

Modelling the dynamics of total precipitation and aboveground net primary production of fescue-feather grass steppe at Askania Nova according to global climate change scenarios

S. O. Belyakov*, O. P. Gofman**, I. G. Vyshenska*

*National University of Kyiv-Mohyla Academy, Kyiv, Ukraine

**Falz-Fein Biosphere Reserve “Askania-Nova”, NAASU, Askania-Nova, Ukraine

Article info

Received 21.12.2016

Received in revised form
28.01.2017

Accepted 31.01.2017

National University
of Kyiv-Mohyla Academy,
Skovoroda str., 2, off. 3-211,
Kyiv, 04655, Ukraine
E-mail:

sergiy.belyakov@gmail.com

Biosphere Reserve “Askania-
Nova” of NAASU,
Frunze Str., 13, Askania-Nova,
Kherson reg., 75230, Ukraine
E-mail:

gofman.orusia@mail.ru

Belyakov, S. O., Gofman, O. P., & Vyshenska, I. G. (2017). Modelling the dynamics of total precipitation and aboveground net primary production of fescue-feather grass steppe at Askania Nova according to global climate change scenarios. *Biosystems Diversity*, 25(1), 16–24. doi: 10.15421/011703

This article discusses modelling of Aboveground Net Primary Production (ANPP) of steppe (arid grassland ecosystems) plant species in relation to changes in total precipitation over the previous year at the “Stara” study site, Biosphere Reserve “Askania-Nova”, Kherson region (Ukraine). To investigate linkages between precipitation and Aboveground Net Primary Production, correlation analysis was chosen and a time series regression analysis was based on the data set for the period 1988–2012. The NPP dependence on quantity of precipitation was found to be more significant for the previous autumn-winter-spring period (AWSP) than for the previous 12 month period. A regression model of ANPP’s dependence on AWSP is proposed. This model was further validated by the authors’ samples of ANPP, collected at the “Stara” study site in 2013–2016. The regression model showed a non-linear (quadratic) dependence of net primary production of zonal and intrazonal plant coenoses and total precipitation for the autumn-winter-spring period for arid grasslands with a coefficient of determination equal to 0.54 and significance level less than 0.05. The non-linear equation for these relations, visualized by a parabola curve, was calculated using the Nonlinear Least-Squares Regression Method. The data set, based on calculated predicted values, using the calculated equation, had a similar dynamic to the historical data on ANPP, but the model could not predict critical values. For this reason, additional studies are required for critical precipitation events. Non-linear response, investigated according to regression analysis, reveals optimal zones of plant growth, depending on the total precipitation level before the vegetation peak. For research areas where the dominant species are the turf grasses *Stipa ucrainica* P. Smirn., *S. capillata* L., *S. lessingiana* Trin. & Rupr., *Festuca valesiaca* Gaudin, *Koeleria cristata* (L.) Pers.) the optimal precipitation rates were found to be 350–400 mm during AWSP with ANPP at 350 g/m². On the basis of the regression model and current forecasts of changes in precipitation rates we made a forecast of net primary production of plant communities for four climate change scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6, and RCP8.5) described in the Fifth Assessment of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). For this purpose, bioclimate projections of 10 major climate models (The Community Climate System Model Version 4 (CCSM4), GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M), used for preparation of the IPCC report, were analyzed and imported to the geographical information system package QGIS. QGIS modelling software was used for geoanalysis and calculation of GIS-layers for Askania-Nova and adjacent arid grasslands. The results of modelling with the 10 climate models were compared and analyzed for each of the four IPCC scenarios, depending on predicted CO₂ levels. The presented modelling results showed a trend to growth in AWSP precipitation and NPP for all scenarios up to 2040–2060. The scenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6 predicted the optimum precipitation zone for current plant diversity for the period of 2040–2060 and scenario RCP8.5 predicted an optimum zone peak after 2080. The study confirmed the importance of monitoring the productivity of herbaceous communities in dry steppe ecosystems of Ukraine.

Keywords: primary production; fescue-feather grass steppe; climate change; regression model; IPCC scenarios; BIOCLIM

Моделювання динаміки сумарної кількості опадів та чистої первинної продукції типчаково-ковилових угруповань асканійського степу за сценаріями глобальних змін клімату

С. О. Беляков*, О. П. Гофман**, І. Г. Вишенська*

*Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ, Україна

**Біосферний заповідник «Асканія-Нова» ім. Ф.Е. Фальц-Фейна НААНУ, Асканія-Нова, Україна

Результати статистичного опрацювання даних вказують на наявність нелінійної (квадратичної) залежності чистої первинної продукції (ЧПП) зональних та інтразональних рослинних угруповань біосферного заповідника «Асканія-Нова» від сумарної кількості опадів за

осінньо-зимово-весняний період (ОЗВП). Для дослідної ділянки плакору, де домінують видами виступають щільнодернинні злаки (*Stipa ucrainica* P. Smim., *S. capillata* L., *S. lessingiana* Trin. & Rupr., *Festuca valesiaca* Gaudin, *Koeleria cristata* (L.) Pers.) оптимальні умови перебувають у межах 350–400 мм опадів за ОЗВП при ЧПП на рівні 350 г/м². На основі масиву даних побудовано регресійну модель залежності ЧПП від ОЗВП. Отримана модель валідована власними даними авторів стосовно показника ЧПП за 2013–2016 роки. На основі отриманої регресійної моделі та існуючих прогнозів зміни кількості опадів створено прогноз показника чистої первинної продукції рослинних угруповань плакору для чотирьох базових сценаріїв кліматичних змін (RCP2.6, RCP4.5, RCP6, та RCP8.5), які офіційно фігурують у V звіті Міжурядової групи експертів із кліматичних змін (IPCC). Для кожного сценарію розраховано показники сумарної кількості опадів та ЧПП степових екосистем із використанням 10 кліматичних моделей (The Community Climate System Model Version 4 (CCSM4), GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M), які використано в ході підготовки V звіту IPCC. Отримані розрахункові параметри використані для створення геоінформаційних шарів із використанням програмного забезпечення QGIS. Отримані результати для кожного сценарію проаналізовані та усереднені. Розраховані дані для сценаріїв RCP2.6, RCP4.5, RCP6 свідчать про можливість настання зони оптимуму за кількістю опадів для сучасних рослин-ефікаторів у 2040–2060 рр., а за настання сценарію RCP8.5 – у 2080-х роках. Проведене дослідження підтвердило важливість вивчення продуктивності трав'янистих угруповань сухостепових екосистем України.

