



Методи і моделі прогнозування

УДК 519.86:332.15

Бородіна О.М., член-кореспондент НАН України, завідувач відділу
Киризюк С.В., канд. екон. наук, старший науковий співробітник
Яровий В.Д., канд. екон. наук, старший науковий співробітник
Інститут економіки та прогнозування НАН України

Єрмольєв Ю.М., академік НАН України
провідний науковий співробітник Програми прогресивних методів
системного аналізу

Єрмольєва Т.Ю., канд. фіз.-мат. наук
науковий співробітник Програми послуг та управління екосистемами
Міжнародний інститут прикладного системного аналізу
(м. Лаксенбург, Австрія)

МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ЗМІН КЛІМАТУ

Стаття присвячена проблемі моделювання впливу глобальних змін клімату на землекористування на різних рівнях просторових вимірювань. Обґрунтовано можливість застосування рекурсивного алгоритму з використанням методу перехресної ентропії для зміни розмірності агрегованих оцінок землекористування. Здійснено просторові оцінки впливу змін клімату на сільськогосподарське використання земельних ресурсів в Україні відповідно до глобальних трендів землекористування, визначених моделлю GLOBIOM¹.

Ключові слова: землекористування, моделювання, агреговані дані, зміна розмірності.

JEL: C18, Q15, Q54

Вступ. Майбутній розвиток глобальної соціоекономічної системи має високий ступінь невизначеності. Внаслідок зростання рівня глобалізації та інтеграції національних економік виникнення негативних явищ в окремих з них впливає на інші регіони та світову економіку загалом. За цих умов проблема надійності розвитку сільськогосподарського виробництва вимагає особливого ставлення, зважаючи на високу достовірність прогнозів щодо зростання попиту на продовольство у світі. Усі розроблені сценарії глобального розвитку виходять із прогнозів прискореного зростання кількості населення на планеті до 2050 року, що розглядають як основний фактор впливу на формування попиту на продовольство у світі. Іншим ключовим фактором називають підвищення добробуту населення в країнах, що розвиваються. Саме ці чинники відіграватимуть ключову роль у посиленні тиску на обмежені природні ресурси – головним чином, земельні й водні.

Продуктивність та ефективність використання природних ресурсів значною мірою залежить від рівня технологій, проте фінансові можливості для їх впровадження у переважній кількості країн досить обмежені, що робить їх залежними винятково від сприятливості погодно-кліматичних факторів.

Глобальне потепління як основний прояв змін клімату на планеті прямо впливає на продуктивність та можливості використання природних ресурсів для задоволення продовольчих потреб. Результати цього впливу значно різняться залежно від регіону.

¹ Публікація підготовлена в рамках виконання спільного проекту НАН України та IIASA "Комплексне моделювання управління безпечним використанням продовольчих, водних і енергетичних ресурсів з метою сталого соціального, економічного і екологічного розвитку" (№ держреєстрації 0112U002643).

Загалом у просторовому контексті у північній півкулі він носить переважно позитивний характер, а у південній – агровиробники стикаються з додатковими ризиками та викликами. Відповідно до прогнозів різних науково-експертних груп дихотомія впливу кліматичних змін на сільське господарство у перспективі лише посилюватиметься. Враховуючи різні масштаби землекористування у сільськогосподарській діяльності в регіонах, де переважатимуть позитивні та негативні наслідки впливу змін клімату, перед глобальної господарською системою постає важлива проблема – ефективного використання земельних ресурсів з метою задоволення попиту та підтримки стабільності пропозиції продовольства.

Крім просторового аспекту землекористування, в умовах глобальних змін клімату постане проблема перерозподілу земельних ресурсів за видами їх господарського використання відповідно до змін попиту на сільськогосподарську продукцію і продовольство. Наприклад, задоволення прогнозованого підвищення попиту на тваринну продукцію може відбуватися за різними сценаріями зміни землекористування: за рахунок розширення площ пасовищ, збільшення посівів фуражних культур на орних землях та ін. Пошук ефективного рішення – досить складний процес, який вимагає системного підходу до моделювання, враховуючи велику кількість взаємозалежних факторів: продуктивність різних типів землекористування, просторову віддаленість точок виробництва та споживання продукції, можливості міжрегіональної торгівлі, вартість транспортування продукції тощо.

