

МОЖЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ ГЛОБАЛЬНОЇ МОДЕЛІ GCAM ДО УМОВ УКРАЇНИ: ТОЧНІСТЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН ЗЕМНОГО ПОКРОВУ

Д. В. Зібаров^{1,а}, А. Ю. Шелестов¹

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

Анотація

У роботі досліджено можливості адаптації глобальної моделі GCAM до умов України з метою прогнозування змін земного покрову. Проведено сценарне моделювання, порівняння результатів з офіційною статистикою за 2020 рік та візуалізацію розбіжностей. Показано, що адаптована версія GCAM Ukraine здатна адекватно відтворювати основні просторові та кількісні тренди у землекористуванні та енергетиці, проте потребує регулярного оновлення вхідних параметрів для підвищення відповідності локальним особливостям.

Ключові слова: GCAM, землекористування, сценарне моделювання, MAPE, Україна

Вступ

У сучасних умовах кліматичних змін, екологічної деградації та воєнних подій Україна потребує ефективних інструментів для аналізу й прогнозування змін земного покрову. Однією з таких систем є **глобальна модель GCAM (Global Change Analysis Model)** [1], яка широко використовується для моделювання змін землекористування, енергетичного балансу та кліматичних процесів у довгостроковій перспективі. Метою даного дослідження є оцінка точності глобальної моделі GCAM при прогнозуванні змін земного покрову в Україні на прикладі 2020 року, порівнюючи базовий сценарій GCAM з фактичними статистичними даними Держстату [2]. Дослідження передбачало адаптацію GCAM до умов України (GCAM Ukraine) з урахуванням локальних економічних та кліматичних параметрів.

1. Опис моделі GCAM Ukraine

GCAM (Global Change Analysis Model) – це динамічна стохастична модель рівноважного типу, яка поєднує в собі модулі енергетики, землекористування, водних ресурсів, кліматичної політики та економіки. Вона моделює взаємозв'язки між галузями в рамках сценарного аналізу до 2100 року.

У межах цього дослідження була використана модифікована версія GCAM 5.3, в якій додано окремий регіон *Ukraine*, що дозволило врахувати специфіку місцевої економіки та агросфери.

1.1. Архітектура моделі

GCAM складається з взаємопов'язаних підмодулів:

- **Модуль землекористування (Land-Use Module):** прогнозує розподіл земель між ріллею, лісами, пасовищами, урбанізованими зонами.
- **Модуль енергетики:** враховує виробництво та споживання енергії за джерелами (вугілля, газ, АЕС, ВДЕ).
- **Модуль економіки:** реалізує функцію рівноваги попиту і пропозиції для різних товарів і послуг.
- **Модуль клімату:** генерує сценарії викидів, враховуючи політичні обмеження (наприклад, податки на CO₂).

Кожен модуль оновлюється на кожному часовому кроці (5 років) і взаємодіє з іншими через спільні параметри (наприклад, попит на землю залежить від попиту на біопаливо, який залежить від структури енергетики).

1.2. Математична основа моделі

GCAM вирішує задачу динамічної рівноваги. Цільова функція – максимізація сумарного соціального добробуту:

$$\max \sum_{t=2020}^{2050} \sum_i (P_{i,t} \cdot L_{i,t} - C_{i,t})$$

за обмеженням $\sum_i L_{i,t} \leq L_{\text{total},t},$

де:

- $L_{i,t}$ – площа землі, зайнята культурою або сектором i у році t ,
- $P_{i,t}$ – прибуток від використання землі i ,
- $C_{i,t}$ – витрати (економічні + екологічні) на утримання $L_{i,t}$,
- $L_{\text{total},t}$ – загальний доступний земельний фонд у році t .

^аdmyzib-ipt23@iit.kpi.ua

У моделі враховано:

- **біофізичні обмеження** (продуктивність ґрунтів, кліматичні фактори),
- **ринкові сигнали** (ціни, субсидії, тарифи),
- **політичні сценарії** (наприклад, заборона на вирубку лісів, квоти на CO₂).

1.3. Вихідні показники

GCAM Ukraine генерує дані у форматах *.csv, *.xml та *.NetCDF з такими ключовими результатами:

- площі землекористування по категоріях на кожен рік;
- обсяги виробництва культур і енергії;
- викиди CO₂ і споживання ресурсів;
- структуру енергетичного балансу;
- зведені фінансові показники для аналізу сценаріїв.