Ключові слова: чиста первинна продукція; типчаково-ковилловий степ; зміни клімату; регресійна модель; RCP; міжурядова група експертів зі зміни клімату; шари ГС; BIOCLIM

Вступ

Степові та лучні екосистеми займають близько чверті земної поверхні (IPCC, 2014) та перебувають у широкому спектрі кліматичних умов, що зумовлює строкатість степових підзон і відповідних видів, що займають ці екологічні ніші. У системі природних зон України одне з важливих місць посідає степова зона, багата на родючі сільськогосподарські угіддя та біорізноманіття (Tsvetkova et al., 2016). Вона – важливий компонент світової екосистеми з погляду видової строкатості, ресурсного та природоохоронного потенціалу. Степові екосистеми можуть виступати джерелом емісії CO₂ – за даними IPCC (IPCC, 2014), степові екосистеми збільшать надходження CO₂ в атмосферу на 25% у наступні роки. Наразі існує декілька сценаріїв розвитку планетарних екосистем, залежно від збільшення кількості енергії та концентрації парникових газів (Representative Concentration Pathways, RCPs), тому важливо дослідити та визначити відповідь степових екосистем України на майбутні можливі зміни. Ці відповіді можуть бути прямими та опосередкованими через трансформацію тваринного наседнення або мікробіоценозу (Brygadyrenko, 2014a, 2014b, 2015). Видовий склад аридних степових екосистем залежить від запасів вологи, які виступають лімітуючим фактором розвитку, продуктивності та багатства видового складу сухостепових біоценозів (Kul'bachko et al., 2015). Залежність динаміки чистої первинної продукції від кількості опадів показана у публікаціях низки авторів, зокрема Rosenzweig (1968), Parton et al. (1981), Yang (2008), Xu et al. (2015).

У звітах Міжурядової групи експертів із питань змін клімату (IPCC, 2014) відзначається глобальне збільшення кількості об'ємів опадів та збільшення частоти випадання дощів. Такий позитивний тренд слід брати до уваги у процесі моделювання продуктивності степових екосистем. Саме тому аналіз впливу кількості опадів на динаміку чистої первинної продукції степових екосистем стає важливим компонентом дослідження глобальних і локальних (на рівні аридних степів Південної України) змін клімату, що дозволить глибше розкрити механізми функціонування степових фітоценозів.

Типчаково-ковилловий степ Біосферного заповідника «Асканія-Нова» – найбільша та найстаріша за часом заповідання степова ділянка України. Постійні геоботанічні дослідження рослинності асканійського степу проводяться понад півстоліття на заповідній ділянці «Стара» (перебуває на заповідному режимі з 1898 р.), де у 1948 р. В. М. Понятовська заклала геоботанічні стаціонари (Veden'kov, 1979). Систематичне вивчення надземної фітомаси степових рослинних угруповань розпочато у 1949 р., тому існує великий масив даних продукції, зокрема матеріали, зібрані та опрацьовані вченими заповідника (Veden'kov, 1979; Drogobych, 2000; Sharoval, 2012). Нині актуальне завдання становить узагальнення, обробка, систематизація та аналіз наявних даних із метою визначення основних факторів, що впливають на процес накопичення та деструкції надземної фітомаси. Основні дослідження надземної фітомаси проведені у період з 1949–1970 рр. на постійних геоботанічних стаціонарах ділянки

«Стара». У 1972 та 1974 рр. на даній території сталися пожежі, тому результати дослідження надземної фітомаси за цей період репрезентують етап постпірогенного відновлення рослинності (Drogobych, 2000). У 1983–1995 роки стаціонарні ділянки з вивчення продуктивності переміщені на 68 кв. масиву «Південний» природного ядра заповідника. З 1996 року дослідження продуктивності на екологічному ряду ділянки «Стара» відновлені та тривають дотепер.

Іншою характеристикою, яка впливає на продукцію рослинних угруповань, виступає вологоємність ґрунту та випаровування, оскільки ксерофітні види щільнодернинних злаків (*Stipa ucrainica* P. Smim., *S. capillata* L., *S. lessingiana* Trin. & Rupr., *Festuca valesiaca* Gaudin, *Koeleria cristata* (L.) Pers.) формують потужну кореневу систему, маса якої значно переважає масу надземної частини. У ході попередніх досліджень встановлено, що для зональних рослинних угруповань «плакору» ділянки «Стара» запаси підземної фітомаси перевищували запаси надземної в 11 разів (Sharoval, 2012). Подібний розвиток кореневих систем дозволяє повніше використовувати атмосферні опади та вологу ґрунту, що, у свою чергу, сприяє нівелюванню та відносній стабілізації величини надземної фітопродукції у різні за вологозабезпеченістю роки (Sharoval, 2012).

Матеріал і методи досліджень

За фізико-географічним районуванням територія заповідника належить до степової зони, південностепової підзони, Присивасько-Приазовської низовинної області. За геоботанічним районуванням вона належить до Асканійського геоботанічного району, Чаплинсько-Якимівсько-Приазовського геоботанічного округу типчаково-ковиллових степів на темно-каштанових залишково-солонцюватих ґрунтах і чорноземах південних залишково-солонцюватих і подових лук; смуги типчаково-ковиллових степів; Приазовсько-Чорноморської степової підпровінції; Причорноморської (Понтичної) степової провінції; Європейсько-Азіатської степової області.

Клімат регіону помірно-континентальний, зі спекотним сухим літом і м'якою зимою. Річний баланс тепла характеризується додатною величиною +9,5 °С. Середньорічна кількість опадів становить 400 мм. У зв'язку з глибоким рівнем залягання водоносного горизонту (18–25 м) (Babich, 1960), основне джерело ґрунтової вологи – атмосферні опади.

Проаналізовано динамічний ряд надземної біомаси за період 1950–2012 рр. для зональних та інтразональних рослинних угруповань плакору ділянки «Стара» (рис. 1) – типчаково-ковиллово угруповання [ас. *Stipa ucrainica* (+ *S. capillata*, *S. lessingiana*) + *Festuca valesiaca*]. На жаль, для даного дослідницького стаціонару відсутні матеріали за періоди 1962–1965, 1972–1975, 1981–1995 рр.; проте за проміжок 1988–1995 рр. вони компенсовані зразками з кв. 68 масиву «Південний», які відбирали в аналогічних рослинних угрупованнях.

Дослідження проводили на основі видів-ефікаторів зональних рослинних угруповань, що поширені на «плакорі» (во-

доділ), якими є щільнодернинні злаки *Stipa ucrainica*, *Festuca valesiaca*, *Koeleria cristata*. Номенклатурні назви рослин подано відповідно до чеклиста судинних рослин України. Фітоценотичну приуроченість видів рослин установлено за останнім флористичним зведенням для території природного ядра заповідника (Shapoval, 2012).

Укисна маса відібрана у розпал вегетації домінантів-ефікаторів рослинних угруповань (кінець травня) за уніфікованою методикою (Ramenskij, 1971; Rodin et al., 1968). Отримані зразки надземної фітомаси (сумарна маса живої та мертвої органічної речовини рослинного походження) розділені на дві основні фракції: біомаса (жива органічна речовина рослинного походження) та мортмаса (мертва органічна речовина рослинного походження). У складі біомаси виділяли окремо злаки (за видами), осоки, одно- та багаторічне різнотрав'я, спорові рослини. Фракцію мортмаси розділяли на сухостій (рослинні рештки, що зберігають зв'язок із материнською особиною) та підстилку (мертва органічна маса рослин, що втратила зв'язок із материнською особиною). Основні терміни подано за Л. Є. Родіним (Rodin, 1968). Проби зважували у повітряно-сухому стані. Чиста первинна продукція представлена даними біомаси без додавання

мортмаси. Показники ЧПП подаються у $г/м^2$. Для аналізу багаторічної динаміки продукції використано матеріали, опубліковані Veden'kov (1979), оприлюднені в «Літописі природи» (1983–1995) та наукових звітах заповідника (1996–2010), а також власні дані (2011–2016). Показники кількості опадів наведено за даними метеорологічної станції «Асканія-Нова».