Розподіл продуктивних сил між країнами та регіонами досить нерівномірний, унаслідок чого одні країни мають значні надлишки продовольства, інші – відчують його брак. Відомо, що крім наявності ресурсів, важливим є їх продуктивне використання, що залежить від розвитку технологій і систем менеджменту як складової продуктивних сил. Саме завдяки високому рівню впровадження прогресивних технологій та систем управління США, країни – лідери ЄС (Німеччина, Франція) є провідними виробниками продовольства у світі. Розрив у продуктивності сільськогосподарських систем цих країн порівняно з іншими досягає подекуди п'ятикратної різниці. В умовах глобальних кліматичних змін завдяки впровадженню новітніх технологій (наприклад, точного землеробства, крапельного зрошування та ін.) можна мінімізувати виробничі ризики і гарантувати стабільність пропозиції продовольства. Проте їх застосування вимагає значних фінансових ресурсів, підвищення рівня знань та менеджменту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На рубежі третього тисячоліття проблема моделювання землекористування, враховуючи вплив глобальних змін клімату та зростання продовольчих потреб, стала однією з найактуальніших через її глобальний вимір, високий рівень невизначеності та просторово-географічну диференціацію. За останні два десятиріччя було розроблено низку просторових моделей рослинного покриву та землекористування з метою оцінки ймовірних майбутніх змін на глобальному та регіональному рівнях [1–6]. Регіональні моделі враховують безліч важливих особливостей та динамічних змін у господарських системах, як правило, такого рівня деталізації немає у глобальних моделях, які, у свою чергу, наділені власними перевагами. Цінність результатів глобальних моделей розвитку економічних секторів у межах усієї планети досить висока, оскільки дозволяє врахувати потенціал та участь окремої економіки у задоволенні глобального попиту, зважаючи на оптимальне використання обмежених природних ресурсів, розміщених у різних куточках світу, та можливостей міжнародного торговельного обміну. Проте агреговані результати моделювання глобальних змін землекористування потребують їх узгодження з локальними, регіональними та національними сценаріями розвитку.

З огляду на зазначене **метою статті** є оцінка змін у сільськогосподарському землекористуванні в Україні внаслідок впливу змін клімату та потреби задоволення глобального попиту на продовольство в умовах необхідності забезпечення сталого й безпечного використання обмежених земельних ресурсів.



Методи і моделі прогнозування

Виклад основного матеріалу. У Міжнародному інституті прикладного системного аналізу (Австрія) розроблено модель GLOBIOM для прогнозування землекористування в умовах глобальних змін клімату. Це – глобальна динамічна модель часткової рівноваги, яка об'єднує сільське господарство, біоенергетику та лісове господарство як основні сектори економіки, для яких головним виробничим ресурсом є земля, відображаючи різні аспекти зміни землекористування:

- регіональний розподіл – прогноз зміни землекористування у розрізі 30 агрегованих районів та країн (країни СНД, США, Бразилія, Китай та ін.);
- розподіл за типами землекористування – зміна типу функціонального використання земельних ресурсів: рілля, пасовища, три типи лісового господарства, інші природні землі;
- розподіл за видами сільськогосподарської продукції – в моделі включено понад 20 видів рослинницької продукції, що покриває понад 80% загальної посівної площі у світі, та основні види тваринницької продукції;
- розподіл за системами менеджменту та технологій – виробництво сільськогосподарської продукції розподіляється за типами технологій, що застосовуються у сільському господарстві: інтенсивне богарне виробництво, богарне виробництво, іригаційне виробництво, аграрне виробництво домогосподарств [7].

Модель GLOBIOM прогнозує зміни виділених типів землекористування, базуючись на доступних земельних ресурсах, у глобальному масштабі за виділеними просторовими одиницями – об'єднаними регіонами та окремими країнами. Конкуренція між формами землекористування (за типами землекористування, видами сільськогосподарської продукції та системами менеджменту) ґрунтується на порівнянні продуктивності та економічної ефективності культивування різних культур і виробництва тваринницької продукції, враховуючи необхідність задоволення глобального попиту на кожен вид. При цьому в моделі реалізовано низку обмежень з метою збереження екологічної стабільності існуючих природно-господарських систем: захищених законом типів землекористування (наприклад національних парків), попередження надмірної концентрації окремих сільськогосподарських культур у структурі посівних площ (зокрема так званих "cash-crops").

Оскільки модель GLOBIOM генерує прогнози обсягів землекористування визначеного масштабу (для 30 агрегованих регіонів), її безпосереднє використання в цілях просторового розвитку на національному рівні було обмеженим. Вирішення цієї проблеми було запропоновано на основі використання методу розукрупнення даних "downscaling" [8]. Суть його полягає у знаходженні спеціального коефіцієнта, який пояснює розподіл землекористування у просторовій одиниці.

У моделі GLOBIOM прогноз (покрокові десятирічні прогнози до 2100 р.) площ певного типу i землекористування A_{ir}^t у регіоні r визначається, зважаючи на інформацію про його обсяг у базовому періоді $t-1$ та розрахованих моделлю усіх можливих трансформацій землекористування ΔA_{ijr}^t та ΔA_{jir}^t :

$$A_{ir}^t = A_{ir}^{t-1} + \sum_j \Delta A_{ijr}^t - \sum_j \Delta A_{jir}^t, \quad (1)$$

де $\sum_j \Delta A_{ijr}^t$ – загальна площа зміни землекористування з типу i до j ; $\sum_j \Delta A_{jir}^t$ – загальна площа зміни землекористування з типу j до i для всіх типів землекористування $j \neq i$, $j = \overline{1, n}$.

