

## ПРОГНОСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕКОСИСТЕМ ПІД ВПЛИВОМ ЗМІНИ КЛІМАТУ: ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

*У статті проаналізовано основні математичні моделі, які використовувалися для прогнозування динаміки чистої первинної продуктивності степових, лугових та сільськогосподарських екосистем. Для порівняння було відібрано моделі, які мають відкритий код та перебувають у вільному доступі. Систематизовано основну інформацію та можливості практичного застосування математичних моделей для прогнозування показника чистої первинної продуктивності рослинних угруповань степових екосистем.*

**Ключові слова:** математичне моделювання екосистем, екосистеми, прогноз, порівняльна характеристика.

Прогностичне математичне моделювання – це сучасний метод дослідження функціонування систем та їхніх окремих елементів, створення прогнозів, спрямованих на дослідження функціонування екосистем, потоків речовини та енергії, а також вирішення інших актуальних завдань екології.

Виходячи із завдання, моделі поділяються на евристичні та прогностичні [4]. Евристичні моделі використовуються для дослідження певного невідомого або маловідомого процесу чи явища, його сутності, розкривають механізм перебігу процесів та слугують для імітації і наочного дослідження структурних елементів та взаємозв'язків у системі, наприклад, евристична модель еволюції спільноти та її таксономічного й екологічного біорізноманіття [1]. Своєю чергою, прогностичні моделі використовуються для вивчення процесів, явищ та систем, які вже досить добре вивчені, і тому існує потреба в кількісній оцінці певних структурних елементів. Прикладом прогностичних моделей може слугувати низка засобів для моделювання продуктивності екосистем, водного балансу, транспірації, що наведені в цій роботі в таблиці.

За характером реалізації та представлення моделі поділяються на концептуальні, фізичні та математичні. Концептуальне моделювання спирається на знакове представлення даних у вигляді схем, карт, діаграм чи інших графічних зображень явищ та об'єктів. Це досить загальний тип моделювання, який допомагає уявити основні зв'язки та сформулювати уявлення про структуру. Досить часто концептуальне моделювання являє собою попередній етап для фізичного чи математичного моделювання, оскільки отримані результати

можливо аналізувати та досліджувати за допомогою математичного аналізу, інтегральних і диференціальних рівнянь, описувати сутність явищ. За допомогою концептуальних моделей можливо зображувати шляхи енергообміну, водного балансу, кругообігу речовин (детермінований метод) та вивчати ймовірнісний характер явищ шляхом обробки великих масивів даних за заданими діапазонами умов (стохастичний метод) [8]. Приклад концептуальної моделі можна знайти в працях Галини Микитин, котра моделювала та оцінювала екологічні ризики, базуючись на технологіях відбору й обробки параметрів води [3].

Фізична модель – це фізичний об'єкт, який являє собою зменшену копію природного аналога. Наприклад, глобус – модель Сонячної системи, фізична модель рельєфу г. Говерли тощо.

Математичне моделювання кліматичних змін бере свій початок у 1960-х роках, переважно на основі праць європейських та американських дослідників (Е. Еріксона, П. Веландера, Б. Боліна та ін.). Так, у США Національне управління океанічних і атмосферних досліджень ініціювало розробку математичної глобальної моделі прогнозування перебігу динамічних та фізичних процесів в атмосфері та океанах. Кінцевою метою розробки цього проекту мала стати глобальна модель перебігу кліматичних процесів, яка б включала в себе локальні кліматичні особливості та мала б на меті створення динамічних прогнозів змін кліматичних умов у світі. З плином часу у світовому науковому товаристві ідея моделювання набувала більшого поширення, внаслідок чого з'явилася серія моделей, спрямованих на дослідження біогеохімічних показників та потоків речовини й енергії.