Попередні дослідження запасів продуктивної вологи у ґрунті на початок вегетаційного сезону на території Біосферного заповідника відзначали його як важливий фактор, що впливає на первинну продукцію та залежить від режиму опадів за осінньо-зимові місяці (Babich, 1960). Оскільки відбирання біомаси проведено у травні, як найбільш репрезентативний показник кількості опадів виділено суму опадів за осінньо-зимово-весняний період перед конкретним вегетаційним періодом. У нашому дослідженні використано показник суми опадів за осінньо-зимово-весняний період (далі – ОЗВП), що передував конкретному сезону вегетації рослин-ефікаторів і становив суму опадів за період із вересня по кінець травня. Розраховано показник сумарної кількості опадів за 12 місяців, які передували вегетаційному піку рослин-ефікаторів дослідної ділянки (далі – 12МПВП). Дані сумарної кількості опадів за ОЗВП та 12МПВП наводяться в мм.

Функціональні зони Біосферного заповідника "Асканія-Нова" ім. Ф.Е. Фальц-Фейна



Ділянка "Стара" (N 46°27'29.64"; E 33°54'23.04") (520 га) є найстарішою за часом заповідання (з 1898 р.) територією, що входить до природного ядра Біосферного заповідника "Асканія-Нова".



Рис. 1. Розташування ділянки «Стара» відносно інших функціональних зон Біосферного заповідника «Асканія-Нова» ім. Ф. Е. Фальц-Фейна

Аналіз здійснено на основі непараметричного показника кореляції рангів за Пірсоном для випадків з відносно прямо-лінійним і непрямо-лінійним зв'язком. Проаналізовано дані чистої первинної продукції (ЧПП), які представляють 1988–2012 рр., та показники сумарної кількості опадів за ОЗВП та 12МПВП. Для дослідження залежності показників сумарної кількості опадів за ОЗВП та 12МПВП та ЧПП створено точкову діаграму та квадратичну регресійну модель. Форму кривої обрали, орієнтуючись на прийнятий критерій якості рівняння регресії на основі індекса детермінації за Пірсоном (R^2). Оцінку критеріїв

здійснено за шкалою Чеддока.

Параметри рівняння обраховані методом найменших квадратів (МНК). Для отриманого рівняння розраховано помилку апроксимації, коефіцієнт пружності, стандартну похибку рівняння. Проведено перевірку гіпотез відносно лінійного рівняння регресії, перевірку наявності автокореляції залишків (критерій Дарбіна – Уотсона), перевірку нормальності розподілу, наявності гетероскедастичності, тест Голдфелда – Квандта, статистику Фішера.

Шари ГС створено на основі регресійного рівняння моделі та відкритих даних BIOCLIM (Hijmans et al., 2005). BIOCLIM –

набір відкритих шарів, у форматі GeoTIFF, які являють собою усереднені значення температури повітря та кількості опадів і похідні від них параметри за 1960–1990 роки. Біокліматичні дані дають змогу візуалізувати у середовищі ГІС річні тренди (середня річна температура, річна сумарна кількість опадів) та лімітуючі екологічні фактори (температура найхолоднішого та найтеплішого, найсухішого та найвологішого місяця або кварталу тощо). Джерелом шарів став масив кліматичних даних світової мережі метеостанцій та показники за 1960–1990 роки. Використовували дані, які входили до динамічного ряду хоча б із 10 безперервних років спостережень. Загалом, для інтерполяції використано 47 554 локації для значень кількості опадів, 24 542 локації для значень середньої температури та 14 835 – для показників максимальних та мінімальних температур (Hijmans et al., 2005). На основі наявних даних змодельовано майбутні значення

біокліматичних параметрів математичних моделей Global Climate Model (GCM), які використовували дані CMIP5 (IPCC Fifth Assessment). Дані наведено з роздільною здатністю 10°, 5°, 2,5°, 30". Для даного дослідження використано біокліматичні шари з роздільною здатністю 30" (Hijmans et al., 2005). Прогнозні моделі охоплюють період до 2050 року (середні значення для 2040–2060 рр.) та 2070 (середні значення для прогнозів 2061–2080 рр.) і являють чотири сценарії збільшення концентрації парникових газів (Representative Concentration Pathways (RCPs)) (Dufresne et al., 2013), заявлених у V звіті IPCC від 2014 року. Назви цих сценаріїв (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 та RCP8.5) відповідають можливій зміні рівня радіаційного впливу (різниця між вхідною та вихідною енергіями випромінювання в кліматичній системі) до 2100 року (+2,6, +4,5, +6,0 та +8,5 Вт/м²) на рисунку 2 (Schmidt et al., 2014).

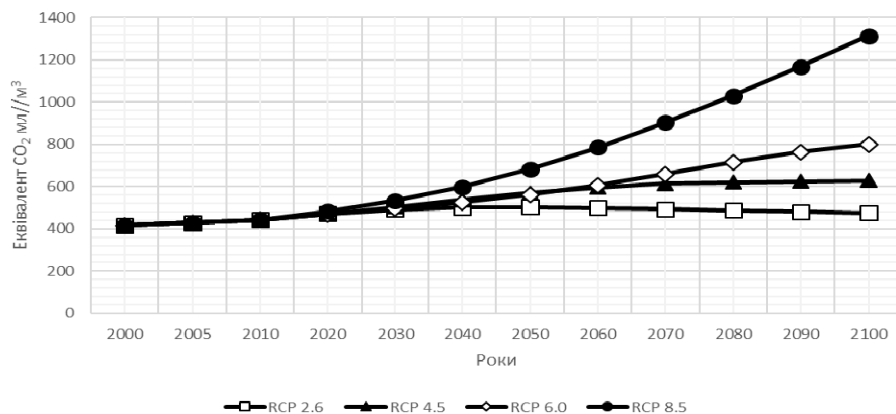


Рис. 2. Сценарії RCP2.6, RCP4.5, RCP6 та RCP8.5, які відповідають можливій зміні рівня радіаційного впливу (різниця між вхідною та вихідною енергією випромінювання в кліматичній системі) до 2100 року (+2,6, +4,5, +6,0 та +8,5 Вт/м²) (Schmidt et al., 2014)

За основу прогнозних шарів ГІС взято біокліматичні параметри, створені за допомогою 10 математичних моделей: CCSM4 (Gent et al., 2011), GISS-E2-R (Schmidt et al., 2014), HadGEM2-AO (Martin et al., 2011), HadGEM2-ES (Martin et al., 2011), IPSL-CM5A-LR (Dufresne et al., 2013), MIROC-ESM-CHEM (Watanabe et al., 2011), MIROC-ESM (Watanabe et al., 2011), MIROC5 (Watanabe et al., 2010), MRI-CGCM3 (Yukimoto et al., 2012), NorESM1-M (Bentsen et al., 2013). Для кожної моделі були розраховані показники сумарної кількості опадів.