При цьому прогноз змін землекористування i з урахуванням усіх можливих перетворень ($i \rightarrow j$ та $j \rightarrow i$) не повинен перевищувати загальну площу доступних земельних ресурсів L_r у регіоні r :

$$\sum_{i=1}^m \left(A_{ir}^{t-1} + \sum_j \Delta A_{ijr}^t - \sum_j \Delta A_{jir}^t \right) \leq L_r. \quad (2)$$

Для того щоб перейти від агрегованих показників землекористування в регіоні r , розрахованих у GLOBIOM, до просторових одиниць меншого масштабу l (наприклад, комірки розміром 5'), можна використати дані про фактичний стан землекористування A_{ilr}^t у просторових одиницях l у базовому періоді часу $t = 1$, отримані з GLC 2000 (Global Land Cover) [9]. Прогнози землекористування A_{ilr}^t у просторовій одиниці l у майбутньому ($t > 1$) розраховуються на основі рівняння (1) шляхом підстановки і знаходження коефіцієнта z_{ijlr}^t , який пояснює частку сукупної зміни землекористування ΔA_{ijr}^t у регіоні r , що має місце у просторовій одиниці l , розташованій у цьому регіоні (зміни типу землекористування з i до j в просторовій одиниці l , $l = \overline{1:m}$, для всіх $i, j = \overline{1:n}$, $r = \overline{1:R}$, $t = \overline{1:T}$):

$$\sum_l z_{ijlr}^t = 1, \quad z_{ijlr}^t \geq 0 \quad (3)$$

Таким чином, рівняння (1) може бути записане:

$$A_{ilr}^t = A_{ilr}^{t-1} + \sum_l z_{ijlr}^t \Delta A_{ijr}^t - \sum_l z_{jilr}^t \Delta A_{jir}^t, \quad (4)$$

де A_{ilr}^t – площа землекористування типу i у просторовій одиниці l регіону r у період часу t ; $z_{ijlr}^t \Delta A_{ijr}^t$ – частка сукупної зміни ΔA_{ijr}^t землекористування з типу i до j у регіоні r й $z_{jilr}^t \Delta A_{jir}^t$ – частка сукупної зміни ΔA_{jir}^t землекористування j до i в регіоні r , для всіх $j \neq i$ у просторовій одиниці l регіону r у період часу t . При цьому сума всіх типів землекористування i у просторовій одиниці l не може перевищувати площу доступних земельних ресурсів L_{lr} у цій просторовій одиниці:

$$\sum_{i=1}^m A_{ilr}^t \leq L_{lr}. \quad (5)$$

Для того щоб розрахувати невідомі коефіцієнти z_{ijlr}^t , можна використати доступні дані в просторовій одиниці l , тобто використати попередньо відомий (апріорний) розподіл землекористування q_{ijlr}^t , що характеризує його реальний стан z_{ijlr}^t . Таким чином, пошук коефіцієнтів z_{ijlr}^t зводиться до розв'язання системи рівнянь (3–5) та мінімізації функції з використанням методу перехресної ентропії:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^m \left(z_{ijlr}^t \ln(z_{ijlr}^t / q_{ijlr}^t) \right), \quad (6)$$

де $q_{ijlr}^t > 0$, $\sum_l q_{ijlr}^t = 1$ – апіорний (теоретично зумовлений) розподіл z_{ijlr}^t .

За умов ринкової економіки апіорний розподіл q_{ijlr}^t може бути визначений на основі оцінки результативності господарської діяльності певного типу землекористування у відповідній просторовій одиниці. За умови відсутності такої інформації апіорний розподіл може визначатися, виходячи з просторової доступності конкретної просторової одиниці – відстані до ринків збуту, розвитку транспортної логістики тощо. Тож, загалом q_{ijlr}^t може бути розрахований таким чином:

$$q_{ijlr}^t = \frac{\varphi_{lr}^t P_{jr}^t y_{jlr}^t A_{jlr}^{t-1}}{\sum_l \varphi_{lr}^t P_{jr}^t y_{jlr}^t A_{jlr}^{t-1}}, \quad (7)$$

де y_{jlr}^t – продуктивність (наприклад урожайність) типу землекористування j у просторовій одиниці l у певний період часу t ; P_{jr}^t – ціна продукції, виробленої за певного типу землекористування j у період часу t в регіоні r ; A_{jlr}^{t-1} – загальна площа певного типу землекористування j , у просторовій одиниці l у попередній період часу $t-1$; φ_{lr}^t – коефіцієнт, що відображає просторові взаємозалежності, зокрема, обсяг, концентрацію попиту та ринкову доступність у відповідній просторовій одиниці l .

Описана вище методика визначення апіорних розподілів використовується нами для зменшення розмірності отриманих за допомогою GLOBIOM результатів моделювання землекористування для 30 агрегованих регіонів у перспективі (до 2100 р.) під впливом глобальних кліматичних змін за різних сценаріїв соціально-економічних трансформацій (SSPs²) до рівня просторових одиниць необхідного масштабу, використовуючи можливі зміни типів землекористування, передбачені в моделі GLOBIOM (табл. 1).

Таблиця 1

Матриця можливих трансформацій типів землекористування в моделі GLOBIOM

Трансформація "з/у"	Рілля	Пасовища	Суспільні лісові ресурси	Природні лісові ресурси	SRF*	Інші землі
Рілля		a			b	
Пасовища	c				d	
Суспільні лісові ресурси						
Природні лісові ресурси			e			
SRF						
Інші землі	f	g			h	

* Short Rotation Forestry (швидкоростучі породи дерев).

Джерело: Havlik P., Schneider U., Schmid E., Böttcher H., Fritz S., Skalsky R., Aoki K., De Cara S., Kindermann G., Kraхner F., Leduc S., McCallum I., Mosnier A., Sauer T., Obersteiner M. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets // Energy policy. – 2011. – № 39. – P. 5690–5702.