В Україні в галузі математичного моделювання екосистемних процесів представлено роботи широкого кола дослідників, зокрема: В. І. Лаврика (моделювання стану навколишнього середовища та екосистем різного ієрархічного рівня) [2]; В. М. Самойленка (геоінформаційне та математичне моделювання в екології) [7]; В. І. Мокрого (моделювання екосистем і екологічний моніторинг) [5]; А. М. Польового (моделювання продуктивності агроекосистем) [6]; В. С. Ткаченка і С. Г. Бойченко (аналіз степових фітосистем під впливом кліматичних змін та розробка прогностичних сценаріїв для їхнього розвитку) [8] та ін.

У рамках дослідження «Моделювання продуктивності степової зони України під впливом змін клімату», яке було ініційоване на базі Центру досліджень екосистем, змін клімату та сталого розвитку Національного університету «Києво-Могилянська академія» на початку 2014 р., ми провели аналіз найвідоміших європейських та американських математичних моделей, їхніх можливостей та шляхів моделювання показників первинної продуктивності. Метою аналізу слугував відбір такого програмного продукту, який має відкритий код, може бути змінений або вдосконалений, а також використаний для потреб дослідження, при цьому модель містить у коді та/або окремим блоком прогнозування динаміки первинної продуктивності трав'яних екосистем (у нашому випадку – степові екосистеми). У ході цієї роботи було переглянуто такі програмні продукти: CENTURY, DAILY CENTURY, Biome-BGC, IBIS, MAPSS, The Terrestrial Ecosystem (TECO) model.

CENTURY являє собою загальну модель для симуляції динаміки вуглецю та циклів поживних речовин, наприклад, азоту, сірки та фосфору, в екосистемах [16]. Ця модель дає змогу створювати предикції для різних типів екосистем (трав'янистий степ, сільськогосподарські угіддя, лісостеп, лісові екосистеми тощо), містить алгоритми, які пояснюють та симулюють перебіг пірогенних процесів, сумарне місячне випаровування, транспірацію, вміст води в шарах ґрунту, водні потоки тощо. Також CENTURY містить відкритий код, що дає змогу вільно використовувати цей продукт, змінювати, редагувати та доповнювати, виходячи з поставлених наукових цілей.

Перевагою цієї моделі є її широке та довготривале застосування для моделювання функціональних процесів як лісових, так і степових, лугових, сільськогосподарських екосистем; дослідження пірогенних процесів. Недоліком можна назвати часовий крок тривалістю один рік, що не дозволяє створювати короткострокові динамічні

моделі. Цей недолік було виправлено в моделі DAYCENT.

Модель DAYCENT (DAILY CENTURY) як розвинена версія продукту CENTURY доповнена модулями для симуляції потоків метану, вуглецю та азоту в атмосфері, додатковими показниками вегетації та субмоделлю дослідження процесів у ґрунті [9; 10].

Biome-BGC є зразком комп'ютерної моделі, що базується на кодї, написаному з використанням комп'ютерної мови Fortran 77 [19]. Цю модель було створено для розрахунку об'ємів та потоків енергії, які містяться в екосистемі, води, вуглецю та азоту, які беруть участь у процесі вегетації та, додатково, ґрунтового компонента екосистеми. Ця модель дає змогу досліджувати як біоми, так і біотопи екосистеми за певний, заданий, період часу. Головна мета моделювання – дослідження глобальних та регіональних зв'язків між біогеохімічними циклами за участі вуглецю й азоту та кліматичними факторами. Модель використовує одноденний часовий крок: прогноз для кожного циклу охоплює період в один день. Важливим компонентом моделі виступають кліматичні показники, які дають змогу змоделювати погодні умови для прогнозованих вегетаційних процесів, які при цьому визначають характер поведінки всієї предикції. Інструменти Biome-BGC дають змогу прогнозувати зміни клімату як на локальному, так і на глобальному рівні, охоплювати такі процеси [19]:

- вегетуюча рослинність та опад;
- поглинання сонячної радіації листям та ґрунтом;
- кількість вологи, яка надходить до листя та ґрунту;
- накопичення снігових мас та об'єми талої вологи;
- вологопроникність ґрунту та об'єми ґрунтового стоку;
- випаровування ґрунтової вологи та евапотранспірація листя;
- фотосинтетична фіксація вуглецю з CO<sub>2</sub> повітря;
- абсорбція азоту, що міститься в ґрунті;
- забезпечення частин рослини вуглецем та азотом;
- пожежі.