Результати та їх обговорення

Дуже часто зв'язок між кількістю опадів та продуктивністю степових екосистем визначається рівняннями лінійних моделей, де коефіцієнт використовується для визначення ступеня впливу опадів на формування надземної біомаси (Huxman et al., 2004; Lauenroth and Sala, 1992; Paruelo et al., 1999; Ponce Campos et al., 2013). Характер зв'язку між змінними може бути як лінійним, так і нелінійним, що говорить про певні «комфортні» умови для існування домінуючих видів і зони оптимуму, з виходом за рамки яких змінюється видовий склад екосистем.

Попередні дослідження кореляції чистої первинної продукції з кількістю опадів для степових екосистем, проведені у 2008 році (Del Grosso, 2008) під час створення глобальної кліматичної моделі NCEAS model, вказують на наявність сильного зв'язку із $R^2 = 0,68$, $P < 0,05$. Багаторічні дослідження американських учених (Webb et al., 1978; Sala et al., 1988; Schuur, 2003; Del Grosso et al., 2008) у галузі моделювання залежності між кількістю опадів, температурою та чистою первинною продукцією показали, що продуктивність екосистем із деревною рослинністю більше залежить від температури повітря, тоді як степові екосистеми більше залежать від кількості наявної вологи.

Дослідження впливу сезонності опадів на фенологію степових рослин проведені також у степових екосистемах Китаю

(Zhou, 2016), де період піка вегетації має сильно виражений зв'язок із кількістю опадів ($R^2 = 0,71$, $P < 0,0001$). Наземна чиста первинна продукція цього регіону має сильний кореляційний зв'язок із сумарною річною кількістю опадів та сумарною кількістю опадів за літній період (Ni, 2004).

Для визначення сили впливу показників кількості опадів на біопродукційні процеси проведено дослідження залежності показників ЧПП ділянки «Стара» БЗ «Асканія-Нова» від сумарної річної кількості опадів і сумарної кількості опадів за ОЗВП та 12 МПВП. У ході статистичного аналізу отримано результати, які підтверджують гіпотезу про те, що показник сумарної кількості опадів за 12 МПВП та за ОЗВП, які передували вегетаційному піку, сильніше впливає на продукцію та процеси накопичення мортмаси, ніж сумарна річна кількість опадів. Ці дані фігурують у періодичній звітності і, зазвичай, використовуються для досліджень впливу кількості опадів на чисту первинну продукцію або створення математичних моделей. Показники кількості опадів за 12 МПВП та за ОЗВП мають кращий кореляційний зв'язок із показником чистої первинної продукції рослинних угруповань БЗ «Асканія-Нова» за 1950–1961, 1966–1970, 1996–2012 рр. (табл. 1). Розриви пояснюються відсутністю показника ЧПП для певних часових проміжків через певні природно-антропогенні причини.

Проведене дослідження дало змогу виявити існування позитивного тренду (рис. 2) динаміки сумарної кількості опадів за ОЗВП (1949–2012 рр.), що підтверджує висновки IV доповіді Міжурядової групи експертів із питань змін клімату (IPCC) у 2007 році про те, що рівень опадів у світі має тенденцію до зростання на 0,5–1,0% кожну декаду (IPCC, 2014). Додатково визначено, що піки (найбільші значення) показника чистої первинної продукції збігаються з піками сумарної кількості опадів за ОЗВП (рис. 3).

Для створення прогнозу показника ЧПП на основі моделі залежності показника ЧПП від сумарної кількості опадів використано часовий ряд із 1988 по 2012 рік. Цей вибір здійснено для ви-

ключення порушення кліматологічної однорідності через відсутність даних і через тимчасову зміну місцезонації стаціонару. Такий вибір пояснюється також концентрацією на сучасному періоді та спробою виключити давніші показники ЧПП і кількості опадів, які могли описувати відмінну кліматичну картину, що існувала у минулому.

Таблиця 1

Показник детермінації між значеннями ОЗВП, 12МПВП, сумарної річної кількості опадів (за 12 місяців, січень – грудень) та чистої первинної продукції дослідної ділянки «Стара» БЗ «Асканія-Нова» за періоди 1950–1961, 1966–1970, 1996–2012 рр.

| Характер залежності чистої первинної продукції | Сумарна кількість опадів за 12МПВП, R ² | Сумарна кількість опадів за ОЗВП, R ² | Сумарна кількість опадів за рік, R ² |
|--|--|--|---|
| Лінійна | 0,35 | 0,30 | 0,05 |
| Експоненціальна | 0,36 | 0,30 | 0,06 |
| Логарифмічна | 0,39 | 0,34 | 0,05 |
| Квадратична | 0,42 | 0,36 | 0,05 |
| Степенева | 0,42 | 0,36 | 0,07 |

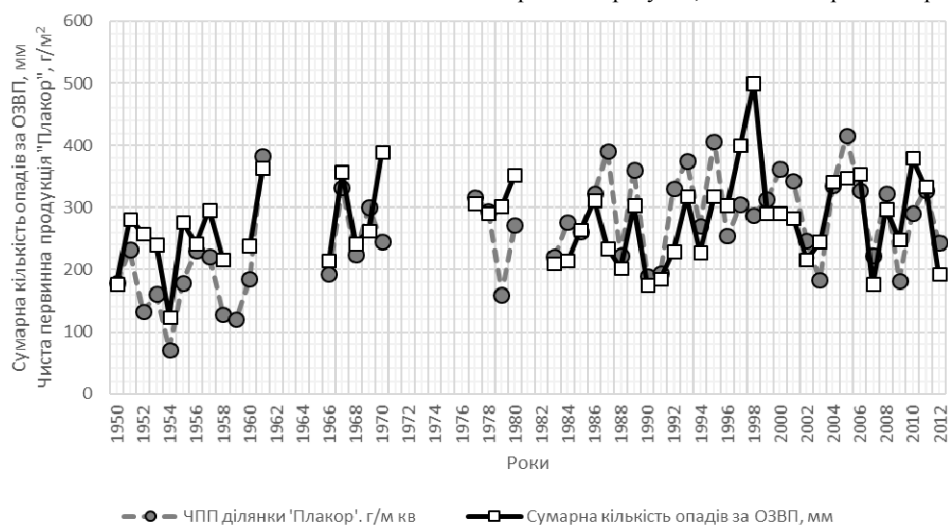


Рис. 3. Динаміка чистої первинної продукції елемента екологічного ряду «плакор» ділянки «Стара» та сумарної кількості опадів за осінньо-зимово-весняний період (1949–2012 рр.)

