
ІННОВАЦІЙНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ГАЛУЗІ

УДК 631:528.8:551.5

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.32>

ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕГЕТАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ГІБРИДІВ СОНЯШНИКА ЗА РІЗНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ ЗОНИ СТЕПУ

Пічура В.І.¹, Домарацький Є.О.², Потравка Л.О.¹

¹Херсонський державний аграрно-економічний університет
вул. Стрітенська, 23, 73006, м. Херсон

²Миколаївський національний аграрний університет
вул. Георгія Гонгадзе, 9, 54000, м. Миколаїв
pichuravitalii@gmail.com

В останні 20 років в зоні Степу фіксується збільшення частоти кліматичних аномалій, зниження продуктивності опадів, збільшення частоти дефляційних процесів та рівня локальних ризиків змиву із полів посівів сільськогосподарських культур, порушення транспіраційних процесів та підвищення випаровуваності вологи у літньо-осінній період, погіршення вологозабезпечення агроценозів. Тому перспективним напрямом аграрної науки є використання даних дистанційного зондування Землі для дослідження стану посівів на основі *normalized difference vegetation index* (NDVI). Зокрема, для прогнозування урожайності необхідно здійснити детальний аналіз сезонних змін значень вегетаційного індексу для верифікації кривих вегетації рослин за різними сценаріями їх вирощування, попередніх польових дослідження та фактичного обліку урожаю окремих сортів та гібридів. Дослідження розвитку та продуктивності різних гібридів соняшника в природно-кліматичних умовах зони Степу України проводили в період 2019–2021 рр. Просторово-часова диференціація вегетації гібридів соняшника визначалася на основі розрахунку NDVI за даними дешифрування космічних знімків Sentinel 2. Встановлено, що зміни кліматичних умов суттєво впливають на інтенсивність фотосинтетичних процесів, продукування хлорофілу та фенологічні фази рослин. Доведено, що у сухий рік (2020 р.) було скорочення тривалості фази цвітіння гібридів соняшника, зафіксовано низький рівень вегетаційного індексу NDVI у фазу утворення кошику (0,22–0,40) та фазу досягання (0,30–0,40). У середньовологий рік (2019 р.) в першій половині вегетації зафіксовано сприятливі умови розвитку рослин та позитивну реакцію на внесення багатофункціональних рістрегулюючих препаратів, а друга половина вегетації характеризувалася зниженням вологозапасу ґрунту та скороченням фази цвітіння гібридів соняшника. У вологий рік (2021 р.) зафіксовано пролонгацію фази цвітіння, високі значення вегетаційного індексу протягом усіх фенологічних фаз розвитку рослин, позитивна реакція на багатофункціональні рістрегулюючі препарати. Доведено ефективність застосування багатофункціональних рістрегулюючих препаратів. Їх внесення сприяло приросту урожайності гібридів соняшника: у сухий рік – 1,5–11,7%, середньовологий – 4,5–11,5%, вологий рік – 4,5–28,2%. Спостерігалось зменшення споживання вологи рослинами у сухий рік – в межах 1,2–10,0%, середньовологий рік – 3,8–8,6%, вологий рік – 3,7–21,9%. Встановлена залежність реакції гібридів соняшника від пластичності гібрида до природно-кліматичних умов зони Степу гібрида та дії багатофункціональних рістрегулюючих препаратів. Отримані результати досліджень являються основою для прогнозування розвитку посівів гібридів соняшника з подальшим визначенням урожайності, що дозволяє встановити можливий рівень ефективності вирощування гібридів сільськогосподарськими виробниками у кліматичних умовах зони Степу. *Ключові слова:* соняшник, ріст регулюючі препарати, вегетація, NDVI, клімат, зона Степу, дистанційне зондування Землі.

The use of remote sensing to research the vegetative development of the sunflower hybrids under different climatic conditions of the Steppe zone. Pichura V., Domaratskiy Ye., Potravka L.