Трансформація ріллі у пасовища (табл. 1 – (a)) можлива на тих територіях, де виробництво сільськогосподарських культур є неефективним з точки зору ринкових законів, а саме: потенційно досяжна урожайність культур на цих територіях є мінімальною, а витрати вирощування максимальними; до того ж територія досить віддалена від ринків збуту продукції. Натомість продуктивність пасовищ на цих територіях має бути досить високою і супроводжуватись зростанням попиту на них унаслідок

² Shared Socio-economic Pathways.

розвитку скотарства. Беручи ці припущення до уваги, розподіл імовірності трансформації землекористування "рілля → пасовища" може бути представлений у вигляді:

$$q_{l,r,CropL_GrassL}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1} (\Pi_{lr}^t)^{-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1} (\Pi_{lr}^t)^{-1})}, \quad (8)$$

де $\Pi_{lr}^t = \sum_s P_{jr}^t y_{slr}^t A_{slr}^{t-1}$ – загальна вартість виробленої продукції усіх сільськогосподарських культур $s = 1, 2, \dots$ у просторовій одиниці l регіону r у період часу $t - 1$, $y_{Grass,l,r}^t$ – продуктивність пасовищ, а $A_{Grass,l,r}^{t-1}$ – площа пасовищ у просторовій одиниці l регіону r у період часу $t - 1$.

Коефіцієнт φ_{lr}^t відображає ринкову доступність просторової одиниці й розраховується на основі порівняння нормалізованих витрат на транспортування продукції від місця виробництва до найближчого пункту її збуту:

$$\varphi_{lr}^t = \frac{T_{lr}^t - T_{minr}^t}{T_{maxr}^t - T_{minr}^t}, \quad (9)$$

де T_{lr}^t – середні транспортні витрати доставки продукції з просторової одиниці l (регіону r у період часу t) до найближчого ринку збуту.

З рівняння (8) слідує, що площі ріллі з найнижчою вартістю вирощеної продукції на них найбільш імовірно можуть бути піддані зміні їх функціонального призначення.

Обмеженість земельних ресурсів породжує конкурентну боротьбу з метою використання їх у тому чи іншому виді діяльності. Зростання світового попиту (особливо у розвинених країнах, зокрема ЄС) на відновлювальні джерела енергії посилює цю конкурентну боротьбу. Зокрема, ідеться про вирощування швидкорослих порід дерев (SRF). Перевагою SRF є те, що такі породи дерев добре ростуть на неродючих або занедбаних землях: найкраще для їх культивування підійдуть піщані, супіщані, глинисті ґрунти з рівнем рН 5,5–6,5. Проте вимоги до водозабезпечення при SRF досить високі – не менше 500 мм опадів на рік. Економічна ефективність SRF оцінюється у 90–300 євро прибутку з га (враховуючи транспортні витрати), проте від посадки дерев до отримання першого врожаю знадобиться мінімум 5–8 років. Крім економічних вигід, SRF має ряд позитивних екологічних впливів: очищення забруднених важкими металами ґрунтів, поглинання вуглекислого газу тощо [10]. З огляду на зазначені конкурентні переваги SRF моделювання трансформації землекористування "рілля → SRF" повинна бути обґрунтована, з одного боку, низькою економічною доцільністю використання цих площ для вирощування сільськогосподарських культур, а з іншого – високим попитом на біосировину та наявністю розвинутої транспортної інфраструктури, що математично виглядає таким чином:

$$q_{l,r,CropL_Plt}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1} (\Pi_{lr}^t)^{-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1} (\Pi_{lr}^t)^{-1})}, \quad (10)$$

де $y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1}$ – валовий збір деревної сировини у просторовій одиниці l регіону r у період часу t .

Що стосується зміни використання пасовищ, то в моделі GLOBIOM імовірними розглядаються два сценарії: використання їх для вирощування сільськогосподарських

культур (ріллі) та SRF (табл. 1 – (с) та (d) відповідно). Ймовірність розорення пасовищ у моделі обґрунтовується на основі економічної ефективності використання землі для вирощування сільськогосподарської продукції (11), а трансформація пасовищ для вирощування енергетичних лісових ресурсів може бути обумовлена їх деградацією і зниженням продуктивності, з одного боку, та близькістю розміщення до об'єктів переробки, що мають розвинене дорожнє сполучення – з іншого (12):

$$q_{l,r,GrassL_CropL}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t (y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1})^{-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t (y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1})^{-1})}, \quad (11)$$

$$q_{l,r,GrassL_Plt}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1} (y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1})^{-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1} (y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1})^{-1})}, \quad (12)$$

Таким чином, з рівнянь (11–12) слідує, що нижче значення продуктивності пасовищ у порівнянні з іншими типами землекористування дає підстави для зміни їх функціонального використання.