Отримані коефіцієнти детермінації підтвердили наявність нелінійної залежності між ЧПП і кількістю опадів за ОЗВП і 12МПВП. Нелінійна реакція степових екосистем у Каліфорнії на глобальні кліматичні зміни відзначається в праці Zhua (2016), де збільшення ЧПП також корелює зі збільшенням рівня опадів, CO₂ та азоту у ґрунті. Нелінійний характер зв'язку визначено на основі 17-річного часового ряду чистої первинної продукції (Zhua et al., 2016).

Для прогнозування показника ЧПП відібрано квадратичну модель залежності ЧПП від кількості опадів за ОЗВП як найбільш статистично значущу. Параметри рівняння обрховано методом найменших квадратів (МНК). Рівняння регресії:

$$y = -0,00396x^2 + 2,936x - 200,297. \quad (1)$$

Емпіричні коефіцієнти регресії виступають оцінками теоретичних коефіцієнтів, рівняння ж показує тільки загальну тенденцію динаміки змінних, що розглядаються. Так, R² = 0,54 говорить про те, що на 54% чиста первинна продукція рослинних угруповань у південному Степу залежить від сумарної кількості опадів за ОЗВП.

Середня відносна помилка апроксимації для даного рівняння становила 12,8%, що задовільно для природних процесів. Значення коефіцієнта пружності становило 0,61 (це означає, що за можливої зміни x на 100%, y зміниться на 61,0%). Коефіцієнт детермінації (та рівняння регресії в цілому) статистично значимий, виходячи з критерію Фішера. Автокореляція

Для подальшого створення моделі залежності чистої первинної продукції від кількості опадів вирішено використати показник сумарної кількості опадів за 12 місяців, які передували вегетаційному піку (12МПВП) та за ОЗВП, як такий, що має вагомий кореляційний зв'язок, і обрати найдостовірніші моделі.

Для вибору форми кривої використано статистичний критерій – коефіцієнт детермінації R². Модель залежності ЧПП від показника сумарної кількості опадів за ОЗВП на основі рівняння другого порядку мала R² = 0,54, степеневого рівняння – R² = 0,41, логарифмічного рівняння – R² = 0,39, на основі експоненти – R² = 0,33, на основі лінійного рівняння – R² = 0,30. Модель залежності ЧПП від показника сумарної кількості опадів за 12МПВП, на основі рівняння другого порядку мала R² = 0,52, степеневого рівняння – R² = 0,39, логарифмічного рівняння – R² = 0,38, на основі експоненти – R² = 0,32, на основі лінійного рівняння – R² = 0,30. Тобто різницю між показниками коефіцієнта детермінації для сумарної кількості опадів за ОЗВП і 12МПВП для сучаснішого кліматичного періоду можна пояснити збільшенням впливу кількості опадів саме за осінньо-зимово-весняний період на формування чистої первинної продукції, ніж для попереднього річного періоду.

та гетероскедастичність відсутні (рис. 4). Для валідації моделі використано дані первинної продукції та кількості опадів за 2013–2016 роки. Проведено графічний порівняльний аналіз динаміки фактичної чистої первинної продукції та змодельованих показників на основі рівняння (1) (рис. 5). Отриманий графік підтверджує, що отримана модель передає загальну структуру динаміки чистої первинної продукції. Єдине обмеження моделі – передача пікових та критичних показників ЧПП у 1995, 2000, 2003, 2009, 2016 роках, на які впливали інші природні та антропогенні чинники, не пов'язані з опадами (пірогенні та постпірогенні процеси, сукцесійні зміни тощо). Змодельовані предикції показників чистої первинної продукції та сумарної кількості опадів за ОЗВП для 2050 та 2070 років. На основі 10 кліматичних моделей (The Community Climate System Model Version 4 (CCSM4), GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M) створено прогнози показника сумарної кількості опадів за осінньо-зимово-весняний період (табл. 2–5). Отримані результати моделювання, використані у розрахованому регресійному рівнянні для отримання показника чистої первинної продукції рослинних угруповань БЗ «Асканія-Нова», також наведені в таблицях 2–5, що являють прогнозовані середні показники сумарної кількості опадів за ОЗВП та чистої первинної продукції для періодів 2040–2060 та 2060–2080 років.

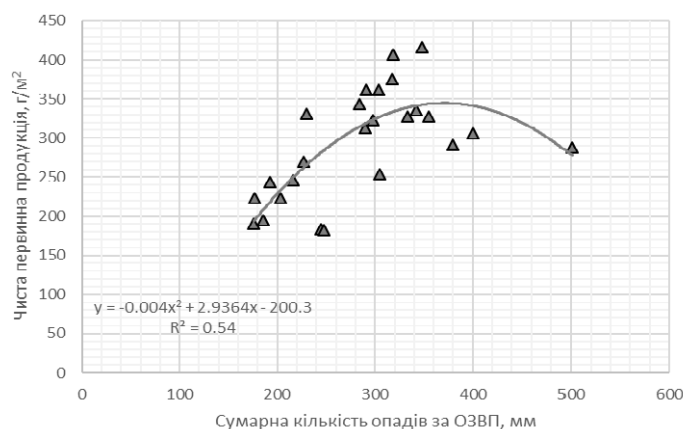


Рис. 4. Модель залежності чистої первинної продукції рослинних угруповань плакору ділянки «Стара» та сумарної кількості опадів за осінньо-зимово-весняний період 1988–2012 рр. ($P < 0,05$)

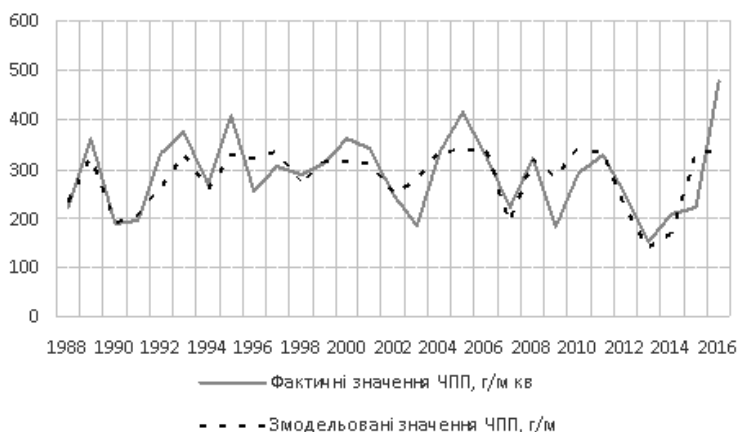


Рис. 5. Характер динаміки фактичної та змодельованої чистої первинної продукції рослинних угруповань плакору ділянки «Стара» (1988–2016 рр.)