Ці результати використовуються для валідації (2020 рік) та формування середньо- і довгострокових прогнозів до 2050 року.

2. Методи

Дослідження ґрунтується на застосуванні інтегрованої моделі GCAM (Global Change Analysis Model), адаптованої до умов України, та охоплює основні етапи що описані нижче.

2.1. Побудова сценаріїв моделювання

Для оцінки потенціалу моделі GCAM в українському контексті було розроблено кілька сценаріїв розвитку землекористування, які відображають різні політичні та економічні стратегії. Базовий сценарій (Business-as-Usual, BAU) передбачає продовження поточних тенденцій без впровадження нових політик або інвестицій, зберігаючи сталу структуру агропромисловості й енергетичного балансу. Альтернативно, сценарій аграрного зростання моделює підвищення агроекспортного потенціалу країни. Сценарій кліматичної політики вводить обмеження на викиди парникових газів, стимулювання відновлюваних джерел енергії та заходи зі збереження лісів.

2.2. Підготовка вхідних даних

Модель GCAM Ukraine базується на поєднанні глобальних і національних джерел даних. Економічний блок формувався на основі показників валового внутрішнього продукту, структури виробництва та цінової динаміки, взятих із баз даних Світового банку та Державної служби статистики України [2].

Для опису структури землекористування використовувалися статистичні щорічники Держстату за 2015–2020 роки [2]. Енергетичний компонент моделі ґрунтувався на офіційних даних Міністерства енергетики України [3].

Кліматичні параметри формувалися на основі відкритих сценаріїв глобальних кліматичних моделей

CMIP6 [4]. Для просторової верифікації змін у земному покриві додатково використовувалися супутникові знімки з місії Sentinel-2 [5].

Усі вхідні дані було нормалізовано та агреговано відповідно до вимог форматів вхідних даних GCAM (*.csv, *.xml, *.gcamdata).

2.3. Адаптація моделі GCAM

Перехід від глобального до регіонального рівня моделювання вимагав низки адаптаційних кроків. У структурі регіонального поділу GCAM було створено окремий регіон **Ukraine**, що дозволило моделі розглядати Україну як самостійного гравця. Налаштовано аграрний сектор, внутрішнє споживання, експортно-імпорتنі параметри, а також зіставлено категорії землекористування зі статистикою Держстату [2].

3. Результати експериментів

З метою перевірки адекватності моделі GCAM Ukraine до регіональних умов було проведено серію експериментів, які охоплювали прогнозування основних показників землекористування та енергетичного балансу на прикладі України. У фокусі дослідження перебували площі сільськогосподарських культур і структура енергогенерації, змодельовані за базовим сценарієм на рік 2020. Кожен експеримент полягав у запуску моделі з узгодженими вхідними параметрами (економіка, клімат, врожайність, енергоспоживання), після чого результати порівнювалися з фактичними статистичними даними, отриманими з відкритих національних джерел, зокрема Держстату [2] та Міненерго [3].

Оцінювання точності здійснювалось як у розрізі окремих культур, так і за агрегованими показниками. Візуалізація результатів дозволила виявити специфіку відхилень моделі у різних секторах.

3.1. Точність прогнозування для аграрних культур (2020 рік)

Культура	GCAM, тис. га	Факт, тис. га	Похибка, %
Пшениця	6800	6595.7	-3.1%
Кукурудза	4800	5431.9	+11.6%
Ячмінь	2800	2395.1	-16.9%
Соняшник	5800	6457.2	+10.2%
Соя	1800	1351.0	-33.2%
Ріпак	800	1126.6	+29.0%

Таблиця 1. Порівняння прогнозу GCAM з фактичними площами культур

3.2. Візуалізація похибок (MAPE)

Аналіз похибок за допомогою метрики середньої абсолютної відносної похибки (MAPE) показав, що найбільші відхилення спостерігаються у випадку культур із високою волатильністю посівних площ, таких як соя та ріпак. Водночас для стратегічних культур, таких як пшениця та кукурудза, похибка залишалася в межах допустимих значень.

