісового господарства" та розрахунки, що застосовуються кожною країною для подання звітів за Кіотським протоколом. [21, 24]

Оскільки за допомогою моделей G4M та EFISCEN обчислили лише емісії з біомаси лісів, а інвентаризації парникових газів можуть включати також інші джерела емісій, для забезпечення відповідності між результатами моделей та історичними даними, наданими країнами, результати моделей були скореговані наступним чином. Спершу, знаходили середні значення емісій за 2000-2020рр., отримані за допомогою обох моделей (позначимо  $E_m$ ). Тоді брали середні значення за 2000-2008рр ( $E_{m2000-2008}$ ) та порівнювали його із середнім за 2000-2008рр., отриманими зі звітів країн до РКЗК ООН ( $E_{unfccc}$ ). Емісії  $E_{unfccc}$  включають емісії з біомаси лісів, а також можуть включати (за вибором країни) емісії з ґрунтів, мертвої деревини та лісової підстилки. Тому проводять корегування результатів моделей з врахуванням двох груп:

- біомаса: корегування, розраховане як різниця між середніми емісіями та абсорбцією по країні з біомаси за період 2000-2008 років та середніми прогнозованими викидами та абсорбцією моделей з біомаси на період 2000-2008 років ( $E_{m2000-2008}$ );

- резервуари без біомаси та джерела ПГ: корегування, що обчислюється як сума емісій пулів без біомаси та джерел ПГ, як повідомляється країною за період 2000-2008 років.

Каліброване середнє значення моделей, яке використовується для встановлення контрольного рівня, отримується шляхом додавання загального середнього значення (корегування біомаси + корегування резервуарів без біомаси

та емісій ПГ) до середніх моделей (*Em*). Тоді запропонований референтний рівень емісій парникових газів обчислюється як середнє за 2013-2020рр. від скорегованих середніх значень моделей (корегування результатів моделей та визначення референтного рівня емісій проводять експерти JRC). [80, 296-299, 356]

На рис. 5.43 представлено приклад результатів моделей до корегування, а на рис. 5.44 - результатів моделей після корегування та запропонований референтний рівень емісій (сума для всіх 14 країн; без врахування емісій з продуктів з деревини). Крім того, для підтвердження надійності результатів дослідили чутливість моделей до зміни попиту на деревину +/-10% від звичайного значення (результати представлено на рис. 5.43 та рис. 5.44).

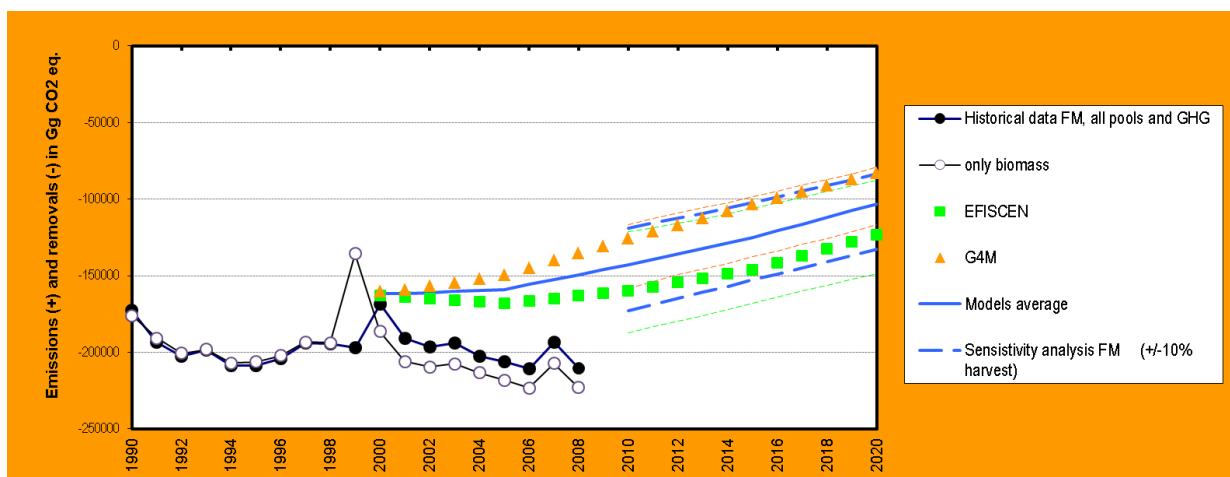


Рис. 5.43. Емісії CO<sub>2</sub> з біомаси лісів від лісокористування, отримані за допомогою моделей G4M та EFISCEN для середніх значень попиту на деревину та +/-10% від середнього, емісії з біомаси лісів з інвентаризації ПГ в категорії «лісові землі, які залишаються лісовими землями», а також емісії ПГ з усіх резервуарів та джерел ПГ для 14 країн ЄС

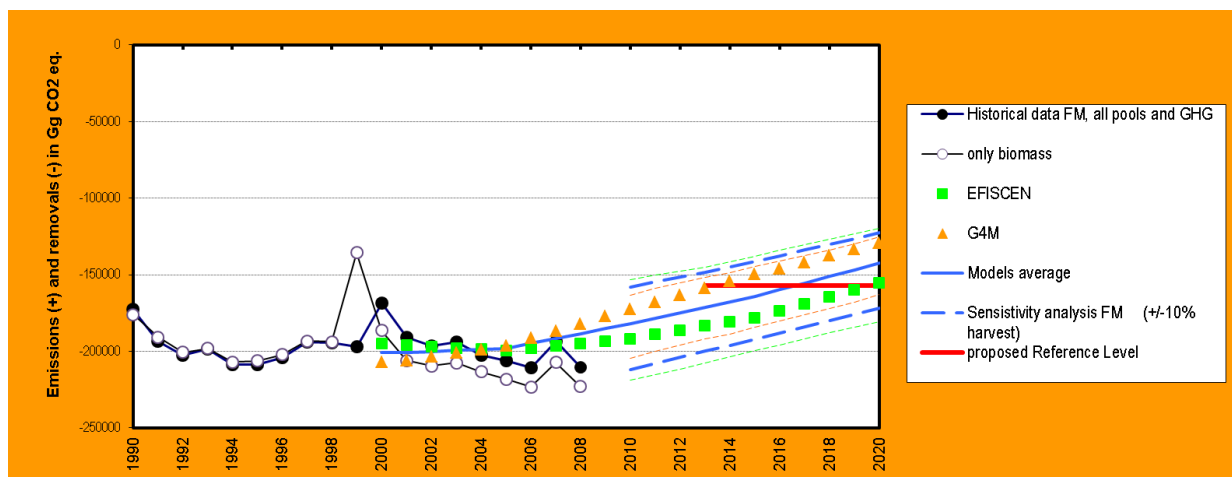


Рис. 5.44. Скореговані емісії CO<sub>2</sub> з біомаси лісів від лісокористування, отримані за допомогою моделей G4M та EFISCEN для середніх значень попиту на деревину та +/- 10% від середнього; емісії з біомаси лісів з інвентаризації ПГ в категорії «лісові землі, які залишаються лісовими землями», емісії ПГ з усіх резервуарів та джерел ПГ; а також визначений референтний рівень емісій (без врахування емісій з продуктів з деревини) для 14 країн ЄС.

## 5.8. Висновки до розділу 5

1. Розроблена математична модель G4M призначена для розв'язування широкого класу задач, пов'язаних із прогнозуванням динаміки площі лісу (через процеси заліснення та знеліснення), біомаси лісу, заготівлі деревини, емісій вуглекислого газу, спричинених цими процесами, а також відгуку на заходи по зменшенню емісій CO<sub>2</sub>. Властивості моделі дають можливість використовувати результати моделювання для підтримки прийняття рішень щодо референтних сценаріїв емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування та змін землекористування у країнах ЄС; референтних рівнів емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування у країнах ЄС; синергії від заходів щодо зменшення швидкості знеліснення та збереження видів тварин у країнах, що розвиваються; визначення оптимальних місць для впровадження заходів по зменшенню втрати вуглецю лісами; зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування та змін землекористування для всіх країн та різних сценаріїв соціально-економічного розвитку; потенціалу заготівлі деревини та відходів від заготівлі деревини для різних сценаріїв соціально-економічного розвитку; використання біоенергії та ін.

2. Розроблено метод отримання кривих граничних витрат на зменшення емісій вуглекислого газу від заліснення, знеліснення та лісокористування з використанням моделі G4M та проаналізовано вплив взаємозв'язків між цими трьома процесами, а також вплив геопросторових та часових ефектів на криві граничних витрат. Зокрема, моделювання здійснюють для набору цін емісій CO<sub>2</sub> від 0 до 2000 \$/тCO<sub>2</sub>. Причому, крок має бути малим для низьких цін емісій CO<sub>2</sub>. Від кожного результату емісій вуглекислого газу віднімають результат з нульовою ціною. Перевагою моделі G4M є те, що процеси заліснення, знеліснення і лісокористування моделюються разом, а також те, що модель є геопросторовою, тому можна спостерігати взаємозв'язки між цими процесами та їх вплив на потенціал зменшення емісій парникових газів. Зокрема, зменшення швидкості знеліснення, спричинене впровадженням ціни емісій CO<sub>2</sub>, збільшує дефіцит землі, і тому може призвести до зменшення заліснення у порівнянні з базовим сценарієм (негативний ефект на кривій граничних витрат). При зменшенні знеліснення менше деревини, заготовленої при знелісненні, потрапляє на ринок, тому об'єм деревини заготовленої в лісі зростає, що в деяких випадках може привести до зниження біомаси лісу і, відповідно, більших емісій вуглекислого газу від лісокористування у порівнянні з базовим сценарієм. Якщо оборот рубки експлуатаційного лісу був збільшений у результаті впровадження ціни емісій CO<sub>2</sub>, то біомаса лісу зростає, і якщо у майбутньому цю ділянку землі буде знеліснено, то втрати біомаси і, відповідно, емісії від знеліснення будуть вищими у порівнянні з базовим сценарієм. Нелінійна швидкість приросту біомаси лісів з віком лісу, а також розкладання ґрунту при знелісненні є причиною того, що емісії від зміни параметрів лісокористування, чи зміни землекористування тривають протягом деякого часу, повільно зменшуючись, а час зміни (наприклад, спричинений введенням певної ціни емісій CO<sub>2</sub>) визначає емісії в майбутньому. Геопросторова нерівномірність параметрів лісів визначає те, що емісії, а також потенціал зменшення емісій залежать також від географічних координат.



3. Розроблено схеми взаємозв'язку моделі G4M з економічною моделлю біоресурсів GLOBIOM для врахування ефектів торгівлі товарами та потреби у сільськогосподарській землі; з економічною моделлю біоресурсів GLOBIOM, моделями енергетичної системи MESSAGE, макроекономіки MACRO, кліматичної системи MAGICC та моделлю GAINS для формування комплексу інтегральної оцінки; економічними моделями GLOBIOM та EU-FASOM, моделлю процесів лісокористування EFISCEN для покращення надійності прогнозів і визначення референтних рівнів емісій CO<sub>2</sub> від лісозаготівлі; економічною моделлю біоресурсів GLOBIOM, економічною моделлю сільського господарства CAPRI, моделлю макроекономіки GEM-E3, моделями енергетичної системи та транспорту PRIMES та PROMETHEUS, моделі забруднень повітря GAINS для розробки референтних сценаріїв розвитку енергетичної та транспортної систем і відповідних емісій парникових газів у країнах ЄС.
4. Використовуючи розроблену математичну модель G4M та схему взаємодії моделі G4M з моделлю GLOBIOM, розроблено прогноз базових емісій вуглекислого газу від лісокористування, заліснення та знеліснення, а також потенціалу зменшення емісій на глобальному рівні та для окремих країн. Показано, що швидкість заліснення досягне максимуму у 2020 році (6.9 Мга/рік), швидкість знеліснення постійно зменшується (14.7 Мга/рік у 2000р., 8 Мга/рік у 2010р. та 4 Мга/рік у 2050р.). Глобальний потенціал зменшення сумарних емісій (завдяки залісненню, зменшенню знеліснення та оптимізації ведення лісового господарства) змінюється від 3444 МтCO<sub>2</sub>/рік у 2020 році (всі траєкторії ціни емісій CO<sub>2</sub>) до 4416 МтCO<sub>2</sub>/рік у 2050 році. Потенціал зменшення емісій вуглекислого газу залежить від траєкторії, за якою буде змінюватися ціна емісій вуглекислого газу, при цьому більший потенціал досягається, якщо ціна зростає швидше з самого початку.
5. Використовуючи розроблену математичну модель G4M та схему взаємодії моделі G4M з іншими моделями для проведення інтегральної оцінки на глобальному рівні, проведено обчислення динаміки заліснення, знеліснення та лісокористування, а також відповідних емісій вуглекислого газу для

сценаріїв спільних соціально-економічних шляхів та репрезентативних шляхів концентрацій парникових газів і радіаційного впливу на кліматичну систему (SSP/RCP). Глобальний потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від заліснення (збільшення поглинання CO<sub>2</sub>) у 2050 році може досягати більше 1000 МтCO<sub>2</sub>/рік при невисоких рівнях попиту на біоенергію. При високому попиті на біоенергію потенціал приблизно у 2.5 рази менший. Глобальний потенціал зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення у 2050 році може досягати більше 4000 МтCO<sub>2</sub>/рік при невисоких рівнях попиту на біоенергію. При високому попиті на біоенергію потенціал приблизно у 2 рази менший, в основному, через нижчу швидкість знеліснення при нульовій ціні емісій вуглекислого газу та більшій потребі у сільськогосподарській землі. У сценарії SSP2 загальна площа лісу (враховуючи заліснення та знеліснення) наприкінці століття відновлюється до початкового значення після повільного зниження на початку століття. Відсоток площі лісу, що використовується для лісозаготівлі, збільшиться з 19% у 2010 році до 24% у 2100 році. Загальна площа лісу у сценарії SSP1 – на 2% і у сценарії SSP3 – на 6% менша, ніж у сценарії SSP2. Частка зменшення емісій парникових газів від лісозаготівлі та зміни землекористування від загального зменшення є невеликою (до 10%) і зменшується від сценарію SSP1 до SSP3, але має важливе значення, оскільки зменшення емісій є дешевшим, а ефект від впровадження заходів є швидким, що дає час та кошти для розгортання інших технологій зменшення емісій.

6. Використовуючи розроблену математичну модель G4M проведено аналіз синергії заходів по зменшенню емісій вуглекислого газу від знеліснення та ризику зникнення видів тварин у країнах, що розвиваються. Показано, що продовження історичного рівня знеліснення, ймовірно, призведе до дуже високого рівня вимирання видів. Запровадження адекватного фінансового механізму REDD може суттєво зменшити вимирання видів. Знеліснення є нерівномірним, найбільше видів може зникнути, якщо будуть знеліснені території з більшою кількістю видів, наприклад, захід басейну Амазонки, південно-східна Азія, атлантичні ліси Південної Америки. Знеліснення відбувається досить нерівномірно, зокрема Нова Гвінея може втратити біля

82% лісового покриву до 2100 року, Мадагаскар – 77%, Атлантичний Ліс та Тропічні Анди – 74%, гори південно-західного Китаю – 25%, Гімалаї та Філіппіни – 28%. Чим вищий рівень інвестицій у програми зменшення емісій від знеліснення та деградації лісів (REDD), тим менше знеліснення і, відповідно, кількість зниклих видів. Різні економічні умови та сільськогосподарська придатність землі (зокрема, у моделі G4M) визначають чутливість до рівня інвестицій у проекти REDD. Наприклад, Нова Гвінея може отримати значну користь від платежів REDD у розмірі 10 \$/тCO<sub>2</sub> (уникнути 90% знеліснення, прогнозованого до 2100 року у базовому сценарії), у той час як регіони атлантичного лісу та Індонезії можуть зменшити знеліснення лише на 35% та 38%, відповідно. Для цін емісій вуглекислого газу 10 \$/тCO<sub>2</sub> і вище в більшості районів Амазонки та Конго можна було б запобігти вимиранню місцевих видів тварин. Проте, вимирання залишається значним (хоч і значно нижчим, ніж без впровадження ціни емісій вуглекислого газу) у частині атлантичного лісу та південно-східної Азії та в інших регіонах, важливих для біорізноманіття, таких як Тропічні Анди. Щоб більш ефективно запобігати зникненню видів можна застосувати підхід запропонований у [68], який полягає у тому, щоб створити карти місць, у яких запровадження проектів зменшення знеліснення, матиме найбільший вплив. Збереження зникаючих видів є додатковою вигодою для проектів REDD, які започатковували для зменшення емісій парникових газів. Зв'язок між ціною емісій вуглекислого газу – рівнем стимулів у проектах REDD – та кількістю збережених видів є досить надійним – він також зберігається для сімейства сценаріїв, що базуються на більш низьких рівнях базового знеліснення, а також при припущенні, що захищені ліси не зазнають знеліснення.

7. Використовуючи розроблену математичну модель G4M та схему взаємодії моделі G4M з іншими моделями для проведення інтегральної оцінки для країн Європейського Союзу, здійснено обчислення динаміки заліснення, знеліснення та лісокористування, а також відповідних емісій вуглекислого газу для різних сценаріїв. Швидкість заліснення зменшується, але між 2005 та 2030 роками буде створено 7 Мга насаджень і ще 3 Мга до 2050 року.

Акумулявання вуглецю посадженим лісом з часом зростає, оскільки створюються нові насадження, а також молоді ліси, які були створені протягом останніх 20 років, потрапляють у фазу високої продуктивності. Заліснені території поглинуть 99 МтСО<sub>2</sub> у 2030р. та 123 МтСО<sub>2</sub> у 2050р. Швидкість знеліснення зменшиться з 160 000 га у 2005р. до 43 000 га у 2030р. та 17 000 га у 2050р., що призведе до зменшення емісій від 63 МтСО<sub>2</sub> у 2005р. до 20 МтСО<sub>2</sub> у 2030р. і 8 МтСО<sub>2</sub> у 2050р. Лісозаготівля зростає з 516 Мм<sup>3</sup> у 2005 році до 565 Мм<sup>3</sup> у 2030 році, що пов'язано зі зростанням попиту на деревину (зумовлене попитом на біоенергію, кількістю населення та зростанням доходів). Приріст лісу зменшується з 751 Мм<sup>3</sup>/га в 2005р. до 725 Мм<sup>3</sup>/га в 2030 р. Як наслідок цих двох процесів стік вуглецю у біомасу лісів знижується на 32% у 2030 році. Загальна площа лісу збільшиться з 155 Мга у 2005 році до 159 Мга у 2030 році і 162 Мга у 2050р.

8. Використовуючи розроблену математичну модель G4M та схему взаємодії моделі G4M з іншими моделями для проведення інтегральної оцінки для країн Європейського Союзу, проведено обчислення референтних рівнів емісій парникових газів для 14 країн-членів ЄС, які подані цими країнами до РКЗК ООН.

## Розділ 6. Прикладні методи оцінки невизначеності емісій парникових газів

### 6.1. Методи визначення зміни емісій парникових газів та досяжності визначених цілей зменшення емісій

Обчислення емісії парникових газів на рівні країн характеризуються певними невизначеностями - від 1% до більше, ніж 200% (95% інтервал довіри, без врахування систематичних похибок) в залежності від процесів, які спричиняють емісії, та, власне, парникових газів [333]. Найменша невизначеність притаманна процесам спалювання викопного палива і емісіям CO<sub>2</sub>, породженим цим спалюванням, а найбільша – процесам у сільському господарстві та емісіям N<sub>2</sub>O, породженим цими процесами. В залежності від точності статистичної інформації та додаткових досліджень щодо факторів емісій у країнах, а також відносного вкладу різних процесів і парникових газів у сумарні емісії у країнах, невизначеність сумарних емісій складає від 3 до більше, ніж 16%. З другого боку, просторова роздільна здатність та точність інверсного моделювання ще недостатня, щоб обчислити надійні значення емісій для країн на основі вимірювання концентрації парникових газів в атмосфері [256], та й не всі парникові гази вимірюють систематично.

Jonas et al. (1999) [163] запропонував концепцію «часу верифікації» (Verification Time) як засобу для діагностування того, коли зміна в емісіях парникових газів може бути надійно детектована. Концепція «часу верифікації» стала основою для розробки ряду інших засобів детектування зміни емісій. Визначення концепції «часу верифікації», яке було сформульовано у [163]:

"... ми вважаємо розумною стандартною умовою для перевірки. Ця умова визначає, що абсолютна зміна нетто емісій у країні у момент часу  $t_2$  ( $|\Delta F(t_2)|$ ) по відношенню до часу  $t_1$  ( $t_1 < t_2$ ) перевищує невизначеність у зареєстрованих нетто емісіях в час  $t_2$ . Ця умова дозволяє здійснити належну перевірку зміни емісій в країні, тобто перевірку, яка сумісна з зареєстрованою зміною нетто емісій:

$$|\Delta F(t_2)| > \varepsilon(t_2),$$

або згідно з припущенням про те, що може бути застосована апроксимація першого порядку,

$$\left| \frac{dF}{dt} \right|_{t_1} \cdot \Delta t > \varepsilon(t_2).$$

На рис.6.1 зміна нетто емісій ( $F$ ) не може бути достовірно визначена в час  $t'_2$ , оскільки  $F(t'_2) - F(t_1) < \varepsilon(t'_2)$ , а отже і досягнення цілі зменшення емісій (позначено зіркою) теж не може бути достовірно визначено. Зміна емісій може бути достовірно визначена лише після часу  $t_2$ , коли  $F(t_2) - F(t_1) \geq \varepsilon(t_2)$ .

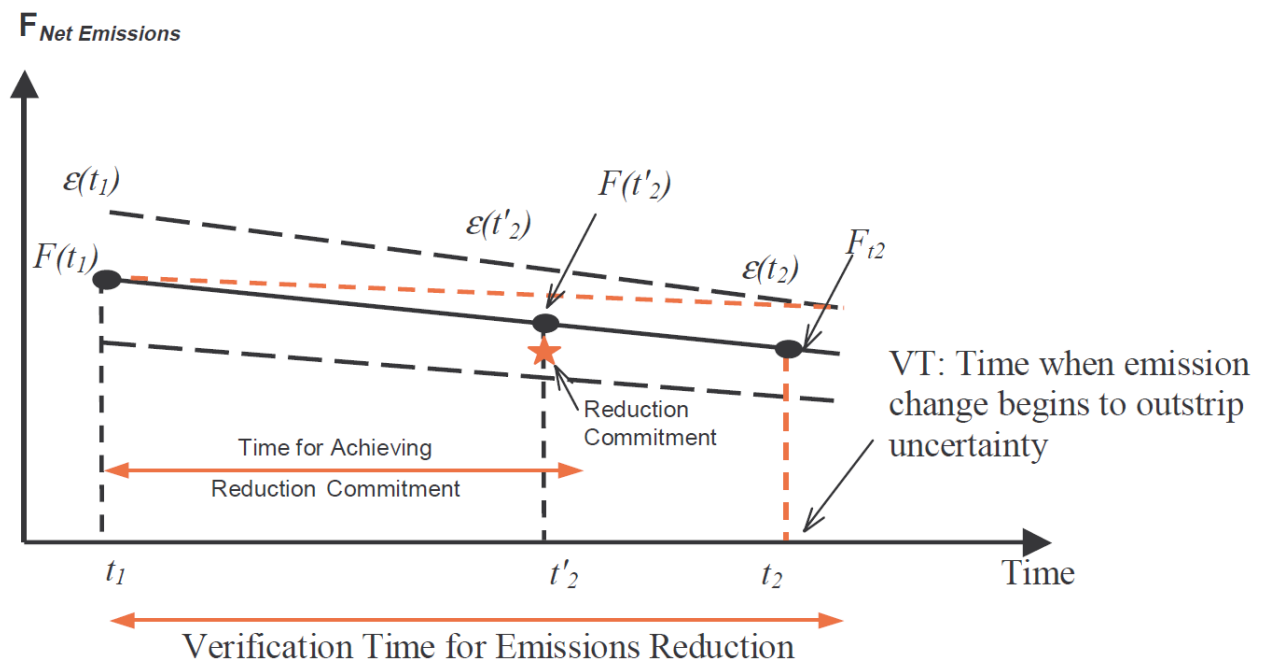


Рис. 6.1. Ілюстрація концепції «часу верифікації» [119]  
(модифікований рис. з [165]).

Використовуючи концепцію «часу верифікації» ми розробили простий засіб діагностування наскільки легко буде детектувати зміну емісій у країні відповідно до невизначеності обчислення емісій в цій країні та зобов'язань країни щодо зміни емісій до визначеного часу [119, 159, 166]. Нехай  $F$  є нетто емісіями парникових газів в країні у базовому році  $t_1$  (наприклад, 1990 рік). Країні, відповідно до зобов'язань по міжнародному договору, необхідно змінити емісії до  $k * 100\%$  у році зобов'язання  $t_2$  (наприклад, 2010 або 2020 рік). Таким чином, нетто емісії у країні у момент часу  $t_2$  будуть рівними  $F_{t2} = k * F_{t1}$  (рис. 6.1).

Припустимо, що відносна невизначеність викидів залишається постійною, тобто

$$R = \frac{\varepsilon_1}{F_{t1}} = \frac{\varepsilon_2}{F_{t2}} = \text{const.}$$

Записавши відношення між емісіями в час  $t_1$  та  $t_2$  та відносну зміну емісій

$$\frac{F_{t2}}{F_{t1}} = k,$$

можемо записати вираз для невизначеності у час  $t_2$ :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cdot \frac{F_{t2}}{F_{t1}} = \varepsilon_1 \cdot k$$

Згідно концепції «часу верифікації», для того щоб зміну в емісіях можна було легко детектувати, має виконуватися умова

$$|F_{t1} - F_{t2}| > \varepsilon_2.$$

Виразивши  $F_{t2}$  через  $F_{t1}$  та  $k$  отримаємо

$$\frac{|1-k|}{k} > \frac{\varepsilon_1}{F_{t1}},$$

де  $\frac{\varepsilon_1}{F_{t1}}$  – відносна невизначеність емісій. Тоді критичне значення невизначеності емісій, при якому зміну емісій можна буде легко детектувати за умови незмінної відносної невизначеності запишемо так:

$$R_{crit} = \frac{|1-k|}{k}.$$

Оскільки у офіційних документах вказують на скільки країни зобов'язуються змінити емісії парникових газів, для зручності перепишемо останній вираз, замінивши  $k$  на  $\delta=1-k$ :

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

Розроблений нами метод діагностики зобов'язань країн змінити емісії парникових газів було використано для розроблення більш складних діагностичних методів та моніторингу виконання країнами їх зобов'язань [159-162, 166].

## **6.2. Дослідження невизначеностей в оцінці повного вуглецевого балансу наземних екосистем та впливу цих невизначеностей на інверсне моделювання потоків CO<sub>2</sub>**

### **6.2.1. Загальна інформація про дослідження**

Потік CO<sub>2</sub> в атмосферу (емісії) можна оцінити, використовуючи наземні вимірювання та облік («знизу вгору»), або вимірювання концентрації атмосферного CO<sub>2</sub> та моделювання потоків, що спричиняють це поле концентрації («зверху вниз») [55, 196]. Існує невідповідність результатів, отриманих з використанням цих двох методів, викликана тим, що не всі процеси враховують, а також невизначеностями, характерними для методів, які використовують. Обидва методи є певною мірою незалежними і можуть бути використані для взаємної перевірки, якщо різниця між результатами буде меншою, а причина різниці більш зрозумілою. Зокрема, якщо б метод "зверху вниз" був вдосконалений для отримання достовірної оцінки емісій на рівні країни, тоді його можна було б використати для перевірки звітів країн про емісії парникових газів для теперішніх та майбутніх кліматичних угод, таких як Кліматична конвенція ООН про зміну клімату та Кіотський протокол [95, 120, 121, 132, 229, 279, 301].

Ціллю нашого дослідження є зменшення різниці між результатами обчислення емісій CO<sub>2</sub> в атмосферу, отриманими методами «знизу-вгору» та «зверху-вниз», щоб забезпечити можливість (взаємної) перевірки результатів обчислень емісій CO<sub>2</sub>. House et al. (2003), Nilsson et al. (2003) та Rödenbeck et al. (2003) [148, 222, 223, 257] вказали на "розрив в обліку CO<sub>2</sub>" у субглобальних (континентальних та менших) масштабах у 2003 році. Ми розглядаємо територію Росії, яка є достатньо великою, щоб бути виділеною під час обох типів обчислень «знизу вгору» та «зверху вниз», крім того, це країна, яка підписала і ратифікувала Кіотський протокол. Початковий експеримент із цикло-стаціонарного інверсного моделювання для визначення невизначеностей, проведений в Лабораторії наук про клімат та навколишнє середовище (Le Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement - LSCE) у Франції, показав, що існує



потенціал для покращення точності оцінок потоків CO<sub>2</sub> методом інверсного моделювання, якщо обчислення методом «знизу вгору» будуть охоплювати всі процеси, а невизначеність результатів обчислень буде достовірною. Крім того, повний облік вуглецю є важливим для впровадження політики пом'якшення кліматичних змін (наприклад, Кіотський протокол), про що можна зробити висновок з ряду досліджень, зокрема [256, 279, 291].

Ми досліджуємо невизначеності в оцінці повного вуглецевого балансу наземних екосистем Росії, яка була проведена у Інституті прикладного системного аналізу (Лаксенбург, Австрія) у 2000р. – FCA2000 [224]. У нових дослідженнях (після публікації FCA2000) було встановлено, що деякі процеси не були відомі і, таким чином, не враховувались при оцінюванні чистої первинної продукції (ЧПП) та гетеротрофного дихання ґрунту. Ці два великі потоки CO<sub>2</sub> та їх невизначеність задають невизначеність атмосферного балансу CO<sub>2</sub>.

Мета дослідження полягала в тому, щоб оцінити невизначеність у результатах FCA2000 з урахуванням останніх досліджень, скласти оновлений баланс вуглекислого газу атмосфери для біокліматичних зон Росії (полярна пустеля, тундра, пре-тундра та північна тайга, середня тайга, південна тайга, ліс помірної зони, степ, напівпустеля і пустеля) для використання як попередньої інформації в експериментах з інверсного моделювання, змасштабувати його до меж Євразії та екстратропічної північної півкулі для порівняння з оцінками "зверху вниз", а отже сприяти зростанню знань про потоки вуглекислого газу між землею та атмосферою над північною Азією [132].

Ми припускаємо, що невизначеності досліджуваних параметрів відповідають нормальному розподілу. Всі знайдені систематичні помилки були скоректовані, а залишкові невизначеності оцінювалися з консервативної точки зору (тобто ми намагалися виявити всі основні джерела невизначеностей та оцінити їх вплив на результат, також дотримувалися принципу, що відсутність знань чи інформації приводить до підвищення невизначеності). Невизначеності оцінюються для 90% довірчого інтервалу.

### **6.2.2. Чиста первинна продукція наземних екосистем, визначена за результатами глобальних біогеохімічних моделей, та оцінка похибок ЧПП**

Для обчислень використовуємо середнє значення результатів 17 глобальних моделей процесів ЧПП наземних екосистем за результатами модельного експерименту порівняння моделей [60]. Cramer et al. (1999) [60] агрегують моделі у три групи: супутникові, в яких всі змінні отримують з даних дистанційного зондування (CASA, GLO-PEM, SDBM, TURC, SIB2); моделі сезонних біогеохімічних потоків (HRBM, CENTURY, TEM, CARAIB, FBM, PLAI, SILVAN, BIOME-BGC, KGBM), а також моделі сезонних біогеохімічних потоків і структури рослинності (BIOME3, DOLY, HYBRID). Всі моделі використовують стандартизовані вхідні дані наскільки це можливо. Дані про клімат є довгостроковими щомісячними середніми значеннями (1931-1960 рр.). Супутникові дані FASIR (AVHRR) за 1987 рік використовують на супутникових моделях. Дані щодо ґрунтів отримано з світової карти ґрунтів ФАО. Моделі з першої групи працюють з фактичним земельним покривом; моделі з другої групи використовують заздалегідь розподілену рослинність з наявних карт потенційної рослинності або моделі BIOME; моделі з третьої групи визначають тип та структуру рослинності шляхом максимізації ЧПП для певного навколишнього середовища (у рівновазі з середніми кліматичними даними). У моделях навіть однієї групи процеси ЧПП описують по різному, що зменшує структурну невизначеність результатів моделювання. Cramer et al. (1999) [60] відзначає узгодженість моделей щодо значень глобальних річних ЧПП, але автори підкреслюють, що калібрування деяких моделей може бути зроблено таким чином, щоб отримати "розумну" глобальну ЧПП.

Геопросторові дані (просторовою роздільною здатністю 0.5 градуса) середніх річних ЧПП та стандартне відхилення (stdNPP) ЧПП, отриманих з результатів 17 моделей, взято з Інтернету ([http://islsdp2.sesda.com/ISLSCP2\\_1/html\\_pages/groups/carbon/model\\_npp\\_xdeg.html](http://islsdp2.sesda.com/ISLSCP2_1/html_pages/groups/carbon/model_npp_xdeg.html)). Ми наклали карти змодельованих значень ЧПП та StdNPP на карти біокліматичних зон та наземного покриву, щоб обчислити відповідні значення для біокліматичних зон

та типів рослинності. Отримані таблиці додатково оброблено в Excel для одержання агрегованих значень ЧПП (таблиця 6.1) та stdNPP (таблиця 6.2). При агрегуванні stdNPP ми припускали, що оцінки ЧПП для всіх клітинок, зроблені однією моделлю є залежними, але оцінки ЧПП, зроблені різними моделями є незалежними навіть для однієї клітинки растру. Таким чином, stdNPP для сукупних категорій біокліматичних зон та наземного покриву обчислюємо як середнє арифметичне stdNPP для всіх клітинок растру в кожній категорії. Загалом, моделі досить добре узгоджуються щодо середніх річних значень ЧПП для категорій біокліматичних зон та земельного покриву. Для основних категорій мінливість результатів моделей знаходиться в діапазоні 16-29% (90% С.І.). [185, 281]

Таблиця 6.1. Чиста первинна продукція, кгС/(га рік); середнє 17 глобальних біокліматичних моделей для біогеохімічних зон та земельного покриву

Біокліматична зона / земельний покрив	Рілля	Пасовища	Ліс	Болота	Заболочені землі	Луки та чагарники	Сумарне
Полярна пустеля						198	198
Тундра	3 024	2 398	2 025	1 928	1 903	1 556	1 629
Лісотундра та північна тайга	3 973	2 905	2 692	2 910	2 429	2 402	2 659
Середня тайга	4 093	3 470	3 351	3 558	2 688	2 653	3 194
Південна тайга	4 862	4 809	4 486	4 533	4 457	4 599	4 563
Помірна зона	5 034	5 098	5 174	5 037	5 431	5 148	5 113
Степ	4 296	3 839	3 898	4 319	4 169	3 772	4 103
Напівпустелі та пустелі	3 526	3 254	4 232	3 810	3 469	3 070	3 273
Сумарне	4 479	3 888	3 482	3 459	2 480	2 271	3 217

Лише у п'яти із сімнадцяти моделей використовують фактичну інформацію про земельний покрив, починаючи з 1987 року, а в інших використовують потенційну рослинність. У потенційній рослинності, ймовірно, не враховано збурення та "штучні" сільськогосподарські екосистеми. У свою чергу, моделі, у яких використано дані дистанційного зондування 1987 року, залежать від інформації про земельний покрив конкретного року, а не про середній земельний

покрив (тут ми маємо на увазі територію після пожеж). Таким чином, в цілому, середнє 17 моделей, як правило, завищує "справжнє" значення ЧПП [185, 274].

Таблиця 6.2. Відносна похибка обчислення чистої первинної продукції (90% С.І.), %, для біокліматичних зон та земельного покриття за результатами 17 глобальних біогеохімічних моделей для біокліматичних зон та земельного покриття

Біокліматична зона / земельний покрив	Рілля	Пасовища	Ліс	Болота	Заболочені землі	Луки та чагарники	Сумарне
Полярна пустеля						94	94
Тундра	26	27	26	27	27	29	29
Лісотундра та північна тайга	20	23	22	22	23	24	22
Середня тайга	20	22	22	21	24	24	22
Південна тайга	18	19	19	19	18	18	19
Помірна зона	16	16	17	17	15	17	16
Степ	18	19	18	18	16	20	18
Напівпустелі та пустелі	19	21	21	16	17	22	21
Сумарне	17	19	21	21	24	25	21

### 6.2.3. Оцінка похибок визначення чистої первинної продукції лісу

У FCA2000 [224] оцінювали ЧПП лісів, використовуючи базу даних біопродуктивності [224, с. 13]. Дані вибирали з урахуванням віку лісонасаджень [284] та з урахуванням режимів порушень (пожежі та спалахи масового розмноження комах) [224]. Дані, які використовували у FCA2000, були зібрані протягом тривалого періоду часу, коли агреговані дані можуть представляти середню ЧПП другої половини XIX століття (але скореговано з поточним віком та поширенням видів лісів). У FCA2000 обчислили ЧПП лісу на рівні 2236 кгС/(га рік) або 1707.3 ТгС/рік для території 763.5 млн. га. ЧПП становить від 1640 кгС/(га рік) у лісовій тундрі та північній тайзі до 4796 кгС/(га рік) у степовій біокліматичній зоні (таблиця 6.3). Невизначеність ЧПП у загальнонаціональному масштабі оцінено на рівні 18% [224, с. 113, табл. 68].