Таблиця 2

Змодельовані предикції показників чистої первинної продукції та сумарної кількості опадів за ОЗВП для 2050 та 2070 рр. для сценарію RCP2.6

| Модель | Сценарій RCP2.6 | | | |
|--------------------|-------------------------|--|-------------------------|--|
| | 2050 | | 2070 | |
| | сума опадів за ОЗВП, мм | чиста первинна продукція, г/м ² | сума опадів за ОЗВП, мм | чиста первинна продукція, г/м ² |
| CCSM4 | 289 | 317 | 283 | 313 |
| GISS-E2-R | 287 | 316 | 280 | 311 |
| HadGEM2-AO | 343 | 341 | 323 | 335 |
| HadGEM2-ES | 311 | 330 | 318 | 333 |
| IPSL-CM5A-LR | 287 | 316 | 288 | 317 |
| MIROC-ESM-CHEM (#) | 283 | 313 | 304 | 326 |
| MIROC-ESM (#) | 297 | 322 | 282 | 313 |
| MIROC5 (#) | 284 | 314 | 292 | 319 |
| MRI-CGCM3 | 284 | 314 | 282 | 313 |
| NorESM1-M | 298 | 323 | 274 | 307 |
| AVERAGE | 296 | 321 | 293 | 319 |

Оскільки кліматичні моделі оперують усередненими за 20 років даними, для території Асканії-Нова на основі наявних даних про динаміку опадів розраховано середній показник сумарної кількості опадів за ОЗВП для періодів 1976–1995 та 1996–2015 років. Даний тип генералізації дозволяє визначити певні усереднені зміни за часові періоди та дозволяє прогнозувати глобальні тенденції змін клімату. На рисунках 6 та 7 наведено графіки зміни сумарної кількості опадів за ОЗВП і прогнозований показник ЧПП для чотирьох можливих кліматичних сценаріїв із використанням середніх значень 10 кліматичних моделей. Як бачимо, на рисунку 6 середні значення показника кількості

опадів для періоду 1996–2015 рр. збільшилися порівняно з періодом 1976–1995 рр. на 35 мм, що являє собою збільшення кількості опадів на 13,3%.

Таблиця 3

Змодельовані предикції показників чистої первинної продукції та сумарної кількості опадів за ОЗВП для 2050 та 2070 рр. для сценарію RCP4.5

| Модель | Сценарій RCP4.5 | | | |
|--------------------|-------------------------|--|-------------------------|--|
| | 2050 | | 2070 | |
| | сума опадів за ОЗВП, мм | чиста первинна продукція, г/м ² | сума опадів за ОЗВП, мм | чиста первинна продукція, г/м ² |
| CCSM4 | 291 | 319 | 286 | 315 |
| GISS-E2-R | 281 | 312 | 275 | 308 |
| HadGEM2-AO | 336 | 339 | 328 | 337 |
| HadGEM2-ES | 306 | 327 | 307 | 328 |
| IPSL-CM5A-LR | 285 | 315 | 286 | 315 |
| MIROC-ESM-CHEM (#) | 293 | 320 | 289 | 317 |
| MIROC-ESM (#) | 291 | 319 | 288 | 317 |
| MIROC5 (#) | 309 | 329 | 276 | 308 |
| MRI-CGCM3 | 306 | 327 | 311 | 330 |
| NorESM1-M | 302 | 325 | 286 | 315 |
| AVERAGE | 300 | 323 | 293 | 319 |

Відповідно до різних сценаріїв та описаних кліматичних моделей за наступні 40 років кількість опадів збільшуватиметься. Для сценарію RCP6.0 збільшення відбудеться приблизно на 20 мм, що становить близько 4,5%, для RCP4.5 – на 2,7%, а для RCP2.6 – на 1,4%. Відповідно до цих трьох сценаріїв пік зростання кількості опадів припадатиме на часовий інтервал 2040–2060 рр., після чого кількість опадів поступово зменшуватиметься.

Таблиця 4

Змодельовані предикції показників чистої первинної продукції та сумарної кількості опадів за ОЗВП для 2050 та 2070 рр. для сценарію RCP6.0

| Модель | Сценарій RCP6.0 | | | |
|--------------------|-------------------------|--|-------------------------|--|
| | 2050 | | 2070 | |
| | сума опадів за ОЗВП, мм | чиста первинна продукція, г/м ² | сума опадів за ОЗВП, мм | чиста первинна продукція, г/м ² |
| CCSM4 | 282 | 313 | 291 | 319 |
| GISS-E2-R | 394 | 342 | 282 | 313 |
| HadGEM2-AO | 333 | 338 | 339 | 340 |
| HadGEM2-ES | 311 | 330 | 330 | 337 |
| IPSL-CM5A-LR | 303 | 326 | 294 | 321 |
| MIROC-ESM-CHEM (#) | 308 | 328 | 304 | 326 |
| MIROC-ESM (#) | 252 | 288 | 281 | 312 |
| MIROC5 (#) | 273 | 306 | 298 | 323 |
| MRI-CGCM3 | 300 | 324 | 301 | 325 |
| NorESM1-M | 296 | 322 | 292 | 320 |
| AVERAGE | 305 | 322 | 301 | 323 |

Ці три сценарії описують подібну тенденцію, з піком опадів у 2040–2060 рр. і поступовим зменшенням у пізніший період. Сценарій RCP8.5 докорінно відрізняється від попереднього, оскільки прогнозує уповільнення та поступове зростання кількості опадів без пікового значення у період 2040–2080 років. Вірогіднішим видається сценарій RCP6.0, оскільки у попередніх публі-

каціях авторів зазначалося, що характер динаміки кількості опадів на території БЗ «Асканія-Нова» має швидше не лінійний, а квадратичний характер, із можливим настанням піка в наступні 20 років, що відповідає саме сценарію RCP6.0.

Таблиця 5

Змодельовані предикції показників чистої первинної продукції та сумарної кількості опадів за ОЗВП для 2050 та 2070 рр. для сценарію RCP8.5

| Модель | Сценарій RCP8.5 | | | |
|--------------------|-------------------------|--|-------------------------|--|
| | 2050 | | 2070 | |
| | сума опадів за ОЗВП, мм | чиста первинна продукція, г/м ² | сума опадів за ОЗВП, мм | чиста первинна продукція, г/м ² |
| CCSM4 | 283 | 313 | 286 | 315 |
| GISS-E2-R | 279 | 311 | 268 | 302 |
| HadGEM2-AO | 304 | 326 | 311 | 330 |
| HadGEM2-ES | 300 | 324 | 306 | 327 |
| IPSL-CM5A-LR | 274 | 307 | 265 | 300 |
| MIROC-ESM-CHEM (#) | 281 | 312 | 309 | 329 |
| MIROC-ESM (#) | 311 | 330 | 311 | 330 |
| MIROC5 (#) | 305 | 327 | 312 | 330 |
| MRI-CGCM3 | 321 | 334 | 344 | 341 |
| NorESM1-M | 280 | 311 | 301 | 325 |
| AVERAGE | 294 | 320 | 301 | 323 |



Рис. 6. Змодельований показник динаміки сумарної кількості опадів за ОЗВП для чотирьох сценаріїв зміни клімату (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 та RCP8.5)