Перевагою цього продукту є наявність широкого спектру засобів для моделювання потоків речовини та енергії в екосистемах на різних рівнях та в локальному і глобальному масштабі. Зручний часовий крок в один день дає змогу створювати термінові короткострокові предикції.

Ще один інструмент для моделювання показників первинної продуктивності наземних екосистем має назву **Integrated Biosphere Simulator (IBIS)**. Цей продукт було створено Center for Sustainability and the Global Environment (SAGE) в рамках проекту дослідження глобальних процесів, які протікають у біосфері, та взаємозв'язку з антропогенним фактором [14]. До модуля дослідження біосфери входять компоненти, які аналізують наземні біогеохімічні цикли, вегетаційну динаміку, продукційні процеси та прогнозування

шляхів адаптації вегетуючої рослинності до змін клімату (коливань кліматичних показників за певний прогнозований період). Також проводяться дослідження широкого спектру процесів, як-от: фізіологія та фенологія рослин, фізичні процеси в екосистемі, динаміка вегетації та сукцесії рослинних угруповань, біогеохімічні цикли вуглецю та інших поживних речовин. Модель генерує глобальну симуляцію поверхневого стоку, водного балансу, ґрунтового балансу вуглецю в екосистемі, показники чистої первинної продуктивності,

Таблиця. Порівняльна характеристика математичних моделей [9–20]

<b>Назва моделі</b>	CENTURY	Biome-BGC
<b>Розробник</b>	United States Department of Agriculture Agricultural Research Service Great Plains Systems Research Unit	Numerical Terradynamic Simulation Group School of Forestry, University of Montana
<b>Остання версія</b>	Версія 4.0	Версія 4.2
<b>Часовий період прогнозу</b>	Рік	День
<b>Процеси, які можливо моделювати за допомогою моделі</b>	Цикл обігу поживних речовин між рослинністю та ґрунтом; Динаміка вуглецю для різних типів екосистем (степові, лугові, сільськогосподарські, лісові та саванові); Дослідження вмісту органіки в ґрунті; Декомпозиція органічної речовини в ґрунті; Водний баланс території; Модуль дослідження продуктивності степових/лугових/сільськогосподарських екосистем; Екосистемний менеджмент; Кругообіг вуглецю, азоту, фосфору та сірки в екосистемі (мінімальні дані – вуглець та азот); Оцінка кількості вуглецю (C), азоту (N), фосфору (P) та сірки (S) в органічній та неорганічній речовині	Вегетуюча рослинність та опад; Поглинання сонячної радіації листям та ґрунтом; Кількість вологи, яка надходить до листя та ґрунту; Накопичення снігових мас та об'єми талої вологи; Вологопроникність ґрунту та об'єми ґрунтового стоку; Випаровування ґрунтової вологи та евапотранспірація листя; Фотосинтетична фіксація вуглецю з CO <sub>2</sub> у повітрі; Абсорбція азоту, що міститься в ґрунті; Забезпечення частин рослини вуглецем та азотом; Розклад підстилки та старої органічної речовини; Об'єм відмирання рослин; Пожежі
<b>Параметри</b>	Середня місячна мінімальна та максимальна температура повітря; Сумарна місячна кількість опадів, вміст лігніну в рослинному матеріалі; Вміст N, P та S в рослинах, атмосфері та ґрунті; Гранулометричний склад ґрунту	Максимальна добова температура повітря; Мінімальна добова температура повітря; Середня добова температура повітря; Сумарна добова кількість опадів; Середній добовий тиск; Середня денна короткохвильова радіація; Тривалість світлового дня в секундах
<b>Публікації</b>	Parton et al. (2007) [10]	Thornton et al. (2005) [19]

чистої продукції, приріст біомаси за певний період, вміст вуглецю в ґрунті, надземну та підземну підстилку, кругообіг CO<sub>2</sub> в ґрунті та характеристики вегетуючої рослинності (біомаса, LAI – індекс листової поверхні, мортмаса, видовий склад) [15].