Нова оцінка ЧПП лісів, проведена Shvidenko et al. (2006) [280] для періоду 1993-2003 рр. становить 3064 кгС/(га рік) (для площі 776.1 млн. га). У 1993 р. ЧПП

склав 3050 кгС/(га рік) (для району 763.5 млн. га, Швіденко 2007 р., особисте спілкування) - в середньому на 36% вище, ніж у FSA2000 [224]. Оцінка базується на даних лісових інвентаризацій по лісogосподарствах (загалом близько 1900 лісogосподарств), моделей росту лісу, моделей живої біомаси та екологічних параметрів виробничого процесу [282]. Метод визначення ЧПП, застосований у [282], досить чутливий до тривалості життя дрібних коренів (діаметр менше 2 мм) і хвойних голок, яка характеризується високою невизначеністю. Наприклад, ЧПП модрина збільшується на 11%, якщо тривалість життя дрібних коренів змінюється від трьох до двох років і зменшується на 6%, якщо тривалість життя дрібних коренів змінюється від трьох до чотирьох років [282, 284]. Тим не менше, цей метод включає в себе нові знання, яких не існувало під час проведення обчислень для FSA2000 (наприклад, ЧПП тонких коренів та, частково, ЧПП у кореневих ексудатах). Обчислення ЧПП для великої кількості лісових підприємств суттєво зменшує випадкові помилки. Згідно методу [282] ЧПП обчислюють як різницю між усією створеною фітомасою протягом певного періоду, що частково усуває систематичні помилки у даних державного обліку лісу, моделях росту лісу та моделях живої біомаси. У [280] оцінено невизначеність середнього значення ЧПП для періоду 1993-2003 на рівні 15%. Невизначеність оцінено за допомогою аналізу вихідних даних, моделей та процесу обчислення ЧПП, а також застосуванням методу Монте-Карло для аналізу поширення похибок. Згідно [284] невизначеність ЧПП усередненої для сорокарічного періоду становить біля 8%.

В національному масштабі ЧПП, обчислена у [280] є близькою до середнього значення 17 моделей (див. секцію 6.2.1 та [60]). Значення ЧПП за результатами 17 моделей (3482 кгС/(га рік) є на 14% вищим, ніж значення ЧПП з [280]. Тим не менше 90% інтервали довіри невизначеностей ЧПП моделей та [280] перекриваються (див. таблиці 6.1 та 6.2). Крім того, у секції 6.2.1 показано, що значення моделей, як правило, переоцінюють реальну ЧПП, оскільки у більшій частині моделей використовують потенційну рослинність, не беручи до уваги порушення. Також значення ЧПП, обчислені у [280] є на 6% вищими, ніж оцінка [369] (таблиця 6.3), де обчислюють ЧПП лісів через зміну запасів стовбурної деревини та конверсійні коефіцієнти (похибка методу біля 36%).

В результаті аналізу публікацій стосовно обчислення чистої первинної продукції (ЧПП) лісів, зокрема [280, 281] та результатів моделювання (див. секцію 6.2.1, а також [60]), встановлено, що оцінка ЧПП лісів у FSA2000 [224] має систематичну похибку, оскільки деякі процеси не були враховані (зокрема, час життя тонких коренів та кореневі ексудати) у методах оцінки ЧПП на рівні дослідних ділянок [281]. Таким чином, для подальшого аналізу ми використовуємо нову оцінку ЧПП лісу [280, 281], що базується на новому підході моделювання, описаному в [282]. Нова оцінка ЧПП приблизно на 36% перевищує оцінку FSA 2000. У публікаціях [280, 281] не наводять результати ЧПП лісу для біокліматичних зон. Ми розподіляємо сумарний ЧПП для країни по біокліматичних зонах, використовуючи додаткову інформацію, а саме: оцінку лісової ЧПП для біокліматичних зон для регіону Сибір-II (таблиця 6.4) [268, 279] та середні значення результатів моделювання експерименту порівняння моделей рослинності [60].

Таблиця 6.3. Порівняння чистої первинної продукції лісів по біокліматичних зонах, кгС/(га рік)

Біокліматична зона	FSA2000 [224]	Моделі [60]	Наші обчислення на основі сумарного значення [280, 281] та розподілу за [60, 224, 268, 279]		Замолодчиков и Уткин, 2000 [369]
Полярна пустеля					
Тундра	1 684	2 025	2 025		
Лісотундра та північна тайга	1 640	2 692	2 395		
Середня тайга	2 207	3 351	3 143		
Південна тайга	2 573	4 486	3 299		
Помірна зона	3 464	5 174	3 710		
Степ	4 796	3 898	3 668		
Напівпустелі та пустелі	2 462	4 232	2 462		
Сумарне	<b>2 236</b>	<b>3 482</b>	<b>3 050</b>		<b>2 857</b>
NPP-U90	<b>1 834</b>	<b>2 751</b>	<b>2 593</b>	<b>3 508</b>	<b>1 843</b>
NPP+U90	<b>2 638</b>	<b>4 213</b>			<b>3 871</b>

Для розподілу сумарного значення ЧПП по біокліматичних зонах ми будуємо задачу оптимізації. Ми ставимо умову для нових значень ЧПП для біокліматичних зон,  $NPP_{new}^i$  ( $i = 1$  відповідає біокліматичній зоні полярних пустель, ...  $i = 8$  відповідає напівпустелям і пустелям), щоб вони були

максимально наближеними до відповідних старих оцінок,  $NPP_{old}^i$  (оцінки FCA2000 [224], зважених за їх відносною невизначеністю, оціненою за даними проекту "Сибір-II" – 0.61 (у тому числі систематичні похибки [268])); а також щоб питомі ЧПП (на одиницю площі) ( $*NPP_{new}^i$ ) були максимально близькі до ЧПП лісу, які обчислено для регіону Сибір-II ( $*NPP_{Sib2}$ ), зважені за їх репрезентативністю для лісів всієї країни для цієї конкретної біокліматичної зони ( $r_i$ ) та невизначеності, тобто відносної невизначеність лісової ЧПП для біокліматичних зон регіону Сибір-II – 0.18 [284]. З додатковими обмеженнями на нові значення ЧПП: сума нових значень дорівнює сумарному значенню, обчисленому Швіденком [284] ( $NPP_{shv}$ ); нові оцінки для біокліматичних зон не перевищують відповідних оцінок математичними моделями [60] ( $NPP_{mod}^i$ ), оскільки моделі, як правило, переоцінюють реальну ЧПП, і нарешті, як ми припускаємо, що оцінка моделей для напівпустель і пустель є завищеною, ми вимагаємо, щоб нова оцінка була меншою або рівною попередній оцінці.

$$\left\{ \sum_{i=1}^8 \frac{(NPP_{old}^i - NPP_{new}^i)^2}{S_i^2} \times (1 - 0.61)^2 + \sum_{i=1}^7 (*NPP_{Sib2}^i - *NPP_{new}^i)^2 \times r_i^2 \times (1 - 0.18)^2 \right\} \rightarrow \min$$

$$\sum_{i=1}^8 NPP_{new}^i = NPP_{shv}$$

$$NPP_{new}^i \leq NPP_{mod}^i, i=1,..8$$

$$NPP_{new}^i \leq NPP_{old}^i, i=8$$

Щоб оцінити невизначеність розподіленої ЧПП, ми виявили відносну відстань нової обчисленої ЧПП до відповідних значень ЧПП у регіоні Сибір-II, у FCA2000 та середнього результатів моделей для кожної біокліматичної зони та обираємо найбільшу з них:

$$RU_{Sib2}^i = \left| \frac{*NPP_{new}^i - *NPP_{Sib2}^i}{*NPP_{new}^i} \right| * r^i, \quad i = \overline{1,7}$$

$$RU_{old}^i = \left| \frac{*NPP_{new}^i - *NPP_{old}^i}{*NPP_{new}^i} \right|, \quad i = \overline{1,8}$$

$$RU_{mod}^i = \left| \frac{*NPP_{new}^i - *NPP_{mod}^i}{*NPP_{new}^i} \right|, \quad i = \overline{1,7}$$

$$RU_{\text{mod}}^s = \left| \frac{NPP_{\text{new}}^i - NPP_{\text{mod}}^i}{NPP_{\text{new}}^i} \right| * 0.8 ,$$

$$R_{-U90}^i = \max \{ U_{\text{Sib2}}^i, U_{\text{mod}}^i, U_{\text{old}}^i \} .$$

Ми припускаємо, що ймовірність того, що інтервали невизначеності містять справжню ЧПП, становить 90%. Результати обчислень наведено у таблицях 6.4 та 6.5.

Таблиця 6.4. Чиста первинна продукція лісу та невизначність, кгС/(га рік)

Біо-кліматична зона	Sib-II [268, 279]	Репрезентативність земельного покриву Sib-II	Наші обчислення на основі сумарного значення [280,281] та розподілу за [60, 224, 268, 279]	R_U90	NPP-U90	NPP+U90
Полярна пустеля						
Тундра	2 137	0.92	2 025	0.17	1 684	2 366
Лісотундра та північна тайга	2 426	0.98	2 363	0.31	1 640	3 085
Середня тайга	3 020	0.90	3 164	0.30	2 207	4 122
Південна тайга	3 353	0.78	3 253	0.38	2 019	4 486
Помірна зона	3 755	**0.65	3 683	0.40	2 192	5 174
Степ	3 433	**0.80	3 796	0.26	2 797	4 796
Напівпустелі та пустелі			2 462	0.58	1 045	3 878
Сумарне	3 064	0.85	3 050	0.15	2 593	3 508

\*\* Експертна оцінка [284]

Таблиця 6.5. Наші обчислення ЧПП лісу на основі сумарного значення [280, 281] та його розподілу за даними [60, 224, 279] та 90% інтервал довіри (MtC/year) а також відносна похибка

Біокліматична зона	ЧПП	R_U90	NPP-U90	NPP+U90
Полярна пустеля				
Тундра	7.695	0.17	6.400	8.991
Лісотундра та північна тайга	333.619	0.31	231.600	435.638
Середня тайга	1 439.796	0.30	1004.300	1875.292
Південна тайга	411.450	0.38	255.457	567.443
Помірна зона	97.609	0.40	58.097	137.120
Степ	35.306	0.26	26.013	44.600
Напівпустелі та пустелі	3.200	0.58	1.359	5.041
Сумарне	2 328.675	0.15	1979.374	2677.976



#### **6.2.4. Оцінка невизначеності обчислень чистої первинної продукції інших екосистем**

##### Сільське господарство

На національному рівні Gusti and Jonas (2010) [132] розрізняють такі сільськогосподарські землі: 1) орні землі для вирощування зернових та незернових культур; 2) пасовища. Загальне основне припущення, яке лежить в основі всіх розрахунків ЧПП, полягає в тому, що життєвий цикл сільськогосподарської продукції становить один рік (тобто, чиста продукція дорівнює фітомасі).

Оцінку точності визначення ЧПП сільськогосподарських земель у національному масштабі проводили, виходячи з наступних міркувань [132]. Джерела статистичних даних (площі, урожайність, коефіцієнти перерахунку сухої речовини на вуглець та ін.), які використовували у FCA2000 [224, с. 38] для дослідження є відповідними. Додаткові знання стосовно відносної невизначеності та їх діапазонів можуть бути отримані з бази даних вуглецевого балансу Австрії [164]. Для врахування підземних частин рослин та їх відходів у ЧПП використано рівняння регресії [382].

Обчислення [132], які ґрунтуються на вихідних даних, та перегляд умов збору урожаю 1990 рр., дозволили виявити наступне: 1) суха біомаса річної трави, помилково, була переоцінена у 10 разів; 2) дані по яровій пшениці відображають особливості значень для всіх типів зерна, а комбінація "60% багаторічної трави плюс 40% річної трави" добре представляє особливості значень для сільськогосподарських культур, відмінних від зернових; 3) втрати урожаю, які були значними на той час (зернові: 10-50%; сільськогосподарські культури, крім зерна: 15-45%, пасовища: 0%), не були враховані у FCA2000.

Для обчислення ЧПП сільськогосподарських земель та невизначеностей у біокліматичних зонах Gusti and Jonas (2010) [132] застосували такі кроки: 1) накладання електронних карт границь областей, наземного покриття та біокліматичних зон для того щоб обчислити ЧПП для окремих біокліматичних зон 2) отримання лінійної регресії  $ЧПП = f(\text{урожай})$  на основі усіх областей і

припускаючи, що ця ж регресія справджується для біокліматичних зон, що дозволяє обчислити ЧПП для біокліматичних зон; 3) застосовуючи припущення про те, що відносна похибка величини урожаю є однаковою для біокліматичних зон.

#### Водно-болотні угіддя, луки та чагарники

Водно-болотні угіддя Росії містять болота і заболочені землі, а луки та чагарники зібрані в одну категорію [120, 121, 132]. З причини нестачі даних розрахунки ЧПП у [120, 121, 132] відповідали тій самій спрощеній структурі, яка вже була застосована у FCA2000 [224]: питомі значення ЧПП помножено на площу, яку займають екосистеми, та на коефіцієнт перерахунку сухої біомаси у одиниці вуглецю. Проте, Gusti and Jonas (2010) [132] також розглянули додаткові результати, зокрема, результати 17 моделей (розділ, 6.2.1 та [60]). Змодельовані значення ЧПП та дані про невизначеність оцінювали за допомогою накладання карт ЧПП моделей (розділ 6.2.1), біокліматичних зон та земельного покриття, щоб отримати відповідні значення для Росії по біокліматичних зонах та класах земельного покриття (таблиця 6.6). Порівняння з значеннями ЧПП у FCA2000 у загальнонаціональному масштабі показує, що значення ЧПП, отримані за допомогою моделей, є такої ж величини для заболочених земель, більшими для боліт і меншими для пасовищ та чагарників.

Таблиця 6.6. Порівняння ЧПП та невизначеностей, обчислених у FCA2000 [224, Таблиці 31 та 68], а також середнє ЧПП 17 моделей та похибок (розділ 6.2.1 та [60]), для категорій земельного покриття у національному масштабі.

Рілля	Пасовища	Ліс	Болота	Заболочені землі	Луки та чагарники	Сумарне	Рілля
FCA2000 NPP, gC/m <sup>2</sup> yr	498	379	224	226	213	278	267
FCA2000 Uncertainty, %	18	18	18	27	27	18	10
Models' NPP, gC/m <sup>2</sup> yr	448	389	348	346	248	227	322
Intermodel variability, %	17	19	21	21	24	25	21

### 6.2.5. Невизначеності у обчисленнях гетеротрофного дихання ґрунту

Гетеротрофне дихання ґрунту (HR) - це один з потоків, які важко визначити на великих незаселених територіях. HR не вимірюють безпосередньо в польових дослідженнях, а обчислюють як різницю між загальним диханням ґрунту (SR) та автотрофним диханням (або часткою кореневого дихання - RC). Ми ідентифікували та обчислили наступні компоненти невизначеності при оцінці гетеротрофного дихання ґрунту для території Росії:

- невизначеність у вимірюваннях;
- невизначеність обумовлена недостатньою просторовою репрезентативністю вимірювань території;
- невизначеності, зумовлені часом вимірювань;
- невизначеності автотрофного дихання ґрунту;
- невизначеність площ екосистем;
- невизначеності через кореляції;
- Невизначеності, зумовлені різними методами оцінки та агрегації.

Для дослідження ми використовували базу даних про загальні вимірювання дихання ґрунту, упорядковану Курганованою (2002) [187] з опублікованих даних. Ми розподілили дані у матриці біокліматичні зони - тип ґрунту - рослинність, щоб враховувати основні фактори, що визначають HR (клімат, тип ґрунту та тип рослинності). У кожному елементі матриці оцінюємо компоненти невизначеності, зазначені вище. Випадкові похибки вимірювань не включені в аналіз, оскільки в базі даних є лише середні значення, отримані з публікацій. Зазвичай невизначеності є малими, оскільки роблять серію вимірювань і обчислюють середнє значення, що зменшує випадкові похибки. Систематичні похибки залежать від методу вимірювання. Систематичні похибки мають суттєвий вплив на результат, якщо вони не виключаються з результатів. Ми оцінили систематичні похибки для кожного елемента матриці, підсумовуючи системні похибки, властиві методам вимірювання [150, 158, 242, 337], які використовувались в кожному елементі матриці.

Дві незалежні оцінки HR та його компонентів (загальний потік дихання ґрунту та кореневе дихання) були доступні у FCA2000 [187, 224, 293]. Оскільки

дві оцінки HR різняться на 13% (різниця для біокліматичних зон коливається від 8% до 62%), ми провели аналіз компонентів HR. Щодо аналізу RC, ми виявили значні відмінності як у підходах, так і в отриманих значеннях, які застосовували В.Столбовой та І.Курганова. Столбовой (2003) [293] виходить переважно з теоретичних міркувань та обмежених даних з російських публікацій та розрахунку HR для відділів ґрунтів (SD, групи типів ґрунтів) в Росії. Навпаки, Курганова (2002) використовує більше опублікованих даних і розрізняє різні рослинні покриви. У середньому значення RC, отримані Столбовим [293] в 2.6 рази менші, ніж значення, отримані Кургановою [187]. Щоб вирішити проблему, ми зібрали нещодавно опубліковані дані, з яких можна було оцінити RC і його невизначеності. Ми проаналізували дані вимірювань SR, представлені Кургановою [187], і визначили зміщення методу вимірювання та невизначеності, викликані просторово розрідженими даними та часом вимірів. Потім ми склали матриці SR (скоректовані до визначених систематичних похибок), RC, а також їх невизначеності за допомогою біокліматичної зони, типу рослинності та відділу ґрунту. З цих двох матриць ми розраховали матрицю HR та її невизначеності, а також кореляції всередині біокліматичних зон та між біокліматичними зонами. В кінці ми виявили середній показник HR за нашою оцінкою та оцінками Столбового (2003) [293] та Кургановою [187] для біокліматичних зон і враховали додаткову невизначеність, що впливає з варіативності оцінок, тому що ми не можемо дискримінувати, яке з трьох значень є "найкращою оцінкою".

Ми вивчали дані вимірювань SR, що використовуються Кургановою [187] для оцінки дихання ґрунтів, для пошуку можливих невизначеностей, які можуть виникнути при використанні вимірювань. За даними [187], дані вимірювань SR, що зберігаються в базі даних і які використовують для оцінки SR, були проведені у польових умовах. Фактично, ми не знаємо достовірно, які методи вимірювання були застосовані, але в той час, коли більшість вимірів були зроблені (1955-1975), найбільш часто використовували метод закритої камери з хімічним поглиначем «CO<sub>2</sub>-абсорбером» (також називається непродувною рівноважною камерою або камерою поглинання) [150, 395]. Опубліковані порівняльні

дослідження різних методів вимірювання показують, що метод камери поглинання переоцінює SR для малих потоків (потoki менше, ніж приблизно 100 мгС/(м<sub>2</sub> година) приблизно на 10% і недооцінюють великі потоки приблизно на 20-30% [158, 337]. Hutchinson and Rochette (2003) [150] показали, що систематична похибка сильно залежить від часу експозиції (що звичайно становило 12 або 24 години), площі поверхні експозиції хімічного реагента СО<sub>2</sub> тощо. Таким чином, ми можемо вважати, що потоки менші за 100 мгС/(м<sup>2</sup> година), представлені в базі даних, які були опубліковані до 1993 року, переоцінені на 10%, але більші потоки недооцінені на 20%. Деякі вимірювання проводилися за допомогою закритої камери, а проби повітря брали шприцом, транспортували до лабораторії та аналізували за допомогою газового хроматографа. Згідно з [242] такий метод вимірювання дихання ґрунту недооцінює потоки максимум на 35%. Таким чином, ми припускаємо, що, якщо б такий метод був використаний, вимірювання недооцінюють значення дихання ґрунтів на 30%. Якщо використовується закрыта камера, але вимірювання проводяться *in situ* за допомогою інфрачервоного аналізатора СО<sub>2</sub>, недооцінка складає приблизно 4-14% [242]. У цьому випадку ми припускаємо 10% недооцінку. Таким чином ми визначили систематичні похибки для всіх вимірів у базі даних та для класів «біокліматична зона – ґрунт – рослинність».

Проаналізувавши просторове розміщення вимірювань дихання ґрунтів, можна зробити такі висновки. Кількість вимірювань є дуже малою для території Росії. У базі даних є близько 370 записів вимірювань, з яких 20 є промахами. Більшість вимірів розташовані в європейській частині Росії, тоді як на великій території Сибіру не проводили вимірювань. Деякі виміри адаптовано з-за меж російської території (Білорусія, Казахстан та Україна) (див. рис. 6.2). Якщо в біокліматичній зоні деякий клас ґрунт-рослинність займає більше 1% території країни, але не існує якісних вимірювань, ми використовували вимірювання з подібного класу ґрунт-рослинність у сусідній біокліматичній зоні або подібному типі ґрунту та підвищили невизначеність на 20% (90% інтервал довіри). Якщо для класу «біокліматична зона – ґрунт – рослинність» доступне лише одне вимірювання, встановлюємо невизначеність на рівні 90%. Таким чином,

частково враховується невизначеність, пов'язана із використанням вимірювань з інших класів.

### Soil respiration measurement plots

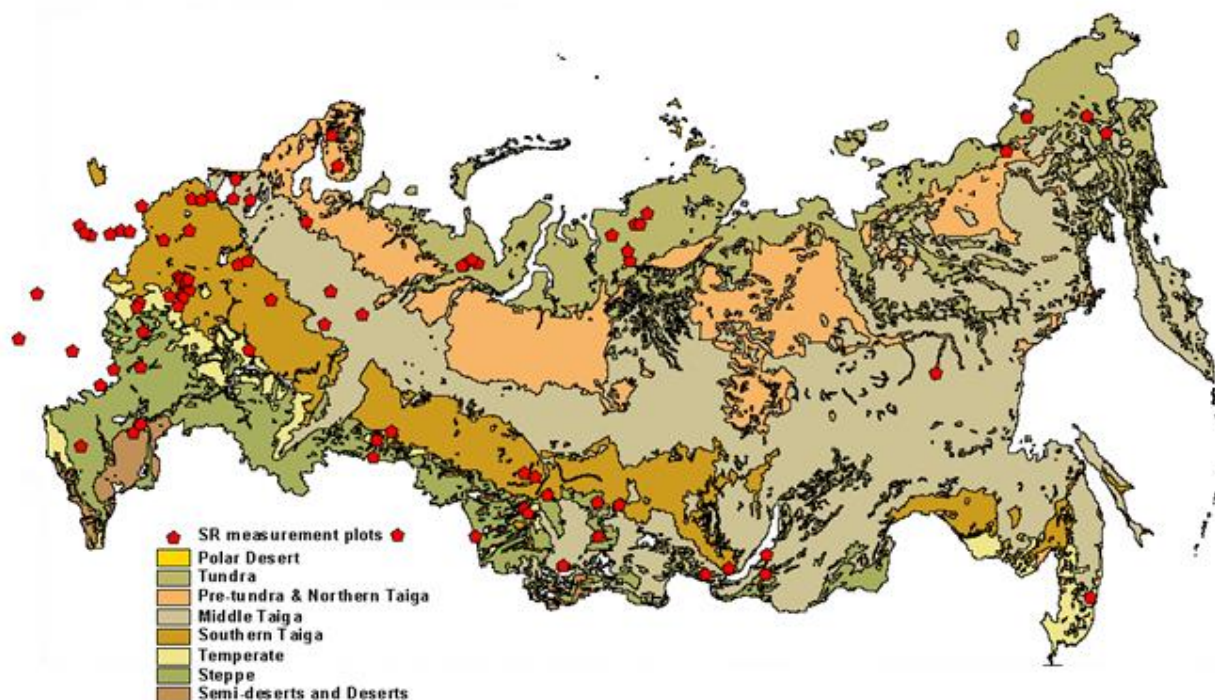


Рис. 6.2. Розміщення вимірювань дихання ґрунту, які використано у дослідженні

Більшість вимірювань було зроблено у 1955-1975 роках (роки публікацій), але не у 1990 рр. У багатьох випадках точні роки вимірювань не вказані у публікаціях. Використання вимірювань для оцінки гетеротрофного дихання ґрунту у 1990 році спричиняє певну невизначеність через різні кліматичні умови. Невизначеність вимірювань, представлених в базі даних, вважаємо подібною до міжрічної та просторової мінливості SR, яка становить більше 20% [186, 200]. Коли усереднюють декілька вимірювань, зроблених у різні роки, невизначеність зменшується і мало впливає на загальну невизначеність. Якщо у елементі матриці існує лише одне вимірювання або всі вимірювання опубліковано протягом одного року, ми враховуємо невизначеність, пов'язану із міжрічною та просторовою мінливістю.

Ми оцінили точність автотрофного дихання ґрунту для різних типів рослинності з опублікованих вимірювань автотрофного дихання [17, 136, 187].

Загалом ми відібрали 150 опублікованих вимірювань RC, що відображають різні типи рослинності та кліматичні умови. Ми також порівняли значення автотрофного дихання ґрунту із значеннями RC, які використовували інші дослідники на різних рівнях агрегації [187, 244] (таблиця 6.7). Ми оцінили RC з опублікованих даних для типів рослинності: ліс помірної зони; ліс південної тайги; ліс середньої тайги, ліс тундри та тундра; болота; пасовища; рілля. Ми обчислили точність оціночної RC (90% -ний довірчий інтервал, позначено як  $U_{90p}$ ) як середньозважену з урахуванням площі значення рослинності за формулою

$$U_{90p}^2 = \frac{\sum_{i=1}^L U_{90p_i}^2 \times S_i^2}{\left(\sum_{i=1}^L S_i\right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^L \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^L (RC_i - RC_j) \times S_j\right)^2 \times U_{90_{S_i}}^2}{\left(\sum_{i=1}^L S_i\right)^4},$$

де  $U_{90_{S_i}}$  - це невизначеність площі  $i$ -го типу рослинності. По суті, другий член в формулі, як мінімум, на порядок менший, ніж перший, і не враховується.

Таблиця 6.7. Відсоток автотрофного дихання ґрунтів у повному диханні ґрунтів для різних типів рослинності

Тип рослинності	Наше дослідження			Kurganova (2002) [187]		Raich and Tufekcioglu (2000) [244]	
	Середнє	N	$U_{90p}$	Середнє	N	Мін.	Макс.
Загальне	43	150	2				
Ліси	47	102	3				
Нелісові екосистеми	41	40	5				
Луки	37	15	5	45	16	17	40
Рілля	36	17	7	38	10	12	38
Тундра	59	6	17	63	5	50	93
Болото	40	3	5				
Ліс середньої тайги	60	8	16	72	6	62	89
Ліс південної тайги	41	17	5	48	60	62	89
Ліс помірної зони	48	62	3	48	60	33	62
Тропічний ліс	51	9	5	48	60		

Площі продуктивних ґрунтів в межах біокліматичних зон також визначені з похибками, що проявляється як невідповідність при накладанні карт біокліматичних зон, землекористування та типів ґрунтів або у порівнянні з площами, які використовували у попередніх оцінках гетеротрофного дихання ґрунту [187, 224, 293]. Коли ми оцінюємо середньозважені середні площі, невизначеності площі (ми розглядаємо лише внутрішні невідповідності) дуже мало впливають на результуючу невизначеність і ми їх не враховуємо. При оцінці сумарних потоків гетеротрофного дихання ґрунту з територій біокліматичних зон невизначеність площі має більш важливе значення і ми її враховуємо. Однак невизначеність площі істотно не впливає на загальну невизначеність, оскільки, в цілому, невизначеність площі є значно меншою, ніж невизначеність гетеротрофного дихання ґрунту.

Невизначеність усередненого дихання ґрунту для 90% довірчого інтервалу для кожного класу «біокліматична зона – ґрунт – рослинність» оцінюється за допомогою статистики Стьюдента:

$$U_{90p} = \frac{STD \times t_{0.9}(N-1)}{\sqrt{N}} \quad (6.1)$$

де  $STD$  - стандартне відхилення,  $t_{0.9}$  - значення t-розподілу Стьюдента для 90% імовірності та  $N-1$  ступеня свободи ( $N$  - кількість вимірювань).

Використовуючи інформацію щодо типу рослинності та біокліматичної зони, було застосовано відповідне значення  $RC$  та розраховано  $HR$ .

Насправді агреговані значення представляють лише класи «біокліматична зона – ґрунт – рослинність», для яких існують вимірювання  $SR$ , або для яких ми використали значення сусідніх класів, але не всю територію. Це призводить до додаткової невизначеності, коли для оцінки сумарного потоку з території Росії використовують середньо-зважені за площею значення.

Невизначеність у  $HR$  (яку ми можемо визначити) виникають у зв'язку з невизначеностями в  $SR$ , невизначеностями в  $RC$  та невизначеностями площі в агрегованих значеннях. Невизначеність площі не враховується, оскільки вона є дуже мала у випадку зважування за площею.



Відносна невизначеність HR для окремих класів «біокліматична зона – грунт – рослинність» оцінюється за формулою

$$R_{-}U90_{HR_{ijk}} = \sqrt{R_{-}U90_{SR_{ijk}}^2 + R_{-}U90_{RC_{ijk}}^2}$$

де  $i$  змінюється по індексах всіх типів рослинності,  $j$  – по всіх відділах ґрунтів і  $k$  – по всіх біокліматичних зонах.

Невизначеність HR для біокліматичних зон визначається за формулою

$$U90_{HR_k} = \sqrt{\sum_{i=1}^L \left[ \left( \sum_{j=1}^J U90_{SR_{ijk}}^2 \times S_{ijk}^2 \right) \times \left( 1 - \frac{RC_{ik}}{100} \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^J SR_{ijk} \times S_{ijk} \right)^2 \times \left( \frac{U90_{RC_{ik}}}{100} \right)^2 \right]} * \frac{1}{\sum_{i,j=1}^{L,J} S_{ijk}}$$

Відповідні відносні невизначеності розраховуються шляхом ділення абсолютних невизначеностей на середні значення HR та множення їх на 100 (%).

Для деяких класів «біокліматична зона – грунт – рослинність», відділів ґрунтів в біокліматичних зонах і відділів ґрунтів загалом, невизначеність становить більше 100%. Це відбувається в тих випадках, коли існує лише декілька вимірювань (один або два) або відсутні вимірювання для великих класів «біокліматична зона – грунт – рослинність», що означало, що значення SR повинні бути замінені вимірами з подібних класів, що призводить до збільшення невизначеності. Оскільки далі ми розглядаємо HR у масштабі біокліматичної зони (для яких невизначеності не перевищують 60%), ми не інтерпретуємо невизначеності, що перевищують 100%, з фізичної точки зору (ми ігноруємо той факт, відповідно до нормального розподілу є невелика ймовірність того, що теоретично деякі значення є негативними).

Кореляція між потоками HR в окремих класах «біокліматична зона – грунт – рослинність» в межах однієї біокліматичної зони та одного типу рослинності, є результатом використання одного RC для оцінок потоку HR. Спільний коефіцієнт RC застосовується для оцінок HR у деяких типах рослин у біокліматичних зонах. Зокрема, спільний фактор RC використовувався для сільськогосподарських земель та боліт у всіх розглянутих біокліматичних зонах; для пасовищ ("нормальний") - у південній тайзі, помірній зоні, степу, напівпустелі та пустелі; для пасовищ (тундра) - у тундрі, лісовій тундрі та

північній тайзі, а також у середній тайзі; для північних лісів - у тундрі, лісовій тундрі і північній тайзі, і середній тайзі; і для лісів помірної зони у помірній зоні, степу, напівпустелі та пустелі. Коефіцієнт кореляції між двома біокліматичними зонами А і В може бути розрахований за формулою

$$Corr_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^4 U90_{RC_i}^2 \times SR_i}{U90_{HR_A} \times U90_{HR_B}}$$

де  $i$  визначає тип рослинності, для якої RC є спільним у біокліматичних зонах А і В. Обчислені коефіцієнти кореляції наведено у таблиці 6.8.

Таблиця 6.8. Коефіцієнти кореляції потоків гетеротрофного дихання ґрунтів між біокліматичними зонами у зв'язку з застосуванням спільних значень автотрофного дихання для окремих типів рослинності

Біокліматична зона	Полярна пустеля	Тундра	Лісотундра та північна тайга	Середня тайга	Південна тайга	Помірна зона	Степ	Напівпустелі і пустелі
Полярна пустеля	<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Тундра	0.00	<b>1.00</b>	0.11	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
Лісотундра та північна тайга	0.00	0.11	<b>1.00</b>	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00
Середня тайга	0.00	0.12	0.32	<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00
Південна тайга	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>1.00</b>	0.06	0.08	0.01
Помірна зона	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	<b>1.00</b>	0.12	0.03
Степ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.12	<b>1.00</b>	0.16
Напівпустелі і пустелі	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.16	<b>1.00</b>

Агрегований HR (для біокліматичних зон або всієї території) залежить від способу розрахунку агрегованих потоків через неповне просторове покриття вимірювань. Автори оцінок HR [187, 224] використовували в основному аналогічні дані вимірювань SR, але застосовували різні підходи, що призвело до різних результатів. Оскільки з наявних публікацій ми не можемо визначити, чий підхід краще, ми поєднуємо всі оцінки на рівні біокліматичних зон (оскільки ці

показники повідомляються всіма авторами), включаючи також різні методи агрегації. Ми визначили точність (90% інтервал довіри; невизначеність, спричинену використанням різних методів оцінки)  $U_{90a}$  за формулою (6.1), але в цьому випадку  $N$  означає кількість груп. Щоб отримати більш повну оцінку невизначеності ( $U_{90}$  та відповідну відносну невизначеність  $R_{U_{90}}$ ), ми об'єднали точність з внутрішньою невизначеністю  $NR$  для біокліматичних зон ( $R_{U_{90p}}$ ) як дві незалежні компоненти

$$U_{90} = \sqrt{U_{90a}^2 + U_{90p}^2}.$$

Обчислені значення гетеротрофного дихання ґрунтів наведено у таблиці 6.9, а відносні невизначеності значень – у таблиці 6.10.

Таблиця 6.9. Гетеротрофне дихання ґрунтів, обчислене у цьому дослідженні

Відділ ґрунту	Біокліматична зона / Гетеротрофне дихання ґрунтів, кгС/(га рік)								
	Полярна пустеля	Тундра	Лісотундра та північна тайга	Середня тайга	Південна тайга	Помірна зона	Степ	Напівпустелі і пустелі	Загальне
Лужно-глинисті диференційовані								1189	1189
Альфегумусні		864	671	830		6877			813
Аллювіальні			2276		794				1790
Криоземи		533							533
Глеєві		855	664	664					768
Галоморфні									
Акумулятивно-гумусні				1489	2247	3020	3531	2859	3296
Літоземи									
Світло-гумусні акумулятивно-карбонатні									
Метаморфні		2693	2871	2871	1079	5090			2998
Торф'яні		2335		4030	2101	1705			2766
Слабо-розвинені									
Органо-акумулятивні				854					854
Текстурно-диференційовані		341	1249	1355	3844	2503	3051	3664	2726
Вулканічні									
Загальне		919	984	1514	3478	3254	3516	2569	1895

Таблиця 6.10. Обчислена відносна невизначеність гетеротрофного дихання ґрунтів

Відділ ґрунту	Біокліматична зона / Відносна невизначеність, %								
	Полярна пустеля	Тундра	Лісотундра та північна тайга	Середня тайга	Південна тайга	Помірна зона	Степ	Напів-пустелі і пустелі	Загальне
Лужно-глинисті диференційовані								101	101
Альфегумусні		56	55	50		75			43
Аллювіальні			49		101				42
Криоземи		65							65
Глеєві		89	110	108					59
Галоморфні									
Акумулятивно-гумусні				47	52	16	19	51	16
Літоземи									
Світло-гумусні акумулятивно-карбонатні									
Метаморфні		73	77	86	100	32			72
Торф'яні		70		91	23	42			46
Слабо-розвинені									
Органо-акумулятивні				108					108
Текстурно-диференційовані		109	61	40	10	22	67	56	12
Вулканічні									
Загальне		52	56	53	10	14	19	47	22

### 6.2.6. Невизначеності інших потоків вуглецю

#### Споживання

Gusti and Jonas (2010) [132] проводили оцінку споживання сільськогосподарської продукції та її невизначеності як частини ЧПП у національному масштабі. Потоки CO<sub>2</sub> від споживання сільськогосподарської продукції, лісових продуктів, торфу, пасовищ та чагарників домашніми тваринами, сумарних значень та невизначеностей, наведених у [224], розподілено пропорційно кількості населення у відповідних біокліматичних зонах. Потік CO<sub>2</sub> від споживання пасовищ та чагарників дикими тваринами розподілено пропорційно площі пасовищ та чагарників у відповідних біокліматичних зонах. Невизначеність потоку, обумовленого споживанням пасовищ та чагарників

дикими тваринами, вважається рівною 50% у кожній біокліматичній зоні. Невизначеність потоку, спричиненого споживанням пасовищ та чагарників домашніми тваринами та використанням торфу, вважається рівною 50% для сумарних значень. Квадрат невизначеності розподілу потоків по біокліматичних зонах обчислювали як суму квадратів сумарної невизначеності для країни та невизначеності кількості населення у відповідних біокліматичних зонах. Невизначеність кількості населення в біокліматичних зонах оцінюється як різниця між кількістю населення, оціненою двома способами - накладанням карти біокліматичних зон та двох різних карт розміщення населення (всі карти з CD-ROM Росії [292], помножена на 1.65.