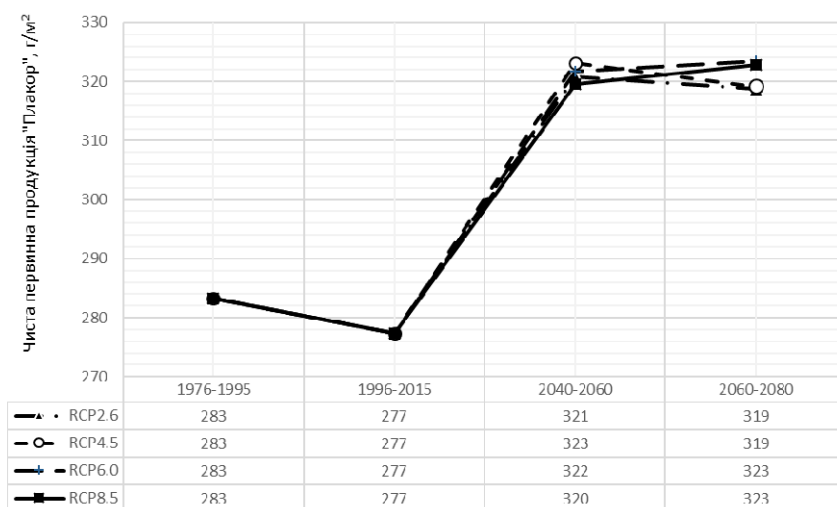


Рис. 7. Змодельований показник динаміки чистої первинної продукції для чотирьох сценаріїв зміни клімату (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 та RCP8.5)

Рисунок 7 показує усереднені прогнозовані значення чистої первинної продукції рослинних асоціацій території дослідної ділянки «Стара» за умов настання різних сценаріїв глобальних кліматичних змін. Така тенденція представлена умовно і без урахування зміни видового складу, який, безумовно, відбуватиметься за змін кількості опадів і поступових сукцесійних процесів. Саме цим пояснюється різкий стрибок продукції: приблизно на 15,5%, який прогнозується за період 2040–2060 рр., після чого прогнозується перехід рослинних видів до зони оптимуму за кількістю опадів і поступове зменшення продуктивності, крім сценарію RCP8.5, який прогнозує перенесення зони оптимуму на наступні за інтервалом 2060–2080 рр. періоди. Можна зробити висновок, що для типових рослинних асоціацій дослідної ділянки «Стара» БЗ «Асканія-Нова» характерний поступовий вхід у зону оптимуму відповідно до кількості вологи та залежно від зміни впливу рівня сонячної радіації та інтенсивності глобального потепління.

Висновки

Показник сумарної кількості опадів за 12 місяців, які передують вегетаційному піку рослин-ефікаторів дослідної ділянки або за осінньо-зимово-весняний період, який передував сезону вегетації, краще корелюють із показником чистої первинної продукції рослинних угруповань БЗ «Асканія-Нова», ніж показник сумарної річної кількості опадів за календарний рік.

Аналіз динаміки показника чистої первинної продукції трав'янистих угруповань дослідної ділянки «Стара» БЗ «Асканія-Нова» за 1988–2012 рр. і показника сумарної кількості опадів за ОЗВП статистично підтвердив наявність нелінійного зв'язку між параметрами, який характеризувався кривою другого порядку (квадратична залежність) з $R^2 = 0,54$ ($P < 0,05$).

Порівняння аналізу динаміки показника чистої первинної продукції трав'янистих угруповань дослідної ділянки «Стара» БЗ «Асканія-Нова» за 1988–2012 рр. із показником сумарної кількості опадів за ОЗВП та 12МПВП показав більш значущий зв'язок саме із кількістю опадів за ОЗВП, що може вказувати на збільшення важливості надходження опадів саме в цей період для вегетаційних процесів або зменшення ролі кількості опадів за зимовий період.

На основі розрахованих даних динаміки показника сумарної кількості опадів за осінньо-зимово-весняний період, які базуються на наявних даних сумарної місячної кількості опадів, наданих метеорологічною станцією «Асканія-Нова», підтверджено наявність позитивного тренду збільшення кількості опадів за цей період.

Показники ЧПП рослинних угруповань БЗ «Асканія-Нова», розраховані для періодів 2050 та 2070 рр. для чотирьох кліматичних сценаріїв, мають подібну тенденцію.

Моделювання показника динаміки сумарної кількості опадів за ОЗВП для чотирьох сценаріїв змін клімату (RCP2.6, RCP4.5, RCP6, та RCP8.5) підтвердило як позитивний тренд, так і нерівномірний характер зростання цього показника. Найбільша кількість опадів (понад 300 мм) за ОЗВП до 2070 р. очікується у разі змін клімату за сценаріями RCP6.0 та RCP8.5. Сценарії RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 прогнозують настання піка кількості опадів у період 2040–2060 рр. із поступовим зменшенням у пізні періоди. Сценарій RCP8.5 свідчить про поступове постійне збільшення кількості опадів і про відсутність зони оптимуму у період до 2080-х років.

Модель динаміки ЧПП залежно від сумарної кількості опадів за ОЗВП передає загальні тенденції без можливості моделювання пікових значень, що можна пояснити впливом інших факторів, які спричиняють піки біомаси, не залежних або частково залежних від кількості опадів.

Проведене дослідження підтвердило важливість проведення моніторингу зміни кліматичних параметрів і стану рослинних угруповань, створення та удосконалення вітчизняних математичних біокліматичних моделей і прогнозів із метою найдосто-

вірнішого моделювання та прогнозування наслідків глобальних кліматичних змін, зокрема, для степової зони України.