Модель **Mapped Atmosphere-Plant-Soil System Model (MAPSS)** була розроблена Р. Драпеком [11] для глобального та регіонального моделювання вегетаційних процесів, дослідження впливу змін клімату на показники валової та чистої первинної продуктивності

зональних екосистем світу. Ця модель цікава тим, що предикції, створені на базі MAPSS, було використано в багатьох проєктах Міжурядової групи експертів з питань змін клімату (IPCC) [15], які стосувалися дослідження впливу кліматичних змін на вегетаційні процеси на локальному та глобальному рівнях.

Методика прогнозування дає змогу оцінити розподіл, об'єми та характер вегетуючої рослинності залежно від кількості наявної вологи, потреб транспірації та наявної кількості енергії для рослинних угруповань.

IBIS	MAPSS	TECO
Center for Sustainability and the Global Environment (SAGE)	US Forest Service	Department of Microbiology & Plant Biology University of Oklahoma
Версія 2.5	Версія 1.0	Версія 1.0
День Місяць	Місяць Рік	Година; день; місяць (залежно від модуля)
Енергообмін між рослинністю та атмосферою; Вологообмін між рослинністю та атмосферою; Кругообіг вуглецю в екосистемі (рослинність – атмосфера); Фізіологічні процеси, які протікають у ґрунті (включаючи фотосинтез та ґрунтову транспірацію); Сезонні вегетаційні зміни, включаючи накопичення продукції й утворення мортмаси; Сукцесійні процеси та видозаміна; Цикли кругообігу поживних речовин; Ґрунтові процеси (обіг поживних речовин)	Розрахунок кількості снігових опадів та талого снігу; Кількість опадів та випаровування вологи; Інфільтрація та вологопроникність ґрунту (використовуються три шари ґрунту); Поверхневий стік; Транспірація, розрахунок якої базується на даних LAI, показниках продихової транспірації; Біофізичні характеристики рослинності залежно від форми листя та фенології; Розрахунок LAI; Алгоритм класифікації домінантної рослинності за вегетаційними класами	Модуль дослідження лісового пологу (для лісових екосистем); Модуль дослідження водного режиму ґрунту; Модуль дослідження вегетаційних процесів (для степових, лугових та сільськогосподарських екосистем); Модуль дослідження кругообігу карбону в екосистемі; У межах останнього модуля досліджується автотрофне Ra (кореневе) та гетеротрофне дихання Rh, неструктуровані карбогідрати NSC
Кліматичні дані; Веgetаційні дані; Характеристика ґрунтового покриву; Первинна продукція; Структура вегетуючої рослинності; Коренева біомаса; Вміст вуглецю в ґрунті; Вміст вуглецю в підстилці (сухостої та опаді); Дані кругообігу CO <sub>2</sub> в ґрунті	Кліматичні дані; Характеристика рослинного покриву; Характеристика деревостану та зімкнутості лісового пологу; Показники азоту, фосфору та сірки в ґрунті; Показник LAI; Показник продуктивності рослинних угруповань та деревна продуктивність лісів	Модуль водного балансу ґрунту поділяє профіль на 10 шарів (перший – 10 см, інші 9 – по 20 см), для кожного з шарів вводяться показники прибуткової та витратної статей; Показники розподілу вуглецю в листі, корінні; Індекс поверхні листа (LAI); Кліматичні показники; Найнижча температура повітря та ґрунту; Кількість опадів; Температура повітря; Температура ґрунту; Вологість ґрунту; Кожен модуль містить різні вимоги до періоду часу та кількості параметрів
Foley et al. (1993) [9]; Foley et al. (2005) [12]; Kucharik et al. (2000) [18]	Nelson et al. (2007) [15]	Weng E. and Luo Y. (2008) [20]