#### Порушення

У FCA2000 [224] обчислено потоки C-CO<sub>2</sub> та їх невизначеність у національному масштабі для таких порушень: прямі емісії вуглецю від пожеж (DFCE) та емісії вуглецю після пожеж (PFCE), промислова трансформація пасовищ та чагарників, спалахи розмноження комах, абіотичні порушення в лісах, порушення в лісах, спричинене лісокористуванням. Ми розподілили сумарні значення з FCA2000 по біокліматичних зонах та оцінили невизначеність розподілу.

Ми обчислили емісії вуглецю від пожеж у біокліматичних зонах, використовуючи дані про типи пожеж та площі різних типів пожеж у біокліматичних зонах [275, 276]. Щоб оцінити невизначеність потоку DFCE, ми використали результати дослідження невизначеності з [92] для бореальних лісів Аляски з використанням аналогічної моделі емісій від лісових пожеж. Для чотирирічного середнього потоку вуглецю у [92] вказують коефіцієнт варіації 24%, що відповідає 40% для 90% довірчого інтервалу.

Щоб оцінити невизначеність потоку PFCE, ми використовували спрощену модель PFCE [275] та застосували метод Монте-Карло (10000 розв'язків) для аналізу поширення невизначеностей параметрів. Спрощення моделі полягає у використанні лише одного резервуару, який розкладається з середньою константою розкладання  $\alpha = 0.043$ . Параметри моделюються за допомогою нормального розподілу з середніми значеннями з [275]. Використовуємо

наступні значення коефіцієнтів варіації параметрів (CV): площа пожежі – 0.15 [92]; константа розкладання ( $\alpha$ ) – 0.12 (чутливість отриманої невизначеності до цього параметру дуже мала); частка вуглецю розкладеної органічної речовини, що виділяється в атмосферу ( $\chi$ ) – 0.05 (ми припустили, що коефіцієнт варіації становить половину діапазону, зазначеного в літературі (0.77-0.92) [275]; кількість органічної речовини (O) – 0.20; зміни в органічному ґрунті (CSOC) – 0.06 (ми припустили, що коефіцієнт варіації становить половину діапазону, зазначеного в літературі (0.02-0.11) [275]. Ми також враховуємо, що такі параметри, як O і CSOC, залежать від площі пожежі.

Отримана невизначеність PFCE для 1990 р. становить 40% (90% інтервал довіри). Ми не розрізняємо невизначеність 1990 року та середньорічну невизначеність протягом п'яти років, оскільки одна і та ж модель (і більшість параметрів) використовується для кожного року; при цьому оцінки не є незалежними.

Невизначеність загального потоку вуглецю ( $FCE = DFCE + PFCE$ ) оцінюється в 40% (90% інтервал довіри), беручи до уваги, що і DFCE, і PFCE залежать від тієї ж площі пожежі. Емісії в результаті спалювання органічних речовин, в основному, складаються з декількох газів, що містять вуглець ( $CO_2$ , CO і  $CH_4$ ). Використовуючи дані [92] ми припускаємо, що емісії  $CO_2$  складають близько 85% всіх емісій в атмосферу.

Ми розподілили емісії, спричинені "промисловою трансформацією луків та чагарників" та "абіотичними порушеннями в лісах" пропорційно до кількості населення у біокліматичних зонах. Невизначеність розподіленого потоку оцінюється аналогічно потоку споживання.

Потік вуглецю від порушень у лісах, спричинений лісозаготівлею, розподіляємо пропорційно фактичній лісозаготівлі лісовими підприємствами (ми наклали карту біокліматичних зон та базу даних лісових підприємств з CD-ROM Росії [292]. Ми розподілили потік вуглецю, викликаний спалахом розмноження лісових комах, пропорційно "індексу комах": індекс, що включає загальну площу лісу в біокліматичній зоні та ступінь пошкоджень лісу комахами (значення беремо з карти "комахи" з CD-ROM Росії [292]).

### 6.2.7. Аналіз результатів обчислень

Сумарне значення ЧПП у 1988-1992 рр. для ріллі Росії, як зазначено у FCA2000 [224: Таблиці 30 та 68] та [223, 225] становило близько 957 ТгС/рік з невизначеністю від ~ 5 до 18%. Сумарне значення ЧПП, обчислене Gusti and Jonas (2010) [132] є меншим на 23%, але воно характеризується більшою невизначеністю: 739 ТгС/рік  $\pm$  25%; у напівпустелях і пустелі нове значення є на 14% більшим, а у тундрі – на 50% меншим. Основними причинами систематичної похибки та більшої випадкової похибки є невизначеність кількості урожаю на рівні областей та втрати урожаю при зборі (див. таблицю 6.11).

Таблиця 6.11. Чиста первинна продукція та невизначеності для біокліматичних зон та земельного покриву, ТгС/рік

Біокліматична зона	Орні землі			Ліс			Болота, заболочені землі, луки та чагарники		
	NPP	U90	R_U90	NPP	U90	R_U90	NPP	U90	R_U90
Полярна пустеля	0	0	0	0	0	0	0	0 .. 0.1	-100 .. +112
Тундра	2	2	80	8	2	17	341	143	42
Лісотундра та північна тайга	3	2	69	334	102	31	196	62	31
Середня тайга	35	18	52	1,440	436	30	626	243	39
Південна тайга	119	54	45	411	156	38	206	96	47
Помірна зона	108	44	41	98	40	41	28	14	50
Степ	393	157	40	35	10	26	165	116	70
Напівпустелі і пустелі	80	51	64	3	2	58	33	13	38
Сумарне	739	187	25	2,329	350	15	1,594	513	32

Наша сумарна оцінка лісової ЧПП є більшою, ніж зазначено у FCA2000, на 36%. Основна причина полягає в наступному. Оцінка лісової ЧПП у FCA2000 ґрунтувалась на використанні польових вимірювань ЧПП, які не враховували ЧПП тонких коренів та кореневих виділень (в той час про це не було відомо). Різниця між оцінками ЧПП для біокліматичних зон коливається від -21% у степу до більш ніж 40% у середній тайзі, лісотундрі та північній тайзі. Невизначеність сумарного ЧПП є приблизно на тому ж рівні, що й у FCA2000. Невизначеність ЧПП для біокліматичних зон представляє наше знання про розподіл сумарної ЧПП між біокліматичними зонами та має інший характер, ніж невизначеність

сумарної ЧПП. Поток  $\text{CO}_2$  в атмосферу та з атмосфери для лісових екосистем представлено на рис. 6.3.

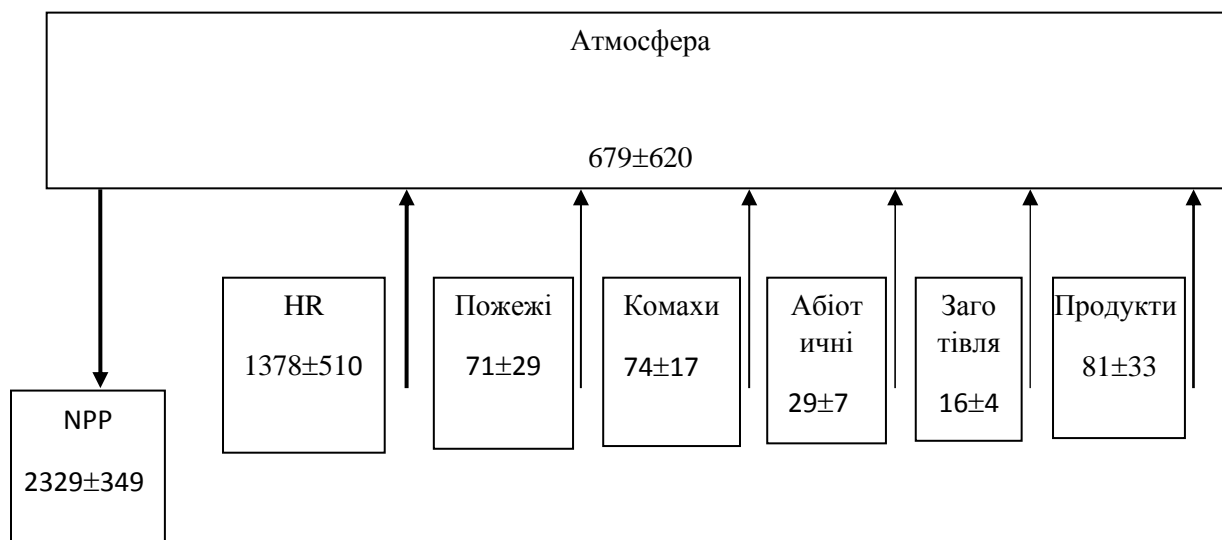


Рис. 6.3. Довготерміновий середній вуглецевий баланс (лише вуглекислий газ) для атмосфери над лісовими екосистемами на території Росії, ТгС/рік (похибки для 90% інтервалу довіри)

Оцінка сумарного ЧПП усередненого для 1988-1992 років для боліт та заболочених земель території Росії, як зазначено у FCA2000 [224: Таблиця 30 та 68] та [223, 225] становила близько 487 ТгС/рік, з невизначеністю від <5 до 27%, а значення для пасовищ та кущів дорівнюють 1202 ТгС/рік, з невизначеністю від <5 до 18%. Відповідні значення ЧПП, отримані у [120, 121, 132] становлять 539 ТгС/рік ± 53% і 1,055 ТгС/рік ± 40%.

Результати оцінки інших потоків  $\text{CO}_2$  наземних екосистем в атмосферу та з атмосфери, чистий атмосферний потік  $\text{CO}_2$  та невизначеності цих потоків представлено в таблиці 6.12.

Наша оцінка ґрунтового гетеротрофного дихання на 9% менша за оцінку FCA2000, а невизначеність зросла з 16% до 24%. Зменшення HR у біокліматичних зонах коливається від 7% у степу до 50% у полярній пустелі. Основною причиною високої невизначеності є недостатнє просторове покриття та репрезентативність часу вимірювань SR та RC для досліджуваного періоду.

Наша оцінка невизначеності HR значно перевищує оцінку невизначеності, опубліковану іншими дослідниками, наприклад, [293] - 6-7% (для SR); [187, 339]



- 10-12% (для HR і 6-8% для SR). На жаль, автори не представляють свої аналізи невизначеності, але лише остаточні цифри. Враховуючи незначну кількість та нерівномірний геопросторовий розподіл вимірювань SR, які є спорадичними, а не статистично запланованими, відсутність досліджень RC, різниця між оцінками HR та інше, можна зробити висновок, що, найімовірніше, дослідники недооцінили невизначеності.

Використання недосконалої техніки для вимірювання дихання ґрунту призводить (ймовірно) до суттєвих систематичних похибок при вимірюванні - до 30% у деяких класах «біокліматична зона – ґрунт». Агрегація класів за типами ґрунтів або біокліматичними зонами знижує систематичні похибки до 22% для типів ґрунтів і до 9% для біокліматичних зон, оскільки систематичні похибки мають протилежні знаки. Агрегація до рівня країни зменшує систематичну похибку до 3%. Визначення та усунення систематичних похибок покращує наші знання про дихання ґрунту, особливо в масштабах країни.

Врахування кореляцій параметрів в межах біокліматичних зон та між біокліматичними зонами при обчисленні HR (оскільки використано спільний RC у декількох біокліматичних зонах) важливе при вивченні невизначеностей потоку. Кореляція досягає 32% у випадку середньої тайги, лісової тундри та північної тайги. Якщо не враховувати кореляцію, похибки буде недооцінено (у нашому випадку кореляція збільшує сумарну невизначеність потоку на 4%).

Наша оцінка невизначеності сумарних потоків, спричинених порушеннями екосистем, є більшою, ніж, невизначеність, зазначена у FCA2000, через більші невизначеності емісій від лісових пожеж (невизначеність зросла з 23% до 40%). Невизначеність сумарних потоків споживання зросла переважно через переоцінку споживання сільськогосподарської продукції. Невизначеність оцінок потоку для біокліматичних зон є більшою через недосконалість просторових даних про кількість населення у біокліматичних зонах, спалахи розмноження комах та лісозаготівлю (невизначеність припущень про розподіл потоків по біокліматичних зонах не враховано). Однак, оскільки потоки, спричинені порушеннями та споживанням, в цілому, є набагато менші за потоки HR та ЧПП (за винятком лісу у помірній зоні, де споживання вдвічі перевищує HR), їх невизначеності не впливають на невизначеність чистих атмосферних потоків для

біокліматичних зон у значній мірі. Наша оцінка невизначеності потоків CO<sub>2</sub>-балансу є вищою, ніж оцінка [279] для Центрального Сибіру. Це, в основному, можна пояснити набагато більш детальною інформацією, яку використовували автори [279] при дослідженні.

Таблиця 6.12. Основні потоки CO<sub>2</sub> з атмосфери та до атмосфери і баланс атмосферного CO<sub>2</sub>, включаючи невизначеності (U90; припускаючи кореляцію між порушеннями та споживанням рівною одиниці), ТгС/рік (мінус відповідає нетто потоку з атмосфери)

Біокліматична зона	NPP		HR		Порушення		Споживання		Сумарне	
	NPP	U90	HR	U90	потік	U90	потік	U90	потік	U90
Полярна пустеля	0.05	0 .. 0.1	0.10	0 .. 0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.16
Тундра	351	143	236	140	10	4	10	4	-96	200
Лісотундра та північна тайга	533	119	253	150	49	18	16	8	-215	193
Середня тайга	2,101	499	1,063	578	75	16	70	21	-893	764
Південна тайга	737	191	611	136	62	10	191	39	127	240
Помірна зона	233	61	188	38	23	5	90	44	68	86
Степ	593	195	523	114	19	3	157	31	106	228
Напівпустелі і пустелі	116	53	48	29	2	1	12	4	-55	60
Сумарне	4,662	648	2,920	687	240	50	545	101	-957	957

Наше припущення, що невизначеність досліджуваних параметрів відповідає розподілу Гауса, призводить до приблизних результатів для позитивно визначених параметрів у випадку невизначеностей більше 33%, оскільки існує (мала) ймовірність того, що деякі значення у вибірці є негативними. Насправді це не відбувається, тому частина ймовірності "втрачається" через нереалістично довгий хвіст теоретичного розподілу з негативними значеннями. Це може призвести до незначної переоцінки невизначеності. Там, де недостатньо інформації для перевірки опублікованих у FCA2000 та інших наукових працях значень та оцінки невизначеності цих значень, ми припустили високу невизначеність, щоб відобразити відсутність інформації.

Слід зазначити, що ми досліджуємо потоки вуглецю та їх невизначеності лише за принципом "знизу вгору", який (поки що) не обмежений «зверху вниз». Невизначеність нашої оцінки невизначеності є значною, і включає багато припущень та експертних оцінок. При оцінках невизначеностей ми слідували

принципу, що невизначеність відображає відсутність інформації, або знань про досліджуваний потік, тому вибирали більші значення невизначеності.

Gusti and Jonas (2010) [132] застосували оновлену оцінку бюджету атмосферного CO<sub>2</sub> для реконструкції розділу для Північної Азії на рис. 7.7 звіту IPCC [67]. Оновлене значення потоку вуглецю «знизу вгору» становить -850 ТгС/рік проти -360 ТгС/рік на оригінальному рисунку та відповідний інтервал невизначеності [-1,700 - 0] проти [-730 - 0] ТгС/рік. Загалом, невизначеність оцінки "знизу вгору" для Азії є меншою, ніж діапазон оцінок, наведених методами "зверху вниз" (рис. 6.4).

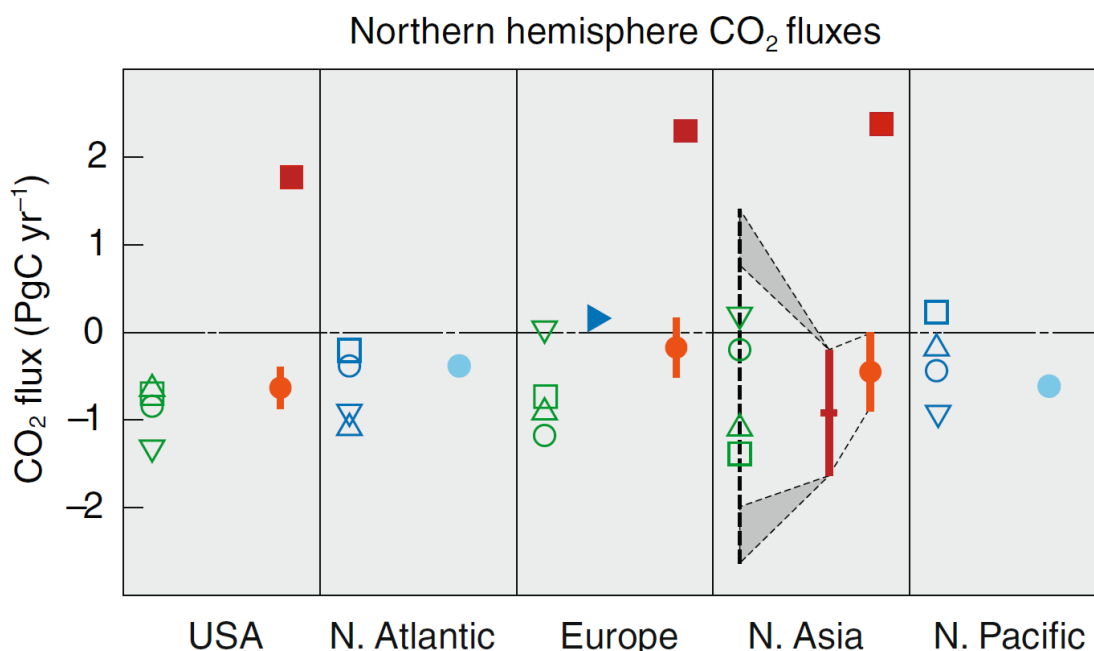


Рис. 6.4. Регіональні потоки CO<sub>2</sub> океан-атмосфера та суходіл-атмосфера для північної півкулі, отримані з використанням інверсного моделювання потоків CO<sub>2</sub> з поля концентрацій CO<sub>2</sub> в атмосфері, та досліджень «знизу вгору». Потік в атмосферу: позитивний; поглинання: негативний. Результати інверсного моделювання відповідають періоду пост-Пінатубо, 1992-1996 рр. У центрі уваги: Північна Азія. Помаранчева лінія: сума потоків з земної поверхні, визначених методом «знизу вгору» для азійської частини Росії [277] і Китаю [76]. Зеленим позначено: потоки з земної поверхні, отримані методом інверсного моделювання [113, 114, 234, 258]; їх похибки від 500 до 1000 ТгС/рік. Червоні квадрати: емісії від спалювання викопного палива. Джерело оригінального рисунка: звіт IPCC [67: Рисунок 7.7]. Додатково введено: червона лінія - наша переглянута оцінка потоку "знизу вгору" для всієї території Росії (68% CI) [132], розширена оцінкою потоку з [76] для Китаю; сіро-затінені трикутники - для полегшення порівняння цієї розширеної оцінки "знизу-вгору" до поточного потоку за допомогою вищезгаданих оцінок інверсії, з урахуванням їх невизначеностей.

У нашому дослідженні [120, 121, 132] оновлені значення потоків вуглецю та їх похибок трохи гірше співвідносяться із результатами, які отримано методом інверсного моделювання, ніж попередні результати. В результаті експерименту, проведеного у 2007р. з дослідниками з Наукової лабораторії клімату та навколишнього середовища (LSCE), по інверсному моделюванню потоків із застосуванням оновлених значень для російської території в якості початкового наближення, можна зробити висновок, що на той час значення потоку «знизу-вверх» та його невизначеність залишались основним фактором, який визначає постеріорний інверсний потік для території Росії. Для експерименту використовували мережу 12 та 77 станцій вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері у якості репрезентативних для ~ 1988 та ~ 2000 років [247, 248]. Це означає, що необхідно мати більше інформації (вимірів, наприклад [246, 248]) про концентрацію CO<sub>2</sub> в атмосфері. [132]

### **6.3. Моделювання процесу прийняття рішень в умовах невизначеності**

Стабілізація кліматичної системи та уникнення незворотних змін вимагають не лише значного скорочення емісій парникових газів у всіх секторах економіки, а також впровадження індустріальних технологій поглинання та зберігання вуглекислого газу, зокрема, в енергетиці, та зміни лісокористування з метою збільшення нагромадження вуглецю у біомасі лісів.

Впровадження індустріальних технологій поглинання та зберігання вуглекислого газу (CCS), а також розбудови мережі (лісових) доріг для зміни лісокористування потребує капітальних інвестицій. Прийняття рішення про інвестиції залежить від прибутковості проєктів, а прибутковість, в тому числі, залежить від цін на викопне паливо, електроенергію, деревину та емісії вуглекислого газу. Зокрема, ціна на емісії вуглекислого газу є стимулом розвитку технологій з меншими, або й негативними (поглинанням) емісіями вуглекислого газу.

Моделювання процесу прийняття рішення, щодо інвестицій у технологію поглинання та зберігання вуглекислого газу виглядає наступним чином [97]. Розглядаємо оптимальний інвестиційний план для одного виробника

електроенергії, який приймає рішення про будівництво вугільної електростанції з, або без модуля поглинання та зберігання  $\text{CO}_2$  під впливом стохастичних цін на електроенергію та  $\text{CO}_2$ . Оскільки ціна  $\text{CO}_2$  визначається, в тому числі, міжнародною та національною політикою стосовно проблеми зміни клімату, визначивши оптимальну стратегію інвестицій у технологію поглинання та зберігання  $\text{CO}_2$  при різній невизначеності ціни  $\text{CO}_2$ , ми зможемо оцінити вплив інформації (на противагу невизначеності) на інвестиційну активність. Для розв'язування цієї задачі використаємо теорію реальних опціонів, оскільки вона допомагає оцінити вартість отримання інформації шляхом очікування.

Тривалість планування - 50 років. Варіанти дій, доступні для інвестора:

1) інвестувати у звичайну вугільну електростанцію, чи у вугільну електростанцію із модулем CCS;

2) інвестувати у модернізацію існуючої вугільної електростанції, добудувавши модуль CCS;

3) вмикати модуль CCS, коли ціна  $\text{CO}_2$  зростає та вимикати, коли ціна зменшується (якщо модуль CCS включений, то кількість виробленої електричної енергії є меншою, витрати на експлуатацію вищі, а витрати, пов'язані з виплатами за емісії  $\text{CO}_2$ , є нижчими; дефіцит згенерованої електроенергії, спричинений роботою модуля CCS, заміщується купівлею такої ж кількості електроенергії за ринковою ціною. Електростанцію з модулем CCS у початковий момент часу можуть побудувати лише за дуже високої початкової ціни емісій  $\text{CO}_2$  [97].

Розглядаємо такі невизначеності: невизначеність ціни на електроенергію та невизначеність ціни на емісії  $\text{CO}_2$ . Ціна емісій  $\text{CO}_2$  впливає на виробничі витрати. Невизначеність ціни емісій  $\text{CO}_2$  складається з двох компонент – ринкової, яка характеризується коливаннями ціни, та політична складова, яка визначає напрямок зміни ціни (тенденцію до зростання, чи спадання) в залежності від дій уряду та міжнародних угод щодо контролю емісій парникових газів. Інші витрати вважаємо постійними та ігноруємо часом будівництва електростанції та модуля CCS. Ціну електроенергії (з ринковою невизначеністю) представляємо моделлю стохастичного процесу зі зворотними середніми:

$$dP_t^e = \alpha \cdot (\mu^e - \ln P_t^e) \cdot P_t^e dt + \sigma^e \cdot P_t^e \cdot dW_t^e,$$

де  $P_t^e$  – ціна електроенергії,  $\alpha$  – визначає швидкість повернення значень до середнього,  $\exp(\mu^e)$ ,  $\sigma^e$  – параметр мінливості, а  $dW_t^e$  – приріст стандартного вінерівського процесу.

Ціну емісії вуглекислого газу представляємо моделлю броунівського руху:

$$dP_t^c = \mu^c \cdot P_t^c dt + \sigma^c \cdot P_t^c \cdot dW_t^c,$$

де  $\mu^c$  – визначає дрефт,  $\sigma^c$  – параметр мінливості, а  $dW_t^c$  – приріст стандартного вінерівського процесу. Прирости  $dW_t^e$  та  $dW_t^c$  позитивно корелюють між собою з коефіцієнтом кореляції  $\rho$ , що означає, що зростання ціни емісії вуглекислого газу, яке збільшує витрати на генерацію електроенергії, відображається у зростанні ціни електроенергії. У цих моделях цін ринкову невизначеність представлено параметрами мінливості  $\sigma$ , а політичну невизначеність – параметром  $\mu^c$ .

Отримуємо задачу оптимізації – знайти такий час будівництва модуля CCS, щоб максимізувати суму дисконтованих очікуваних майбутніх прибутків [97]:

$$\begin{aligned} & \max_{a_t \in A_t(x_t)} \left\{ \sum_{t=1}^{50} e^{-rt} \cdot E[\pi(x_t, a_t, P_t^e, P_t^c)] \right\}, \\ & x_{t+1} = F(x_t, a_t), \\ & dP_t^e = \alpha \cdot (\mu^e - \ln P_t^e) \cdot P_t^e dt + \sigma^e \cdot P_t^e \cdot dW_t^e, \\ & dP_t^c = \mu^c \cdot P_t^c dt + \sigma^c \cdot P_t^c \cdot dW_t^c, \end{aligned}$$

де  $A_t(x_t)$  – це набір дозволених дій для певного стану  $x_t$  (інвестор повинен збудувати вугільну електростанцію (з модулем CCS, або без) в перший період; якщо модуль CCS не збудований на початку, може бути доданий пізніше; якщо модуль CCS збудований, він може бути вимкнений і включений, оскільки ціни на емісії  $\text{CO}_2$  змінюються; нічого не робити);  $r$  – коефіцієнт дисконтування; стан у наступний момент часу  $x_{t+1}$  залежить від теперішнього стану  $x_t$  та вибраної дії  $a_t$ ;  $x_{t+1} = F(x_t, a_t)$ ;  $\pi$  – прибуток:

$$\pi(x_t, a_t, P_t^e, P_t^c) = q^e(m_t) \cdot P_t^e + q^h(m_t) \cdot P^h - q^c(m_t) \cdot P_t^c - q^f(m_t) \cdot P^f - \text{OC}(m_t) - c(a_t)$$

де  $P^f$  – ціна вугілля;  $P^h$  – ціна теплової енергії;  $q^e(m_t)$ ,  $q^h(m_t)$ ,  $q^c(m_t)$ ,  $q^f(m_t)$  – річний обсяг електроенергії, теплової енергії, емісії  $\text{CO}_2$  та вугілля, які залежать від типу електростанції, яка працює в час  $t - m = 1$  електростанція без модуля CCS,

або з вимкнутим модулем CCS,  $m=2$  – модуль CCS ввімкнутий;  $OC(m_t)$  – річні витрати на обслуговування обладнання;  $c(a_t)$  – витрати, необхідні, щоб здійснити дію  $a_t$ .

Необхідно знайти оптимальні стратегії для всього періоду  $\{a_t\}_{t=1}^T$  ( $T=50$  років). Оптимальну дію щороку визначаємо рекурсивно, розв'язуючи рівняння Беллмана:

$$V_t(x_t, P_t^e, P_t^c) = \max_{a_t \in A_t(x_t)} \{ \pi(x_t, a_t, P_t^e, P_t^c) + e^{-r} \cdot E[V_{t+1}(x_{t+1}, P_{t+1}^e, P_{t+1}^c) | P_t^e, P_t^c] \}$$

Для обчислення  $E[V_{t+1}(x_{t+1}, P_{t+1}^e, P_{t+1}^c) | P_t^e, P_t^c]$  для всіх реалізацій стохастичних цін використовуємо метод Монте-Карло. В результаті отримуємо багатомірну матрицю, елементами якої є оптимальні дії ( $a_t$ ) для кожного року ( $t$ ), реалізації цін  $P_t^e$  та  $P_t^c$ . На другому етапі симулюємо можливі траєкторії цін та вибираємо відповідні оптимальні дії.

Fuss et al. (2008) [97] провели наступний експеримент із вищенаведеною моделлю. Припустимо, що уряд запровадив певну стратегію зменшення емісій  $CO_2$  (схема торгівлі дозволами на емісії, або зростаючий податок на емісії). Тому спочатку ціна на емісії  $CO_2$  зростає, але немає впевненості, що зростання ціни буде продовжуватись. Якщо уряд країни бере участь у міжнародних переговорах з питань зміни клімату і переговори будуть успішними, уряд зобов'язується ще більше знизити емісії  $CO_2$ , для чого буде збільшена ціна на емісії  $CO_2$ . Але якщо переговори будуть неуспішними (приклад США, які заявили про наміри залишити кліматичну угоду), може виявитися, що уряд припинить стратегію скорочення емісій  $CO_2$  і ціна емісій зменшиться. Таким чином, інвестор стикається з двома сценаріями: у першому, ціна буде продовжувати зростати, у другому - ціна знизиться (або до нуля, або до відносно низького рівня). Якщо дії уряду є такими, які важко передбачити, інвестори стикаються з 50% ймовірністю реалізації одного з двох наведених сценаріїв. Основний висновок аналізу полягає в тому, що - при такому типі невизначеності - інвестори відкладуть своє рішення до року, в якому вони дізнаються про рішення уряду щодо кліматичної угоди. Якщо уряд зобов'язується запровадити більш жорстку ціль скорочення емісій, інвестори добавлять модуль CCS. В іншому випадку вони будуть продовжувати генерацію

електроенергії на вугільній електростанції без модуля CCS (рис. 6.5 [97]). Схожий висновок можна зробити і з дослідження проблеми інвестицій у лісокористуванні для зменшення емісій CO<sub>2</sub>, проведеного Fuss et al. (2011) [96]. Szolgayova et al. (2016) [301] використовуючи такий же метод реальних опціонів досліджувала вплив ринкової невизначеності ціни емісій CO<sub>2</sub> на оптимальний час переходу на технології генерації електроенергії з меншими емісіями CO<sub>2</sub>.

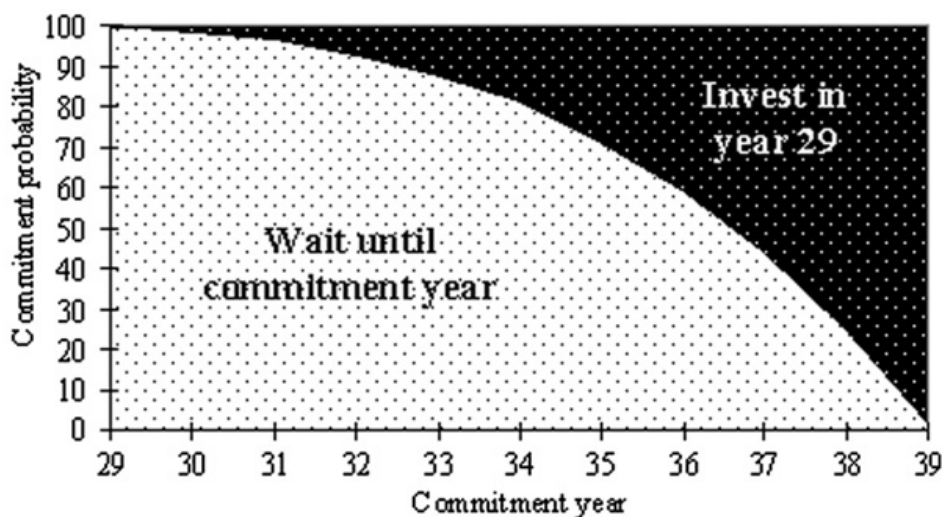


Рис. 6.5. Вплив ймовірності запровадження урядом країни більш жорстких цілей скорочення емісій CO<sub>2</sub> на рік інвестицій у модуль поглинання та зберігання CO<sub>2</sub> [97].

#### 6.4. Оцінка переваг вдосконалення системи моніторингу запасів та потоків вуглецю

Існує ризик раптової зміни кліматичної системи Землі, якщо кількість парникових газів в атмосфері досягне деякого критичного рівня. Цей критичний рівень точно невідомий. Але щоб уникнути ймовірних незворотних змін кліматичної системи, або затримати настання цих змін необхідно суттєво зменшити емісії парникових газів [171]. Як було показано у [236] зменшення емісій вуглекислого газу в секторі зміни землекористування та лісового господарства відіграє важливу роль на початку скоординованих зусиль по зменшенню впливу на кліматичну систему, оскільки є відносно дешевим і може бути досить швидко впроваджено. Разом з тим, емісії в цьому секторі характеризуються суттєвою невизначеністю. Щоб уникнути змін клімату необхідно знати з певною ймовірністю, що емісії справді зменшено на задану



величину (не перевищують заданої величини). Тому емісії потрібно зменшити «з запасом» (наприклад, концепція «overshooting» [159, 166]), або очікувати певний час, коли зміну емісій можна буде достовірно визначити (наприклад, критична невизначеність та час верифікації [119, 159, 161, 166]). Інакше, знаючи, що справжнє значення емісій в цьому секторі може бути більшим, необхідно буде більше скорочувати емісії в інших секторах, або країни можуть не виконувати взятих на себе зобов'язань по зменшенню емісій, наскільки це невиконання може бути замасковане невизначеністю обчислень емісій [95]. Оскільки в даний час знеліснення є найбільшим у тропічних лісах, ми розглядаємо у цьому дослідженні тропічні ліси.

Для зменшення емісій парникових газів необхідно витратити кошти. Вартість зменшення емісій може, зокрема, подаватись у формі кривих граничних витрат на зменшення емісій (див. розділ 5.2, а також рис. 6.6 та рис. 6.7). Для того, щоб забезпечити на певному рівні ймовірності досягнення визначеного рівня емісій від знеліснення (позначеного  $m$  на рис. 6.8), необхідно домагатися більшого зниження емісій на величину, яка перевищує невизначеність у обчисленнях цих емісій. В залежності від прийнятого ризику можуть використовувати різні інтервали довіри, наприклад, 68% інтервал довіри (одне стандартне відхилення,  $\sigma$ ), або 95% інтервал довіри ( $2\text{-}\sigma$ ). Необхідність більшого скорочення емісій значно збільшує витрати на скорочення (рис. 6.8), наприклад, скорочення глобальних емісій на 30% ( $9.5 \text{ MtCO}_2/\text{рік}$  можна досягнути при ціні вуглекислого газу  $3 \text{ \$/tCO}_2$ , 60% скорочення ( $119 \text{ MtCO}_2/\text{рік}$ ) – при ціні  $6 \text{ \$/tCO}_2$  (рис. 6.6 та рис. 6.7). Додаткові витрати коштів можуть бути виправданими, якщо стоїть завдання зменшити ризик перевищення критичного рівня емісій, який призводить до необоротних змін кліматичної системи та збитків економіці. Зменшити витрати на надмірне зменшення емісій можна також підвищивши точність визначення емісій [95].

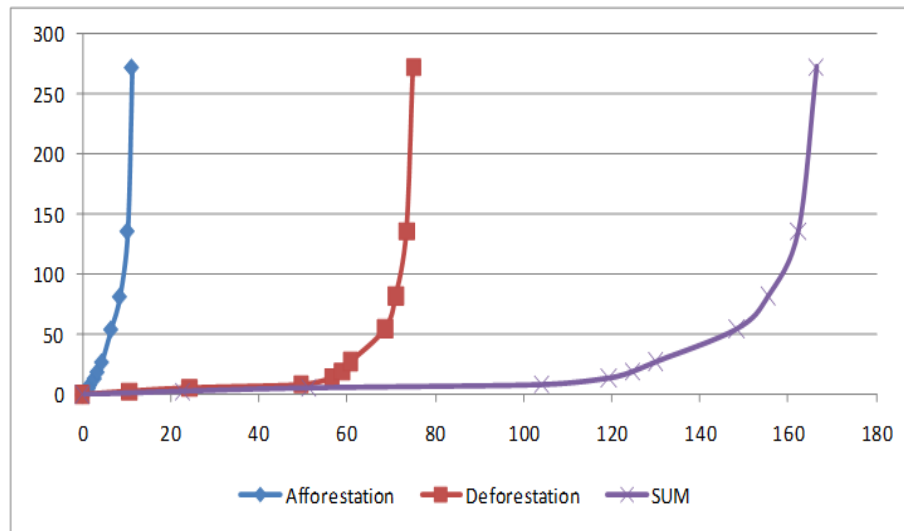


Рис. 6.6. Крива граничних витрат на зменшення емісій (вісь абсцис – зменшення емісій відносно нульової ціни вуглецю, %) вісь ординат – ціна CO<sub>2</sub>, \$/тCO<sub>2</sub>)

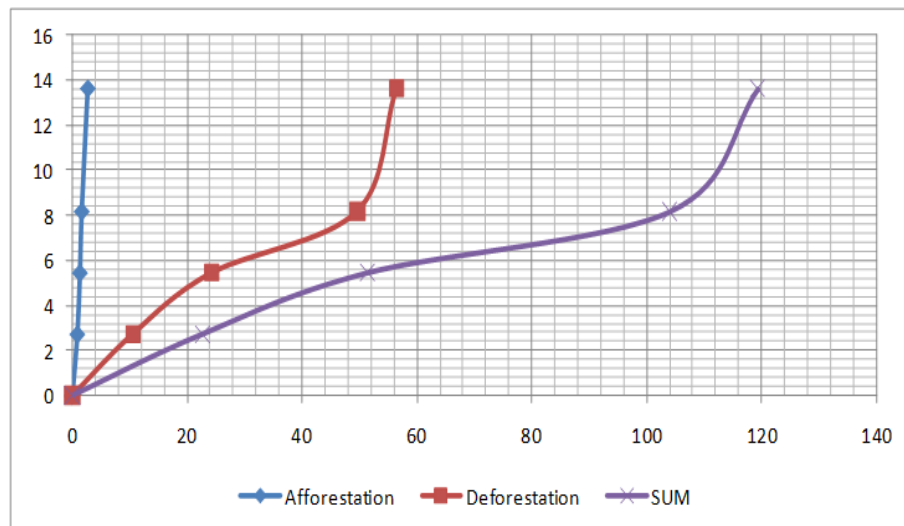


Рис. 6.7. Крива граничних витрат на зменшення емісій (вісь абсцис – зменшення емісій відносно нульової ціни вуглецю, %) вісь ординат – ціна CO<sub>2</sub>, \$/тCO<sub>2</sub>)

На рис. 6.8 Схематично наведено приклад того, як вимірюється перевага отримання більш точної інформації щодо емісій вуглекислого газу, пов'язаних з знелісненням тропічних лісів, зокрема економія коштів від уникнення надмірного зменшення емісій. Вартість заданого зменшення емісій визначаємо, використовуючи криву граничних витрат на зменшення емісій (рис. 6.6 та рис. 6.7). Помноживши задане скорочення емісій на відповідну ціну вуглекислого газу отримаємо необхідну кількість коштів на реалізацію такого скорочення. Знайшовши різницю між кількістю коштів, необхідною для

скорочення емісій з врахуванням різних рівнів надмірності скорочень, ми отримуємо грошову вигоду від зменшення невизначеності обчислення емісій, яку можна порівняти з вартістю встановлення, обслуговування та експлуатації системи моніторингу емісій від знеліснення, що забезпечує менше, ніж поточне значення невизначеності [95].