Ймовірність включення інших природних земель у сільськогосподарське виробництво (трансформація у категорію ріллі) залежить насамперед від природної продуктивності та розвиненості дорожньо-транспортної інфраструктури – тобто економічної результативності використання землі як орної (табл. 1 – (f), (13). У свою чергу доцільність трансформації використання інших природних земель у пасовища (табл. 1 – (g)) та для вирощування енергетичних порід дерев (табл. 1 – (h)) визначається на основі потенційної продуктивності пасовищ (14) та SRF (15) з урахуванням дорожньої доступності та віддаленості просторових одиниць від основних пунктів постачання та переробки виробленої на них продукції:

$$q_{l,r,OthL_CropL}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t)} \quad (13)$$

$$q_{l,r,OthL_GrassL}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1})} \quad (14)$$

$$q_{l,r,OthL_Plt}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1})} \quad (15)$$

У моделі GLOBIOM також закладено можливість відведення природних лісових систем для суспільних цілей, що, як правило, обґрунтовано необхідністю збереження природного біорізноманіття, створення місць громадського користування тощо (наприклад, національних парків, заказників та ін., табл. 1 – (e)). Прийнятність такої трансформації більш доцільна на територіях з високим ступенем лісистості, а також наявною мінімально необхідною дорожньо-транспортною інфраструктурою:

$$q_{l,r,NonMForesL_MForesL}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} A_{NonMForesL,r}^{t-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} A_{NonMForesL,r}^{t-1})}, \quad (16)$$

де $A_{NonMForest,l,r}^{t-1}$ – площа лісових ресурсів у просторовій одиниці l регіону r у період часу $t - 1$.

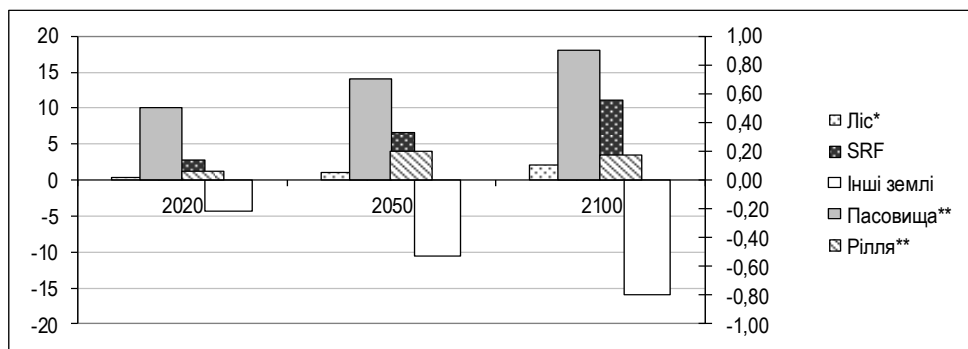
Таким чином, застосування методології downscaling дає можливість проектування прогнозів землекористування під впливом глобальних змін клімату на досить малі просторові одиниці з урахуванням особливостей і тенденцій макроекономічного та локального соціоекономічного розвитку, які, як правило, не відображені в глобальних моделях, зокрема у GLOBIOM.

Використовуючи методологію, описану вище (функцію мінімізації (6) за умови дотримання обмежень (3–5) на основі апріорних розподілів (8, 10–16)), проводилися розрахунки змін землекористування в Україні за просторовими одиницями l відповідно до агрегованих прогнозів зміни типів землекористування до 2100 р. з кроком у 10 років, змодельованих у моделі GLOBIOM. Для зручності використання результатів моделювання при обґрунтуванні локальних (наприклад на рівні районів) чи регіональних стратегій розвитку основних галузей землекористування (сільського та лісового господарства зокрема) отримані результати були приведені у відповідність до прийнятої практики просторового управління – тобто до діючого адміністративно-територіального устрою в Україні (районного рівня):

$$A_{idr}^t = \sum_{l=1}^n \gamma_{ild} A_{ilr}^t \quad (17)$$

де A_{idr}^t – площа i типу землекористування в адміністративній одиниці d , регіону r у період часу t , $d = \overline{1:D}$ (для України: в районах $D=490$); γ_{ild} – частка i типу землекористування у просторовій одиниці l , $l \in d$.

Задоволення глобального попиту на продовольство в умовах змін клімату може дещо впливати на зміну просторового землекористування в сільському господарстві України. Сукупні зміни землекористування в Україні відповідно до глобальних прогнозів моделі GLOBIOM представлені на рис. 1.



* Природні та суспільні лісові ресурси; ** права шкала.

Рис. 1. Прогнози зміни площ землекористування в Україні за їх типами, % від базового року (2010 р.)

Джерело: власні розрахунки авторів.

Відповідно до даних, представлених на рис. 1, у майбутньому в Україні прогнозується незначне розширення господарського використання земельних ресурсів переважно за рахунок площ земель, віднесених до категорії "інші землі" (луки, перелogi, заболочені території та ін.): до 2020 р. прогнозується, що близько 5% "інших земель" будуть задіяні у сільськогосподарському виробництві (як рілля, пасовища чи SRF); до

2050 р. ця цифра становитиме 10,5%, а до кінця століття – майже 16%. Загальна площа ріллі згідно з прогнозами змінюватиметься найменше: максимальне збільшення може мати місце у середині століття – лише 0,2% від базового року, що становить приблизно 65 тис га. Для типів землекористування "пасовища", "ліс" (природний та культивованний) і "SRF" (швидкоростучі енергетичні породи дерев) очікується стала тенденція нарощування їх площ в Україні протягом століття. При цьому найбільші відсоткові зміни матимуть місце саме для типу землекористування "SRF", проте, враховуючи надзвичайно низькі абсолютні значення у базовому році, розширення площ під енергетичними породами дерев загалом суттєво не впливатиме на перерозподіл земельних ресурсів у структурі землекористування в Україні. Що стосується лісових ресурсів, то до 2100 р. їх площі в Україні можуть зрости на 2% (на понад 210 тис. га).