Для створення предикцій використовуються такі алгоритми [15]:

- розрахунок кількості снігових опадів та талого снігу;
- кількість опадів та випаровування вологи;
- інфільтрація та вологопроникність ґрунту (використовуються три шари ґрунту);
- поверхневий стік;
- транспірація, розрахунок якої базується на даних LAI, показниках продихової транспірації;
- біофізичні характеристики рослинності залежно від форми листя та фенології;
- багаторазовий розрахунок LAI;
- алгоритм класифікації за типами доміантної рослинності, вегетаційні класи.

Модель може створювати прогнози з місячним та річним кроком та роздільною здатністю 0,5 м на піксель. Розраховані результати можуть використовуватися для глобальних прогнозів змін клімату. Також цей інструмент може симулювати зміни в розподілі вегетуючої рослинності та поверхневого стоку залежно від збільшення концентрації вуглецю. Модель зосереджена переважно на вегетаційних процесах в екосистемі.

### Висновки

Проведений аналіз досвіду створення і функціонування предикативних моделей екосистем разом із дослідженням питання модифікації архітектури та функціонування моделей дав нам змогу визначити оптимальну модель для прогнозування показника чистої первинної продуктивності сухостепових трав'янистих угруповань, сформулювати вимоги до архітектури моделі та побажання щодо вмісту блоків моделі. Таким продуктом виявилася **The Terrestrial Ecosystem (TECO) model**. Ця модель еволюціонувала з моделі TCS [20]. Це процесно-орієнтована екосистемна модель, створена для дослідження критичних процесів, відповіді екосистем на збільшення кількості вуглецю та парникових газів, підвищення зволоження та збільшення температурних показників. Модель TECO складається з чотирьох блоків: дослідження фотосинтезу та продуктивності, дослідження динаміки ґрунтових вод, дослідження росту рослин (алюкація та фенологія) та дослідження потоків вуглецю (переважно в ґрунті).

Блоки дослідження фотосинтезу та режиму ґрунтових вод містять погодинний крок, що дає змогу моделювати процеси в динаміці з мінімальними інтервалами часу, разом з тим блоки

дослідження росту рослин та моделювання кругообігу вуглецю мають добовий крок. Блок дослідження фотосинтезу створювався на основі алгоритмів моделей 1998 р. [20], він симулює пропускання сонячної радіації кронами дерев, спираючись на закон експоненційного зменшення інтенсивності світла в середовищі залежно від товщини (закон Бугера – Ламберта – Бера). Фотосинтез оцінюється на основі алгоритмів, взятих із моделі Farquhar photosynthesis model [20].