References

- Bentsen, M., Bethke, I., Debemard, J. B., Iversen, T., Kirkevag, A., Seland, O., Drange, H., Roelandt, C., Seierstad, I. A., Hoose, C., & Kristjánsson, J. E. (2013). The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. *Geoscientific Model Development*, 6, 687–720.
- Brygadyrenko, V. V. (2014a). Influence of moisture conditions on the structure of litter invertebrate communities in shelterbelt and plantation forests in Southern Ukraine. *Journal of Bio-Science*, 22, 77–88.
- Brygadyrenko, V. V. (2014b). Influence of soil moisture on litter invertebrate community structure of pine forests of the steppe zone of Ukraine. *Folia Oecologica*, 41(1), 8–16.
- Brygadyrenko, V. V. (2015). Influence of moisture conditions and mineralization of soil solution on structure of litter macrofauna of the deciduous forests of Ukraine steppe zone. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, Ecology*, 23(1), 50–65.
- Del Grosso, S., Parton, W., Stohlgren, T., Zheng, D., Bachelet, D., Prince, S., Hibbard, K., & Olson, R. (2008). Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. *Ecology*, 89, 2117–2126.
- Drogobych, N. E. (2000). Postpyrognennaja dinamika nadzemnoj fitomassy stepnyh fitocenozov prichernomor'ja [Post-pyrognenic dynamics of aboveground biomass of steppe phytocoenosis of Black Sea region]. *Stepi Severnoj Evrazii. Orenburg*, 148–150 (in Russian).
- Dufresne, J. L., Foujols, M. A., & Denvil, S. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40(9), 2123–2165.
- Fay, P. A., Carlisle, J. D., & Knapp, A. K. (2003). Productivity responses to altered rainfall patterns in a C₄-dominated grassland. *Oecologia*, 137(2), 245–251.
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B., Rasch, P. J., Vertenstein, M., Worley, P. H., Yang, Z.-L., & Zhang, M. (2011). The Community Climate System Model Version. *Journal of Climate*, 24, 4973–4991.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Huxman, T. E., Smith, M. D., Fay, P. A., Knapp, A. K., Shaw, M. R., Loik, M. E., Smith, S. D., Tissue, D. T., Zak, J. C., Weltzin, J. F., Pockman, W. T., Sala, O. E., Haddad, B. M., Harte, J., Koch, G. W., Schwinning, S., Small, E. E., & Williams, D. G. (2004). Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 429, 651–654.
- Kul'bachko, Y. L., Didur, O. O., Loza, I. M., Pakhomov, O. E., & Bezrodnova, O. V. (2015). Environmental aspects of the effect of earthworm (Lumbricidae, Oligochaeta) tropho-metabolic activity on the pH buffering capacity of remediated soil (steppe zone, Ukraine). *Biology Bulletin*, 42, 899–904.
- Lauenroth, W., & Sala, O. (1992). Long-term forage production of North American shortgrass steppe. *Ecological Applications*, 2(4), 397–403.
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R., Hardiman, S. C., Hinton, T. J., Jones, C. D., McDonald, R. E., McLaren, A. J., O'Connor, F. M., Roberts, M. J., Rodriguez, J. M., Woodward, S., Best, M. J., Brooks, M. E., Brown, A. R., Butchart, N., Dearden, C., Derbyshire, S. H., Dharssi, I., Doutriaux-Boucher, M., Edwards, J. M., Falloon, P. D., Gedney, N., Gray, L. J., Hewitt, H. T., Hobson, M., Huddleston, M. R., Hughes, J., Ineson, S., Ingram, W. J., James, P. M., Johns, T. C., Johnson, C. E., Jones, A., Jones, C. P., Joshi, M. M., Keen, A. B., Liddicoat, S., Lock, A. P., Maidens, A. V., Manners, J. C., Milton, S. F., Rae, J. G. L., Ridley, J. K., Sellar, A., Senior, C. A., Totterdell, I. J., Verhoef, A., Vidale, P. L., & Wiltshire, A. (2011). The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4, 723–757.
- Ni, J. (2004). Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China. *Plant Ecology*, 174–217.
- Paris, Q. (1992). The Return of von Liebig's "Law of the Minimum". *Agronomy Journal*, 84, 1040–1046.
- Parton, W. J., Lauenroth, W. K., & Smith, F. M. (1981). Water loss from a shortgrass steppe. *Agriculture and Meteorology*, 24, 97–109.
- Paruelo, J., Lauenroth, W., Burke, I., & Sala, O. E. (1999). Grassland precipitation-use efficiency varies across a resource gradient. *Ecosystems*, 2(1), 64–68.
- Ponce-Campos, G. E., Moran, M. S., Huetel, A., Zhang, Y., Bresloff, C., & Huxman, T. E. (2013). Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. *Nature*, 494, 349–352.
- Ramenskij, L. G. (1971). Uchjot i opisanie rastitel'nosti (na osnove proektivnogo metoda): Izbrannye raboty [Accounting and description of vegetation (based on projective method): Selected works], 57–100 (in Russian).

- Rodin, L. E., Remezov, N. P., & Bazilevich, N. I. (1968). Metodicheskie ukazaniya k izucheniju dinamiki i biologicheskogo krugovorota v fitocenoazah [Guidelines for the study of the dynamics and biological cycle in plant communities]. Nauka, Leningrad (in Russian).
- Rosenzweig, M. L. (1968). Net primary productivity of terrestrial communities: Predictions from climatological data. *American Naturalist*, 102, 67–74.
- Sala, O. E., Parton, W. J., Joyce, L. A., & Lauenroth, W. K. (1988). Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology*, 69, 40–45.
- Schmidt, G. A., Kelley, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Russell, G. L., Aleinov, I., Bauer, M., Bauer, S. E., Bhat, M. K., Bleck, R., Canuto, V., Chen, Y.-H., Cheng, Y., Clune, T. L., Del Genio, A., de Fainchtein, R., Faluvegi, G., Hansen, J. E., Healy, R. J., Kiang, N. Y., Koch, D., Lacis, A. A., LeGrande, A. N., Lerner, J., Lo, K. K., Matthews, E. E., Menon, S., Miller, R. L., Oinas, V., Olosio, A. O., Perlwitz, J. P., Puma, M. J., Putman, W. M., Rind, D., Romanou, A., Sato, M., Shindell, D. T., Sun, S., Syed, R. A., Tausnev, N., Tsigaridis, K., Unger, N., Voulgarakis, A., Yao, M.-S., & Zhang, J. (2014). Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(1), 141–184.
- Schuur, E. A. G. (2003). Productivity and global climate revisited: The sensitivity of tropical forest growth to precipitation. *Ecology*, 84, 1165–1170.
- Shapoval, V. V. (2012). Flora sudynnyh roslyn Askanijs'kogo stepu [Flora of vascular plants of Askania steppe]. FOP Andrijev O. V., Askaniya-Nova (in Ukrainian).
- Tsvetkova, N. M., Pakhomov, O. Y., Serdyuk, S. M., & Yakyba, M. S. (2016). Biologichne riznomannitja Ukrainy. Dnipropetrovs'ka oblast'. Grunty. Metaly u gruntah [Biological diversity of Ukraine. Dnipropetrovsk region. Soils. Metals in the soils]. Lira, Dnipropetrovsk (in Ukrainian).
- Veden'kov, E. P. (1979). K voprosu o vlijanii zapovednogo rezhima na korennyju rastitel'nost' Askania-Nova [The influence of the protected regime on the root vegetation of Askania Nova]. *Aktual'nye Voprosy Sovremennoj Botaniki. Naukova Dumka, Kyiv*, 31–35 (in Russian).
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., & Kimoto, M. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23, 6312–6335.
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., & Kawamiya, M. (2011). MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4, 845–872.
- Webb, W., Szarek, S., Lauenroth, W., Kinerson, R., & Smith, M. (1978). Primary productivity and water use in native forest, grassland, and desert ecosystems. *Ecology*, 59, 1239–1247.
- Xu, X. M., Li, D. J., & Luo, Y. Q. (2015). Modeled ecosystem responses to intra-annual redistribution and levels of precipitation in a prairie grassland. *Ecological Modelling*, 297, 33–41.
- Yang, Y., Fang, J., Ma, W., & Wang, W. (2008). Relationship between variability in aboveground net primary production and precipitation in global grasslands. *Geophysical Research Letters*, 35, L23710.
- Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Tanaka, T. Y., Shindo, E., Tsujino, H., Deushi, M., Mizuta, R., Yabu, S., Obata, A., Nakano, H., Koshiro, T., Ose, T., & Kitoh, A. (2012). A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 23–64.
- Zhou, Y., & Jia, S. (2016). Precipitation as a control of vegetation phenology for temperate steppes in China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 9(3), 162–168.
- Zhua, K., Chiariello, N. R., Tobeck, T., Fukami, T., & Field, C. B. (2016). Nonlinear, interacting responses to climate limit grassland production under global change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(38), 10589–10594.