Оцінюючи тенденції та масштаби змін типів землекористування в Україні у XXI ст., можна говорити в цілому про незначне посилення господарського навантаження на земельні ресурси на національному рівні, що проявлятиметься, головним чином, через збільшення площі земель, задіяних для виробництва рослинницької продукції. Разом із тим позитивною з об'єктивних причин (оскільки сприятиме екологічному збалансуванню структури використання земельних ресурсів) можна розглядати тенденцію щодо збільшення площ пасовищ та лісових масивів.

Незважаючи на незначні сукупні зміни площі ріллі в Україні, згенеровані в моделі GLOBIOM, усе ж матимуть місце деякі важливі з точки зору безпечного землекористування просторові відмінності (рис. 2).

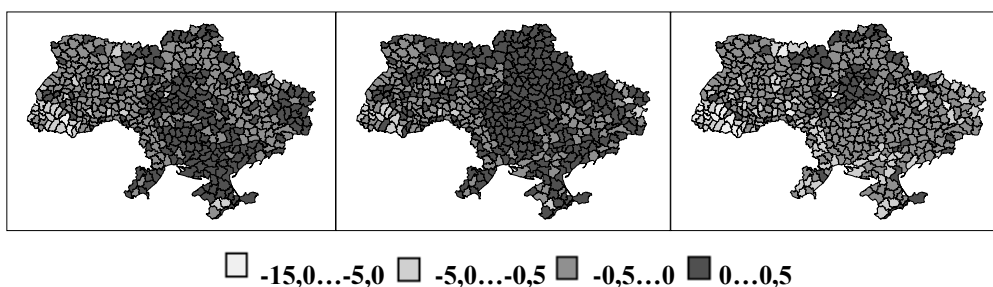


Рис. 2. Прогноз зміни площі ріллі в Україні у перспективі (2020, 2050 та 2100 рр. – зліва направо), % від базового року

Джерело: власні розрахунки авторів.

Як уже згадувалося вище, до середини століття прогнозується найбільше підвищення потреби у ріллі – 0,2% від базового періоду. При цьому економічно обґрунтованим рішенням моделі пропонується збільшення площ ріллі в межах до 0,5% від базового періоду в центральній та північно-східній частинах України, а також у північній частині Центрального Полісся, тоді як у переважній частині Західного регіону доцільним буде незначне зменшення площ орних земель – до -0,5%. Якщо аналізувати рішення моделі для найближчої перспективи (2020 р.), то як доцільне рішення пропонується незначне збільшення площ ріллі (до 0,5%) у районах, що практично суцільним масивом охоплюють Миколаївську, Херсонську, Кіровоградську та Черкаську, а також Луганську області. Такий сценарій виглядає цілком очевидним, враховуючи плани уряду України та профільного міністерства щодо відновлення та розвитку іригаційних систем на півдні країни на площі 1–1,1 млн га [11]. У далекій перспективі (до 2100 р.) доцільність розширення площ ріллі прогнозується як рішення лише для незначної кількості районів Північно-Центрального Полісся та районів Черкаської та Полтавської областей у басейні річки Дніпро. При цьому збільшиться кількість районів, де внаслідок низької економічної доцільності сільськогосподарського виробництва пропонується суттєво зменшити площі ріллі (до -5 та до -15% від базового періоду).

Оцінюючи потенційні зміни площ ріллі у розрізі районів України, відзначимо, що в цілому зростання глобального попиту на продовольство серйозних загроз землекористуванню в Україні не несе, принаймні до 2050 р.: доцільний перерозподіл площ ріллі у переважній кількості районів коливатиметься в межах $-0,5...+0,5\%$ від рівня базового періоду. Проте в районах з надзвичайно високим рівнем розораності (переважно південні регіони) навіть таке незначне збільшення площі ріллі повинно супроводжуватись виваженими управлінськими рішеннями й компенсуватись відповідними агроекологічними заходами, спрямованими на захист земельних ресурсів.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Підсумовуючи, зазначимо, що в умовах глобальних змін клімату підвищення попиту на природні ресурси для задоволення зростаючої потреби у продовольстві супроводжуватиметься суттєвим перерозподілом продуктивних сил на планеті. На природний потенціал України (головним чином земельний) покладаються великі сподівання щодо вирішення глобальних продовольчих проблем. Оскільки прогнозується значне підвищення продуктивності сільськогосподарської діяльності на більшій території країни під впливом змін клімату, задоволення глобального продовольчого попиту несуттєво вплине на зміну обсягів і структури землекористування в Україні за умови збереження існуючих тенденцій у сільському господарстві (форм господарювання, технологій тощо). Розширення господарського використання природних земель пропонується здійснювати в напрямі розширення лісових масивів, у тому числі енергетичних порід дерев, і пасовищ. Це сприятиме сталому й безпечному використанню земельних ресурсів і підвищенню екологічної стійкості природно-господарських систем. Певні ризики регіональної диференціації сільськогосподарського навантаження на земельні ресурси можуть мати місце в центральних та північно-східних регіонах України внаслідок незначного підвищення площі орних земель. Проте отримані результати моделювання базуються на базовому сценарії, який не передбачає кардинальних техніко-технологічних змін. Глобальні результати моделювання землекористування свідчать, що за умови реалізації сценарію розширення доступу до іригаційних систем можна зменшити потребу в орних землях як мінімум на 2–3%. Реалізація такого сценарію в Україні може бути ще ефективнішою, проте достовірність моделювання обмежена відсутністю повноцінної інформації про реальний стан іригаційних систем, вартість і доступність водних ресурсів тощо. Саме цей аспект стане ключовим у майбутніх дослідженнях.