Проведене дослідження показало, що моделі CENTURY, DAYCENT, MAPSS, Biom-BGC, IBIS, TECO можуть бути використані для моделювання функціонування зональних екосистем України, окремих функціональних процесів екосистем та їхніх структурних компонентів. Було перекладено та проаналізовано англійські статті та публікації, які описують ці моделі. Отриману інформацію було систематизовано за характером можливого використання прогностичних продуктів та шляхом доступу до відкритого коду. У наведеній таблиці подано загальну характеристику перелічених моделей та джерела, які містять код моделі в мережі Інтернет, за яким можливо завантажити ці програмні продукти та використати для створення локальних і глобальних прогнозів. Також проведене дослідження допомогло визначити перелік напрямів використання названих програмних продуктів. Так, головним критерієм відбору моделей була наявність моделювання показників чистої первинної продуктивності рослинних біоценозів, особлива увага приділялася можливості використання для степових екосистем. Усі перелічені продукти можуть бути використані для прогнозування динаміки біомаси степових та лісових екосистем. У моделях CENTURY, DAYCENT наявний пірогенний модуль, що поширює спектр застосування моделі, її використання для екосистемного менеджменту і більш глибокої оцінки вмісту вуглецю, азоту, фосфору та сірки в органічній та неорганічній речовині. Для дослідження вмісту поживних речовин також доцільно використовувати TECO. Biome-BGC та IBIS у цьому плані більш зосереджені на дослідженні динаміки вуглецю в екосистемі. Проте IBIS дає змогу відстежувати і прогнозувати сукцесійні процеси. TECO – багатомодульна складна модель, яка допомагає прогнозувати значну низку процесів в атмосфері, ґрунті, рослинному покриві, включаючи автотрофне та гетеротрофне дихання. Перелічені продукти написані мовою програмування Fortran 77. Часовий крок отриманих предикцій різниться: для CENTURY,

MAPSS – рік, найбільший часовий період, тому зазначений продукт доцільно використовувати для довготривалих прогнозів. Місячний крок характерний для TECO, MAPSS, IBIS, що дає змогу створювати переважну більшість моделей, які використовують та отримують у результаті середньомісячні показники. Більш точні моделі Biome-BGC, TECO, IBIS мають можливість використовувати одноступінний часовий крок, і тільки TECO

надає прогнози з часовим інтервалом, що дає змогу застосовувати їх для проведення ситуативного термінового менеджменту екосистем, який потребує швидких і обґрунтованих рішень.

*Це дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Прогностичне моделювання динаміки енергетичних потоків зональних екосистем України за умов зміни клімату».*