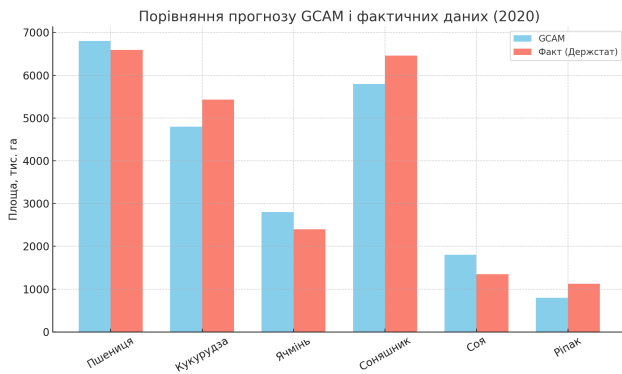


Рис. 1. Порівняння прогнозу GCAM і фактичних даних по аграрних культурах (2020)

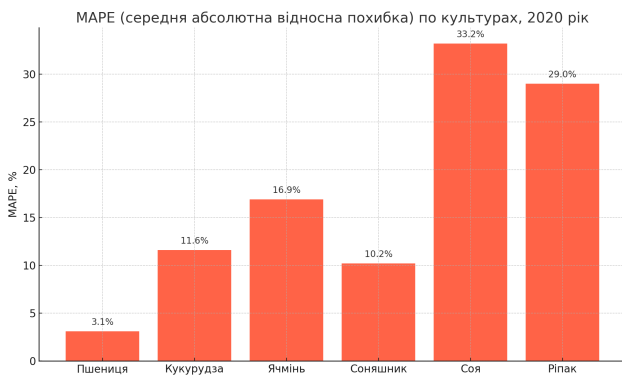


Рис. 2. MAPE (середня абсолютна відносна похибка) по культурах, 2020 рік

3.3. Енергетичний сектор

У рамках того ж експерименту аналізувалась відповідність структури енергогенерації в моделі GCAM реальним даним по Україні. За результатами моделювання прогнозована частка атомної енергетики становила приблизно 50%, що практично збігається з фактичним значенням у 51,2% [3]. Водночас було виявлено переоцінку використання викопного палива, зокрема вугілля та природного газу (на 4% і 2% відповідно), що частково пояснюється інерційністю глобальних сценаріїв розвитку енергетики. Також модель недооцінила реальний розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ): прогнозована частка склала 5%, тоді як за даними Міненерго вона сягала 7,3% [3].

Висновки

Таким чином, у процесі дослідження глобальна модель GCAM була адаптована до умов території України шляхом створення окремого регіону Ukraine, налаштування параметрів сільського господарства,

енергетики та землекористування, а також інтеграції національної статистики у відповідний формат вхідних даних [2, 3].

На основі адаптованої версії моделі було проведено низку експериментів, що дозволили оцінити її ефективність при відтворенні фактичної ситуації на прикладі 2020 року.

По-перше, результати моделювання свідчать про те, що глобальна модель GCAM у локалізованому вигляді є застосовною до задач регіонального рівня – зокрема, для моделювання змін у структурах агровиробництва та енергетичного балансу.

По-друге, модель продемонструвала здатність відносно точно відтворювати розподіл площ під ключовими сільськогосподарськими культурами: середня абсолютна відносна похибка (MAPE) для стратегічних культур (пшениця, кукурудза, соняшник) не перевищувала 12%, а для всіх культур загалом становила в середньому близько 17%. Найбільші похибки виникали у випадку культур із високою волатильністю або слабким впливом цінових сигналів, таких як соя та ріпак.

По-третє, дослідження виявило, що основні обмеження точності моделі пов'язані з недообліком локальної ринкової динаміки, експортної орієнтації окремих культур, а також швидкими змінами в секторі відновлюваної енергетики.

Це вказує на необхідність регулярного оновлення вхідних даних, передусім щорічної аграрної та енергетичної статистики, а також бажаність включення сценаріїв зміни політики.

Отже, адаптована модель GCAM Ukraine може бути використана як основа для системи підтримки прийняття рішень у сфері національного планування землекористування, аграрної політики та екологічного моніторингу – зокрема в рамках роботи Мінагрополітики, Міндовкілля та інших органів державного управління.

Перелік використаних джерел

1. *Institute J. G. C. R.* Global Change Analysis Model (GCAM) Documentation. — 2020. — URL: <https://jgcri.github.io/gcam-doc>.
2. *України Д. служба статистики.* Сільське господарство України – 2020. — Київ : Держстат, 2021.
3. *України М. енергетики.* Звіт за 2020 рік. — 2021. — URL: <https://mev.gov.ua>.
4. *Programme W. C. R.* CMIP6 Datasets. — 2020. — URL: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>.
5. *Agency E. S.* ESA Sentinel-2 Data. — 2020. — URL: <https://sentinel.esa.int>.