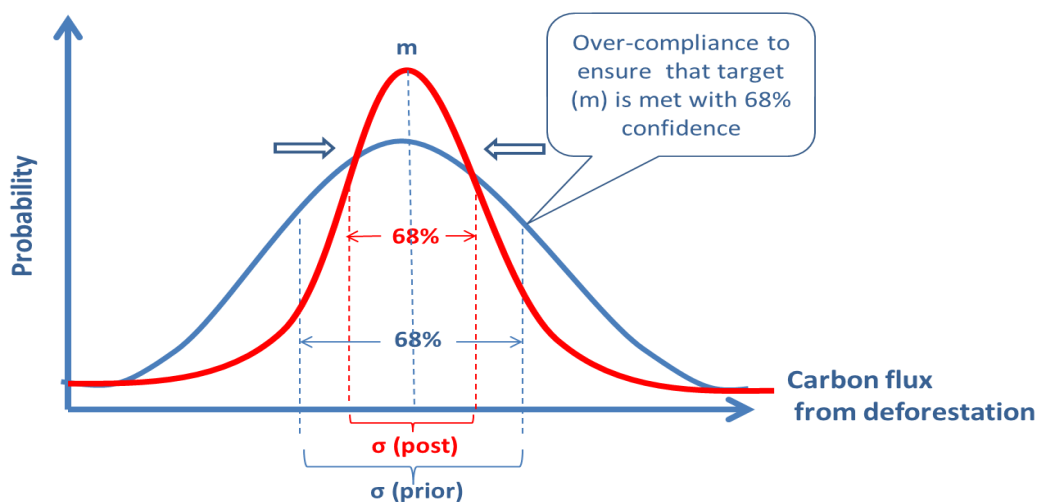


Рис. 6.8. Схематичне зображення проблеми досягнення цілі зменшення емісій вуглекислого газу, якщо обчислення емісій характеризується суттєвою невизначеністю, а також потенційної користі від зменшення невизначеності [95].

Для зменшення невизначеності параметрів, які використовують для обчислення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення – площі знеліснення  $S$  та запасів вуглецю біомаси на цій площі  $B$  – необхідно забезпечити регулярний (в кращому випадку щорічний) моніторинг цих параметрів з високою просторовою роздільною здатністю на всій території країн, де будуть впроваджувати заходи зменшення емісій від знеліснення.

Для аналізу невизначеності даних про біомасу тропічних лісів використаємо опубліковані дані [211], де порівнювали дві карти надземної біомаси рослинного покриву, отримані за даними дистанційного зондування (RS), опубліковані в [261] (позначено як SA2011, середня роздільна здатність (463 м і 1000 м)) та [12], позначено BA2012), а також з даними на рівні країн зі звіту ФАО про лісові ресурси 2010 року [105] і з картою біомаси з високою просторовою роздільною здатністю (100 м), створеною для частини колумбійської амазонки (див. секцію 4.2).

Для цього дослідження ми розглядаємо п'ять країн - найбільших емітентів CO<sub>2</sub> від знеліснення (ці п'ять країн загалом містять від 39 до 50% загальної біомаси у тропічних країнах, перелічених у [211], а емісії від знеліснення становлять 63% від всіх емісій від знеліснення у тропічних країнах (за даними [137])).

Для оцінки невизначеності запасу вуглецю у біомасі лісів ми використовуємо максимальну різницю між двома картами біомаси [12] та [261] згідно інформації наведеній у [211] та оцінкою [105] плюс "внутрішня невизначеність" у масштабі країни, зазначеної для кожного набору даних, як вірогідну величину для 90% інтервалу довіри ( $1.5\text{-}\sigma$ ), яку країни могли б додати до середньої величини емісій для скороченням. Згідно з цим припущенням, ми розглядаємо ці три оцінки біомаси для кожної країни як три зразки нормального розподілу поточних оцінок запасів вуглецю біомаси та наявних невизначеностей у таких оцінках.

У таблиці 6.13 представлено результати для сумарної невизначеності запасу вуглецю надземної біомаси лісів, яку обчислено як максимальну відносну різницю між середнім значенням та мінімальним або максимальним значеннями, опублікованими у [261] та [12]. Ми припускаємо, що обидві оцінки ([261] та [12]) охоплюють 90% довірчий інтервал у своїх даних, що відповідає  $1.5\text{-}\sigma$ . На наступному етапі ці відносні відмінності застосовуються до даних, представлених у [211], щоб отримати мінімальні та максимальні значення для запасу вуглецю. Сумарна невизначеність обчислюється як максимальний запас вуглецю біомаси з трьох наборів даних (включаючи звіт ФАО [105]) мінус мінімальний запас вуглецю біомаси з трьох наборів даних. Таким чином, для кожного набору даних отримуємо мінімальне значення (середнє значення мінус невизначеність) та максимальне значення (середнє значення плюс невизначеність). Відносна невизначеність відповідає невизначеності середнього значення серед трьох наборів даних.

Вважаємо, що невизначеність запасу вуглецю підземної біомаси є такою ж як і надземної. Невизначеність площі знеліснення становить до 25% (68% інтервал довіри) [58], невизначеність емісій CO<sub>2</sub> з ґрунту становить 60% і

складає 1/3 всіх емісій від знеліснення [95]. Повну невизначеність емісій від знеліснення з врахуванням вищенаведених невизначеностей компонент наведено у таблиці 6.14.

Таблиця 6.13. Відносні невизначеності (внутрішня – властива набору даних) у обчисленнях запасу вуглецю надземної біомаси лісів у країнах на основі даних [12, 105, 211, 261] для 68% (1-s) та 90% (1.5-s) інтервалів довіри

Країна	Внутрішня невизначеність [261]		Внутрішня невизначеність [12]		Внутрішня невизначеність [105]		Сумарна невизначеність	
	1.5-s	1-s	1.5-s	1-s	1.5-s	1-s	1.5-s	1-s
<b>Бразилія</b>	12%	8%	1%	1%	45%	30%	81%	54%
<b>Індонезія</b>	10%	7%	1%	1%	45%	30%	85%	57%
<b>Малайзія</b>	9%	6%	1%	1%	45%	30%	94%	63%
<b>Колумбія</b>	11%	7%	2%	1%	45%	30%	86%	57%
<b>Болівія</b>	14%	9%	3%	2%	45%	30%	98%	65%

Очікується [95], що за допомогою оновленої системи моніторингу запасів біомаси та площі лісів можна буде знизити невизначеність емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення до 12 тCO<sub>2</sub>/(рік га), що складе на рівні країн менше 30% (68% інтервал довіри). Такі результати можуть бути досягнуті в майбутньому за рахунок використання даних дистанційного зондування Землі високої роздільної здатності. Зокрема, для моніторингу площі лісів планують використовувати LANDSAT-ETM (а також заплановані: Landsat Data Continuity Mission LDCM; NRC 2010 та European Sentinel-2 Mission), з допомогою яких детектуватимуть зміну площі з точністю 4%, а для моніторингу запасу біомаси лісів – BIOMASS-P, який буде працювати з роздільною здатністю 200м [194]. Планується, що три зазначені супутники (BIOMASS-P, LDCM і Sentinel-2 почнуть надавати дані після 2020 року. Вартість місії BIOMASS-P становить 400 млн. Євро (<http://www.sheffield.ac.uk/news/nr/biomass-mission-quegan-european-space-agency-forest-1.272588>). Вартість системи моніторингу біомаси та площі лісів, заснованої на цих трьох супутникових інструментах, з додатковою мережею інвентаризації тропічних лісів (300 пробних ділянок) для калібрування супутникових даних та пов'язаної з цією системою моніторингу інфраструктури обробки даних, становитиме приблизно 50 млн. \$ протягом 5 років. [95]. У

таблиці 6.14 наведено теперішню оцінку невизначеності емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення для вибраних країн та невизначеність з врахуванням оновленої системи моніторингу.

Таблиця 6.14. Невизначеність емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення для вибраних країн, обчислена на основі даних [12, 211, 261] та невизначеність із врахуванням оновленої системи моніторингу

<b>Країна</b>	<b>Теперішня невизначеність</b>	<b>Очікувана невизначеність</b>
Бразилія	40%	30%
Індонезія	50%	30%
Малайзія	50%	30%
Колумбія	50%	30%
Болівія	50%	30%

Для того, щоб більш надійно оцінити переваги зменшення невизначеності національної системи моніторингу емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення, описаної вище, ми використовуємо дві схеми моделювання:

1) модель G4M зв'язану із моделлю GLOBIOM, з додатковими даними сценаріїв на основі результатів моделі POLES [180, 61] та прогнозів WEO (World Energy Outlook) (розділ 5.3.1)

2) комплексу моделей інтегральної оцінки IIASA (розділ 5.3.2).

Використовуючи обидві схеми моделювання ми створили криві граничних витрат на зменшення емісій від знеліснення (розглядаємо нетто-знеліснення – арифметичну суму емісій від знеліснення та заліснення за 2026-2050pp., враховуємо емісії з біомаси та ґрунту). Для кожної країни визначили кошти необхідні для зменшення емісій з врахуванням теперішньої невизначеності обчислень емісій, а також очікуваної невизначеності після оновлення системи моніторингу.

Згідно результатів моделювання при зменшенні теперішньої невизначеності, 40-50%, до мінімум 30% при впровадженні вищезазначеної системи моніторингу, можна досягнути значного скорочення витрат на зменшення емісій від знеліснення, у порівнянні із витратами на вдосконалення

системи моніторингу. Так для Бразилії, щоб зменшити емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення на 40%, необхідна ціна CO<sub>2</sub> від 5 до 9.8 \$/тCO<sub>2</sub>, що призведе до зменшення емісій на 7.9-9.3 ГтCO<sub>2</sub> у 2026-2050рр, а загальні витрати складуть 39.5-91.1 мільярди доларів. В той же час, щоб зменшити емісії на 30%, необхідна ціна CO<sub>2</sub> від 3.7 до 9.1 \$/тCO<sub>2</sub>, що призведе до зменшення емісій на 5.92-6.98 ГтCO<sub>2</sub> у 2026-2050рр, загальні витрати складуть 21.9-63.5 мільярди доларів, економія становитиме 17.6-27.8 мільярдів доларів. Враховуючи всі розглянуті країни (таблиця 6.15 Та таблиця 6.16) економія коштів за період 2026-2050рр. становитиме 49-70 мільярдів доларів, що значно перевищує витрати на оновлення системи моніторингу біомаси та площі лісів. [95].

Таблиця 6.15. Ціна вуглекислого газу для зменшення емісій на теперішній рівень невизначеності, \$/тCO<sub>2</sub>, на рівень невизначеності з оновленою системою моніторингу (30%), відповідне зменшення емісій за період 2026-2050рр. та очікувана економія коштів, мільярдів \$, для схеми моделювання описаної у секції 5.3.1 (сценарій POLES та WEO).

Країна	Ціна CO <sub>2</sub> для зменшення емісій на теперішній рівень невизначеності, \$/тCO <sub>2</sub>	Ціна CO <sub>2</sub> для зменшення емісій на рівень невизначеності 30%, \$/тCO <sub>2</sub>	Сума зменшених емісій CO <sub>2</sub> за 2026-2050рр. при першій ціні CO <sub>2</sub> , Гт CO <sub>2</sub>	Сума зменшених емісій CO <sub>2</sub> за 2026-2050рр. при другій ціні CO <sub>2</sub> , Гт CO <sub>2</sub>	Очікувана економія коштів, мільярдів \$
Бразилія	9.8	9.1	9.31	6.98	27.8
Індонезія	21.0	17.2	1.34	0.81	14.4
Малайзія	33.7	25.2	0.32	0.19	6.0
Колумбія	10.7	8.9	1.75	1.05	9.4
Болівія	6.6	5.8	2.60	1.56	8.1

Натомість, для оцінки вигоди від вдосконалення системи моніторингу потоків вуглецю, ми дослідили вплив невизначеності у ціні CO<sub>2</sub>, яка залежить від інформації про величину емісій CO<sub>2</sub> та необхідного обсягу скорочень для стабілізації концентрації атмосферного CO<sub>2</sub> на рівні 450, 480 та 520 ppm, на інвестиції у технології генерації електрики з різним рівнем емісій CO<sub>2</sub> та технології поглинання і зберігання CO<sub>2</sub> [301]. Для дослідження впливу невизначеності на прийняття рішень інвесторами використано метод,

розроблений у [97] (розділ 6.3). Вдосконалення мережі станцій вимірювання потоків CO<sub>2</sub> (додавання пунктів безпосереднього вимірювання потоків та вимірювання методом аналізу проб повітря, наприклад [246]) для зменшення невизначеності приблизно на 1% коштуватиме біля 30 мільйонів євро, що може зменшити мінливість ціни CO<sub>2</sub> на 30%. Зменшення мінливості ціни CO<sub>2</sub> стимулює інвестиції у нові технології з меншими емісіями CO<sub>2</sub> та з поглинанням і зберіганням CO<sub>2</sub>. При коефіцієнті дисконтування 6% і обмеженні стабілізації концентрації атмосферного CO<sub>2</sub> на рівні 450 ppm, вигода від вдосконалення системи моніторингу потоків CO<sub>2</sub> може становити 170 мільйонів євро [301].

Таблиця 6.16. Ціна вуглекислого газу для зменшення емісій на теперішній рівень невизначеності, \$/тCO<sub>2</sub>, на рівень невизначеності з оновленою системою моніторингу (30%), відповідне зменшення емісій за період 2026-2050pp. та очікувана економія коштів, мільярдів \$, для схеми моделювання описаної у розділі 5.3.2 (сценарій SSP2).

Країна	Ціна CO <sub>2</sub> для зменшення емісій на теперішній рівень невизначеності, \$/тCO <sub>2</sub>	Ціна CO <sub>2</sub> для зменшення емісій на рівень невизначеності 30%, \$/тCO <sub>2</sub>	Сума зменшених емісій CO <sub>2</sub> за 2026-2050pp. при першій ціні CO <sub>2</sub> , Гт CO <sub>2</sub>	Сума зменшених емісій CO <sub>2</sub> за 2026-2050pp. при другій ціні CO <sub>2</sub> , Гт CO <sub>2</sub>	Очікувана економія коштів, мільярдів \$
Бразилія	5.0	3.7	7.90	5.92	17.6
Індонезія	23.9	17.2	0.88	0.53	11.9
Малайзія	48.1	40.4	0.38	0.23	9.1
Колумбія	3.5	2.1	1.08	0.65	2.4
Болівія	4.9	2.9	2.56	1.54	8.0

## 6.5. Висновки до розділу 6

1. Розроблено простий метод діагностики умов перевірки зміни рівня емісій парникових газів у країнах відповідно до їх міжнародних зобов'язань – метод критичної відносної похибки. Цей метод ґрунтується на концепції «часу верифікації» і, в свою чергу, є основою для більш складних діагностичних методів. У методі критичної відносної невизначеності вважаємо, що час



верифікації має бути меншим, ніж період протягом якого у розглянутій країні зобов'язуються змінити емісії.

2. Проведено аналіз невизначеностей потоків вуглекислого газу наземних екосистем для 1988-1992рр. із застосуванням опублікованих результатів додаткових досліджень, проведених після 2000р. Зокрема, використано результати моделювання чистої первинної продукції 17 глобальними моделями та спеціальною моделлю лісових екосистем; доповнено базу даних вимірювань повного дихання ґрунтів та автотрофного дихання ґрунтів; у результаті аналізу методів вимірювання дихання ґрунтів визначено та усунуено систематичні похибки вимірювань; розроблено метод аналізу складових потоків дихання ґрунтів для великих територій з використанням матриці «біокліматична зона – відділ ґрунту – рослинність», що дає можливість систематизувати спорадичні вимірювання, обчислити потоки, кореляцію обчислених значень та оцінити невизначеності; з використанням отриманих результатів оновлено баланс атмосферного CO<sub>2</sub> для Північної Азії у звіті IPCC (оновлене значення "знизу вгору" становить -850 ТгС/рік, проти попереднього значення -360 ТгС/рік та відповідний інтервал невизначеності [-1700 - 0] проти [-730-0] ТгС/рік), що дасть можливість використовувати у обчисленнях «згори-вниз» більш достовірний інтервал невизначеності.
3. Із застосуванням методу реальних опціонів розроблено математичну модель прийняття рішень про будівництво вугільної електростанції та модуля вловлювання та зберігання вуглекислого газу (CCS) в умовах невизначеності щодо цін на електроенергію (ринкова невизначеність) та на емісії вуглекислого газу (ринкова та політична невизначеності). Показано, що політична невизначеність (наприклад, нечітка позиція країни на міжнародних переговорах по скороченню емісій парникових газів), відтерміновує прийняття рішення про будівництво модуля CSS до дати заключення міжнародної угоди.
4. Із використанням розробленої математичної моделі G4M та схем моделювання (зв'язку моделі G4M з іншими моделями та наборами вхідних даних), отриманих кривих граничних витрат на зменшення емісій

вуглекислого газу від знеліснення, заліснення та лісокористування (розд. 3 та розд. 5) розроблено метод аналізу переваг вдосконалення системи моніторингу емісій вуглекислого газу для підвищення точності визначення емісій. Згідно результатів моделювання при зменшенні теперішньої невизначеності нетто емісій вуглекислого газу від знеліснення, 40-50%, до мінімум 30% при впровадженні вдосконаленої системи моніторингу, можна досягнути значного скорочення витрат на зменшення емісій від знеліснення, у порівнянні із витратами на вдосконалення системи моніторингу. Так, для Бразилії, щоб зменшити емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення на 40%, необхідна ціна емісій CO<sub>2</sub> від 5 до 9.8 \$/тCO<sub>2</sub>, що призведе до зменшення емісій на 7.9-9.3 ГтCO<sub>2</sub> у 2026-2050 рр., а загальні витрати складуть 39.5-91.1 мільярди доларів. У той же час, щоб зменшити емісії на 30%, необхідна ціна CO<sub>2</sub> від 3.7 до 9.1 \$/тCO<sub>2</sub>, що призведе до зменшення емісій на 5.92-6.98 ГтCO<sub>2</sub> у 2026-2050 рр., загальні витрати складуть 21.9-63.5 мільярди доларів, економія становитиме 17.6-27.8 мільярдів доларів. Враховуючи 5 розглянутих країн, у яких відбувається найбільше знеліснення, економія коштів за період 2026-2050 рр. становитиме 49-70 мільярдів доларів, що значно перевищує витрати на оновлення системи моніторингу біомаси та площі лісів.

## Висновки

У дисертаційній роботі розв'язано комплекс задач, які у сукупності вирішили науково-прикладну проблему математичного моделювання процесів емісії та стоку CO<sub>2</sub> у лісовому господарстві та при змінах землекористування, що дало можливість підвищити ефективність прийняття природоохоронних управлінських рішень щодо пом'якшення зміни клімату на глобальному, регіональному та національному рівнях. За результатами дисертаційної роботи можна зробити такі висновки:

1. Розроблено метод моделювання вуглецевого балансу лісової екосистеми, який поєднує процеси кругообігу вуглецю та таксаційні параметри деревостану. Він включає удосконалену структуру математичної моделі вуглецевого балансу лісової екосистеми з врахуванням наявних даних про лісові екосистеми в Україні, доповнену математичною моделлю фенологічних процесів у букових та дубових лісах, які базуються на даних спостережень та враховують часовий зсув цих процесів при зміні клімату. Завдяки такому поєднанню можливо врахувати вікову динаміку деревостану при моделюванні його вуглецевого балансу. Запропонований метод використано при розробці математичних моделей вуглецевого балансу букових, дубових та ялинових лісів, які застосовано для аналізу динаміки запасів вуглецю у компонентах лісової екосистеми при залісненні.
2. Розроблено метод геопросторового моделювання процесів лісокористування та зміни типів землекористування на глобальному рівні, який, на відміну від відомих, враховує взаємний вплив цих процесів, а також процесів торгівлі та переміщення заготовленої деревини, процесів заліснення та знеліснення, що дає можливість сумісно аналізувати і прогнозувати ці процеси у залежності від економічної ситуації та встановлених обмежень на емісію парникових газів.
3. Розроблено метод моделювання процесу просторового поширення знеліснення для глобальної геопросторової моделі G4M шляхом врахування інтенсивності знеліснення в даній клітинці растру на попередньому кроці моделювання та мінімальної площі лісу у сусідніх клітинках, а також

транспортної мережі, що дає можливість точніше відтворити просторову структуру знеліснення.

4. Розроблено метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини та зменшення емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування при збереженні заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни чи регіону, для геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування (моделі G4M), який ґрунтується на принципі максимізації чистої приведеної вартості, поєднанні інформації про заготівлю деревини на різних геопросторових рівнях (регіони, країни та окремі клітинки растру) та дає можливість проводити імітаційне моделювання процесів лісозаготівлі та впровадження природоохоронних стратегій.
5. З використанням зазначеного у пунктах 2-4 розроблено глобальну геопросторову математичну модель процесів заліснення, знеліснення, заготівлі деревини та відповідних емісій CO<sub>2</sub> (модель G4M). У моделі процеси прийняття рішень щодо зміни землекористування та параметрів лісокористування розглядаються з точки зору власників ділянок землі, які знаходяться у клітинках растру 0.5x0.5 градуса. Також розроблено версію моделі G4M для території Європейського Союзу, у якій додатково використано наявні геопросторові дані, що дало можливість вдосконалити метод моделювання процесу прийняття рішень щодо заготівлі заданої кількості деревини на рівні країни та метод калібрування емісій CO<sub>2</sub> з біомаси лісів. Запропоновано параметри та дані, які необхідні для адаптації геопросторової моделі процесів лісокористування та зміни землекористування для України.
6. Розроблено метод ідентифікації параметрів моделі G4M, які відповідають за моделювання процесів зміни землекористування, за даними ФАО та звітів країн до РКЗК ООН на національному рівні, що дало можливість відтворити історичні емісії CO<sub>2</sub> країн у секторі лісового господарства та зміни землекористування та прогнозувати емісії за різних сценаріїв соціально-економічного розвитку та податку на емісії парникових газів.

7. У результаті аналізу неточностей вхідних даних розробленої моделі G4M виявлено, що дані характеризуються досить високою невизначеністю, особливо на рівні клітинок растру. У результаті аналізу чутливості моделі G4M до зміни окремих параметрів виявлено, що результати моделювання швидкості заліснення та знеліснення без впливу податку на вуглець найбільш чутливі до зміни валового внутрішнього продукту, коефіцієнта перерахунку вуглецю у об'єм деревини (комбінація щільності деревини та вмісту вуглецю у деревині), приросту деревини (залежить від чистої первинної продукції), щільності розміщення населення, ціни на деревину, придатності землі для ведення сільського господарства та вартості заліснення. Реакція емісій CO<sub>2</sub> на зміну ціни на сільськогосподарську землю дуже висока при ціні CO<sub>2</sub> 3-10 \$/тCO<sub>2</sub>, причому симетрична на негативні та позитивні відхилення параметра.
8. При порівнянні результатів моделювання G4M з статистичними даними та результатами інших моделей показано, що у середньому за 1999-2015рр. середньоквадратичне відхилення змодельованих значень заготівлі деревини склало 0.5% для ЄС; для більшості країн відхилення становить біля 1%, але для кількох країн більше 7%. В загальному, для ЄС середньоквадратичне відхилення змодельованих значень емісій CO<sub>2</sub> з біомаси від лісокористування від значень РКЗК ООН становить 17%, а для окремих країн відхилення складає 30-90%. Порівняння результатів моделей показує, що результати G4M є раціональними, а різниця у результатах моделей пояснюється відмінностями у підходах до моделювання відповідних процесів і вхідних даних, а також те, що якість вхідних даних може бути такою ж важливою при створенні кривих граничних витрат на зменшення емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення, як і застосування декількох різних моделей для побудови кривих граничних витрат.
9. Розроблена математична модель G4M призначена для розв'язування широкого класу задач, пов'язаних із прогнозуванням динаміки площі лісу (через процеси заліснення та знеліснення), біомаси лісу, заготівлі деревини та емісій CO<sub>2</sub>, спричинених цими процесами, а також відгуку на заходи по

зменшенню емісій CO<sub>2</sub>. Властивості моделі дають можливість використовувати результати моделювання для підтримки прийняття рішень щодо проблеми зменшення емісій CO<sub>2</sub>.

10. Розроблено схеми взаємозв'язку моделі G4M з економічною моделлю біоресурсів GLOBIOM для врахування ефектів торгівлі товарами та потреби у сільськогосподарській землі; моделями енергетичної системи MESSAGE, макроекономіки MACRO, кліматичної системи MAGICC та ін. для формування комплексів моделей інтегральної оцінки. Із використанням розроблених схем взаємозв'язку моделей проведено обчислення референтних рівнів емісій парникових газів для 14 країн-членів ЄС, які подані цими країнами до РКЗК ООН; розроблено прогноз базових емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування, заліснення та знеліснення, а також потенціалу зменшення емісій на глобальному рівні та для окремих країн; проведено обчислення динаміки заліснення, знеліснення та лісокористування, а також відповідних емісій CO<sub>2</sub> для сценаріїв спільних соціально-економічних шляхів та репрезентативних шляхів концентрацій парникових газів і радіаційного впливу на кліматичну систему (SSP/RCP); проведено аналіз синергії заходів по зменшенню емісій CO<sub>2</sub> від знеліснення та ризику зникнення видів тварин у країнах, що розвиваються; здійснено обчислення динаміки заліснення, знеліснення та лісокористування, а також відповідних емісій CO<sub>2</sub> для країн ЄС.

## Список використаних джерел

1. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) on behalf of The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Hayama, Japan (2006)
2. Ahn, S., Plantinga, A.J., Alig, R.J.: Predicting Future Forestland Area: A Comparison of Econometric Approaches. *Forest Science*. **46**(3), 363-376 (2000)
3. Alexandrov, G.A., Yamagata, Y., Oikawa, T.: Towards a Model for Projecting Net Ecosystem Production of the World Forests. *Ecological Modelling*. **123**, 183-191 (1999). [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00128-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00128-3)
4. Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., Klimont, Z., Nguyen, B., Posch, M., Rafaj, P., Sandler, R., Schöpp, W., Wagner, F., Winiwarter, W.: Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications. *Environmental Modelling & Software*. **26**, 1489-1501 (2011)
5. Angelsen, A., Gierløff, C.W., Beltrán, A.M., den Elzen, M.: REDD credits in a global carbon market: Options and impacts. Nordic Council of Ministers. Copenhagen: Nordisk Ministerråd, 102 p. (2014)
6. Angelsen, A., Kaimowitz, D.: Rethinking the Causes of Deforestation: Lessons from Economic Models. *The World Bank Research Observer*. **14** (1), 73-98 (1999)
7. Anger, N. Sathaye, J.: Reducing Deforestation and Trading Emissions: Economic Implications for the post-Kyoto Carbon Market. *ZEW - Centre for European Economic Research Discussion Paper No. 08-016*. (2008). <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1114044>
8. Arney, J.D.: Biometric Methods for Forest Inventory, Forest Growth and Forest Planning: The Forester's Guidebook. Forest Biometrics Research Institute, Portland, Oregon, USA (2015)
9. Australia's country report for the FAO Global Forest Resources Assessment 2015, submitted in 2014 <http://www.fao.org/3/a-az156e.pdf>
10. Australia's National Greenhouse Accounts Inventory Report 2011. Australian Government Department of Climate Change and Energy Efficiency, Australia (2013)
11. Australia's National Greenhouse Accounts Inventory Report 2013. Australian Government Department of Climate Change and Energy Efficiency, Australia (2015)

12. Baccini, A., Goetz, S.J., Walker, W.S., Laporte, N.T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P.S.A., Dubayah, R., Friedl, M.A., Samanta, S., Houghton, R.A.: Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*. **2**(12), 182–185 (2012)
13. Beach, R., Zhang, Y., McCarl, B.A.: Modeling bioenergy, land use, and GHG emissions with FASOMGHG: Model overview and analysis of storage cost implications. *Climate Change Economics*. **03**(03), 1250012 (2012). DOI: 10.1142/S2010007812500121
14. Benítez, P., McCallum, I., Obersteiner, M., Yamagata, Y.: Global Supply for Carbon Sequestration: Identifying Least-Cost Afforestation Sites Under Country Risk Consideration. Technical report, International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg, Austria (2004)
15. Benitez, P.C., Obersteiner, M.: Site identification for carbon sequestration in Latin America: A grid-based economic approach. *Forest Policy and Economics*. **8**, 636–651 (2006)
16. Bonan, G.B., Levis, S., Sitch, S., Vertenstein, M., Oleson, K.W.: A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics. *Global Change Biology*. **9**, 1543–1566 (2003)
17. Bond-Lamberty, B., Wang, Ch., Gower, S.: The contribution of root respiration to soil surface CO<sub>2</sub> flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree Physiology*. **24**(12), 1387–1395 (2004)
18. Bosello, F., Parrado, R., Rosa, R., Eboli, F.: REDD in the Carbon Market: A general equilibrium analysis. *Environmental Modeling & Assessment* **20**(2), 103-115 (2015). doi:10.1007/s10666-014-9419-1
19. Bosetti, V., Lubowski, R., Golub, A., Markandya, A.: Linking Reduced Deforestation and a Global Carbon Market: Implications for Clean Energy Technology and Policy Flexibility. *Environment and Development Economics*. **16**(4), 479-505 (2011)
20. Böttcher, H., Gusti, M., Mosnier, A., Havlik, P.: Global forestry emissions projections and abatement costs. Final Report submitted to The Secretary of State of Energy and Climate Change, London, UK, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 30p. (2011)
21. Böttcher, H., Verkerk, P.J., Gusti, M., Havlik, P., Schneider, U.: Analysis of potential and costs of LULUCF use by EU Member States. Final Report submitted



- to the European Commission - DG Climate Action. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 56p. (2011)
22. Böttcher, H., Aoki, K., De Cara, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Schneider, U., Obersteiner, M.: GAINS. GHG Mitigation Potentials and Costs from Land-Use, Land-Use Change and Forestry in Annex-I Countries: Methodology. Report. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 39 pp. (2008)
  23. Böttcher, H., Gusti, M., Mosnier, A., Havlik, P., Obersteiner, M.: Global forestry emission projections and abatement costs. In: Geophysical Research Abstracts, vol.14 EGU2012-7062 (2012)
  24. Böttcher, H., Verkerk, P.J., Gusti, M., Havlik, P., Grassi, G.: Projection of the future EU forest CO<sub>2</sub> sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models. *GCB Bioenergy*. **4**, 773–783 (2012)
  25. Britz, W., van Ittersum, M., Lansink, A.O., Heckeley, T.: Tools for Integrated Assessment in Agriculture. State of the Art and Challenges. *Bio-based and Applied Economics*. **1**(2), 125-150 (2012)
  26. Britz, W., Witzke, P. (Eds.): CAPRI model documentation. Common Agricultural Policy Regionalised Impact Modelling System, 277p. (2014). [http://www.capri-model.org/docs/capri\\_documentation.pdf](http://www.capri-model.org/docs/capri_documentation.pdf)
  27. Brus, D.J., Hengeveld, G.M., Walvoort, D.J.J., Goedhart, P.W., Heidema, A.H., Nabuurs, G.J. et al.: Statistical mapping of tree species over Europe. *European Journal of Forest Research*. **131**(1), 145-157 (2012)
  28. Bugmann, H.: A Review of Forest Gap Models. *Climatic Change*. **51**(3-4), 259–305 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1012525626267>
  29. Bun, A., Gusti, M., Hamal, Kh., Bun, R.: Analysis and minimization of uncertainty of results of multilevel greenhouse gases inventory. In: Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems “ENVIROMIS’2006”. Tomsk, Russia, p. 45 (2006)
  30. Bun, R., Gusti, M., Bun, A., Hamal, K.: Multilevel model for greenhouse gas inventory and uncertainty analysis concerning the Kyoto Protocol implementation. In: Proc. of the Intern. Conf. on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006). Yamaguchi, Japan, 118-119 (2006)
  31. Bun, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Greenhouse gas inventory on the base of multilevel model. In: Filho, L.W., Gomez, J.M., Rautenstrauch, C. (Eds.) Second

- International ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering. Proceedings. Shaker Verlag, Aachen, Germany, 294-308 (2005)
32. Bun, R., Hamal, K., Gusti, M., Bun, A., Savchyn, O.: Spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: Gómez, J.M., Sonnenschein, M., Müller, M., Welsch, H., Rautenstrauch, C. (Eds) Information Technologies in Environmental Engineering. Book Series “Environmental Science and Engineering”, ITEE 2007, Third International ICSC Symposium (2007). <http://www.springerlink.com/content/j183524664262371/>
  33. Bun, R., Gusti, M., Dachuk, V., Oleksiv, B., Tsybrivskyy, Ya.: Geoinformation system for greenhouse gas inventories as a practical tool for decision-makers. In: The Information Society and Enlargement of the European Union: 17th International Conference “Informatics for Environmental Protection”, Cottbus, Germany, Part 2, 765-772 (2003)
  34. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L., Tokar, O., Tsybrivskyy, Y., Bun, A.: Spatial GHG inventory: analysis of uncertainty sources. A case study for Ukraine. In: Lieberman, D., Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S. (Eds.) Accounting for Climate Change: Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories – Verification, Compliance, and Trading, pp. 63-74. Springer, The Netherlands (2007). doi:10.1007/978-1-4020-5930-8\_6
  35. Buń, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Technologie informacyjne inwentaryzacji gazów cieplarnianych z wykorzystaniem georozproszonych baz danych. In: Nowe technologie w komputerowych systemach zarządzania, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, pp. 37-43 (2005)
  36. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: quality control and specific characters of inventory sectors. Information and Telecommunication Systems, Bielsko-Biala: Polish Information Processing Society. **4**, 73-82 (2004)
  37. Bun, R., Gusti, M.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: multilevel models. Information and Telecommunication Systems, Bielsko-Biala: Polish Information Processing Society. **1**, 61-67 (2004)
  38. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Spatial GHG inventory at the regional level: accounting for uncertainty. In: Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S., Whiter, T. (eds.) Greenhouse Gas Inventories: Dealing With Uncertainty, pp.227-244. Springer, Dordrecht (2011). doi:10.1007/978-94-007-1670-4\_13

36. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Geoinformation technology and greenhouse gas spatial inventory: An analysis of structural changes in energy sector. In: *Zeszyty Naukowe: Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Przemysłu. Sesja Naukowa "Środowisko i Technologie Informatyczne a Zdrowie Człowieka"*, vol.1, 14-34 (2007)
37. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Savchyn, O.: Information technology for spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: *Wieczorek, T. (ed.) Internet in the information society: Application of the information technologies*, pp. 154-163. WSB, Dabrowa Gornicza (2007)
38. Burniaux, J.-M., Lee, H.-L.: Modelling Land Use Changes in GTAP. In: *Proceedings of the 6th Annual Conference on Global Economic Analysis, The Hague, The Netherlands, 12-14 June 2003*
39. Busch, J., Ferretti-Gallon, K., Engelmann, J., Wright, M., Austin, K.G., Stolle, F., Turubanova, S., Potapov P.V., Margono, B., Hansen, M.C., Baccini, A.: Reductions in emissions from deforestation from Indonesia's moratorium on new oil palm, timber, and logging concessions. *PNAS*. **112**(5), 1328-1333 (2015)
40. Busch, J., Ferretti-Gallon, K.: What Drives Deforestation and What Stops It? A Meta-Analysis. *Review of Environmental Economics and Policy*. **11** (1), 3-23 (2017)
41. Busch, J., Lubowski, R., Godoy, F., et al.: Structuring economic incentives to reduce emissions from deforestation within Indonesia. *PNAS*. **109**(4), 1062-1067 (2012)
45. Butchart, S.H.M., Stattersfield, A.J., Bennun, L.A., Shutes, S.M., Akçakaya, H.R., Baillie, J.E.M., et al.: Measuring Global Trends in the Status of Biodiversity: Red List Indices for Birds. *PLoS Biology*. **2**(12), e383 (2004). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0020383>
46. Cai, R., Lubowski, R., Reis, T., Stabile, M C.C., Azevedo, A.: Modeling the Opportunity Costs of Reducing Legal Deforestation and the Implications for Forest Policy in Mato Grosso, Brazil. Selected Paper prepared for presentation at the 2016 Agricultural & Applied Economics Association Annual Meeting, Boston, Massachusetts, July 31, 2016
47. Camara, G., Soterroni, A., Ramos, F., Carvalho, A., Andrade, P., Souza, R.S., Mosnier, A., Mant, R., Buurman, M., Pena, M., Havlik, Petr, Pirker, J., Kraxner, F., Obersteiner, M., Kapos, V., Affonso, A., Espindola, G. and Bocqueho, G.:

- Modelling Land Use Change in Brazil: 2000-2050 (Dataset) (2016). DOI:10.22022/REDD/09-2016.13782.
48. Campbell, A., Kapos, V., Lysenko, I., Scharlemann, J., Dickson, B., Gibbs, H., Hansen, M., Miles, L., et al.: Carbon emissions from forest loss in protected areas. UNEP-WCMC, Cambridge, UK (2008)
  49. Canada's country report for the FAO Global Forest Resources Assessment 2015, submitted in 2014. <http://www.fao.org/3/a-az181e.pdf>
  50. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Papadopoulos, D., Siskos, P., Apostolaki, E., Zampara, M., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Kouvaritakis, N., Hoeglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Bottcher, H., Frank, S., Havlik, P., Gusti, M., Witzke, H.P.: EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050 - Reference scenario 2013. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 173 p. (2014)
  51. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Siskos, P., Kannavou, M., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S., Zampara, M., Papadopoulos, D., Nakos, Ch., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Tsani, S., Karkatsoulis, P., Fragkos, P., Kouvaritakis, N., Höglund Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Gomez Sanabria, A., Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M., Witzke, H.P., Kesting, M.: EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. European Commission Directorate - General for Energy, Directorate - General for Climate Action and Directorate - General for Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 223 p. (2016)
  52. Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University, and Information Technology Outreach Services - ITOS - University of Georgia: Global Roads Open Access Data Set, Version 1 (gROADSv1). NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Palisades, NY (2013). <http://dx.doi.org/10.7927/H4VD6WCT>.
  53. Center for International Earth Science Information Network, Columbia University; and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT): Gridded Population of the World Version 3 (GPWv3): Population Density Grids. Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University, Palisades, NY (2005). <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw>
  54. Chomitz, K.M., Gray, D.A.: Roads, Land Use, and Deforestation: A Spatial Model Applied to Belize. *World Bank Economic Review*. **10**(3), 487-512 (1996)

55. Ciais, P., Rayner, P., Chevallier, F., Bousquet P., Logan M., Peylin P., Ramonet M.: Atmospheric inversions for estimating CO<sub>2</sub> fluxes: methods and perspectives. *Climatic Change*. **103**, 69–92 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9909-3>
56. Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao, S., Thornton, P.: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2013)
57. *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA (2001). <http://www.ipcc.ch/pub/syngeng.htm>
58. CMEGGE: *Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements*. The National Academies Press, Washington, DC (2010)
59. Coren, M., Streck, C., Myers Madeira, E.: Estimated supply of RED credits 2011–2035. *Climate Policy*. **11**(6), 1272-1288 (2011). DOI:10.1080/14693062.2011.579318
60. Cramer, W., Kicklighter, D.W., Bondeau, A., Moore III, B., Churkina, G., Nemry, B., Ruimy, A., Schloss, A.L., and the participants of the Potsdam NPP Model Intercomparison: Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results. *Global Change Biology* **5**(S1), 1–15 (1999)
61. Criqui, P., Mima, S., Menanteau, P., Kitous, A.: Mitigation strategies and energy technology learning: An assessment with the POLES model. *Technological Forecasting and Social Change*. **90**(A), 119-136 (2015)
62. Czimczik, C.I., Mund, M., Schulze, E.D., Wirth, C.: Effects of reforestation, deforestation, and afforestation on carbon storage in soils. In: Griffith H (Eds.) *The Carbon Balance of Forest Biomes*, [ECO142/026], pp. 319-330. Taylor and Francis, Milton Park (2005)

63. Deforestation estimates in the Brazilian Amazon. INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), Sao Jose dos Campos (2003) <http://www.obt.inpe.br/prodes/>
64. Dellink, R., Chateau, J., Lanzi, E., Magné, B.: Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*. **42**, 200-214 (2017).
65. Den Elzen, M., Fekete H., Admiraal, A., Forsell, N., Höhne, N., Korosuo, A., Roelfsema, M., van Soest, H., Wouters, K., Day, Th., Hagemann, M., Hof, A., Mosnier A.; Contributing authors: Havlik, P., Gusti, M., Obersteiner, M., Wong, L.: Enhanced policy scenarios for major emitting countries. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 134 pp. (2015). [http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-enhanced-policy-scenarios-for-major-emitting-countries\\_1631.pdf](http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-enhanced-policy-scenarios-for-major-emitting-countries_1631.pdf)
66. Den Elzen, M., Mendoza Beltran, A., Piris-Cabezas, P., van Vuuren, D.P.: Analysing the international carbon market and abatement costs by 2020 for low concentration targets: policy choices and uncertainties. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), report 500102031, Bilthoven, the Netherlands (2009). <http://www.pbl.nl/en/publications/2009/Balancing-the-carbon-market-Analysing-the-international-carbon-market-and-abatement-costs>
67. Denman, K., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P., Dickinson, R., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da Silva Dias, P., Wofsy, S., Zhang, X.: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Avery, K., Tignor, M., Miller, H. (Eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 499–58. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007). <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.
68. Deveney, A., Nackoney, J., Purvis, N., Gusti, M., Kopp, R., Myers, E., Stevenson, A., Kindermann, G., Macauley, M., Obersteiner, M.: Forest carbon index: The geography of forests in climate solutions. Joint report by Resources for the Future and Climate Advisers. Washington, DC, USA, 80 pp. (2009). <http://www.bluepointmaps.com/staging/fci3/index.html>

69. Di Fulvio, F., Forsell, N., Lindroos, O., Korosuo, A., Gusti, M.: Spatially explicit assessment of roundwood and logging residues availability and costs for the EU28. *Scandinavian Journal of Forest Research*. **31**(7), 691-707 (2016). doi: 10.1080/02827581.2016.1221128
70. Edwards, N.T., Shugart, H.H., McLaughlin, Jr.S.B., Harris, W.F., Reichle, D.E.: Carbon metabolism in terrestrial ecosystems. In: Reichle, D.E. (Ed) *Dynamic Properties of Forest Ecosystems*, pp. 499–536. Cambridge University Press, Cambridge (1980)
71. Eggleton, T.: *A short introduction to climate change*. Cambridge University Press, New York (2013)
72. Ekins, P., Kesicki, F., Smith, A.Z.P.: *Marginal Abatement Cost Curves: A call for caution. A report from the UCL Energy Institute to, and commissioned by, Greenpeace UK, April 2011* (2011)
73. Eliasch, J.: *Climate change: financing global forests: the Eliasch review*. Earthscan, London, Sterling, VA (2008)
74. Esser, G.: Osnabrück Biosphere Model: Structure, construction, results. In: Esser, G., Overdieck, D. (Eds) *Modern Ecology: Basic and Applied Aspects*, pp. 679-709. Elsevier Science, Amsterdam (1991)
75. EUCLIMIT Project. <http://www.euclimit.eu/Models.aspx>. Accessed 27 April 2017
76. Fang, J., Chen, A., Peng, C., Zhao, S., Ci, L.: Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*. **292**, 2320–2322 (2001)
77. Federici, S., Tubiello, F., Salvatore, M., Jacobs, H., Schmidhuber, J.: New estimates of CO<sub>2</sub> forest emissions and removals: 1990–2015. *Forest Ecology and Management*. **352**, 89–98 (2015)
78. Fischer, R., Bohn, F., de Paula, M.D., Dislich, C., Groeneveld, J., Gutiérrez, A.G., Kazmierczak, M., Knapp, N., Lehmann, S., Paulick, S., Pütz, S., Rödiger, E., Taubert, F., Köhler, P., Huth, A.: Lessons learned from applying a forest gap model to understand ecosystem and carbon dynamics of complex tropical forests. *Ecological Modelling*. **326**, 124-133 (2016).
79. Forest Europe, 2015: *State of Europe's Forests 2015*. Madrid, Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe: 314 (2015)
80. Forest management reference levels: Submissions 2011. UNFCCC. <http://unfccc.int/bodies/awg-kp/items/5896.php>. Accessed 10 November 2017

81. Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand: Main Report 2000. UN-ECE/FAO Contribution to the Global Forest Resources Assessment 2000. United Nations Publication (2000)
82. Forsell, N., Gusti, M., Havlík, P., Kindermann, G., Korosuo, A., Kraxner, F., Obersteiner, M.: Update of Global Forestry Emissions Projections and Abatement Costs. Final Report submitted to the Ministry of Climate and Energy, Danish Energy Agency. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg (2014)
83. Forsell, N., Havlík, P., Korosuo, A., Kraxner, F., Frank, S., Valin, H., Gusti, M., Zhang, W., Nordin, A., Lundmark, T., Obersteiner, M.: Global harvesting of wood under different socio-economic and climate mitigation scenarios. In: Towards a New Era of Forest Science in the Boreal Region. Abstracts of the 17th IBFRA Conference, Rovaniemi, Finland. p. 79 (2015)
84. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy. Task 3: Modelling of impacts of an increased EU bioenergy demand on biomass production, use and prices. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 109 pp. (2016)
85. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M., Böttcher, H., Hennenberg, K., Hüneck, K., Wiegmann, K., Pekkanen, M., Nuolivirta, P., Bowyer, C., Nanni, S., Allen, B., Poláková, J., Fitzgerald, J., Lindner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio). Final report. Project: ENV.F.1/ETU/2013/0033. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 43 pp. (2016)
86. Forsell, N., Korosuo, A., Lauri, P., Gusti, M., Havlik, P., Böttcher, H., Hennenberg, K.: Follow-up study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio follow-up). Publications Office of the European Union, Luxembourg, 68 pp. (2016)
87. Forsell, N., Turkovska, O., Gusti, M., den Elzen, M., Obersteiner, M., Havlik, P.: Assessing the INDCs' land use, land use change, and forest emission projections. *Carbon Balance and Management*. **11**(26), 1-17 (2016). doi:10.1186/s13021-016-0068-3
88. Frank, S., Böttcher, H., Gusti, M., Havlík, P., Klaassen, G., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Dynamics of the land use, land use change, and forestry sink in



- the European Union: the impacts of energy and climate targets for 2030. *Climatic Change*. **138**, 253–266 (2016). doi:10.1007/s10584-016-1729-7
89. Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlík, P.: Methodology for estimation and modelling of EU LULUCF greenhouse gas emissions and removals until 2050 in GLOBIOM and G4M. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, 29 pp. (2016). [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models/docs/lulucf\\_methodology\\_report\\_may2016\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models/docs/lulucf_methodology_report_may2016_en.pdf)
  90. Frank, S., Havlík, P., Soussana, J.F., Levesque, A., Valin, H., Wollenberg, E., Kleinwechter, U., Fricko, O., Gusti, M., Herrero, M., Smith, P.: Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? In: EGU General Assembly Conference: Abstracts, vol. 19, p. 15384 (2015)
  91. Frank, S., Havlík, P., Soussana, J.F., Levesque, A., Valin, H., Wollenberg, E., Kleinwechter, U., Fricko, O., Gusti, M., Herrero, M., Smith, P., Hasegawa, T., Kraxner, F., Obersteiner, M.: Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? *Environmental Research Letters*. **12**, 105004 (2017)
  92. French, N.H.F., Goovaerts, P., Kasischke, E.S.: Uncertainty in estimating carbon emissions from boreal forest fires. *J. Geophys. Res.* **109**, D14S08 (2004). doi:10.1029/2003JD003635.
  93. Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schöpp, W., Riahi, K.: The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*. **42**, 251–267 (2017)
  94. Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., et al.: SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*. **42**, 268-283 (2017)
  95. Fuss, S., Gusti, M., Broquet, G., Ciais, P., Tavoni, M., MacCallum, I.: Assessing the benefit of carbon monitoring systems for REDD+ in Pan-Tropical regions. In: XIV World Forestry Congress, Durban, South Africa, pp. 7-11 (2015)
  96. Fuss, S., Gusti, M., Kraxner, F., Aoki, K., Szolgayova, J.: Boreal forests as a carbon sink: A real options perspective. In: *Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action*. Proceedings of the international conference IBFRA, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia, pp. 382-386 (2011)

97. Fuss, S., Szolgayova, J., Obersteiner, M., Gusti, M.: Investment under market and climate policy uncertainty. *Applied Energy*. **85**, 708-721 (2008). doi:10.1016/j.apenergy.2008.01.005
98. Gallaun, H., Zanchi, G., Nabuurs, G J., Hengeveld, G., Schardt M., Verkerk, P.J.: EU-wide maps of growing stock and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements. *Forest Ecology and Management*. **260**(3), 252-261 (2010)
99. Gao, S., Zhou, T., Zhao, X., Wu, D., Li, Z., Wu, H., Du, L., Luo, H.: Age and climate contribution to observed forest carbon sinks in East Asia. *Environmental Research Letters*. **11**(3), 034021 (2016). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034021>
100. GGI Scenario Database, 2007. International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Laxenburg (2007). <http://www.iiasa.ac.at/Research/GGI/DB/>. Accessed 27 April 2017
101. Gholz, H., Wedin, D., Smitherman, S. et al.: Long-term dynamics of pine and hardwood litter in contrasting environments: toward a global model of decomposition. *Global Change Biology*. **6**, 751-765 (2000)
102. Global Forest Resources Assessment 2000. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy (2001)
103. Global Forest Resources Assessment 2005. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome (2006)
104. Global Forest Resources Assessment 2005: Progress towards sustainable forest management. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 350p. (2006)
105. Global Forest Resources Assessment 2010. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome (2010)
106. Global Forest Resources Assessment 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy (2015)
107. Global Forest Resources Assessments. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/en>. Accessed 27 April 2017
108. Global Mitigation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases: 2010-2030. EPA-430-R-13-011. United States Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs (6207J), Washington, DC 20005, 410p. (2013). [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/mac\\_report\\_2013.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/mac_report_2013.pdf)

109. Golub, A., Hertel, T., Lee, H.-L., Rose, S., Sohngen, B.: The opportunity cost of land use and the global potential for greenhouse gas mitigation in agriculture and forestry. *Resource and Energy Economics*. **31**(4), 299-319 (2009)
110. Grainger A.: Difficulties in tracking the long-term global trend in tropical forest area. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A. (PNAS)*. **105**(2), 818-823 (2008). <http://www.pnas.org/content/105/2/818.full>.
111. Groen T., Verkerk, P., Böttcher, H. et al.: What causes differences between national estimates of forest management carbon emissions and removals compared to estimates of large-scale models? *Environmental Science & Policy*. **33**, 222-232 (2013)
112. Grübler, A., O'Neill, B., Riahi, K., Chirkov, V., Goujon, A., Kolp, P., Prommer, I., Scherbov, S., Slento, E.: Regional, national, and spatially explicit scenarios of demographic and economic change based on SRES. *Technological Forecasting and Social Change*. **74**(7), 980-1029 (2007)
113. Gurney, K.R., Law, R.M., Denning, A.S., Rayner, P.J., Baker, D., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y.-H., Ciais, P., Fan, S., Fung, I.Y., Gloor, M., Heimann, M., Higuchi, K., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Peylin, P., Prather, M., Pak, B.C., Randerson, J., Sarmiento, J., Taguchi, S., Takahashi, T., Yuen, C.-W.: Towards robust regional estimates of CO<sub>2</sub> sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*. **415**(6872), 626–630 (2002)
114. Gurney, K.R., Law, R.M., Denning, A.S., Rayner, P.J., Baker, D., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y.H., Ciais, P., Fan, S., Fung, I.Y., Gloor, M., Heimann, M., Higuchi, K., John, J., Kowalczyk, E., Maki, T., Maksyutov, S., Peylin, P., Prather, M., Pak, B.C., Sarmiento, J., Taguchi, S., Takahashi, T., Yuen, C.-W.: TransCom 3 CO<sub>2</sub> inversion intercomparison: 1. Annual mean control results and sensitivity to transport and prior flux information. *Tellus*. **55B**, 555–579 (2003)
115. Gusti M.: An algorithm for simulation of forest management decisions in the Global Forest Model. *Artificial Intelligence*. **4**, 45-49 (2010)
116. Gusti, M., Böttcher, H., Kindermann, G., Havlik, P., Obersteiner, M.: Simulation of REDD+ options using IIASA model framework. In: Seppelt, R., Voinov, A.A., Lange, S., Bankamp, D. (Eds.) *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software “Managing Resources of a Limited Planet”*, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany. (2012). <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>

117. Gusti, M., Böttcher, H., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Integrated assessment of global mitigation options in the forestry sector. In: Abstracts of the 8th International Carbon Dioxide Conference (ICDC-2009), Jena, Germany, 13-19 September 2009
118. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: Technical Description of the IIASA Model Cluster. The Eliasch Review; Office of Climate Change, UK, 12 pp. (2008) [http://www.occ.gov.uk/activities/eliasch/Gusti\\_IIASA\\_model\\_cluster.pdf](http://www.occ.gov.uk/activities/eliasch/Gusti_IIASA_model_cluster.pdf)
119. Gusti, M., Jeda, W.: Carbon Management: A New Dimension of Future Carbon Research. IIASA Interim Report IR-02-006. IIASA, Laxenburg, Austria (2002)
120. Gusti, M., Jonas, M.: How well do we know Russia's carbon budget for 1988-1992? Critical look from uncertainty study of IIASA's Full Carbon Account. In: Geophysical Research Abstracts, vol. 10, EGU2008-A-09464, (2008)
121. Gusti, M., Jonas, M.: IIASA's terrestrial full carbon account for Russia: Revised uncertainty estimates and its role in a bottom-up/top-down exercise. In: Proceedings: 2nd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories, IIASA, Laxenburg, Austria, 27-28 September 2007
122. Gusti, M., Khabarov, N., Forsell, N.: Sensitivity of marginal abatement cost curves to variation of G4M parameters. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Cracow, Poland, 163-169 (2015)
123. Gusti, M., Kindermann, G.: An approach to modeling land use change and forest management on a global scale. In: Proceedings, 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011), Noordwijkerhout, Netherlands, 180-185 (2011)
124. Gusti, M., Okhremchuk, I.: Accounting for social and sociopolitical factors in global integrated assessment models. В: Обчислювальні методи і системи перетворення інформації: збірник праць IV наук.-техн. конф., Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 133–137 (2016)
125. Gusti, M.: An algorithm for simulation of forest management response to carbon price incentive. In: Proceedings of the conference 'Modern Information Technologies in Economy, Management and Education', Lviv, 94-97 (2010)
126. Gusti, M.: An approach to simulation of deforestation in tropical forests. In: Proceedings of the conference 'Modern Information Technologies in Economy, Management and Education', Lviv, 81-85 (2011)

127. Gusti, M.: G4M Overview (global version). Research Gate (2015). doi: 10.13140/RG.2.1.4319.8804
128. Gusti, M.: Mathematical model for making decisions on land-use change. В: Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті: Всеукр. наук.-практ. конф.: зб. Матеріалів, Львів, 57-59 (2008)
129. Gusti, M.: Modelling the afforestation process and underlying uncertainties. In: Proceedings of the International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories: Verification, Compliance and Trading, Warsaw, Poland, 59-66 (2004)
130. Gusti, M.: Uncertainty of BAU emissions in LULUCF sector: Sensitivity analysis of the Global Forest Model. In: Proc. of the 3rd Intern. Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories, LPNU, Lviv, 73-80 (2010)
131. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: How much additional carbon can be stored in forests if economic measures are used and how much could it cost? Науковий вісник НУБіП України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. **135**, 244–253 (2009)
132. Gusti, M., Jonas, M.: Terrestrial full carbon account for Russia: revised uncertainty estimates and their role in a bottom-up/top-down accounting exercise. Climatic Change. **103**(1-2), 159-174 (2010). doi: 10.1007/s10584-010-9911-9
133. Gusti, M.: Modeling afforestation and the underlying uncertainties. Water, Air, & Soil Pollution: Focus. **7**(4-5), 475-482 (2007). doi:10.1007/s11267-006-9115-5
134. Hansen M., Stehman S., Potapov, P.: Quantification of global gross forest cover loss. Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A. (PNAS). **107**(19), 8650-8655 (2010). <http://www.pnas.org/content/107/19/8650.full>
135. Hansen, M., Potapov, P., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S., Goetz, S., Loveland, T., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C., Townshend, J.: High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science. **342**(6160), 850-853 (2013), DOI: 10.1126/science.1244693
136. Hanson, P., Edwards, N., Garten, C. et al.: Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. Biogeochemistry. **48**, 115–146 (2000)
137. Harris, N., Brown, S., Hagen, S., Saatchi, S., Petrova, S., Salas, W., Hansen, M., Potapov, P., Lotsch, A.: Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. Science. **336**, 1573-1576 (2012)

138. Havlik, P., Valin, H., Herrero, M., Obersteiner, M., Schmid, E., Rufino, M.C., Mosnier, A., Thornton, P.K., et al.: Climate change mitigation through livestock system transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **111**(10), 3709-3714 (2014). DOI:10.1073/pnas.1308044111.
139. Havlík, P., Valin, H., Jean P., Gusti, M., Schmid, E., Forsell, N., Herrero, M., Khabarov, N., Mosnier, A., Cantele, M., Obersteiner, M.: Climate change impacts and mitigation in the developing world: an integrated assessment of the agriculture and forestry sectors. Policy Research working paper; no. WPS 7477. Washington, D.C.: World Bank Group, 56 pp. (2015). <http://documents.worldbank.org/curated/en/2015/11/25250682/climate-change-impacts-mitigation-developing-world-integrated-assessment-agriculture-forestry-sectors>
140. Havlík, P., Valin, H., Mosnier, A., Forsell, N., Frank, S., Leclère, D., Palazzo, A., Ermolieva, T., Gusti, M., Balkovič, J., Skalský, R., Schmid, E., Herrero, M., Kraxner, F., Obersteiner, M.: Integrated multi-scale modeling framework for assessment of land-use related challenges under global change. In: Conference Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015”, IIASA, Laxenburg, Austria, p. 73 (2015)
141. Heal, O.W.: Decomposition and nutrient release in even-aged plantations. In: Ford, E.D., Malcolm, D.C., Atterson, J. (Eds.) *The ecology of even-aged forest plantations*. Cambridge, Institute of Terrestrial Ecology, pp. 257-291 (1979)
142. Helming, K.: Wind speed effects on rain erosivity. In: Stott, D., Mohtar, R., Steinhardt, G. (Eds) *Sustaining the Global Farm - Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting*, West Lafayette, IN, 1999. International Soil Conservation Organization in cooperation with the USDA and Purdue University, West Lafayette, IN, pp. 771-776 (2001)
143. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., Troxler, T.G (Eds): 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland (2014)
144. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., Troxler, T.G. (Eds): 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. IPCC, Switzerland (2014)
145. Hooijer, A., Page, S., Canadell, J.G., Silvius, M., Kwadijk, J., Wosten, H., Jauhiainen, J.: CO<sub>2</sub> emissions from drained peat in Southeast Asia. *Biogeosciences*. **7**, 1505–1514 (2010)

146. Hooijer, A., Page, S., Navratil, P., et al.: Carbon Emissions from Drained and Degraded Peatland in Indonesia and Emission Factors for Measurement, Reporting and Verification (MRV) of Peatland Greenhouse Gas Emissions: A summary of KFCP research results for practitioners. IAFCP, Jakarta, Indonesia, 53p. (2014)
147. Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, R.S., Brockhaus, M., Verchot L., Angelsen, A., Romijn E.: An Assessment of Deforestation and Forest Degradation Drivers in Developing Countries. *Environmental Research Letters*. **7**(4), 1–12 (2012)
148. House, J.I., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Houghton, R.A., Heiman, M.: Reducing apparent uncertainties in estimates of terrestrial CO<sub>2</sub> sources and sinks. *Tellus*. **55B**, 345–363 (2003)
149. Hughes, B.: Assessing the Credibility of Forecasts using International Futures (IFs): Verification and Validation. Working paper 2006.06.20. Pardee Center for International Futures, Josef Korbel School of International Studies, University of Denver, Denver, CO (2006)
150. Hutchinson, G.L., Rochette, P.: Non-flow-through steady-state chambers for measuring soil respiration: numerical evaluation of their performance. *Soil Science Society of America Journal*. **67**, 166–180 (2003)
151. ILUC Quantification Study of EU Biofuels. Meeting Notes. Ecofys, IIASA and E4tech. <http://www.globiom-iluc.eu/project-information/stakeholder-consultation/meeting-minutes/>. Accessed 27 April 2017
152. Indonesia Second National Communication Under The United Nations Framework Convention, Jakarta (2010)
153. Indonesia's greenhouse gas abatement cost curve. Dewan Nasional Perubahan Iklim, Indonesia (2010)
154. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2012. EPA 430-R-14-003, U.S. Environmental Protection Agency (2014)
155. IUCN Red List Categories & Criteria (version 3.1). IUCN, Gland, Switzerland (2001). <http://www.iucnredlist.org/technical-documents/categories-and-criteria/2001-categories-criteria>. Accessed October 19, 2017
156. Jaenicke, J., Rieley, J.O., Mott, C., et al.: Determination of the amount of carbon stored in Indonesian peatlands. *Geoderma*. **147**(3-4), 151-158 (2008)
157. Japan's country report for the FAO Global Forest Resources Assessment 2015, submitted in 2014 (2014) <http://www.fao.org/3/a-az247e.pdf>

158. Jensen, L.S., Mueller, T., Tata, K.R., Ross, D.J., Magid, J., Nielsen, N.E.: Soil surface CO<sub>2</sub> flux as an index of soil respiration in situ: A comparison of two chamber methods. *Soil Biology and Biochemistry*. **28**(10-11), 1297–1306 (1996)
159. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal detection techniques for consideration in the (Post-) Kyoto policy process. In: *Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 107-135 (2007)
160. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: *Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2002)*. International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-046, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)
161. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: *Preparatory Signal Detection for Annex I Countries under the Kyoto Protocol — A Lesson for the Post-Kyoto Policy Process*. International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-024, Laxenburg, Austria, 91 pp. (2004)
162. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: *Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2001)*. International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-029, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)
163. Jonas, M., Nilsson, S., Obersteiner, M., Gluck, M., Ermoliev, Y.: *Verification Times Underlying the Kyoto Protocol: Global Benchmark Calculations*. Interim Report IR-99-062. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (1999)
164. Jonas, M., Nilsson, S.: *Austrian Carbon Database (ACDb)*. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. (2002). <http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/acdb.html>
165. Jonas, M., Obersteiner, M., Nilsson, S.: *How to Go From Today's Kyoto Protocol to a Post-Kyoto Future that Adheres to the Principles of Full Carbon Accounting and Global-scale Verification? A Discussion Based on Greenhouse Gas Accounting, Uncertainty and Verification*. IIASA Interim Report IR-00-061. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (2000)



166. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal analysis techniques for consideration in the (post-)Kyoto policy process. *Climatic Change*. **103**(1-2), 175-213 (2010) doi:10.1007/s10584-010-9914-6
167. Kant, S., Redantz, A.: An econometric model of tropical deforestation. *Journal of Forest Economics*. **3**, 51-86 (1997)
168. Karjalainen, T., Liski, J.: Approaches for carbon budget analysis of the Siberian forests. IR-97-023, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (1997)
169. Kaufmann, D., Kraay, A., Mastruzzi, M.: Governance Matters IV: Governance Indicators for 1996-2004. World Bank Policy Research Working Paper Series No. 3630. World Bank (2005). <http://ssrn.com/abstract=718081>
170. KC, S., Lutz, W.: The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change*. **42**, 181-192 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.004>
171. Keller, K., Bolker, B.M., Bradford, D.F.: Uncertain climate thresholds and optimal economic growth. *Journal of Environmental Economics and Management*. **48**, 723–741 (2004)
172. Kesicki, F., Strachan, N.: Marginal abatement cost (MAC) curves: confronting theory and practice. *Environmental Science & policy*. **14** (8), 1195-1204 (2011)
173. Kesicki, F.: Marginal Abatement Cost Curves: Combining Energy System Modelling and Decomposition Analysis. *Environmental Modeling and Assessment*. **18**(1), 27-37 (2013). doi:10.1007/s10666-012-9330-6
174. Kim, H., Kim, Y.-H., Kim, R., Park, H.: Reviews of forest carbon dynamics models that use empirical yield curves: CBM-CFS3, CO2FIX, CASMOFOR, EFISCEN. *Forest Science and Technology*. **11**(4), 212-222 (2015). DOI: 10.1080/21580103.2014.987325
175. Kindermann, G., McCallum, I., Fritz, S., Obersteiner, M.: A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica*. **42**(3), 387-396 (2008)
176. Kindermann, G., Obersteiner, M., Rametsteiner, E., McCallum, I.: Predicting the Deforestation – Trend under Different Carbon–Prices. *Carbon Balance and Management*. **1**, 15 (2006). doi:10.1186/1750-0680-1-15

177. Kindermann, G., Obersteiner, M., Sohngen, B., Sathaye, J., Andrasko, K., Rametsteiner, E., Schlamadinger, B., Wunder, S., Beach, R.: Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation. *PNAS*. **105**(30), 10302–10307 (2008)
178. Kindermann, G.E., Schörghuber, S., Linkosalo, T., et al.: Potential stocks and increments of woody biomass in the European Union under different management and climate scenarios. *Carbon Balance and Management*. **8**, 2 (2013). doi:10.1186/1750-0680-8-2.
179. King, A.W., Emanuel, W.R., Wullschleger, S.D., Post, W.M.: In search of the missing carbon sink: A model of terrestrial biospheric response to land-use change and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Tellus*. **47B**, 501-519 (1995)
180. Kitous, A., Criqui, P., Bellevrat, E., Chateau, B.: Transformation Patterns of the Worldwide Energy System – Scenarios for the Century with the POLES Model. *The Energy Journal*. **31**(1), 49-82 (2010)
181. Kohlmaier, G.H., Badech, F.-W., Otto, R.D., et al.: The Frankfurt Biosphere Model: A global process-oriented model of seasonal and long-term CO<sub>2</sub> exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. II. Global results for potential vegetation in an assumed equilibrium state. *Climate Research*. **8**, 61-87 (1997)
182. Kraxner, F., Nordström, E.-M., Obersteiner, M., Havlík, P., Gusti, M., Kindermann, G., Fuss, S., Khabarov, N.: Global feedstock scenarios for bioenergy - Land-use change and trade-offs. In: Paper submitted to the International Energy Workshop - IEW 2012 (2012) <http://iew2012.ercblogs.co.za/wp-content/uploads/sites/7/2012/06/Kraxner.pdf>
183. Kraxner, F., Nordström, E.-M., Havlik, P., Gusti, M., Mosnier, A., Frank, S., Valin, H., Fritz, S., Fuss, S., Kindermann, G., McCallum, I., Khabarov, N., Bottcher, H., See, L., Aoki, K., Schmid, E., Mathe, L., Obersteiner, M.: Global bioenergy scenarios - future forest development, land-use implications, and trade-offs. *Biomass and Bioenergy*. **57**, 86-96 (2013). doi: 10.1016/j.biombioe.2013.02.003
184. Krey, V., Riahi, K., Johnson, N., Kolp, P., Lutz, W., KC, S., Crespo Cuaresma, J., Havlik, P., Böttcher, H., Gusti, M., Obersteiner, M.: The new scenarios process – the way toward more integrated assessment of climate change. In: *Worlds Within Reach: From Science To Policy - IIASA 40th Anniversary Conference*, Hofburg Congress Center, Vienna and IIASA, Laxenburg, Austria (2012) <http://pure.iiasa.ac.at/12238/1/krey1.pdf>

185. Kryazhimskiy, A., Rovenskay, E., Shvidenko, A., Gusti, M., Shchepashchenko, D., Veshchinskaya, V.: Towards harmonizing competing models: Russian forests' net primary production case study. *Technological Forecasting and Social Change*. **98**, 245–254 (2015). doi:10.1016/j.techfore.2015.06.003
186. Kurganova, I., Lopes de Gerenyu, V., Rozanova, L., Myakshina, T., Kudeyarov, V.: Effect of hydrothermal conditions on CO<sub>2</sub> emissions from soils of forest zone: Analysis of long-term field observations. In: Abstracts of the Second International Conference "Emissions and Sink of Greenhouse Gases on the Territory of Northern Eurasia Territory," pp.70–71 (2003)
187. Kurganova, I.: Carbon Dioxide Emission from Soils of Russian Terrestrial Ecosystems. Interim Report IR-02-070, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 64 pp. (2002). <http://www.iiasa.ac.at/Publications/Documents/IR-02-070.pdf>.
188. Kurz, W., Apps, M., Webb, T., McNamee, P.: The carbon budget of the Canadian forest sector: Phase I. Information Report NOR-X-326, Northern Forestry Centre, Northwest Region, Forestry Canada, 56 p. (1992)
189. Kurz, W., Dymond, C., White, T., Stinson, G., Shaw, C., Rampley, G., Smyth, C., Simpson, B., Neilson, E., Trofymow, J.: CBM-CFS3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*. **220**, 480–504 (2009)
190. Lakida, P., Nilsson, S., Shvidenko, A.: Estimation of forest phytomass for selected countries of the former European U.S.S.R. *Biomass and Bioenergy*. **11**(5), 371-382 (1996)
191. Lakida, P., Nilsson, S., Shvidenko, A.: Forest phytomass and carbon in European Russia. *Biomass and Bioenergy* **12**(2), 91-99 (1997)
192. Lauri, P., Havlik, P., Kindermann, G., Forsell, N., Bottcher, H., Obersteiner, M.: Woody biomass energy potential in 2050. *Energy Policy*. **66**, 19-31 (2014) DOI:10.1016/j.enpol.2013.11.033.
193. Le Quéré, C., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Sitch, S., Korsbakken, J.I., et al.: Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*. **8**, 605-649 (2016). <https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>
194. Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M.W.J. et al.: The BIOMASS mission: mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*. **115** (11), 2850-2860 (2011)

195. Leimbach, M., Kriegler, E., Roming, N., Schwanitz, J.: Future growth patterns of world regions – A GDP scenario approach. *Global Environmental Change*. **42**, 215-225 (2017)
196. Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H., Zhang, T.: Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Avery, K., Tignor, M., Miller, H. (Eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007)
197. Lesiv, M., Shvidenko, A., Schepaschenko, D., See, L., Fritz, S.: A spatial assessment of forest carbon budget for Ukraine. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* (2017, under review)
198. Letourneau, A., Verburg, P., Stehfest, E.: A land-use systems approach to represent land-use dynamics at continental and global scales. *Environmental Modelling & Software*. **33**, 61-79 (2012). doi: 10.1016/j.envsoft.2012.01.007.
199. Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Sievänen, R.: Carbon and decomposition model YASSO for forest soils. *Ecological Modelling*. **189**(1-2), 168-182 (2005)
200. Lopes de Gerenyu, V.O., Kurganova, I.N., Rozanova, L.N., Kudeyarov, V.N.: Effect of soil temperature and moisture on CO<sub>2</sub> evolution rate of cultivated Phaeozem: analysis of a long-term field experiment. *Plant Soil Environ*. **51**(5), 213–219 (2005)
201. Lubowski, R., Plantinga, A., Stavins, R.: Land-use change and carbon sinks: Econometric estimation of the carbon sequestration supply function. *Journal of Environmental Economics and Management*. **51**(2), 135-152 (2006)
202. Lüdeke, M., Badeck, F., Otto, R., et al.: The Frankfurt Biosphere Model: A global process-oriented model of seasonal and long-term CO<sub>2</sub> exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Model description and illustrative results for cold deciduous and boreal forests. *Climate Research*. **4**, 143-166 (1994)
203. Mahapatra, K., Kant, S.: Tropical deforestation: a multinomial logistic model and some country-specific policy prescriptions. *Forest Policy and Economics*. **7**, 1-24 (2005)
204. Mas, J., Puig, H., Palacio, J.J., Sosa-Lopez, A.: Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. *Environmental Modelling & Software*. **19**. 461-471 (2004). Doi: 10.1016/S1364-8152(03)00161-0.