#### Список літератури

1. Каландадзе Н. Н. Эвристическая модель эволюции сообщества и его таксономического и экологического разнообразия / Н. Н. Каландадзе, А. С. Раутиант // Биологическое разнообразие: подходы к изучению и сохранению. – СПб. : ЗИН РАН, 2006. – С. 65–80.
2. Лаврик В. І. Математичне та імітаційне моделювання процесів формування і регулювання поверхневого стоку промислових територій / В. І. Лаврик, І. А. Скуратівська // Вісник ЖДТУ : Технічні науки. – 2004. – № 2 (29). – С. 234–239.
3. Микитин Г. Концептуальна модель оцінки екологічного ризику на основі інформаційних технологій відбору і обробки параметрів води / Галина Микитин // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий наук.-техн. зб. / НУ «Львівська політехніка»; відп. ред. Б. І. Стадник. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2014. – Вип. 75. – С. 52–59.
4. Моделирование экосистем : метод. пособие / В. В. Дмитриев, В. П. Кулеш, Ю. Н. Сергеев, В. Ю. Третьяков. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2006. – 16 с.
5. Мокрий В. І. Моделі фазових переходів сукцесійних процесів лісових угруповань Західного Полісся / В. І. Мокрий, В. Б. Капустяник, П. Г. Хомяк // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук. пр. – К., 2011. – Вип. 8. – С. 94–118.
6. Польовий А. М. Аналіз тенденцій зміни термічних показників агрокліматичних ресурсів в Україні за період до 2030–2040 рр. / А. М. Польовий, Л. Ю. Божко, О. О. Дронова // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 9. – С. 90–99.
7. Самойленко В. М. Математичне моделювання в геоecології / В. М. Самойленко. – К. : ВПЦ «Київський університет», 2003. – 233 с.
8. Ткаченко В. С. Структурний дрейф степових фітосистем України під впливом кліматичних змін та прогностичні сценарії для першої половини XXI століття / В. С. Ткаченко, С. Г. Бойченко // Доповіді НАН України. – 2014. – № 4. – С. 172–180.
9. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics / J. A. Foley, I. C. Prentice, N. Ramankutty [et al.] // Global Biogeochemical Cycles. – 1993. – Vol. 10, № 4. – P. 603–628.
10. DAYCENT: Its land surface submodel: description and testing / W. J. Parton, M. D. Hartman, D. S. Ojima, D. S. Schimel // Glob. Planet. Chang. – 2007. – Vol. 19. – P. 35–48.
11. Drapek R. MAPSS: Mapped Atmosphere-Plant-Soil System Model, Version 1.0. Model product [Electronic resource] / R. Drapek, R. P. Neilson // Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. – 2007. – Mode of access: [http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds\\_id=853](http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=853) (date of access: 12.05.2015). – Title from the screen.
12. Foley J. A. Integrated Biosphere Simulator Model (IBIS), Version 2.5 Model product [Electronic resource] / J. A. Foley, C. J. Kucharik, D. Polzin // Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. – 2005. – Mode of access: [http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds\\_id=808](http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=808) (date of access: 12.05.2015). – Title from the screen.
13. Forest production predicted from satellite image analysis for the Southeast Asia region / C. Potter, S. Klooster, V. Genovese, C. Hiatt // Carbon Balance and Management. – 2013. – Vol. 8, № 9.
14. Kucharik C. J. Integrated Biosphere Simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of Nitrogen fertilizer / C. J. Kucharuk, K. R. Brye // Journal of Environmental Quality. – 2003. – Vol. 32. – P. 247–268.
15. MAPSS: Mapped Atmosphere-Plant-Soil System Model, Version 1.0. Model product [Electronic resource] / R. P. Neilson, J. M. Lenihan, D. Bachelet, R. Drapek // Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. – 2007. – Mode of access: [http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds\\_id=853](http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=853) (date of access: 12.05.2015). – Title from the screen.
16. Parton W. J. Modelling soil organic matter dynamics and plant productivity in tropical ecosystems / W. J. Parton, P. L. Woome, A. Martin // The Biological Management of Tropical Soil Fertility / ed. by P. L. Woome, M. J. Swift. – Chichester, U.K. : John Wiley and Sons, 1994. – P. 171–188.
17. Simulated interaction of carbon dynamics and nitrogen trace gas fluxes using the DAYCENT model / S. J. Del Grosso, W. J. Parton, A. R. Mosier [et al.] // Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management / ed. by M. J. Schaffer, Liwang Ma, Soren Hansen. – Boca Raton, Florida : CRC Press, 2000. – P. 303–332.
18. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance and vegetation structure / C. J. Kucharik, J. A. Foley, C. Delire [et al.] // Global Biogeochemical Cycles. – 2000. – Vol. 14, № 3. – P. 795–825.
19. Thornton P. E. Biome-BGC: Terrestrial Ecosystem Process Model, Version 4.1.1. Model product [Electronic resource] / P. E. Thornton, S. W. Running, E. R. Hunt // Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. – 2005. – Mode of access: [http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds\\_id=805](http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=805) (date of access: 12.05.2015). – Title from the screen.
20. Weng E. Soil hydrological properties regulate grassland ecosystem responses to multifactor global change: a modeling analysis / E. Weng, Y. Luo // Journal of Geophysical Research – Biogeosciences. – 2008. – Vol. 113. – P. 937–964.

*S. Belyakov*

**PROGNOSTIC MODELING  
OF ECOSYSTEMS PROCESSES UNDER CLIMATE CHANGES:  
PERSPECTIVES OF MATHEMATICAL MODELING APPLYING**

*It has been analyzed common mathematical models that could be applied for net primary productivity dynamics modelling in steppe, grasslands, agricultural ecosystems etc. The evaluation was based on open source, free access models. The primary descriptive information of the main prognostic models has been systematized in order to practical application of mathematical models for grassland plant species NPP prediction.*

**Keywords:** mathematical modeling, ecosystems, forecast, comparative description.

*Матеріал надійшов 30.08.2015*