Крім цього, точність результатів моделювання та узгодження глобальних і локальних прогнозів залежить від достовірності використовуваних карт рослинного покриву та землекористування. Порівняння результативності використання альтернативних карт землекористування (зокрема, GLC2000, MODIS2000, GLOBCOVER2000) та методик дезагрегації даних може бути предметом окремого дослідження в найближчій перспективі.

Список використаних джерел

1. Agarwal C., Green G.M., Grove J.M., Evans T.P., Schweik C.M. A Review and assessment of land-use change models: Dynamics of space, time, and human choice. General Technical Report NE-297. – USDA Forest Service, 11 Campus B, Delaware, US, 2002. – 67 p.
2. Britz W., Verburg P. H., Leip A. Modelling of land cover and agricultural change in Europe: Combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches // *Agr. Ecosyst. Environ.* – 2011. – № 142. – P. 40–50.
3. Chomitz K. M., Gray D. A. Roads, land use, and deforestation: a spatial model applied to Belize // *World Bank Econ. Rev.* – 1996. – № 10. – P. 487–512.
4. Dietrich J. P., Schmitz C., Lotze-Campen H., Popp A., Müller C. Forecasting technological change in agriculture - An endogenous implementation in a global land use model // *Technol. Forecast. Soc.* – 2014. – № 81. – P. 236–249.
5. Heubes J., Schmidt M., Stuch B., Márquez J. R. G., Wittig R., Zizka G., Thiombiano A., Sinsin B., Schaldach R., Hahn K. The projected impact of climate and land use change on plant diversity: An example from West Africa // *J. Arid Environ.* – 2013. – № 96. – P. 48–54.



Методи і моделі прогнозування

6. Lambin E. F., Meyfroidt P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity // P. Natl. Acad. Sci. USA– 2011. – № 108. – P. 3465–3472.
7. Havlik P., Schneider U., Schmid E., Böttcher H., Fritz S., Skalsky R., Aoki K., De Cara S., Kindermann G., Kraxner F., Leduc S., McCallum I., Mosnier A., Sauer T., Obersteiner M. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets // Energy policy. – 2011. – № 39. – P. 5690–5702.
8. Zhang X, Ermolieva T, Balkovic J, Mosnier A, Kraxner F, Liu J. Recursive cross-entropy downscaling model for spatially explicit future land uses: A case study of the Heihe River Basin // Physics and Chemistry of the Earth. – Parts A/B/C, 89-90:56-64.
9. Skalsky R., Tarasovic`ova` Z., Balkovic` J., Schmid E., Fuchs M., Moltchanova E., Kindermann G., Scholtz P. Geo-bene global database for bio-physical modeling v. 1.0. Concepts, methodologies and data [Електронний ресурс] // IIASA, Technical Report. – 2008. – 58 p. – Доступний з : [http://www.geo-bene.eu/files/Deliverables/Geo-BeneGlbDb10\(DataDescription\).pdf](http://www.geo-bene.eu/files/Deliverables/Geo-BeneGlbDb10(DataDescription).pdf)
10. Шанси для безстрашних: енергетична перспектива деревини [Електронний ресурс] // Український лісовод. – Доступний з : <http://www.lesovod.org.ua/node/3014>
11. Мінагрополітики спільно зі Світовим банком опрацьовує Стратегію відновлення зрошення на Півдні України, – заступник міністра [Електронний ресурс] // Урядовий портал ; Головна ; Новини ; Міністерств та відомств. – Доступний з : http://www.kmu.gov.ua/control/uk/publish/article?art_id=248828800&cat_id=244277212

Надійшла до редакції 11.03.2016 р.

Бородина Е.Н., член-корр. НАН України
заведующая отделом

Киричук С.В., канд. екон. наук, старший научный сотрудник

Яровой В.Д., канд. екон. наук, старший научный сотрудник

Институт экономики и прогнозирования НАН Украины

Ермольев Ю.М., академик НАН Украины

ведущий научный сотрудник Программы прогрессивных методов системного анализа

Ермольева Т.Ю., канд. физ.-мат. наук

научный сотрудник Программы по услугам и управлению экосистемами

Международный институт прикладного системного анализа (г. Лаксембург, Австрия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Статья посвящена проблеме моделирования влияния глобальных изменений климата на землепользование на разных уровнях пространственных измерений. Обоснована возможность использования рекурсивного алгоритма с применением метода перекрестной энтропии для изменения разрешения агрегированных оценок землепользования. Осуществлены пространственные оценки влияния изменений климата на сельскохозяйственное использование земельных ресурсов в Украине в соответствии с глобальными тенденциями землепользования, которые определены с помощью модели GLOBIUM.