205. Maser, O.R., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G.J., Pussinen, A., de Jong B.H.J., Mohren, G.M.J.: Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*. **164**, 177-199 (2003)
206. McKinsey&Company: Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve (2013). <http://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/pathways-to-a-low-carbon-economy>
207. Megevand, C., Mosnier, A., Hourticq, J., Sanders, K., Doetinchem, N., Streck C.: Deforestation Trends in the Congo Basin: Reconciling Economic Growth and Forest Protection. World Bank, Washington, DC (2013). doi: 10.1596/978-0-8213-9742-8
208. Meiyappan, P., Dalton, M., O'Neill, B., Jain, A.K.: Spatial modeling of agricultural land use change at global scale. *Ecological Modelling*. **291**, 152–174 (2014)
209. Mertens, B., Lambin, E.F.: Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon: Spatial disaggregation of diverse deforestation processes. *Applied Geography*. **17**(2), 143-162 (1997)
210. Michaelova, A., Jotzo, F.: Impacts of transaction costs and institutional rigidities on the share of the Clean Development Mechanism in the global greenhouse gas market. Paper für die Sitzung des Ausschusses Umweltökonomie im Verein für Socialpolitik, Rostock (2003)
211. Mitchard, E.T.A., Saatchi, S.S., Baccini, A., Asner, G.P., Goetz, S.J., Harris, N.L., Brown, S.: Uncertainty in the spatial distribution of tropical forest biomass: a comparison of pan-tropical maps. *Carbon Balance and Management*. **8**,10 (2013)
212. Models overview. EUCLIMIT project. Development and application of EU economy-wide climate mitigation modelling capacity (all greenhouse gas emissions and removals) <http://www.euclimit.eu>. Accessed 1 November 2017
213. Monni, S., Syri, S., Pipatti, R., Savolainen, I.: Extension of EU emissions trading scheme to other sectors and gases: Consequences for uncertainty of total tradable amount. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*. **7**, 529-538 (2007)
214. Moreno, N., Quintero, R., Ablan, F., Barros, R., Dávila, J., Ramírez, H., Tonella, G., Acevedo, M.: Biocomplexity of deforestation in the Caparo tropical forest reserve in Venezuela: an integrated multi-agent and cellular automata model. *Environmental Modelling and Software*. **22**, 664–673 (2007)

215. Naidoo, R., Iwamura, T.: Global-scale mapping of economic benefits from agricultural lands: Implications for conservation priorities. *Biological Conservation*. **140**, 40-49 (2007). 10.1016/j.biocon.2007.07.025
216. National Greenhouse Gas Inventory Report 1990-2013. Annual Report submission under the “United Nations Framework Convention on Climate Change”, Turkish Statistical Institute, Turkey (2015)
217. National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan, April, 2015, Ministry of the Environment, Greenhouse Gas Inventory Office of Japan (GIO), CGER, NIES, Japan (2015)
218. National Inventory Report 1990–2014: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada. Environment and Climate Change Canada (2016)
219. National Inventory Submissions 2016. United Nations Framework Convention on Climate Change. [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php). Accessed 15 Oct. 2017
220. Nguyen, T.G.: A methodology for validation of integrated assessment models with an application to coastal-zone management in South-West Sulawesi. Dissertation to obtain the doctor’s degree at the University of Twente, Enschede, The Netherlands (2005)
221. Nijnik, M., Bizikova, L.: Responding to the Kyoto Protocol through forestry: A comparison of opportunities for several countries in Europe. *Forest Policy and Economics*. **10**, 257–269 (2008)
222. Nilsson, S., Jonas, M., Shvidenko, A., Stolbovoi, V., McCallum, I.: Monitoring, Verification and Permanence of Carbon Sinks. In: Abstracts of the 3<sup>rd</sup> CarboEurope Conference "The continental carbon cycle", Lisbon, Portugal, 19–21 March 2003
223. Nilsson, S., Jonas, M., Stolbovoi, V., Shvidenko, A., Obersteiner, M., McCallum, I.: The missing "missing sink". *The Forestry Chronicle*. **79**(6), 1071-1074. (2003)
224. Nilsson, S., Shvidenko, A., Stolbovoi, V., Gluck, M., Jonas, M., Obersteiner, M.: Full Carbon Account for Russia. Interim Report IR-00-021, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 180pp. (2000). <http://www.iiasa.ac.at/Publications/Documents/IR-00-021.pdf>
225. Nilsson, S., Vaganov, E.A., Shvidenko, A.Z., Stolbovoi, V., Rozhkov, V.A., McCallum, I., Jonas, M.: Carbon budget of vegetation ecosystems of Russia. *Doklady Earth Sciences*. **393A**(9), 1281–1283. Translated from: *Doklady Akademii Nauk*, **393**(4), 541–543 (2003)

226. Noormets, A., Chen, J., Crow, T.R.: Age-Dependent Changes in Ecosystem Carbon Fluxes in Managed Forests in Northern Wisconsin, USA. *Ecosystems*. **10**(2), 187-203 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9018-y>
227. Obersteiner, M., Huettner, M., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Rametsteiner, E., Reyers, B.: On fair, effective and efficient REDD mechanism design. *Carbon Balance and Management*. **4**(11), 1-11 (2009). doi:10.1186/1750-0680-4-11
228. Obersteiner, M., Rametsteiner, E., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Reyers, B.: Towards a sound REDD: Ensuring globally consistent reference scenarios and safeguarding sustainability co-benefits. In: Bosetti, E., Lubowski, R. (Eds) *Deforestation and Climate Change: Reducing Carbon Emissions from Deforestation and Forest Degradation*, pp.121-136. Edward Elgar, Cheltenham, UK (2010)
229. Ometto, J.P., Bun, R., Jonas, M., Nahorski, Z., Gusti, M.: Uncertainties in greenhouse gases inventories - Expanding our perspective. *Climatic Change*. **124**(3), 451-458 (2014). doi: 10.1007/s10584-014-1149-5
230. Orrego, S.: *Economic Modeling of Tropical Deforestation in Antioquia (Colombia), 1980-2000: An Analysis at a Semi-Fine Scale with Spatially Explicit Data*. A Dissertation submitted to Oregon State University, Corvallis, OR (2009)
231. Pacala, S.W., Canham, C.D., Saponara, J., Silander, J.A., Kobe, R.K., Ribbens, E.: Forest Models Defined by Field Measurements: Estimation, Error Analysis and Dynamics. *Ecological Monographs*. **66**, 1-43 (1996)
232. Peichl, M., Arain, M.A., Brodeur, J.J.: Age effects on carbon fluxes in temperate pine forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. **150** (7/8), 1090-1101 (2010)
233. Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T. et al. (Eds): *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC (2003)
234. Peylin, P., Bousquet, P., Le Quéré, C., Sitch, S., Friedlingstein, P., McKinley, G., Gruber, N., Rayner, P., Ciais, P.: Multiple constraints on regional CO<sub>2</sub> flux variations over land and oceans. *Global Biogeochemical Cycles*. **19**, GB1011 (2005). doi:10.1029/2003GB002214.
235. Pietsch, S., Hasenauer H.: Using mechanistic modeling within forest ecosystem restoration. *Forest Ecology and Management*. **159**, 111-131 (2002)

236. Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B., Dietrich, J.P., Doelmann, J., Gusti, M., Hasegawa, T., Kyle, P., Obersteiner, M., Tabeau, A., Takahashi, K., Valin, H., Waldhoff, S., Weindl, I., Wise, M., Kriegler, E., Lotze-Campen, H., Fricko, O., Riahi, K., van Vuuren, D.: Land use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*. **42**, 331–34 (2017)
237. Post, W.M. Pastor, J.: Linkages - an individual-based forest ecosystem model *Climatic Change*. **34**(2), 253–261 (1996). <https://doi.org/10.1007/BF00224636>
238. Pretzsch, H., Biber, P., Dursky, J.: The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*. **162**, 3-21 (2002)
239. Primes Model 2013-2014. Detailed model description. E3MLab/ICCS at National Technical University of Athens, NTUA, Zografou Campus Athens, Greece, 155p. [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/analysis/models/docs/primes\\_model\\_2013-2014\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/analysis/models/docs/primes_model_2013-2014_en.pdf). Accessed 12 November 2017
240. Prometheus Model 2017. Model description. E3MLab/ICCS at National Technical University of Athens, Athens, Greece. [http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/PROMETHEUSManual/ThePROMETHEUSMODEL\\_2017.pdf](http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/PROMETHEUSManual/ThePROMETHEUSMODEL_2017.pdf). Accessed 12 November 2017
241. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Commission Staff Working Document SWD 418 (final). Impact Assessment. European Commission, Brussels (2016). [https://www.parlament.gv.at/PAKT/EU/XXV/EU/12/52/EU\\_125202/imfname\\_10677059.pdf](https://www.parlament.gv.at/PAKT/EU/XXV/EU/12/52/EU_125202/imfname_10677059.pdf). Accessed 27 April 2017
242. Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Niinisto, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J.C., Grunzweig, J.M., Reth, S., Subke, J.A., Savage, K., Kutsch, W., Oestreg, G., Ziegler, W., Anthoni, P., Lindroth, P., Hari, P.: Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*. **123**, 159–176 (2004)
243. Radov, D., Klevnas, P., Lindovska, Hanif A. et al.: The Demand for Greenhouse Gas Emissions Reduction Investments: An Investors' Marginal Abatement Cost Curve for Ukraine. Prepared for EBRD. NERA Economic Consulting (2012) [http://www.ebrd.com/downloads/research/economics/publications/specials/Ukraine\\_MACC\\_report\\_ENG.pdf](http://www.ebrd.com/downloads/research/economics/publications/specials/Ukraine_MACC_report_ENG.pdf)



244. Raich, J.W., Tufekcioglu, A.: Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*. **48**, 71–90 (2000)
245. Ramankutty, N., Foley, J.A.: Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*. **13**(4), 997-1027 (1999)
246. Ramonet, M., Ciais, P., Nepomniachii, I., Sidorov, K., Neubert R.E.M., Langendorfer, U., Picard, D., Kazan, V., Biraud, S., Gusti, M., Kolle, O., Schulze, E.-D., Lloyd, J.: Three years of aircraft-based trace gas measurements over the Fyodorovskoye southern taiga forest, 300 km north-west of Moscow. *Tellus B*. **54**(5), 713-735 (2002). doi: 10.1034/j.1600-0889.2002.01358.x
247. Rayner, P.J., Enting, I.G., Francey, R.J., Langenfelds, R.: Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO<sub>2</sub>, δ<sup>13</sup>C and O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> observations. *Tellus*. **51B**, 213–232 (1999)
248. Rayner, P.J., Law, R.M., Allison, C.E., Francey, R.J., Pickett-Heaps, C.: The interannual variability of the global carbon cycle (1992–2005) inferred by inversion of atmospheric CO<sub>2</sub> and δ<sup>13</sup>CO<sub>2</sub> measurements. *Global Biogeochemical Cycles*. **22**, GB3008 (2007)
249. Reducing emissions from deforestation and forest degradation in Indonesia. Ministry of Forestry, Jakarta, Indonesia (2008)
250. Reducing emissions from deforestation in developing countries. FAO sub. to UNFCCC. Submission by the Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/forestry/11262-1-0.pdf>. Accessed 27 April 2017
251. Repo, A., Bottcher, H., Kindermann, G., Liski, J.: Sustainability of forest bioenergy in Europe: Land-use-related carbon dioxide emissions of forest harvest residues. *GCB Bioenergy*. **7**(4), 877-887 (2015).
252. Reyer, C., Guericke, M., Ibisch, P.L.: Climate change mitigation via afforestation, reforestation and deforestation avoidance: and what about adaptation to environmental change? *New Forests*. **38**(1), 15-34 (2009)
253. Riahi, K., Dentener, F., Gielen, D., Grubler, A., Jewell, J., Klimont, Z., Krey, V., McCollum, D., Pachauri, S., Rao, S., van Ruijven, B., van Vuuren, D.P., Wilson, C.: Chapter 17 - Energy Pathways for Sustainable Development. In: *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 1203-1306 (2012)

254. Riahi, K., Grübler, A., & Nakicenovic, N., Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*. **74**, 887-935 (2007)
255. Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., et al.: Shared socioeconomic pathways: an overview. *Global Environmental Change*, **42**, 153-168 (2017). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
256. Rivier, L., Peylin, P., Ciais, P., Gloor, M., Rödenbeck, C., Geels, C., et al.: European CO<sub>2</sub> fluxes from atmospheric inversions using regional and global transport models. *Climatic Change*. **103**(1-2), 93-115 (2010). doi:10.1007/s10584-010-9908-4.
257. Rödenbeck, C., Houweling, S., Gloor, M., Heimann, M.: CO<sub>2</sub> flux history 1982–2001 inferred from atmospheric data using a global inversion of atmospheric transport. *Atmospheric Chemistry and Physics*. **3**, 1919–1964 (2003)
258. Rödenbeck, C., Houweling, S., Gloor, M., Heimann, M.: Time-dependent atmospheric CO<sub>2</sub> inversions based on interannually varying tracer transport. *Tellus*. **55B**, 488–497 (2003)
259. Rokityanskiy, D., Benítez, P., Kraxner, F., McCallum, F., Obersteiner, M., Rametsteiner, E., Yamagata, Y.: Geographically explicit global modeling of land-use change, carbon sequestration, and biomass supply. *Technological Forecasting and Social Change*, **74**(7), 1057-1082 (2007)
260. Running, S., Nemani, R., Glassy, J., Thornton, P.: MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17). Algorithm Theoretical Basis Document. Version 3.0, 29 April 1999. NASA, USA (1999)
261. Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., Morel, A.: Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**(24), 9899–9904 (2011)
262. Sands, R.D., Leimbach, M.: Modeling Agriculture and Land Use in an Integrated Assessment Framework. *Climatic Change*. **56**(1-2), 185–210 (2003). <https://doi.org/10.1023/A:1021344614845>
263. Sargent, R.: Verification, Validation, and Accreditation of Simulation Models. In: Joines, J.A., Barton, R.R., Kang, K., Fishwick, P.A. (Eds) *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, INFORMS Simulation Society, Orlando, FL, USA, 10-13 December 2000. <http://www.informs-sim.org/wsc00papers/009.PDF>. Accessed 27 April 2017

264. Schaldach, R., Alcamo, J., Koch, J., Koelking, C., Lapola, D.M., Schuengel, J., Priess, J.A.: An integrated approach to modelling land-use change on continental and global scales. *Environmental Modeling and Software*. **26**(8), 1041-1051 (2011). Doi:10.1016/j.envsoft.2011.02.013
265. Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Verkerk, P.J.: Description of the modelling approach of the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 4.1). European Forest Institute (2016). [http://www.efi.int/files/attachments/publications/efiscen/efiscen\\_description.pdf](http://www.efi.int/files/attachments/publications/efiscen/efiscen_description.pdf)
266. Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Verkerk, P.J., Hengeveld, G., Packalen, T., Sallnäs, O., Pilli, R., Grassi, G., Forsell, N., Frank, S., Gusti, M., Havlik, P.: Forest resource projection tools at the European level. In: Barreiro, S., Schelhaas, M.-J., McRoberts, R.E., Kändler, G. (eds.) *Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability. Managing Forest Ecosystems*, vol.29, pp. 49-68. Springer International Publishing, Cham, Switzerland (2017). doi:10.1007/978-3-319-56201-8\_4.
267. Schipper, J., Chanson, J.S., Chiozza F. et al.: The status of the world's land and marine mammals: diversity, threat, and knowledge. *Science*. **322**, 225-230 (2008)
268. Schmullius, C., Santoro, M. (Eds), Balzter, H., Bartsch, A., Beer, C., Cramer, W., Delbart, N., George, C., Gerard, F., Gerlach, R., Grippa, M., Handoh, I., Hese, S., Kidd, R., Lehmann, E., Le Toan, T., Lucht, W., Luckman, A., McCallum, I., Mognard, N., Nilsson, S., Pathe, C., Petrocchi, A., Quegan, S., Robertson, N., Rowland, C., Shvidenko, A., Skinner, L., Thomson, A., Voigt, S., Wagner, W., Wegmüller, U., Wiesmann, A.: SIBERIA-II Final Report, Contract Number EVG1-CT-2001-00048, EC Deliverable: EC17, Reporting Period 1.1.2002–30.09.2005, October, 69 pp. (2005)
269. Schneider, U.A., Balkovic, J., De Cara, S., Franklin, O., Fritz S., Havlik, P., Huck, I., Jantke, K., Kallio, A.M.I., Kraxner, F., Moiseyev, A., Obersteiner, M., Ramos, C.I., Schleupner, C., Schmid, E., Schwab, D., Skalsky R.: *The European Forest and Agricultural Sector Optimization Model – EUFASOM*. FNU-156, Hamburg University and Centre for Marine and Atmospheric Science, Hamburg (2008).
270. Schneider, U.A., McCarl, B.A.: Appraising agricultural greenhouse gas mitigation potentials: effects of alternative assumptions. *Agricultural Economics*. **35**, 277–287 (2006). doi:10.1111/j.1574-0862.2006.00162.x

271. Seebach, L., McCallum, I., Fritz S. et al.: Choice of forest map has implications for policy analysis: A case study on the EU biofuel target. *Environmental Science & Policy*. **22**, 13-24 (2012)
272. Sheng, J., Han, X., Zhou, H., Miao, Z.: Effects of corruption on performance: Evidence from the UN-REDD Programme. *Land Use Policy*. **59**, 344–350 (2016)
273. Shpakivska, I., Maryskevych, O.: The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature in the ecosystems of the Eastern Carpathians. In: Abstracts of the Carboeurope Conference, Lisbon, Portugal, 19-21 March 2003
274. Shvidenko, A., McCallum, I., Nilsson, S., Schepaschenko, D., Schmillius, C., Beer, C., Santoro, M., Baltzer, H., Quegan, S., LeToan, T., Gusti, M.: Regional terrestrial vegetation full greenhouse account for Northern Eurasia: a system approach. In: *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-07835, 2008, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-07835, EGU General Assembly, Vienna, Austria (2008)
275. Shvidenko, A., Nilsson, S.: Extent, distribution, and ecological role of fire in Russian forests. In: Kasischke, E.S., Stocks, B.J. (Eds) *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Springer-Verlag, New York, pp. 132-150 (2000)
276. Shvidenko, A., Nilsson, S.: Fire and the carbon budget of Russian forests. In: Kasischke, E.S., Stocks, B.J. (Eds): *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Springer-Verlag, New York, pp. 289–311 (2000) Shvidenko, A., Nilsson, S.: A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998. *Tellus*. **55B**, 391-415 (2003)
277. Shvidenko, A., Nilsson, S.: A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998. *Tellus*. **55B**, 391-415 (2003)
278. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Bottcher, H., Gusti, M., Kraxner, F., Obersteiner, M., Leduc, S.: *The Role of ECA's Forest Resources in Climate Change Mitigation*. Final Report submitted to The World Bank on Contract #7158909 (September 2011), International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 78p. (2011)
279. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., McCallum, I., Nilsson, S.: Can the uncertainty of full carbon accounting of forest ecosystems be made acceptable to policymakers? *Climatic Change*. **103**(1–2), 137–157 (2010). doi:10.1007/s10584-010-9918-2
280. Shvidenko, A., Schepaschenko, D.G., Nilsson, S., Vaganov, E.A.: Dynamics of net primary production of Russian forests in a changing world: A new estimate.

- In: Abstracts of the International Conference: Climate Changes and Their Impact on Boreal and Temperate Forests, Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia, 5–7 June 2006
281. Shvidenko, A., Schepashchenko, D.G., Vaganov, E.A., Nilsson, S.: Net Primary Production of Forest Ecosystems of Russia: A New Estimate. *Doklady Earth Sciences*. **421A**(6), 1009–1012 (2008)
  282. Shvidenko, A., Schepschenko, D., Nilsson, S., Bouloui, Y.: Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests. *Ecological Modelling*. **204**, 163-179 (2007)
  283. Shvidenko, A., Venevsky, S., Raile, G., Nilsson, S.: Dynamics of Fully Stocked Stands in the Territory of the Former Soviet Union. WP-96-19, IIASA, Laxenburg, 68p. (1996)
  284. Shvidenko, A.: Personal communication, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (2007)
  285. Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E.A., Haberl, H., Harper, R., House J., Jafari, M., Masera, O., Mbow, C., Ravindranath, N.H., Rice, C.W., Robledo Abad, C., Romanovskaya, A., Sperling, F., Tubiello, F.: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel T., Minx J.C. (Eds) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2014)
  286. Soares-Filho, B., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G., Vera Diaz, M.d.C., Rivero, S., Solórzano, L., Voll, E.: Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém–Cuiabá corridor. *Global Change Biology*. **10**, 745–764 (2004). doi:10.1111/j.1529-8817.2003.00769.x
  287. Soares-Filho, B., Nepstad, D., Curran, C.L.M. et al.: Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*. **440**, 520-523. (2006). <http://dx.doi.org/10.1038/nature04389>
  288. Soares-Filho, B.S., Cerqueira, G.C., Pennachin, C.L.: DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*. **154**(3), 217-235 (2002)

289. Sohngen, B., Mendelsohn, R., Sedjo, R.: A global model of climate change impacts on timber markets. *Journal of Agricultural and Resource Economics*. **26**(2), 326-343 (2001)
290. SSP Database, 2012–2016. Intern. Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>. Accessed 4 November 2017
291. Steffen, W., Noble, I., Canadell, J., Apps, M., Schulze, E.-D., Jarvis, P.: CLIMATE: The Terrestrial Carbon Cycle: Implications for the Kyoto Protocol. *Science*. **280**(5368), 1393–1394 (1998). DOI: 10.1126/science.280.5368.1393
292. Stolbovoi, V., McCallum, I.: CD-ROM "Land Resources of Russia". International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science, Laxenburg, Austria (2002).  
[http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia\\_cd/index.htm?sb=17](http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/index.htm?sb=17)
293. Stolbovoi, V.: Soil respiration and its role in Russia's terrestrial C flux balance for the Kyoto baseline year. *Tellus*. **55B**, 258-269 (2003)
294. Strassburg, B.N.B., Rodrigues, A.S.L., Gusti, M., Balmford, A., Fritz, S., Obersteiner, M., Turner, R.K., Brooks, T.M.: Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. *Nature Climate Change*. **2**, 350–355 (2012). doi:10.1038/nclimate1375
295. Stuart, S.N., Chanson, J.S., Cox, N.A., Young, B.E., Rodrigues, A.S., Fischman, D.L., Waller, R.W.: Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science*. **306**, 1783-1786 (2004)
296. Submission of information on forest management reference levels by Estonia. Ad Hoc Working Group on Further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol (AWG-KP). UNFCCC (2011). [http://unfccc.int/files/meetings/ad\\_hoc\\_working\\_groups/kp/application/pdf/awgkp\\_estonia\\_fmrl\\_2011.pdf](http://unfccc.int/files/meetings/ad_hoc_working_groups/kp/application/pdf/awgkp_estonia_fmrl_2011.pdf)
297. Submission of information on forest management reference levels by France. Ad Hoc Working Group on Further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol (AWG-KP). UNFCCC (2011). [http://unfccc.int/files/meetings/ad\\_hoc\\_working\\_groups/kp/application/pdf/awgkp\\_france\\_2011.pdf](http://unfccc.int/files/meetings/ad_hoc_working_groups/kp/application/pdf/awgkp_france_2011.pdf)
298. Submission of information on forest management reference levels by Latvia. Ad Hoc Working Group on Further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol (AWG-KP). UNFCCC (2011) [https://unfccc.int/files/meetings/ad\\_hoc\\_working\\_groups/kp/application/pdf/awgkp\\_latvia\\_fmrl\\_2011.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/ad_hoc_working_groups/kp/application/pdf/awgkp_latvia_fmrl_2011.pdf)
299. Submission of information on forest management reference levels by Lithuania. Ad Hoc Working Group on Further Commitments for Annex I Parties under the

- Kyoto Protocol (AWG-KP). UNFCCC (2011). [http://unfccc.int/files/meetings/ad\\_hoc\\_working\\_groups/kp/application/pdf/awgkp\\_lithuania\\_2011.pdf](http://unfccc.int/files/meetings/ad_hoc_working_groups/kp/application/pdf/awgkp_lithuania_2011.pdf)
300. Suyanto, S., Ekadinata, A., Sofiyuddin, M., Rahmanullah, A.: Opportunity Costs of Emissions Caused by Land-Use Changes. *Open Journal of Forestry*. **4**, 85-90 (2014). doi: 10.4236/ojf.2014.41013.
  301. Szolgayová, J., Fuss, S., Kaminski, T., Scholze, M., Gusti, M., Heimann, M., Tavoni, M.: The benefits of investing into improved carbon flux monitoring. *Cogent Economics & Finance*. **4**(1), 1239672 (2016). doi:10.1080/23322039.2016.1239672
  302. Teobaldelli, M., Somogyi, Z., Migliavacca, M., Usoltsev, V.A.: Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management*. **257**, 1004-1013 (2009)
  303. The Global Land Cover Map for the Year 2000. GLC2000 database. European Commission Joint Research Centre (2003). <http://www-gvm.jrc.it/glc2000>
  304. The Keeling Curve. Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory, Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego. [https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/mlo\\_full\\_record.pdf](https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/mlo_full_record.pdf). Accessed 10 November 2017
  305. Thomas, C., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M. et al.: Extinction risk from climate change. *Nature*. **427**, 145 – 148 (2004)
  306. Tokar, O., Bun, R., Gusti, M.: Mathematical models for estimation of the carbon sinks in forests of the Carpathian Region of Ukraine. *Information and Telecommunication Systems*. **9**, 80-89 (2006)
  307. Tubiello, F.N., Fischer, G.: Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000-2080. *Technological Forecasting and Social Change*. **74**(7), 1030-1056 (2007)
  308. Tum, M.: Modelling and Validating Biomass Potentials Over Agricultural and Forest Areas. Interim Report IR-10-21, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria, 39p. (2010)
  309. Turkey's country report for the FAO Global Forest Resources Assessment 2015, submitted in 2014 (2014). <http://www.fao.org/3/a-az358e.pdf>
  310. Turkovska, O., Gusti, M., Ochremchuk, I.: Modeling forest CO<sub>2</sub> emissions for Ukraine affected by bioenergy and carbon sequestration policies. In: Proceedings of 6th International Academic Conference of Young Scientists "Computer Science

- and Engineering 2013”, Lviv, Lviv Polytechnic National University, pp. 146-147 (2013). <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/23782/1/52-146-147.pdf>
311. Turkovska, O., Gusti, M, Lauri, P., Forsell, N., Havlik, P., Obersteiner, M.: Linear optimization of forest management for dynamic recursive model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. **5**(4), 12-18 (2015). doi:10.15587/1729-4061.2015.50966
  312. Turkovska, O., Gusti, M.: A conceptual scheme for modelling forestry and LUC CO<sub>2</sub> emissions in Ukraine. *Econtechmod*. **2**(1), 57-62. (2013)
  313. United State of America country report for the FAO Global Forest Resources Assessment 2015, submitted in 2014 (2014)
  314. Valatin G.: Marginal abatement cost curves for UK forestry. Forestry Commission Research Report. Forestry Commission, Edinburgh, 20p. (2012)
  315. Valin H., Frank, S., Pirker, J., Mosnier, A., Forsell, N., Havlik P.: Improvements to GLOBIOM for modelling of biofuels indirect land use change. ILUC Quantification Consortium (2014)
  316. Van der Sluijs J.P.: A way out of the credibility crisis of models used in integrated environmental assessment. *Futures*. **34**(2), 133-146 (2002)
  317. Van der Velde, M., Tubiello, F.N., Vrieling, A., Vrieling, A., Bouraoui, F.: Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data. *Climatic Change*. **113**(3-4), 751-765 (2012)
  318. Van Kooten, C., Folmer, H.: *Land and Forest Economics*. Edward Elgar, Cheltenham, UK, 523p. (2004)
  319. Van Vuuren, D., Hoogwijk, M., Barker, T., Riahi, K., Boeters, S., Chateau, J., Scricciu, S., van Vliet, J., Masui, T., Blok, K., Blomen, E., Kram, T.: Comparison of top-down and bottom-up estimates of sectoral and regional greenhouse gas emission reduction potentials. *Energy Policy*. **37**(12), 5125-5139 (2009). <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.024>.
  320. Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose S.K.: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*. **109**, 5-31 (2011)
  321. Van Vuuren, D.P., Kok, M.T.J., Girod, B., Lucas, P.L., de Vries, B.: Scenarios in Global Environmental Assessments: Key characteristics and lessons for future use. *Global Environmental Change*. **22**, 884–895 (2012). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.06.001>



322. Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., O'Neill, B.C., Ebi, K.L., Riahi, K., Carter, T.R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur, R., Winkler, H.: A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture. *Climatic Change*. **122**, 373-386 (2014)
323. Venevsky, S.V.: A set of biogeochemical model approaches for integrated modelling of climate change impacts: Biospheric carbon and nitrogen cycles. WP-94-62, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 27p. (1994)
324. Verburg, P.H., Soepboer, W., Limpiada, R., Espaldon, M.V.O., Sharifa, M.A., Veldkamp, A.: Modelling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*. **30**, 391-405 (2002)
325. Verkerk, P.J., Levers, C., Kuemmerle, T., Lindner, M., Valbuena, R., Verburg, P.H., Zudin, S.: Mapping wood production in European forests. *Forest Ecology and Management*. **357**, 228-238 (2015)
326. Vogt-Schilb, A., Hallegatte, S., De Gouvello, C.: Marginal Abatement Cost Curves and Quality of Emission Reductions: A Case Study on Brazil. *Climate Policy*. **15**(6), 703-723 (2015)
327. Wagner, F., Amann, M., Borken-Kleefeld, J. et al.: Sectoral marginal abatement cost curves: implications for mitigation pledges and air pollution co-benefits for Annex I countries. *Sustainability Science*. **7**(2), 169-184 (2012). doi:10.1007/s11625-012-0167-3
328. Warnant, P., Francois, L., Strivay, D., Gerald, J.-C.: CARAIB: A global model of terrestrial biological productivity. *Global Biogeochemical Cycles*. **8**(3), 255-270 (1994)
329. WDPA Consortium: World Database on Protected Areas. World Conservation Union (IUCN) and UNEP-World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC)
330. Wehkamp, J., Pietsch, S.A., Kraxner, F., Reuter, W.H., Fuss, S., Gusti, M., Koch, N.: Taking differences in institutional quality into account in global forest modelling. In: Conference Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa "Systems Analysis 2015", IIASA, Laxenburg, Austria, p. 67 (2015)
331. Williams, J.R.: The EPIC Model. In: Singh, V.P. (Ed): *Computer Models of Watershed Hydrology*, pp. 909-1000. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado (1995)

332. Willmott, C., Matsuura, K., Legates, D.: Global Air Temperature and Precipitation: RegridDED Monthly and Annual Climatologies (Version 2.01). Center for Climatic Research Department of Geography, University of Delaware (1998). [http://climate.geog.udel.edu/~climate/html\\_pages/README.lw.html](http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README.lw.html)
333. Winiwarter, W., Muik, B.: Statistical Dependences in Input Data of National Greenhouse Gas Inventories: Effects on the Overall Inventory Uncertainty. *Climatic Change*. **103**(1-2), 19-36 (2010).
334. World Bank: World Development Indicators. World Bank (2005)
335. World Database on Protected Areas. UNEP-WCMC, IUCN, & WCPA (2008)
336. World Energy Outlook 2013. International Energy Agency (2013)
337. Yim, M.H., Joo, S.J., Nakane, K.: Comparison of field methods for measuring soil respiration: a static alkali absorption method and two dynamic closed chamber methods. *Forest Ecology and Management*. **170**, 189–197 (2000)
338. Yu, Y., Chen, J. M., Yang, X., Fan, W., Li, M., He, L.: Influence of site index on the relationship between forest net primary productivity and stand age. *PLoS ONE*. **12**(5), e0177084 (2017). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0177084>
339. Zavarzin, G.A. (Ed): Carbon Pools and Fluxes in Terrestrial Ecosystems of Russia. Nauka, Moscow, 315 pp. (2007)
340. Zhang, Y., Uusivuori, J., Kuuluvainen J.: Econometric Analysis of the Causes of Forest Land Use Changes in Hainan, China. Department of Forest Economics, University of Helsinki, Finland (2000)
341. Біловус, З.П., Вайнагій, І.В., Голубець, М.А. та ін.: Біологічна продуктивність смерекових лісів Карпат. Наукова думка, Київ, 240 с. (1975)
342. Букша, І.Ф., Гожик, П.Ф., Ємельянова, Ж.Л. та ін.: Україна та глобальний парниковий ефект. Книга 2. Вразливість і адаптація екологічних та економічних систем до зміни клімату. АренаЕко, Київ, 208с. (1998)
343. Бунь, А., Густі, М., Кужій, Л.: Геоінформаційні технології формування кадастрів викидів парникових газів в енергетичній галузі. Вісник Східноукраїнського національного університету. **10**, 87-94 (2005)
344. Бунь, А., Густі, М., Кужій, Л.: Моделі та алгоритми формування кадастрів викидів парникових газів в енергетичній галузі з врахуванням невизначеностей. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці. **28**, 89-96 (2005)

345. Бунь, Р., Густі, М., Дачук, В., Олексів, Б., Цибрівський, Я.: Спеціалізована комп'ютерна система для багаторівневої інвентаризації парникових газів. Вісник Технологічного університету Поділля. 1(3), 77-81 (2003)
346. Бунь, Р.А., Густі, М.І., Дачук, В.С., Кужій, Л.І., Олексів, Б.Я., Стрямець, Г.В., Стрямець, С.П., Токар, О.Є., Цибрівський, Я.Б.: Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України. Українська академія друкарства, Львів, 376 с. (2004)
347. Бунь, Р.А., Густі, М.І., Кужій, Л.І., Бунь, А.Р.: Комп'ютерна система формування кадастрів викидів парникових газів та оцінки похибок інвентаризацій в енергетичній галузі. В: Матер. 12 міжнар. конф. з автоматичного управління, Харків, НТУ "ХПІ", т. 2, 202-203 (2005)
348. Галушак М.О.: Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів від використання палива у промисловості України і Польщі. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, Національний університет «Львівська політехніка», Львів (2017)
349. Ганжара Н.Ф.: О коэффициенте гумификации и методическом подходе к определению гумусового баланса в почвах. Почвоведение. 4, 139-147 (1979)
350. Голубец, М.А. (Ред): Украинские Карпаты: Природа. Наукова Думка, Киев (1988)
351. Голубец, М.А., Борсук, Д.В., Гаврилюк, М.В. и др.: Биогеоценотический покров Бескид и его динамические тенденции. Наукова думка, Киев, 240 с. (1983)
352. Грищенко, В.Ф., Аксюк, О.М., Гончаренко, Г.А.: Довідник зі снігового покриву в горах України (Карпати, Крим). Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут, Київ (2013)
353. Густі М.І.: Математичне моделювання вуглецевого балансу екосистем Карпатського регіону України. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури, Львів, 226 с. (2002)
354. Густі, М., Токар, О.: Регіональні особливості екосистем України як джерел і поглиначів парникових газів. В: Інформатизація рекреаційної та туристичної діяльності: Перспективи культурного та економічного розвитку: Праці Другого міжнар. конгресу, Трускавець-Львів, ДНДІІ, 175-179 (2003)

355. Густі, М.: Математичне моделювання для підтримки прийняття рішень у міжнародних відносинах: досвід застосування глобальної моделі лісу. В: Матеріали II всеукр. наук. конф. «Україна в системі глобального інформаційного обміну: теоретико-методологічні аспекти дослідження і підготовки фахівців», Львів, Ліга-Прес, 37-44 (2013)
356. Густі, М.: Прогнозування базового рівня емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування для країн Європейського Союзу. В: Тринадцята відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук (PSC-IMFS-13), Зб. матеріалів конф., Львів, Вид-во Тараса Сороки, 130-132 (2017)
357. Густі, М.І., Бунь, Р.А., Дачук, В.С., Шпаківська, І.М.: Математична модель вуглецевого балансу букового лісу. Інформаційні технології та системи. 7(2), 90-99 (2004)
358. Густі, М.І., Охремчук, І.А.: Валідація глобальних моделей, які використовують для проведення інтегральної оцінки. В: Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2017: тези доповідей Дванадцятої міжнародної науково-практичної конференції, Чернігів, ЧНТУ, 116-120 (2017)
359. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Алгоритм лісокористування для моделі «лісового господарства» в Україні. В: Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: IV міжнр. наук.-практ. конф., тези доповідей, Вінниця, 105-107 (2014)
360. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Географічний підхід до моделювання викидів CO<sub>2</sub> у лісовому господарстві та при зміні землекористування в Україні. В: Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті: III всеукр. наук.-практ. конф., зб. Матеріалів, Львів, 79-84 (2012)
361. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Застосування інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень щодо пом'якшення глобальної зміни клімату. В: Україна в процесах глобального інформаційного обміну: міжнр. наук.-практ. конф., зб. матеріалів, Львів, 67-69 (2016)
362. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Прогнозування потенціалу зменшення емісій вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін землекористування. В: Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: IV міжнр. наук.-практ. конф., праці конференції, Чернівці, 126-128 (2015)
363. Густі, М.І.: Алгоритм оцінки емісії вуглекислого газу при знелісненні болотистих ґрунтів для глобальної геопросторової моделі лісу. В: Матеріали статей П'ятої Міжнр. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", Івано-Франківськ, 222-223 (2015)

364. Густі, М.І.: Вдосконалення модуля прийняття рішень щодо параметрів лісокористування у глобальній моделі лісу G4M (версія для ЄС). В: Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: V міжнр. наук.-практ. конф., праці конференції, Чернівці, 109-110 (2016)
365. Густі, М., Цибрівський, Я., Токар, О., Дачук, В., Бунь, Р.: Використання сучасних програмних засобів для оцінки та аналізу вуглецевого балансу лісових екосистем. Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В.Докучаєва. **2**, 129-134 (2003)
366. Густі, М.І., Токар, О.Є., Король, М.М.: Порівняльна оцінка стоку вуглецю у фітомасу лісів України при різних рівнях деталізації. Науковий вісник УкрДЛТУ: Збірник науково-технічних праць. **14**(4), 13-18 (2004)
367. Данило О.Я.: Математичне моделювання та просторовий аналіз емісії парникових газів у житловому секторі. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, Національний університет «Львівська політехніка», Львів (2015)
368. Дачук В.С.: Діакоптический підхід до моделювання глобального кругообігу вуглецю в біосфері. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури, Львів, 154с. (1997)
369. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И.: Система конверсионных отношений для расчета чистой первичной продукции лесных экосистем по запасам насаждений. Лесоведение. **6**, 54-63 (2000)
370. Звіт про НДР „Геоінформаційні технології аналізу стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві для підтримки прийняття рішень”. Національний університет Львівська політехніка", Львів, 213 с. (2014)
371. Кононова М.М.: Органическое вещество почвы: Его природа, свойства и методы изучения. Издательство АН СССР, Москва, 193с. (1963)
372. Короткий довідник по лісовому фонду України (за матеріалами чергового державного обліку лісів України станом на 01.01.96). Державний комітет лісового господарства України, Київ, 101с. (1998)
373. Крапивин В.Ф., Свирежев Ю.М., Тарко А.М.: Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. Наука, Москва, 272 с. (1982)

374. Красовский А.А.: Основы автоматики и технической кибернетики. Госэнергоиздат, Москва-Ленинград, 600 с. (1962)
375. Кужій, Л.І., Густі, М.І., Бунь, А.Р.: Автоматизована система розподіленої інвентаризації парникових газів. Вісник Хмельницького національного університету. **2**(1/4), 22-27 (2005)
376. Лархер В.: Экология растений. Мир, Москва, 220 с. (1978)
377. Лесів, М.Ю., Щепашенко, Д.Г., Швіденко, А.З., Бунь, Р.А.: Побудова карти лісів України за даними глобальних цифрових карт земельного покриву. Науковий вісник НЛТУ України. **23**, 24–30 (2012)
378. Лесные экосистемы верховья бассейна Днестра, их структура, продуктивность и водорегулирующая роль. Науковий звіт відділу біогеоценології Львівського відділення Інституту ботаніки ім. М.Г.Холодного АН УРСР, Том 1, 2, Львів, (1982)
379. Літопис природи. Природний заповідник «Розточчя», Івано-Франкове, 133с. (2001)
380. Одум Ю.: Экология, Т.1. Мир, Москва, 328с. (1986)
381. Остапчук, Ю.М. (заг. кер-во): Статистичний збірник «Довкілля України» за 2000 рік. Державний комітет статистики України, Київ, 293 с. (2001)
382. Родин, А.З., Крылатов, А.К. (Ред.): Динамика баланса гумуса на пахотных землях Российской Федерации. Госкомзем России, Москва (1998)
383. Семёвский, Ф.Н., Семенов, С.М.: Математическое моделирование экологических процессов. Метеоиздат, Ленинград, 280 с. (1982)
384. Стрямець О.С.: Геоінформаційна технологія просторового аналізу процесів стоку та емісії парникових газів у лісовому господарстві Польщі. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології, Національний університет «Львівська політехніка», Львів (2015)
385. Токар О.Є.: Інформаційна технологія дослідження стоку вуглецю в лісових екосистемах. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології, Національний університет «Львівська політехніка», Львів (2015)
386. Токар, О., Густі, М., Король, М.: Автоматизація збору та обробки даних при дослідженні лісових масивів. Вісник НУ «Львівська політехніка», «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». **598**, 171-175 (2007)

387. Токар, О., Густі, М.: Математичні моделі інвентаризації парникових газів в лісовому господарстві. Інформаційні технології і системи. **6(1-2)**, 211-217 (2003)
388. Турковська О.В.: Методи та засоби аналізу процесів землекористування для дослідження емісії вуглекислого газу. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.13.06 – інформаційні технології, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 146с. (2017)
389. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Інформаційні технології для аналізу емісій CO<sub>2</sub> в лісовому господарстві та при зміні землекористування України. В: 10-та наук. конф. ІМФН НУ «Львівська політехніка», зб. матеріалів, Львів, Н3-Н4 (2012)
390. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Моделювання опцій для пом'якшення зміни клімату в глобальних моделях землекористування. В: 2-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», збірник матеріалів. «ЗУКЦ», Львів, с.20 (2012)
391. Турковська, О.В., Охремчук, І.А., Густі, М.І.: Оцінювання ефективності політики зменшення викидів CO<sub>2</sub> лісами України при різних соціально-економічних сценаріях. Науковий вісник НЛТУ України. **25(4)**, 98-104 (2015)
392. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Адаптація глобальної комп'ютерної моделі лісу G4M для України. Вісник Вінницького політехнічного інституту. **5**, 9-15 (2015)
393. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Алгоритм лісокористування для глобальної геопросторової моделі G4M з врахуванням сортиментної структури. Науковий вісник НЛТУ України. **25(5)**, 339-345 (2015)
394. Чарковська Н.В. Математичне моделювання та просторовий аналіз процесів емісії парникових газів у промисловому та сільськогосподарському секторах Польщі. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, Національний університет «Львівська політехніка», Львів (2015)
395. Шпаківська І.Р.: Дихання ґрунту в екосистемах бореального ряду на верхній межі лісу Чорногори (Українські Карпати). Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук за спеціальністю 03.00.16 – екологія. Дніпропетровський національний університет, Дніпропетровськ (2004)

## Додаток А. Технічна інформація до розділів

### Додаток до розділу 3.

Таблиця Д.3.1. Коефіцієнти рівнянь для основних груп деревних порід Європи, визначених за даними таблиць ходу росту [178]

	сосна	бук	береза	ялиця	модрина	дуб	ялина	сосна алепська
$c_0$	-0.3835	0	0	-0.4562	0	0	0	-0.3
$c_1$	-0.2416	-0.5998	-0.7422	-0.7403	-0.388	-0.6	-0.9082	-0.306
$c_2$	-1.7576	-0.2467	-0.54	-1.0772	-0.01226	-0.4419	-0.2728	-2.052
$c_3$	1.1638	0.7674	0.5719	1.4803	0.8593	0.3179	0.6483	1.673
$c_4$	170	245.6	137	0.6713	195.4	16.67	209.7	150
$c_5$	114.3	100	100	300	600	300	300	130
$c_6$	-2.804	2.6345	0.2972	-0.2151	0.9883	-0.6066	1.8536	1.898
$c_7$	1.044	-0.8978	-0.7543	-0.9929	1.0784	-1.1243	0.4811	-1.141
$c_8$	0	0.69135	0	0.5	0	0.7	0	0.92
$c_9$	0.9	0	0.9	0.2	0.9	0.3	0.9	0.07
$c_{10}$	-0.8242	0	-0.953	-0.7642	-2.1347	-0.4339	-0.143	-4.25
$c_{11}$	-0.4273	0	-0.9236	0.3156	-0.3437	0.5288	-0.5915	6.168
$c_{12}$	-0.4	-0.03177	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
$c_{13}$	-1.476	0	1.052	0.4468	1.3238	2.0156	0.4507	0.9324
$c_{14}$	4.283	0	0.108	0.1425	0.4061	-0.07354	0.3713	-0.00468
$c_{15}$	-0.3	0	0	0	0	0	0	0
$c_{16}$	3.61	0	0	0	0	0	0	0
$c_{17}$	-1.071	0	0	0	0	0	0	0
$c_{18}$	0.1	-0.875	0.1	0.25	0.1	0.1	0.1	0.25
$c_{19}$	1.127	2	1.082	-0.865	1.082	1.03	1.135	-0.865
$c_{20}$	-0.3028	0	-0.4	-0.5	-0.3	0.3	-0.3	-0.5
$c_{21}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$c_{22}$	22.09	21.29	23.24	24.83	23.63	21.26	22.59	26.59
$c_{23}$	0.6207	0.4872	0.4455	0.6071	0.5028	0.5199	0.6168	0.6284
$c_{24}$	-0.0197	-0.0197	-0.0249	-0.0212	-0.0156	-0.019	-0.021	-0.0202
$c_{25}$	1.5061	1.8148	1.3697	2.4131	1.162	1.3408	2.4176	1.0595
$c_{26}$	-0.2535	-0.2914	-0.4294	-0.4825	-0.1867	-0.1098	-0.3582	-0.0349
$c_{27}$	22.7	30.71	13.61	16.11	25.2	-7.511	16.11	18.73





Таблиця Д.3.2. Втрати вуглецю ґрунту, тСО<sub>2</sub>/(га рік), в результаті заготівлі відходів деревини з врахуванням критеріїв сталого лісокористування, складено за даними [251], для врахування втрат при заготівлі відходів без пнів, оригінальні значення зменшені на 58% [69]

Період, роки	0-5		6-20		21-50		51-80	
	без пнів	з пнями	без пнів	з пнями	без пнів	з пнями	без пнів	з пнями
Австрія	0.15	0.37	0.07	0.17	0.05	0.11	0.01	0.01
Бельгія	0.22	0.51	0.07	0.17	0.05	0.11	0.02	0.04
Болгарія	0.12	0.29	0.05	0.12	0.04	0.10	0.01	0.02
Чехія	0.34	0.81	0.16	0.39	0.11	0.27	-0.02	-0.05
Данія	0.31	0.73	0.17	0.42	0.06	0.15	0.03	0.06
Естонія	0.12	0.29	0.08	0.20	0.03	0.06	0.02	0.04
Фінляндія	0.15	0.37	0.12	0.29	0.06	0.13	0.03	0.06
Франція	0.15	0.37	0.08	0.20	0.05	0.12	0.01	0.01
Німеччина	0.43	1.03	0.23	0.54	0.15	0.35	0.02	0.05
Греція	0.03	0.07	0.02	0.05	0.02	0.05	0.01	0.01
Угорщина	0.25	0.59	0.10	0.24	0.05	0.12	0.01	0.02
Ірландія	0.15	0.37	0.11	0.27	0.04	0.10	0.02	0.05
Італія	0.22	0.51	0.10	0.24	0.08	0.18	0.02	0.04
Латвія	0.22	0.51	0.12	0.29	0.05	0.11	0.02	0.05
Литва	0.03	0.07	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00
Люксембург	0.31	0.73	0.15	0.37	0.06	0.15	0.03	0.06
Нідерланди	0.22	0.51	0.07	0.17	0.05	0.12	0.02	0.05
Польща	0.22	0.51	0.06	0.15	0.07	0.16	0.00	0.00
Португалія	0.06	0.15	0.03	0.07	0.03	0.06	0.01	0.01
Румунія	0.09	0.22	0.04	0.10	0.02	0.05	0.01	0.01
Словакія	0.15	0.37	0.07	0.17	0.04	0.09	0.01	0.01
Словенія	0.09	0.22	0.04	0.10	0.02	0.05	0.00	0.00
Іспанія	0.06	0.15	0.02	0.05	0.03	0.06	0.01	0.01
Швеція	0.18	0.44	0.13	0.32	0.07	0.16	0.04	0.09
Великобританія	0.37	0.88	0.21	0.49	0.10	0.23	0.05	0.11

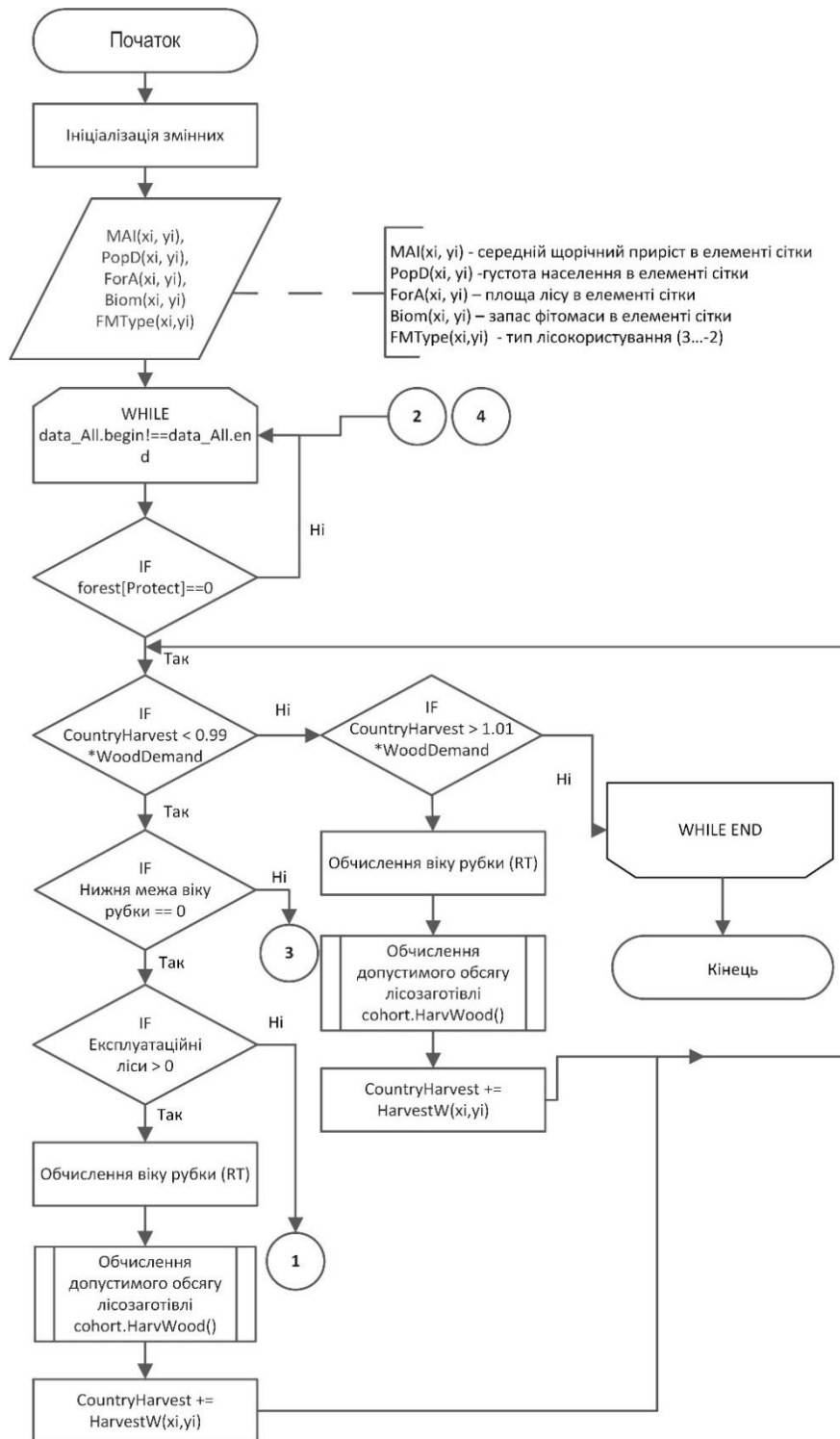


Рис. Д.3.1. Блок-схема алгоритму корегування параметрів лісокористування для вироблення потрібної кількості деревини [388, 393]

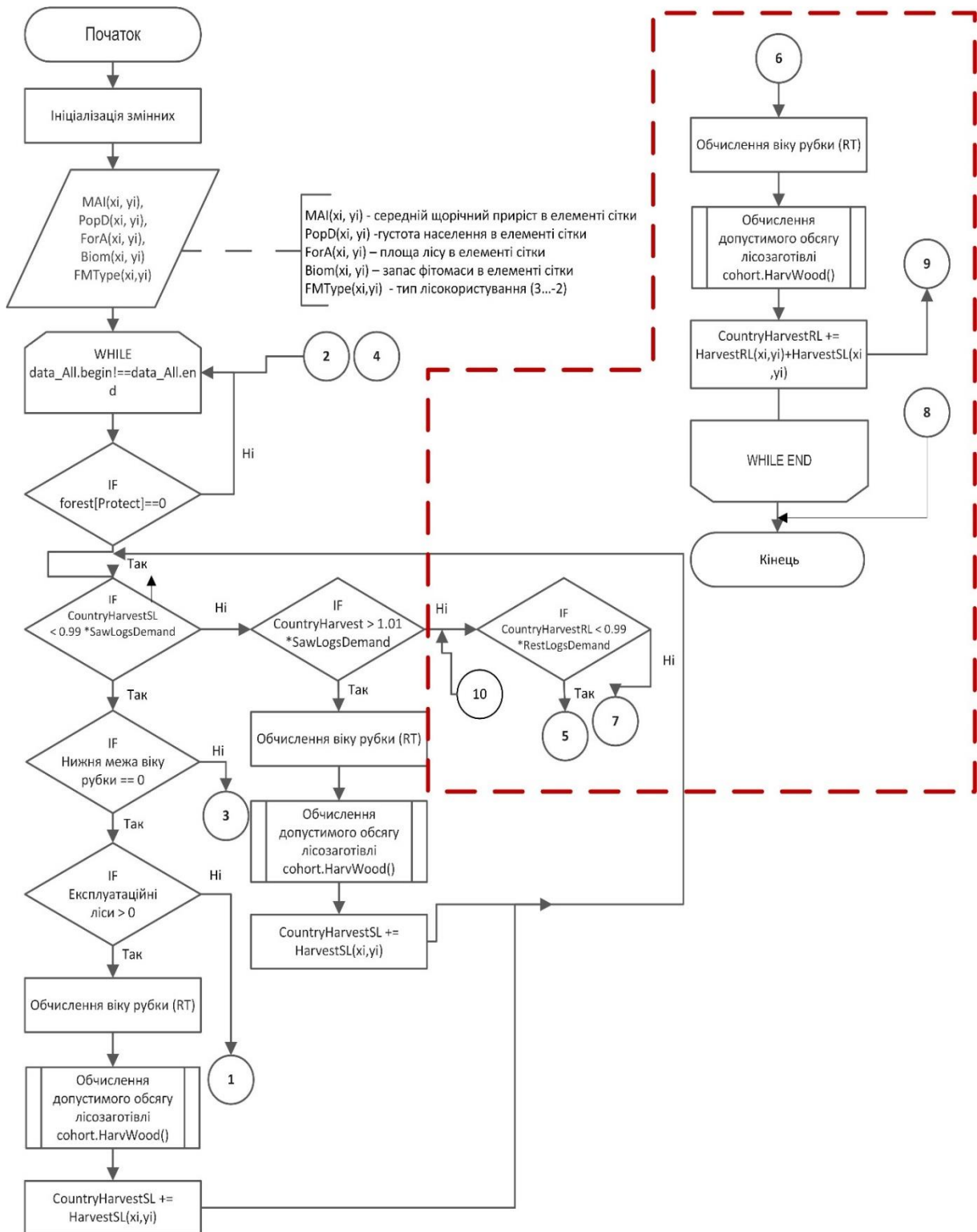


Рис. Д.3.2. Блок-схема алгоритму виконання моделювання лісозаготівельних операцій з врахуванням сортиментів деревини (штрихованою лінією виділено другий блок алгоритму, який відповідає за інші сортименти деревини) [388, 393].

## Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



про використання результатів дисертаційної роботи "Математичні моделі процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування" докторанта кафедри міжнародної інформації к.т.н., ст.н.сп. Густі Миколи Івановича, представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, при виконанні держбюджетних тем та госпдоговірних робіт 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. та зав. кафедри прикладної математики, д.ф.-м.н., проф. Костробій П.П. цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційного дослідження докторанта кафедри міжнародної інформації Густі М.І. використано під час виконання наукових завдань у рамках держбюджетних тем та робіт за міжнародними грантами кафедри прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка", зокрема:

- гранту 7ПП ЄС "Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів" (грант 7ПП ЄС – Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES; 2010-2014 pp.);  
 В рамках гранту Густі М.І. розробив методи обчислення емісій парникових газів у лісовому господарстві та їх невизначеностей з врахуванням особливостей інвентаризації лісів у Польщі та Україні, методи просторової інвентаризації парникових газів з врахуванням особливостей статистичної звітності та наявних геопросторових даних, методи детектування зміни емісій парникових газів на рівні країни з врахуванням невизначеності.
- українсько-австрійського проекту „Просторово-часове оцінювання невизначеності кадастрів емісії парникових газів: ретроспективний аналіз для Австрії та України та ефективне прогнозування” (угода М/196-2015 від 16.11.2015 р., номер держреєстрації 0115U006500 та угода М/85-2016 від 27.07.2016 р.; номер держреєстрації 0116U005309);  
 В рамках проекту Густі М.І. розробив метод просторової інвентаризації та прогнозування парникових газів у секторі лісового господарства та зміни землекористування з використанням геопросторової математичної моделі процесів лісокористування та зміни землекористування.
- українсько-китайського проекту "Просторова інвентаризація парникових газів у житловому секторі китайських та українських регіонів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень" (угода № М/12-2013 від 25.04.2013 р.; номер держреєстрації 0113U001997 та угода № М/125-2014 від 24.06.2014 р.; номер держреєстрації 0114U003703);  
 В рамках проекту Густі М.І. метод дезагрегації статистичних даних, методи просторової інвентаризації парникових газів на основі растру.

- українсько-австрійського проекту „Регіональний просторовий кадастр емісій парникових газів з врахуванням невизначеностей вхідних даних” (угода М/435-2011 від 12.09.2011 р., номер держреєстрації 0111U008510 та угода М/301-2012 від 25.07.2012 р.; номер держреєстрації 0112U003944);  
В рамках проекту Густі М.І. розробив методи аналізу невизначеностей вхідних даних та методи обчислення емісій вуглекислого газу в секторі лісового господарства та зміни землекористування з використанням математичних моделей.
- українсько-австрійського проекту „Методи просторової інвентаризації емісій парникових газів Кіотського протоколу з врахуванням їх невизначеностей” (угода М/32-2009 від 04.03.2009 р., номер держреєстрації 0109U003461);  
В рамках проекту Густі М.І. розробив методи просторової інвентаризації парникових газів та їх невизначеностей для лісового сектора, методи детектування зміни емісій парникових газів на рівні країни з врахуванням невизначеності.
- держбюджетної теми 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 теми Густі М.І. запропонував параметри для адаптації геопросторової математичної моделі процесів лісокористування та зміни землекористування G4M для України, проводив обчислювальні експерименти та здійснював інтерпретацію результатів моделювання.
- держбюджетної теми ДБ/ГЕО “Геоінформаційні технології побудови регіональних кадастрів емісії парникових газів для підтримки прийняття ефективних економіко-адміністративних рішень” (2011-2012 рр., номер державної реєстрації 0111U001210);  
В рамках теми Густі М.І. розробив методи обчислення емісій парникових газів у лісовому господарстві та їх невизначеностей, методи просторової інвентаризації парникових газів для лісового сектора, методи детектування зміни емісій парникових газів на рівні країни з врахуванням невизначеності.

Використання розроблених Густі М.І. методів просторової інвентаризації парникових газів, математичних моделей та програмних засобів моделювання процесів емісії парникових газів у секторі лісокористування та зміни землекористування дало можливість сформулювати геопросторові кадастри емісій парникових газів, сценарії емісії вуглекислого газу в секторі лісокористування та зміни землекористування. Методи детектування зміни емісій парникових газів на рівні країни з врахуванням невизначеності дали можливість оцінити траєкторію зменшення емісій парникових газів у країнах відповідно до їх зобов'язань.

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




Лого IASA)	Міжнародний інститут прикладного системного аналізу Шльоспляц 1 А-2361 Лаксенбург, Австрія	Тел.: +43 2236 807 492 Факс: +43 2236 807 599 Ел. пошта: oberstei@iiasa.ac.at Веб-сайт: www.iiasa.ac.at
---------------	--	--

Д-р Міхаель Оберштайнер  
 Керівник Програми послуг екосистем та управління екосистемами

23 вересня 2013 р.

## ДОВІДКА

Цим засвідчується, що наукові результати д-ра Миколи Густі щодо розробки Глобальної моделі лісу (G4M), дослідження потоків вуглецю в суходільних екосистемах та факторів невизначеності цих потоків, були використані в Міжнародному інституті прикладного системного аналізу в ряді науково-дослідних проєктів, а саме:

- Оцінка фактору невизначеності у повному обліку вуглецю методом “знизу-вгору” для Росії (Австрійський науковий фонд - FWF; Проєкт № P17569-N04, 2005-2007 pp.);

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

Розроблені д-ром Густі методи дозволили оцінити емісії та поглинання CO<sub>2</sub> у суходільних екосистемах на великих територіях з більш достовірною оцінкою невизначеності, що, зокрема, полегшує інверсне моделювання емісій; допомогли вдосконалити підготовчу методику виявлення змін емісій парникових газів, обчислених із невизначеностями. Деякі з звітів та публікацій, які мають відношення до вищезазначених проєктів, наведено нижче:

- Оцінка фактору невизначеності у повному обліку вуглецю методом “знизу-вгору” для Росії. **Короткий звіт про проєкт, IASA, 2008;**



- Густі М. і Йонас М. (2010) Оцінка фактору невизначеності у повному обліку вуглецю наземних екосистем методом “знизу-вгору” для Росії: переглянуті оцінки фактору невизначеності та їх роль у обліку методами “знизу-вгору” та “згори-вниз”. Кліматичні зміни, 103(1-2): 159-174 DOI: 10.1007/s10584-010-9911-9;
- Йонас М., Густі М., Єнда В., Нагурські З. та Нільссон С. (2010) Порівняння підготовчих методів аналізу сигналу для розгляду в рамках (після) Кіотського процесу. Кліматичні зміни, 103(1-2): 175-213, DOI: 10.1007/s10584-010-9914-6;
- Бунь Р., Хамаль Х., Густі М. та Бунь А. (2010) Територіальна інвентаризація ПГ на регіональному рівні: врахування фактору невизначеності. Кліматичні зміни, 103(1-2):227-244, DOI: 10.1007/s10584-010-9907-5.

Розроблена модель G4M дозволяє оцінити емісії CO<sub>2</sub> від знеліснення, заліснення та управління лісовими угіддями та відгук емісій на стратегії скорочення емісій, що використовується у відповідних дослідженнях для оцінки базових емісій в країнах та розробки стратегій скорочення емісій. Розроблена методологія зв'язку G4M з іншими моделями у модельній схемі ПАСА дає можливість враховувати вплив «перетікання» емісій між галузями економіки, країнами та з часом. Деякі з відповідних звітів та публікацій наведено нижче:

- Всесвітній фонд дикої природи. Звіт про живі ліси (2011 р. р, <http://www.panda.org/what we do/how we work/conservation/forests/publications/living forests report/>);
- Індекс вуглецю в лісі (2009 р., <http://www.forestcarbonindex.org/>);
- Підсумковий звіт «Роль лісових ресурсів ЄЦА в пом'якшенні зміни клімату» представлена Світовому банку в 2011 р.;
- Заключний звіт «Аналіз потенціалу та витрат у землекористуванні, змінах в землекористуванні та лісовому господарстві в країнах-членах ЄС» представлений Європейській комісії - Генеральній дирекції з питань зміни клімату в 2011 р.;
- Заключний звіт «Глобальні прогнози щодо лісових емісій та витрати на зменшення емісій», представлений Державному секретарю з питань енергетики та зміни клімату, Лондон, Великобританія в 2011 р.;
- Густі М., Ботчер Г., Кіндерман Г., Хавлік П., Оберштайнер М. (2012 р.) Моделювання параметрів REDD + за допомогою модельної схеми ПАСА. Міжнародне товариство моделювання навколишнього середовища та програмного забезпечення (iEMSs), 2012 р., міжнародний конгрес з моделювання навколишнього середовища та програмного забезпечення «Управління обмеженими ресурсами», Шоста дворічна зустріч, м. Лейпциг, Німеччина. Сепелт Р., Воїнов А. А., Ланге С., Банкамп Д. (Ред. кол.) <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-p.-proceedings>;
- Густі М., Кіндерман Г. (2011 р.). Підхід до моделювання змін у землекористуванні та управління лісовим господарством у глобальному масштабі. Праці, 1-ої Міжнародної конференції з моделювання та методологій моделювання, технологій та застосувань (SIMULTECH 2011 р.), 29-31 липня 2011 р., Нордвейкерхаут, Нідерланди, с. 180-185 (липень 2011 р.);
- Ботчер Х., Веркерк П. Дж., Густі М., Хавлік П., Грассі Дж. (2012 р.). Прогнозування майбутнього поглинання CO<sub>2</sub> лісами ЄС, як результат впливу нещодавніх біоенергетичних стратегій, з використанням двох досконалих моделей управління лісом. Біоенергія майбутніх біологічних змін, N4(6), с.773-783;
- Страссбург Б.Н.Б., Родрігес А.С.Л., Густі М., Балмфорд А., Фріц Ш., Оберштайнер М, Тернер Р.К., Брукс Т.М. (2012 р.). Вплив стимулів для скорочення емісій від знеліснення на зникнення видів тварин у глобальному масштабі. Природа зміна клімату, №2, с.350-355.

З повагою,

[підпис]

Д-р Міхаель Оберштайнер

Керівник Програми послуг екосистем та управління екосистемами, ПАСА

Міжнародний інститут прикладного системного аналізу  
 Реєстраційний номер: ZVR 524808900







International Institute for  
Applied Systems Analysis  
Schlossplatz 1  
A-2361 Laxenburg, Austria

Tel: +43 2236 807 492  
Fax: +43 2236 807 599  
E-mail: oberstei@iiasa.ac.at  
Web: www.iiasa.ac.at

**Dr. Michael Obersteiner**

Leader

Ecosystems Services and Management Program

23 September 2013

## C E R T I F I C A T E

This is to certify that Dr. Mykola Gusti's scientific results on development of the Global Forest Model (G4M), studying carbon fluxes in terrestrial ecosystems and uncertainties of the fluxes have been used in a number of research projects at the International Institute for Applied Systems Analysis, in particular:

- Assessing Uncertainty in Bottom-up Full Carbon Accounting for Russia (the Austrian Science Fund - FWF; Project N P17569-N04, 2005-2007);
- Model Application for Post-2012 Regime Global Policies and EU-27 Action (Post 2012 Project) (European Commission, 2008-2009);
- Climate Change - Terrestrial Adaptation and Mitigation in Europe (CC TAME) (EU FP7 Grant Agreement N 212535, 2008-2011);
- Full Costs of Climate Change: ClimateCost (EU FP7 Grant Agreement N 212774, 2008-2011);
- Earth Observation for Monitoring and Assessment of the Environmental Impact of Energy Use: EnerGEO (EU FP7 Grant Agreement N 226364, 2009-2013);
- Greenhouse Gas Management in European Land Use Systems - GHG-Europe (EU FP7 Grant Agreement N 244122, 2010-2014);
- Analysis of Potential and Costs of LULUCF Use by EU Member States (EC, DG Environment and DG Climate Action Agreement N 07.0307/2009/541003/SER/C5, 2011);
- EUCLIMIT - Development and Application of EU Economy-Wide Climate Change Mitigation Modelling Capacity (All Greenhouse Gas Emissions and Removals) (EU Tender, DG Climate Action, 2011-2013);
- Mitigation of Climate Change: Continued Model Capacity to Support International Policy Objectives (EU Tender, DG Climate Action, 2011-2013);
- Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation: Continued Model Capacity to Support EU International Policy Preparation (EU Tender, DG Climate Action, 2011-2013);
- Development and Application of Global Economy-Wide Climate Change Modelling Capacity to Support EU Policy Preparation (EU Tender, DG Climate Action, 2012-2014);
- Operational Global Carbon Observing System (GEOCarbon) (EU FP7 Grant Agreement N 283080, 2011-2014).

The methods developed by Dr. Gusti allowed assessing CO<sub>2</sub> emissions and removals from terrestrial ecosystems of large territories with more reliable uncertainties that, in particular, facilitate inverse emission modeling; helped to advance preparatory detection technique of uncertain greenhouse gas emission changes. Some of the relevant reports and publications are listed below:

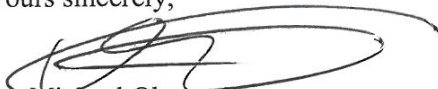
- Assessing Uncertainty in Bottom-up Full Carbon Accounting for Russia. Brief project report, IIASA, 2008;

- Gusti M. and M. Jonas (2010) Terrestrial Full Carbon Account for Russia: Revised Uncertainty Estimates and their Role in a Bottom-Up/Top-Down Accounting Exercise. *Climatic Change*, 103(1-2):159-174 DOI: 10.1007/s10584-010-9911-9;
- Jonas M., M. Gusti, W. Jęda, Z. Nahorski and S. Nilsson (2010) Comparison of Preparatory Signal Analysis Techniques for Consideration in the (Post-)Kyoto Policy Process. *Climatic Change*, 103(1-2):175-213, DOI: 10.1007/s10584-010-9914-6;
- Bun R., Kh. Hamal, M. Gusti and A. Bun (2010) Spatial GHG Inventory at the Regional Level: Accounting for Uncertainty. *Climatic Change*, 103(1-2):227-244, DOI: 10.1007/s10584-010-9907-5.

The developed G4M model allows assessment of afforestation, deforestation and forest management CO<sub>2</sub> emissions and their response to emission mitigation policies that is used in policy relevant studies for estimation of countries' baseline emissions and elaboration of mitigation policies. The developed methodology of linking G4M with the other models within the IIASA Model Framework gives an opportunity to take into account the effect of emission "leakages" between economy sectors, countries and time. Some of the relevant reports and publications are listed below:

- WWF's Living Forests Report (2011, [http://wwf.panda.org/what\\_we\\_do/how\\_we\\_work/conservation/forests/publications/living\\_forests\\_report/](http://wwf.panda.org/what_we_do/how_we_work/conservation/forests/publications/living_forests_report/));
- The Forest Carbon Index (2009, <http://www.forestcarbonindex.org/>);
- Final report "The Role of ECA's Forest Resources in Climate Change Mitigation" submitted to The World Bank in 2011;
- Final report "Analysis of potential and costs of LULUCF use by EU Member States" submitted to the European Commission – DG Climate Action in 2011;
- Final report "Global Forestry Emissions Projections and Abatement Costs" submitted to the Secretary of State of Energy and Climate Change, London, UK in 2011;
- Gusti M., Böttcher H., Kindermann G., Havlik P., Obersteiner M. (2012) Simulation of REDD+ Options Using IIASA Model Framework. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software "Managing Resources of a Limited Planet", Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany. R. Seppelt, A.A. Voinov, S. Lange, D. Bankamp (Eds.) <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>;
- Gusti M, Kindermann G (2011). An Approach to Modeling Landuse Change and Forest Management on a Global Scale. Proceedings, 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011), 29-31 July 2011, Noordwijkerhout, Netherlands pp.180-185 (July 2011);
- Böttcher H, Verkerk PJ, Gusti M, Havlik P, Grassi G (2012). Projection of the Future EU Forest CO<sub>2</sub> Sink as Affected by Recent Bioenergy Policies Using Two Advanced Forest Management Models. *GCB Bioenergy*, N4(6), pp.773-783;
- Strassburg BNB, Rodrigues ASL, Gusti M, Balmford A, Fritz S, Obersteiner M, Turner RK, Brooks TM (2012). Impacts of Incentives to Reduce Emissions from Deforestation on Global Species Extinctions. *Nature Climate Change*, N2, pp.350–355.

Yours sincerely,



Dr. Michael Obersteiner

Leader, Ecosystems Services and Management Program, IIASA



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Природний заповідник «Розточчя»**

81070 Львівська обл., Яворівський район, смт. Івано-Франкове,  
 вул. Січових Стрільців, 7, тел (03259)3-33-91, zaproz25@gmail.com

«13» листопада 2017р. № \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Директор Природного заповідника «Розточчя»  
 Я.С. Бовт  
 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.



**АКТ**

**про використання результатів дисертаційної роботи  
 докторанта кафедри міжнародної інформації Національного  
 університету «Львівська політехніка» к.т.н. Густі Миколи Івановича**

Даний акт укладено про те, що в Природному заповіднику «Розточчя» використано низку результатів дисертаційної роботи докторанта кафедри міжнародної інформації Національного університету «Львівська політехніка» к.т.н. Густі Миколи Івановича. Зокрема, використано наступне:

- методи та програмні засоби математичного моделювання фенологічних процесів у букових та дубових лісах, яка базується на даних спостережень, враховує часовий зсув цих процесів при зміні клімату та дає можливість точніше відтворити сезонну динаміку процесів кругообігу вуглецю;
- удосконалені математичні моделі вуглецевого балансу лісових екосистем з врахуванням наявних даних про лісові екосистеми та кліматичні умови, відображають процеси накопичення та танення снігу, що дало можливість враховувати таксаційні параметри деревостанів і залежності інтенсивності процесів кругообігу вуглецю від віку деревостану, а також точніше відтворити вікову та сезонну динаміку процесів кругообігу вуглецю.

Використання розроблених к.т.н. Густі М.І. математичних моделей та геоінформаційних технологій дало можливість проаналізувати основні потоки вуглецю в лісових екосистемах з врахуванням сезонних змін, а також оцінити вплив на них кліматичних змін. Результати досліджень частково використанні при обґрунтуванні внесення ділянки квазі-пралісових букових лісів Розточчя до об'єкту природної спадщини ЮНЕСКО «Букові праліси і давні букові ліси Карпат та інших регіонів Європи».

**Заступник директора  
 з наукової роботи,  
 к.с.-г.н.  
 старший науковий співробітник**

**Г.В. Стрянець**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури

Грицик В.В.

“11” 06 2004 р.

**А К Т**

про використання результатів наукових досліджень  
старшого наукового співробітника Державного науково-дослідного інституту  
інформаційної інфраструктури  
к.т.н. Густі Миколи Івановича

Цей акт підтверджує, що розроблені к.т.н. Густі М.І. математичні моделі та програмні засоби моделювання процесів стоку вуглецю в лісах України та методи оцінювання вуглецевого балансу лісових екосистем використано у науково-дослідній тематиці і технічних розробках Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Державного комітету зв'язку та інформатизації України, які пов'язані зі створенням інформаційних технологій прогнозування вуглецевого балансу України, зокрема в рамках робіт за проектом Науково-технологічного центру України №1700 “Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України” (2002-2004 рр.). Зокрема, використано математичні моделі вуглецевого балансу основних типів екосистем, програмні засоби імітаційного моделювання кругообігу вуглецю, результати аналізу змін в землекористуванні та веденні лісового господарства на вуглецевий баланс України.