Ключевые слова: землепользование, моделирование, агрегированные данные, изменение разрешения.

Olena Borodina, Doctor in Economics, Corresponding Member of NAS of Ukraine

Sergii Kyryziuk, PhD in Economics

Victor Yarovi, PhD in Economics

Institute for Economics and Forecasting, NAS of Ukraine

Yuriy Ermoliev, Academician of the NAS of Ukraine

Tatiana Ermolieva, PhD in Physics and Mathematics

International Institute for Applied System Analysis

MODELING LOCAL LAND USES UNDER THE GLOBAL CLIMATE CHANGE

The interdependencies among land use systems at national and international levels motivate the development of global land use models facilitating the analysis of the trends of plausible future land use under the conditions of increasing population and climate change for environmental and food security purposes. Computational complexity of such models limits the land use projections to aggregate levels which give no clue regarding the potentially critical local heterogeneities. Improving these projections at fine resolutions requires new methods of systems analysis for integrating land use models at different scales. For that purpose, we have proposed a dynamic cross-entropy based proba-

bilistic downscaling model which facilitates to obtain future aggregate land use projections from global models (e.g. GLOBIOM) to finer resolutions. The proposed procedure allows incorporating data received from different sources, such as satellite images, statistics, and expert opinions, as well as data from global land use models.

Using downscaling procedure, we estimate future impacts of global climate changes on the land use in Ukraine (on the rayon level) in accordance with the aggregated results of GLOBIOM modeling. They indicate some growth of pressure on land resources in Ukraine associated with the satisfaction of the increasing global demands for foods and biofuels. On the one side, the model forecasts a small growth of demand (0.2%) for arable land by the middle of the XXI century. At the national level, it doesn't pose any serious threats, but, on the case regional level, it can lead to certain ecological risks (in the oblasts with an extremely high share of arable land). On the other side, the model also predicts some growth of the demand for forests, including SRF, and pastures. These changes could have some positive effect by supporting safety and sustainable land use in Ukraine.

Further investigations will be oriented to comparing the results of modeling based on different available maps of land cover and land use (GLC2000, MODIS2000, GLOBCOVER2000) and to estimating the land demand under different scenarios of agriculture improvements (technology, management etc.).

Keywords: land use, modeling, aggregated data, downscaling.

References

1. Agarwal, C., Green, G.M., Grove, J.M., Evans, T.P., Schweik, C.M. (2002). A Review and assessment of land-use change models: Dynamics of space, time, and human choice. General Technical Report NE-297. USDA Forest Service, 11 Campus B, Delaware, US [in English].
2. Britz, W., Verburg, P. H., Leip, A. (2011). Modelling of land cover and agricultural change in Europe: Combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 142, 40–50 [in English].
3. Chomitz, K. M., Gray, D. A. (1996). Roads, land use, and deforestation: a spatial model applied to Belize. *World Bank Econ. Rev.*, 10, 487–512 [in English].
4. Dietrich, J. P., Schmitz, C., Lotze-Campen, H., Popp, A., Müller, C. (2014). Forecasting technological change in agriculture - An endogenous implementation in a global land use model. *Technol. Forecast. Soc.*, 81, 236–249 [in English].
5. Heubes, J., Schmidt, M., Stuch, B., Márquez, J. R. G., Wittig, R., Zizka, G., Thiombiano, A., Sinsin, B., Schaldach, R., Hahn, K. (2013). The projected impact of climate and land use change on plant diversity: An example from West Africa. *J. Arid Environ.*, 96, 48–54 [in English].
6. Lambin, E. F., Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, 3465–3472 [in English].
7. Havlík, P., Schneider, U., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalsky, R., Aoki, K., De Cara, S., Kindermann, G., Kraxner, F., Leduc, S., McCallum, I., Mosnier, A., Sauer, T., Obersteiner, M. (2011). Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy policy*, 39, 5690–5702 [in English].
8. Zhang X, Ermolieva T, Balkovic J, Mosnier A, Kraxner F, Liu J. (2015) Recursive cross-entropy downscaling model for spatially explicit future land uses: A case study of the Heihe River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 89–90:56–64 [in English].
9. Skalsky', R., Tarasovic'ova', Z., Balkovic', J., Schmid, E., Fuchs, M., Moltchanova, E., Kindermann, G. and Scholtz, P. (2008). Geo-bene global database for bio-physical modeling v. 1.0. Concepts, methodologies and data. Technical Report, IIASA. Retrieved from [http://www.geo-bene.eu/files/Deliverables/Geo-BeneGlbDb10\(DataDescription\).pdf](http://www.geo-bene.eu/files/Deliverables/Geo-BeneGlbDb10(DataDescription).pdf) [in English].
10. Chances for die-hard: energy future of lumber. *Ukrainian arboriculturist*. Retrived from <http://www.lesovod.org.ua/node/3014> [in Ukrainian].
11. Ministry of Agrarian Policy and Food with World Bank develop the Strategy of irrigation revitalization in the South of Ukraine. Retrived from http://www.kmu.gov.ua/control/uk/publish/article?art_id=248828800&cat_id=244277212 [in Ukrainian].