Використання цих математичних моделей та відповідних інформаційних технологій для обчислення стоку вуглецю в лісах та оцінювання вуглецевого балансу України дало можливість врахувати специфіку лісових насаджень різних регіонів України і тим самим отримати покращені оцінки стоків вуглецю у фітомасу лісів України та їх просторового розподілу.

Відповідальний виконавець  
проекту № 1700 УНТЦ,  
к.т.н.



Дачук В.С.



"Затверджую"  
 Проректор з науково-  
 педагогічної роботи  
 Національного університету  
 "Львівська політехніка"

Давидчак О.Р.

2017 р.

## А К Т

про впровадження результатів докторської дисертаційної роботи докторанта Густі Миколи Івановича на тему "Математичні моделі процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування" у навчальний процес на кафедрі прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка"

Даним актом засвідчується, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи докторанта кафедри міжнародної інформації к.т.н. Густі М.І. на тему "Математичні моделі процесів емісії та стоку вуглекислого газу в лісовому господарстві та при змінах землекористування" впроваджено в навчальний процес кафедри прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка", а саме:

- підходи до просторового моделювання процесів емісії та поглинання двоокису вуглецю у лісовому господарстві, підготовки вхідних даних та реалізації обчислювальних експериментів, а також верифікації результатів просторового моделювання використано в лекційному курсі „Просторове моделювання екологічних процесів” для студентів 1-го курсу освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр" (спеціальність 113 – „Прикладна математика”, спеціалізація 0102 – „Математичне та комп’ютерне моделювання”) у таких темах:
  - тема № 11: Просторове моделювання екологічних процесів, пов’язаних з функціонуванням лісового господарства (поглинання);
  - тема № 12: Просторове моделювання екологічних процесів, пов’язаних з функціонуванням лісового господарства (емісії);
  - тема № 24: Верифікація результатів просторового моделювання;
- підходи до формування математичних моделей основних потоків вуглецю у лісових екосистемах, засади реалізації обчислювальних експериментів з математичного моделювання складних процесів емісії та поглинання двоокису вуглецю у лісовому господарстві, а також підходи до аналізу невизначеності результатів математичного моделювання використано в лекційному курсі „Математичні моделі екологічних процесів” для студентів 1-го курсу освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр" (спеціальність 113 – „Прикладна математика”, спеціалізація 0102 – „Математичне та комп’ютерне моделювання”) у таких темах:
  - тема № 11: Формування математичних моделей екологічних процесів, пов’язаних з поглинанням вуглецю у лісових екосистемах;

- тема № 12: Формування математичних моделей екологічних процесів, пов'язаних з емісією парникових газів у лісовому господарстві;
- тема № 15: Аналіз невизначеності результатів математичного моделювання складних екологічних процесів.

Розроблені Густі М.І. підходи до побудови геоінформаційної системи просторового аналізу процесів емісії та поглинання вуглекислого газу у лісових екосистемах та при зміні землекористування, відповідні алгоритми та програмні засоби аналізу дають студентам можливість: оволодіти основними підходами до моделювання екологічних процесів; вивчити принципи формування математичних моделей та отримання вхідних даних для математичного моделювання; ознайомитися з основними підходами до моделювання процесів емісії та поглинання вуглекислого газу на національному і регіональному рівнях; ознайомитися з принципами реалізації сучасних геоінформаційних систем для потреб екології та охорони довкілля; оволодіти основними математичними методами просторового моделювання; ознайомитися з основними принципами використання геоінформаційних систем.

Лектор курсів  
докт. техн. наук, проф.



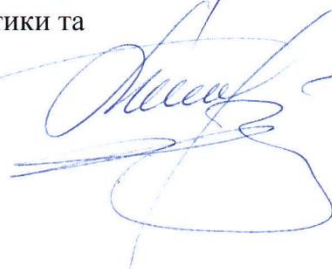
Р.А. Бунь

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



П.П. Костробій

Директор  
Інституту прикладної математики та  
фундаментальних наук,  
докт. фіз.-мат. наук, проф.



П.І. Каленюк

## Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів

1. Бунь, Р.А., Густі, М.І., Дачук, В.С., Кужій, Л.І., Олексів, Б.Я., Стрямець, Г.В., Стрямець, С.П., Токар, О.Є., Цибрівський, Я.Б.: Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України. Українська академія друкарства, Львів, 376 с. (2004)
2. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Papadopoulos, D., Siskos, P., Apostolaki, E., Zampara, M., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Kouvaritakis, N., Hoeglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Bottcher, H., Frank, S., Havlik, P., Gusti, M., Witzke, H.P.: EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050 - Reference scenario 2013. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 173 p. (2014)
3. Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Siskos, P., Kannavou, M., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S., Zampara, M., Papadopoulos, D., Nakos, Ch., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Tsani, S., Karkatsoulis, P., Fragkos, P., Kouvaritakis, N., Höglund Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Gomez Sanabria, A., Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M., Witzke, H.P., Kesting, M.: EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. European Commission Directorate - General for Energy, Directorate - General for Climate Action and Directorate - General for Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 223 p. (2016)
4. Turkovska, O., Gusti, M., Lauri, P., Forsell, N., Havlik, P., Obersteiner, M.: Linear optimization of forest management for dynamic recursive model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. **5**(4), 12-18 (2015). doi:10.15587/1729-4061.2015.50966
5. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Алгоритм лісокористування для глобальної геопросторової моделі G4M з врахуванням сортиментної структури. Науковий вісник НЛТУ України. **25**(5), 339-345 (2015)
6. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Адаптація глобальної комп'ютерної моделі лісу G4M для України. Вісник Вінницького політехнічного інституту. **5**, 9-15 (2015)

7. Турковська, О.В., Охремчук, І.А., Густі, М.І.: Оцінювання ефективності політики зменшення викидів CO<sub>2</sub> лісами України при різних соціально-економічних сценаріях. Науковий вісник НЛТУ України. **25**(4), 98-104 (2015)
8. Gusti M.: An algorithm for simulation of forest management decisions in the Global Forest Model. Artificial Intelligence. **4**, 45-49 (2010)
9. Токар, О., Густі, М., Король, М.: Автоматизація збору та обробки даних при дослідженні лісових масивів. Вісник НУ "Львівська політехніка", "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". **598**, 171-175 (2007)
10. Бунь, А., Густі, М., Кужій, Л.: Геоінформаційні технології формування кадастрів викидів парникових газів в енергетичній галузі. Вісник Східноукраїнського національного університету. **10**, 87-94 (2005)
11. Бунь, А.Р., Густі, М.І., Кужій, Л.І.: Моделі та алгоритми формування кадастрів викидів парникових газів в енергетичній галузі з врахуванням невизначеностей. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці. **28**, 89-96 (2005)
12. Кужій, Л.І., Густі, М.І., Бунь, А.Р.: Автоматизована система розподіленої інвентаризації парникових газів. Вісник Хмельницького національного університету. **2**(1/4), 22-27 (2005)
13. Густі, М.І., Бунь, Р.А., Дачук, В.С., Шпаківська, І.М.: Математична модель вуглецевого балансу букового лісу. Інформаційні технології та системи. **7**(2), 90-99 (2004)
14. Густі, М.І., Токар, О.Є., Король, М.М.: Порівняльна оцінка стоку вуглецю у фітомасу лісів України при різних рівнях деталізації. Науковий вісник УкрДЛТУ: Збірник науково-технічних праць. **14**(4), 13-18 (2004)
15. Токар, О., Густі, М.: Математичні моделі інвентаризації парникових газів в лісовому господарстві. Інформаційні технології і системи. **6**(1-2), 211-217 (2003)
16. Бунь, Р., Густі, М., Дачук, В., Олексів, Б., Цибрівський, Я. Спеціалізована комп'ютерна система для багаторівневої інвентаризації парникових газів. Вісник Технологічного університету Поділля. **1**(3), 77-81 (2003)
17. Fricko, O., Navlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schöpp, W., Riahi, K.: The marker quantification of the



- Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*. **42**, 251–267 (2017)
18. Forsell, N., Turkovska, O., Gusti, M., den Elzen, M., Obersteiner, M., Havlik, P.: Assessing the INDCs' land use, land use change, and forest emission projections. *Carbon Balance and Management*, **11**(26), 1-17 (2016). doi:10.1186/s13021-016-0068-3
19. Szolgayová, J., Fuss, S., Kaminski, T., Scholze, M., Gusti, M., Heimann, M., Tavoni, M.: The benefits of investing into improved carbon flux monitoring. *Cogent Economics & Finance*, **4**(1), 1239672 (2016). doi:10.1080/23322039.2016.1239672
20. Di Fulvio, F., Forsell, N., Lindroos, O., Korosuo, A., Gusti, M.: Spatially explicit assessment of roundwood and logging residues availability and costs for the EU28. *Scandinavian Journal of Forest Research*. **31**(7), 691-707 (2016). doi: 10.1080/02827581.2016.1221128
21. Frank, S., Böttcher, H., Gusti, M., Havlík, P., Klaassen, G., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Dynamics of the land use, land use change, and forestry sink in the European Union: the impacts of energy and climate targets for 2030. *Climatic Change*. **138**, 253–266 (2016). doi:10.1007/s10584-016-1729-7
22. Kryazhimskiy, A., Rovenskay, E., Shvidenko, A., Gusti, M., Shchepashchenko, D., Veshchinskaya, V.: Towards harmonizing competing models: Russian forests' net primary production case study. *Technological Forecasting and Social Change*. **98**, 245–254 (2015). doi:10.1016/j.techfore.2015.06.003
23. Ometto, J.P., Bun, R., Jonas, M., Nahorski, Z., Gusti, M.: Uncertainties in greenhouse gases inventories - Expanding our perspective. *Climatic Change*. **124**(3), 451-458 (2014). doi: 10.1007/s10584-014-1149-5
24. Kraxner, F., Nordstroem, E.-M., Havlik, P., Gusti, M., Mosnier, A., Frank, S., Valin, H., Fritz, S., Fuss, S., Kindermann, G., McCallum, I., Khabarov, N., Böttcher, H., See, L., Aoki, K., Schmid, E., Mathe, L., Obersteiner, M.: Global bioenergy scenarios - future forest development, land-use implications, and trade-offs. *Biomass and Bioenergy*. **57**, 86-96 (2013). doi: 10.1016/j.biombioe.2013.02.003
25. Böttcher, H., Verkerk, P.J., Gusti, M., Havlik, P., Grassi, G.: Projection of the future EU forest CO<sub>2</sub> sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models. *GCB Bioenergy*. **4**, 773–783 (2012)

26. Strassburg, B.N.B., Rodrigues, A.S.L., Gusti, M., Balmford, A., Fritz, S., Obersteiner, M., Turner, R.K., Brooks, T.M.: Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. *Nature Climate Change*. **2**, 350–355 (2012). doi:10.1038/nclimate1375
27. Gusti, M., Jonas, M.: Terrestrial full carbon account for Russia: revised uncertainty estimates and their role in a bottom-up/top-down accounting exercise. *Climatic Change*. **103**(1-2), 159-174 (2010). doi: 10.1007/s10584-010-9911-9
28. Obersteiner, M., Huettner, M., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Rametsteiner, E., Reyers, B.: On fair, effective and efficient REDD mechanism design. *Carbon Balance and Management*. **4**(11), 1-11 (2009). doi:10.1186/1750-0680-4-11
29. Fuss, S., Szolgayova, J., Obersteiner, M., Gusti, M.: Investment under market and climate policy uncertainty. *Applied Energy*. **85**, 708-721 (2008). doi: 10.1016/j.apenergy.2008.01.005
30. Gusti, M.: Modeling afforestation and the underlying uncertainties. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. **7**(4-5), 475-482 (2007). doi:10.1007/s11267-006-9115-5 (передруковано в монографії Lieberman et al.: Accounting for Climate Change: Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories – Verification, Compliance, and Trading, pp.52-62. Springer, The Netherlands (2007))
31. Ramonet, M., Ciais, P., Nepomniachii, I., Sidorov, K., Neubert R.E.M., Langendorfer, U., Picard, D., Kazan, V., Biraud, S., Gusti, M., Kolle, O., Schulze, E.-D., Lloyd, J.: Three years of aircraft-based trace gas measurements over the Fyodorovskoye southern taiga forest, 300 km north-west of Moscow. *Tellus B*. **54**(5), 713-735 (2002). doi: 10.1034/j.1600-0889.2002.01358.x
32. Turkovska, O., Gusti, M.: A conceptual scheme for modelling forestry and LUC CO<sub>2</sub> emissions in Ukraine. *Econtechmod*. **2**(1), 57-62. (2013)
33. Tokar, O., Bun, R., Gusti, M.: Mathematical models for estimation of the carbon sinks in forests of the Carpathian Region of Ukraine. *Information and Telecommunication Systems*. **9**, 80-89 (2006)
34. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: quality control and specific characters of inventory sectors. *Information and Telecommunication Systems*, Bielsko-Biala: Polish Information Processing Society. **4**, 73-82 (2004)

35. Bun, R., Gusti, M.: Computer system for greenhouse gases inventory and analysis: multilevel models. *Information and Telecommunication Systems, Bielsko-Biala: Polish Information Processing Society*. **1**, 61-67 (2004)
36. Bun, R., Gusti, M., Kujii, L., Tokar, O., Tsybrivskyy, Y., Bun, A.: Spatial GHG inventory: analysis of uncertainty sources. A case study for Ukraine. In: Lieberman, D., Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S. (eds.) *Accounting for Climate Change: Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories – Verification, Compliance, and Trading*, pp. 63-74. Springer, The Netherlands (2007). doi:10.1007/978-1-4020-5930-8\_6
37. Obersteiner, M., Rametsteiner, E., Kraxner, F., McCallum, I., Aoki, K., Bottcher, H., Fritz, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Reyers, B.: Towards a sound REDD: Ensuring globally consistent reference scenarios and safeguarding sustainability co-benefits. In: Bosetti, E., Lubowski, R. (eds) *Deforestation and Climate Change: Reducing Carbon Emissions from Deforestation and Forest Degradation*, pp.121-136. Edward Elgar, Cheltenham, UK (2010)
38. Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Verkerk, P.J., Hengeveld, G., Packalen, T., Sallnäs, O., Pilli, R., Grassi, G., Forsell, N., Frank, S., Gusti, M., Havlik, P.: Forest resource projection tools at the European level. In: Barreiro, S., Schelhaas, M.-J., McRoberts, R.E., Kändler, G. (eds.) *Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability. Managing Forest Ecosystems*, vol.29, pp. 49-68. Springer International Publishing, Cham, Switzerland (2017). doi:10.1007/978-3-319-56201-8\_4.
39. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Spatial GHG inventory at the regional level: accounting for uncertainty. In: Jonas, M., Nahorski, Z., Nilsson, S., Whiter, T. (eds.) *Greenhouse Gas Inventories: Dealing With Uncertainty*, pp.227-244. Springer, Dordrecht (2011). doi:10.1007/978-94-007-1670-4\_13
40. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Bun, A.: Geoinformation technology and greenhouse gas spatial inventory: An analysis of structural changes in energy sector. In: *Zeszyty Naukowe: Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Przemysłu. Sesja Naukowa "Środowisko i Technologie Informatyczne a Zdrowie Człowieka"*, vol.1, 14-34 (2007)
41. Bun, R., Hamal, Kh., Gusti, M., Savchyn, O.: Information technology for spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: Wieczorek, T. (ed.) *Internet in the information society: Application of the information technologies*, pp. 154-163. WSB, Dabrowa Gornicza (2007)

42. Buń, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Technologie informacyjne inwentaryzacji gazów cieplarnianych z wykorzystaniem georozproszonych baz danych. In: Nowe technologie w komputerowych systemach zarządzania, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, pp. 37-43 (2005)
43. Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B., Dietrich, J.P., Doelmann, J., Gusti, M., Hasegawa, T., Kyle, P., Obersteiner, M., Tabeau, A., Takahashi, K., Valin, H., Waldhoff, S., Weindl, I., Wise, M., Kriegler, E., Lotze-Campen, H., Fricko, O., Riahi, K., van Vuuren, D.: Land use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*. **42**, 331–34 (2017). doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.10.002
44. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal analysis techniques for consideration in the (post-)Kyoto policy process. *Climatic Change*. **103**(1-2), 175-213 (2010) doi:10.1007/s10584-010-9914-6
45. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: How much additional carbon can be stored in forests if economic measures are used and how much could it cost? *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво*. **135**, 244–253 (2009)
46. Густі, М., Цибрівський, Я., Токар, О., Дачук, В., Бунь, Р.: Використання сучасних програмних засобів для оцінки та аналізу вуглецевого балансу лісових екосистем. *Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В.Докучаєва*. **2**, 129-134 (2003)
47. Forsell, N., Korosuo, A., Lauri, P., Gusti, M., Havlik, P., Böttcher, H., Hennenberg, K.: Follow-up study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio follow-up). Publications Office of the European Union, Luxembourg, 68 pp. (2016) ISBN 978-92-79-64433-7
48. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M., Böttcher, H., Hennenberg, K., Hünecke, K., Wiegmann, K., Pekkanen, M., Nuolivirta, P., Bowyer, C., Nanni, S., Allen, B., Poláková, J., Fitzgerald, J., Lindner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio). Final report. Project: ENV.F.1/ETU/2013/0033. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 43 pp. (2016)
49. Forsell, N., Korosuo, A., Havlik, P., Valin, H., Lauri, P., Gusti, M., Kindermann, G., Obersteiner, M.: Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy. Task 3: Modelling of impacts of an increased EU bioenergy demand

- on biomass production, use and prices. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 109 pp. (2016).
50. Frank, S., Forsell, N., Gusti, M., Havlík, P.: Methodology for estimation and modelling of EU LULUCF greenhouse gas emissions and removals until 2050 in GLOBIOM and G4M. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, 29 pp. (2016) [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models/docs/lulucf\\_methodology\\_report\\_may2016\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models/docs/lulucf_methodology_report_may2016_en.pdf)
51. Elzen, M., Fekete H., Admiraal A., Forsell N., Höhne N., Korosuo A., Roelfsema M., van Soest H., Wouters K., Day Th., Hagemann M., Hof A., Mosnier A.; Contributing authors: Havlik P., Gusti M., Obersteiner M., Wong L.: Enhanced policy scenarios for major emitting countries, The Hague, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 134 pp. (2015). [http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-enhanced-policy-scenarios-for-major-emitting-countries\\_1631.pdf](http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-enhanced-policy-scenarios-for-major-emitting-countries_1631.pdf)
52. Havlík, P., Valin, H., Jean P., Gusti, M., Schmid, E., Forsell, N., Herrero, M., Khabarov, N., Mosnier, A., Cantele, M., Obersteiner, M.: Climate change impacts and mitigation in the developing world: an integrated assessment of the agriculture and forestry sectors. Policy Research working paper; no. WPS 7477. Washington, D.C.: World Bank Group, 56 pp. (2015) <http://documents.worldbank.org/curated/en/2015/11/25250682/climate-change-impacts-mitigation-developing-world-integrated-assessment-agriculture-forestry-sectors>
53. Gusti, M.: G4M Overview (global version). Research Gate (2015). doi: 10.13140/RG.2.1.4319.8804. [https://www.researchgate.net/publication/284625564\\_G4M\\_Overview\\_global\\_version](https://www.researchgate.net/publication/284625564_G4M_Overview_global_version)
54. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Bottcher, H., Gusti, M., Kraxner, F., Obersteiner, M., Leduc, S.: The Role of ECA's Forest Resources in Climate Change Mitigation. Final Report submitted to The World Bank on Contract #7158909 (September 2011), International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 78 pp. (2011)
55. Deveney, A., Nackoney, J., Purvis, N., Gusti, M., Kopp, R., Myers, E., Stevenson, A., Kindermann, G., Macauley, M., Obersteiner, M.: Forest carbon index: The geography of forests in climate solutions. Joint report by Resources for the Future and Climate Advisers. Washington, DC, USA, 80 pp. (2009). <http://www.bluepointmaps.com/staging/fci3/index.html>

56. Böttcher, H., Aoki, K., De Cara, S., Gusti, M., Havlik, P., Kindermann, G., Schneider, U., Obersteiner, M.: GAINS. GHG Mitigation Potentials and Costs from Land-Use, Land-Use Change and Forestry in Annex-I Countries: Methodology. Report. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 39 pp. (2008)
57. Gusti, M., Havlik, P., Obersteiner, M.: Technical Description of the IIASA Model Cluster. The Eliasch Review; Office of Climate Change, UK, 12 pp. (2008) [http://www.occ.gov.uk/activities/eliasch/Gusti\\_IIASA\\_model\\_cluster.pdf](http://www.occ.gov.uk/activities/eliasch/Gusti_IIASA_model_cluster.pdf)
58. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for Annex I Countries under the Kyoto Protocol — A Lesson for the Post-Kyoto Policy Process. International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-024, Laxenburg, Austria, 91 pp. (2004)
59. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2001). International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-029, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)
60. Jonas, M., Nilsson, S., Bun, R., Dachuk, V., Gusti, M., Horabik, J., Jęda, W., Nahorski, Z.: Preparatory Signal Detection for the EU Member States under the EU Burden Sharing – Advanced Monitoring Including Uncertainty (1990-2002). International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR-04-046, Laxenburg, Austria, 29 pp. (2004)
61. Gusti, M., Böttcher, H., Kindermann, G., Havlik, P., Obersteiner, M.: Simulation of REDD+ options using IIASA model framework. In: International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software “Managing Resources of a Limited Planet”, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany. Seppelt, R., Voinov, A.A., Lange, S., Bankamp, D. (Eds.) (2012) <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>
62. Gusti, M., Kindermann, G. An approach to modeling landuse change and forest management on a global scale. In: Proceedings, 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011), Noordwijkerhout, Netherlands, 180-185 (2011)

63. Bun, R., Gusti, M., Oleksiv, B.: Greenhouse gas inventory on the base of multilevel model. In: Filho, L.W., Gomez, J.M., Rautenstrauch, C. (Eds.) Second International ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering. Proceedings. Shaker Verlag, Aachen, Germany, 294-308 (2005)
64. Bun, R., Hamal, K., Gusti, M., Bun, A., Savchyn, O.: Spatial inventory of greenhouse gases on regional level. In: Gómez, J.M., Sonnenschein, M., Müller, M., Welsch, H., Rautenstrauch, C. (Eds) Information Technologies in Environmental Engineering. Book Series “Environmental Science and Engineering”, ITEE 2007, Third International ICSC Symposium (2007) <http://www.springerlink.com/content/j183524664262371/>
65. Gusti, M., Khabarov, N., Forsell, N.: Sensitivity of marginal abatement cost curves to variation of G4M parameters. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Cracow, Poland, 163-169 (2015)
66. Fuss, S., Gusti, M., Broquet, G., Ciais, P., Tavoni, M., MacCallum, I.: Assessing the benefit of carbon monitoring systems for REDD+ in Pan-Tropical regions. In: XIV World Forestry Congress, Durban, South Africa, 7-11 (2015)
67. Frank, S., Havlík, P., Soussana, J.F., Levesque, A., Valin, H., Wollenberg, E., Kleinwechter, U., Fricko, O., Gusti, M., Herrero, M., Smith, P.: Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? In: EGU General Assembly Conference: Abstracts, vol. 19, p. 15384 (2015)
68. Forsell, N., Havlík, P., Korosuo, A., Kraxner, F., Frank, S., Valin, H., Gusti, M., Zhang, W., Nordin, A., Lundmark, T., Obersteiner, M.: Global harvesting of wood under different socio-economic and climate mitigation scenarios. In: Towards a New Era of Forest Science in the Boreal Region. Abstracts of the 17th IBFRA Conference, Rovaniemi, Finland. p. 79 (2015)
69. Wehkamp, J., Pietsch, S.A., Kraxner, F., Reuter, W.H., Fuss, S., Gusti, M., Koch, N.: Taking differences in institutional quality into account in global forest modelling. In: Conference Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015”, IIASA, Laxenburg, Austria, p. 67 (2015)
70. Havlík, P., Valin, H., Mosnier, A., Forsell, N., Frank, S., Leclère, D., Palazzo, A., Ermolieva, T., Gusti, M., Balkovič, J., Skalský, R., Schmid, E., Herrero, M., Kraxner, F., Obersteiner, M.: Integrated multi-scale modeling framework for assessment of land-use related challenges under global change. In: Conference

- Program, Information, and Book of Abstracts, A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015”, IIASA, Laxenburg, Austria, p. 73 (2015)
71. Krey, V., Riahi, K., Johnson, N., Kolp, P., Lutz, W., KC S., Crespo Cuaresma, J., Havlik, P., Böttcher, H., Gusti, M., Obersteiner, M.: The new scenarios process – the way toward more integrated assessment of climate change. In: *Worlds Within Reach: From Science To Policy - IIASA 40th Anniversary Conference*, Hofburg Congress Center, Vienna and IIASA, Laxenburg, Austria (2012) <http://pure.iiasa.ac.at/12238/1/krey1.pdf>
  72. Bottcher, H., Gusti, M., Mosnier, A., Havlik, P., Obersteiner, M. Global forestry emission projections and abatement costs. In: *Geophysical Research Abstracts*, Vol.14 EGU2012-7062 (2012)
  73. Kraxner, F., Nordström, E.-M., Obersteiner, M., Havlík, P., Gusti, M., Kindermann, G., Fuss, S., Khabarov, N.: Global feedstock scenarios for bioenergy - Land-use change and trade-offs. In: Paper submitted to the International Energy Workshop - IEW 2012 (2012) <http://iew2012.ercblogs.co.za/wp-content/uploads/sites/7/2012/06/Kraxner.pdf>
  74. Fuss, S., Gusti, M., Kraxner, F., Aoki, K., Szolgayova, J.: Boreal forests as a carbon sink: A real options perspective. In: *Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action*. Proceedings of the international conference IBFRA, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia, 382-386 (2011)
  75. Shvidenko, A., McCallum, I., Nilsson, S., Schepaschenko, D., Schmillius, C., Beer, C., Santoro, M., Baltzter, H., Quegan, S., LeToan, T., Gusti, M.: Regional terrestrial vegetation full greenhouse account for Northern Eurasia: a system approach. In: *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-07835, 2008, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-07835, EGU General Assembly, Vienna, Austria (2008)
  76. Gusti, M., Jonas, M.: How well do we know Russia’s carbon budget for 1988-1992? Critical look from uncertainty study of IIASA’s Full Carbon Account. In: *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-09464, (2008)
  77. Gusti, M., Jonas, M.: IIASA’S terrestrial full carbon account for Russia: Revised uncertainty estimates and its role in a bottom-up/top-down accounting exercise. In: *Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 69-85 (2007)



78. Jonas, M., Gusti, M., Jęda, W., Nahorski, Z., Nilsson, S.: Comparison of preparatory signal detection techniques for consideration in the (Post-) Kyoto policy process. In: Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 107-135 (2007)
79. Bun, R., Gusti, M., Bun, A., Hamal, K.: Multilevel model for greenhouse gas inventory and uncertainty analysis concerning the Kyoto Protocol implementation. In: Proc. of the Intern. Conf. on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006). Yamaguchi, Japan, 118-119 (2006)
80. Bun, A., Gusti, M., Hamal, Kh., Bun, R.: Analysis and minimization of uncertainty of results of multilevel greenhouse gases inventory. In: Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems "ENVIROMIS'2006". Tomsk, Russia, p. 45 (2006)
81. Gusti, M.: Modelling the afforestation process and underlying uncertainties. In: Proceedings of the International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories: Verification, Compliance and Trading, Warsaw, Poland, 59-66 (2004)
82. Bun, R., Gusti, M., Dachuk, V., Oleksiv, B., Tsybrivskyy, Ya.: Geoinformation system for greenhouse gas inventories as a practical tool for decision-makers. In: The Information Society and Enlargement of the European Union: 17th International Conference "Informatics for Environmental Protection", Cottbus, Germany, Part 2, 765-772 (2003)
83. Turkovska, O., Gusti, M., Ochremchuk, I.: Modeling forest CO<sub>2</sub> emissions for Ukraine affected by bioenergy and carbon sequestration policies. In: Proceedings of 6th International Academic Conference of Young Scientists "Computer Science and Engineering 2013", Lviv, Lviv Polytechnic National University, pp. 146-147 (2013) <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/23782/1/52-146-147.pdf>
84. Gusti, M.: An algorithm for simulation of forest management response to carbon price incentive. In: Proceedings of the conference 'Modern Information Technologies in Economy, Management and Education', Lviv, 94-97 (2010)
85. Gusti, M.: An approach to simulation of deforestation in tropical forests. In: Proceedings of the conference 'Modern Information Technologies in Economy, Management and Education', Lviv, 81-85 (2011)
86. Gusti, M.: Uncertainty of BAU emissions in LULUCF sector: Sensitivity analysis of the Global Forest Model. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories, LPNU, Lviv, 73-80 (2010)

87. Gusti, M.: Mathematical model for making decisions on land-use change. В: Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті: Всеукр. наук.-практ. конф.: зб. Матеріалів, Львів, 57-59 (2008)
88. Gusti, M., Okhremchuk, I.: Accounting for social and sociopolitical factors in global integrated assessment models. В: Обчислювальні методи і системи перетворення інформації: збірник праць IV наук.-техн. конф., Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 133–137 (2016)
89. Густі, М.І., Охремчук, І.А.: Валідація глобальних моделей, які використовують для проведення інтегральної оцінки. В: Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2017 : тези доповідей Дванадцятої міжнародної науково-практичної конференції, Чернігів, ЧНТУ, 116-120 (2017)
90. Густі, М.І.: Вдосконалення модуля прийняття рішень щодо параметрів лісокористування у глобальній моделі лісу G4M (версія для ЄС). В: Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: V міжнр. наук.-практ. конф., праці конференції, Чернівці, 109-110 (2016)
91. Густі, М.І.: Алгоритм оцінки емісії вуглекислого газу при знелісненні болотистих ґрунтів для глобальної геопросторової моделі лісу. В: Матеріали статей П'ятої Міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", Івано-Франківськ, 222-223 (2015)
92. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Прогнозування потенціалу зменшення емісій вуглекислого газу в секторі лісового господарства та змін землекористування. В: Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: IV міжнр. наук.-практ. конф., праці конференції, Чернівці, 126-128 (2015)
93. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Алгоритм лісокористування для моделі «лісового господарства» в Україні. В: Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: IV міжнр. наук.-практ. конф., тези доповідей, Вінниця, 105-107 (2014)
94. Токар, О., Густі, М., Король, М.: Автоматизація збору та обробки даних при дослідженні лісових масивів. В: Праці міжнародної конференції «Комп'ютерні науки та інформаційні технології - 2007», Львів, НУ «ЛП», 214-218 (2007)
95. Бунь, Р.А., Густі, М.І., Кужій, Л.І., Бунь, А.Р.: Комп'ютерна система формування кадастрів викидів парникових газів та оцінки похибок інвентаризацій в енергетичній галузі. В: Матер. 12 міжнар. конф. з автоматичного управління, Харків, НТУ «ХПІ», т. 2, 202-203 (2005)

96. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Застосування інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень щодо пом'якшення глобальної зміни клімату. В: Україна в процесах глобального інформаційного обміну: міжнр. наук.-практ. конф., зб. матеріалів, Львів, 67-69 (2016)
97. Густі, М., Токар, О.: Регіональні особливості екосистем України як джерел і поглиначів парникових газів. В: Інформатизація рекреаційної та туристичної діяльності: Перспективи культурного та економічного розвитку: Праці Другого міжнр. конгресу, Трускавець-Львів, ДНДШ, 175-179 (2003)
98. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Моделювання опцій для пом'якшення зміни клімату в глобальних моделях землекористування. В: 2-й міжнародний конгрес "Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування", збірник матеріалів. "ЗУКЦ", Львів, с.20 (2012)
99. Густі, М.: Математичне моделювання для підтримки прийняття рішень у міжнародних відносинах: досвід застосування глобальної моделі лісу. В: Матеріали II всеукр. наук. конф. «Україна в системі глобального інформаційного обміну: теоретико-методологічні аспекти дослідження і підготовки фахівців», Львів, Ліга-Прес, 37-44 (2013)
100. Густі, М.І., Турковська, О.В.: Географічний підхід до моделювання викидів CO<sub>2</sub> у лісовому господарстві та при зміні землекористування в Україні. В: Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті: III всеукр. наук.-практ. конф., зб. Матеріалів, Львів, 79-84 (2012)
101. Густі, М.: Прогнозування базового рівня емісій CO<sub>2</sub> від лісокористування для країн Європейського Союзу. В: Тринадцята відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук (PSC-IMFS-13), Зб. матеріалів конф., Львів, Вид-во Тараса Сороки, 130-132 (2017)
102. Турковська, О.В., Густі, М.І.: Інформаційні технології для аналізу емісій CO<sub>2</sub> в лісовому господарстві та при зміні землекористування України. В: 10-та наук. конф. ІМФН НУ «Львівська політехніка», зб. матеріалів, Львів, НЗ-Н4 (2012)

*Апробація основних результатів дослідження на конференціях:*

Основні наукові результати та положення дисертації представлені та обговорені на 43 міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах, зокрема: European Geosciences Union General Assembly

Conference (Vienna, Austria, 2008, 2012, 2017) (очна участь, плакат; заочна участь, доповідь співавтора); Дванадцятій міжнародній науково-практичній конференції „Математичне та імітаційне моделювання систем - МОДС 2017” (Чернігів, 2017) (заочна участь, доповідь співавтора); IV науково-технічній конференції „Обчислювальні методи і системи перетворення інформації“ (Львів, 2016) (очна участь, доповідь співавтора); IV та V Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми інформатики та комп’ютерної техніки» (Чернівці, 2015, 2016) (заочна участь, доповідь співавтора); Міжнародній науково-практичній конференції “Україна в процесах глобального інформаційного обміну” (Львів, 2016) (очна участь доповідь); 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions (Cracow, Poland, 2015) (очна участь доповідь); XIV World Forestry Congress (Durban, South Africa, 2015) (заочна участь, доповідь співавтора); П’ятій міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія" (Івано-Франківськ, 2015) (очна участь, доповідь); 17th International Conference of the International Boreal Forest Research Association (IBFRA) “Our Boreal Our Future” (Rovaniemi, Finland, 2015) (заочна участь, доповідь співавтора); A conference in celebration of Howard Raiffa “Systems Analysis 2015” (Laxenburg, Austria, 2015) (заочна участь, плакат); IIASA 40th Anniversary Conference “Worlds Within Reach: From Science To Policy” (Vienna and Laxenburg, Austria, 2012) (заочна участь, плакат); IV міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія” (Вінниця, 2014) (очна участь, доповідь); 6th International Academic Conference of Young Scientists “Computer Science and Engineering 2013” (Lviv, 2013) (заочна участь, доповідь співавтора); 9th International Carbon Dioxide Conference (ICDC-2013) (Beijing, China, 2013) (очна участь, доповідь); International Congress on Environmental Modelling and Software “Managing Resources of a Limited Planet”, Sixth Biennial Meeting (Leipzig, Germany, 2012) (очна участь, доповідь); International Energy Workshop - IEW 2012 (Cape Town, South Africa, 2012) (заочна участь, доповідь співавтора); 2-му міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2012) (заочна участь, доповідь

співавтор); 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011) (Noordwijkerhout, Netherlands, 2011) (очна участь, доповідь); International Conference of the International Boreal Forest Research Association (IBFRA) “Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action” (Krasnoyarsk, Russia, 2011) (заочна участь, доповідь співавтора); 3rd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories (Lviv, 2010) (очна участь, доповідь); 8th International Carbon Dioxide Conference (ICDC-2009) (Jena, Germany, 2009) (очна участь, доповідь); Міжнародній науково-практичній конференції “Сталий розвиток лісового господарства в контексті реалізації Кіотського протоколу в країнах Центральної та Східної Європи” (Київ, 2008) (очна участь, доповідь); Міжнародній конференції „Комп’ютерні науки та інформаційні технології” CSIT'2007 (Львів, 2007) (очна участь, доповідь); ITEE 2007 - Third International ICSC Symposium (Oldenburg, Germany, 2007) (очна участь, доповідь); 2nd International Workshop on Uncertainty of Greenhouse Gas Inventories (Laxenburg, Austria, 2007) (очна участь, доповідь); International Conference on Ecological Modelling 2006 in Yamaguchi (ICEM-2006) (Yamaguchi, Japan, 2006); International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems “ENVIROMIS’2006” (Tomsk, Russia, 2006) (заочна участь, доповідь співавтора); International Conference “Climate Changes and their Impact on Boreal and Temperate Forests” (Ekaterinburg, Russia, 2006) (заочна участь, доповідь співавтора); Second International ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering (Magdeburg, Germany, 2005) (очна участь, доповідь); 12 міжнародній конференції з автоматичного управління (Харків, 2005) (очна участь, доповідь); International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories: Verification, Compliance and Trading (Warsaw, Poland, 2004) (очна участь, доповідь); The Information Society and Enlargement of the European Union: 17th International Conference “Informatics for Environmental Protection” (Cottbus, Germany, 2003) (очна участь, доповідь); Second International Congress “Informatization of Recreation and Tourist Activity: Perspectives of Cultural and Economic Development” (Truskavets, 2003) (очна участь, доповідь); Всеукраїнській науково-практичній

конференції “Україна в процесах глобального інформаційного обміну” (Львів, 2013) (очна участь, доповідь); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (Львів, 2010, 2011, 2012) (очна участь, доповідь); Наукових конференціях ІМФН НУ «Львівська політехніка» (Львів, 2012, 2017) (очна участь, доповідь); Міжвузівській науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (Львів, 2008) (очна участь, доповідь).