In the last 20 years, in the Steppe zone, have been recorded an increase of the climatic anomalies frequency, a decrease of the rainfall productivity, an increase of the deflation processes frequency and the level of local risks of washing away from the fields of agricultural crops, disruption of the transpiration processes and an increase of moisture evaporation in the summer-autumn period, deterioration of the moisture supply of agrocenoses. Therefore, a promising area of agricultural science is the use of remote sensing data to research the condition of crops based on the *normalized difference vegetation index* (NDVI). In particular, in order to forecast the crop yield, it is necessary to carry out a detailed analysis of seasonal changes in the values of the vegetation index to verify the vegetation curves of plants according to different scenarios of their cultivation, preliminary field research and actual accounting of the harvest of individual varieties and hybrids. Research of the development and productivity of various sunflower hybrids in the natural-climatic conditions of the Steppe zone of Ukraine was conducted in the period 2019–2021. Spatio-temporal differentiation of the vegetation of the sunflower hybrids was determined on the basis of the calculation of NDVI based on the data deciphered from the Sentinel 2 space images. It was determined that changes in climatic conditions significantly affect the intensity of photosynthetic processes, chlorophyll

production and phenological phases of plants. It was proved that in a dry year (2020) there was a reduction in the duration of the flowering phase of sunflower hybrids, a low level of the NDVI vegetation index was recorded in the phase of basket formation (0.22–0.40) and the phase of maturation (0.30–0.40). In the moderately wet year (2019), favorable conditions for plant development and a positive reaction to the introduction of multifunctional growth-regulatory preparations were recorded in the first half of the vegetation, while the second half of the vegetation was characterized by a decrease in soil moisture and a shortening of the flowering phase of sunflower hybrids. In the wet year (2021), a prolongation of the flowering phase, high values of the vegetation index during all phenological phases of plant development, and a positive reaction on the multifunctional growth-regulatory preparations were recorded. The effectiveness of the use of multifunctional growth-regulatory preparations has been proven. Their application contributed the increase in the crop yield of sunflower hybrids: in a dry year – 1.5–11.7%, in a moderately wet year – 4.5–11.5%, in a wet year – 4.5–28.2%. A decrease in moisture consumption by plants was observed in a dry year – in the range of 1.2–10.0%, in a moderately wet year – 3.8–8.6%, in a wet year – 3.7–21.9%. The dependence of the reaction of sunflower hybrids on the plasticity of the hybrid to the natural-climatic conditions of the Steppe zone and the action of multifunctional growth-regulatory preparations was determined. The obtained research results are the basis for forecasting the development of sunflower hybrid crops with further determination of crop yield, which allows establishing the possible level of efficiency of hybrids growing by agricultural producers in the climatic conditions of the Steppe zone. *Key words:* sunflower, growth-regulatory preparations, vegetation, NDVI, Steppe zone, remote sensing.

Постановка проблеми. Фізико-географічна зона Степу характеризується високим рівнем температурного режиму, дефіцитним, нестійким та нерівномірним розподілом атмосферних опадів, що обумовлює ризикові умови землеробства та недоотримання урожаю сільськогосподарських культур [1–4]. В останні 20 років зафіксовано зростання частоти аномальних кліматичних проявів в 3 рази, що стало причиною зростання середньорічної температури на 2,6°C та збільшення частоти опадів зливового характеру у весняно-літній період [5–7]. Наслідком таких явищ є зниження продуктивності опадів, збільшення частоти дефляційних процесів та рівня локальних ризиків змиву із полів посівів сільськогосподарських культур, порушення транспіраційних процесів та підвищення випаровуваності вологи у літньо-осінній період, погіршення вологозабезпечення агроценозів. За таких екстремальних кліматичних умов волога є лімітуючим фактором продуктивності сільськогосподарських культур [8–9], тому важливим завданням у землеробстві є агротехнологічна консервація передпосівної ґрунтової вологи та ефективне її використання запасів у період вегетації рослин [10–12].

Перспективним напрямом аграрної науки є використання даних дистанційного зондування Землі для дослідження стану посівів на основі *normalized difference vegetation index* (NDVI) [13–14]. Просторово-часове диференціація вегетаційного індексу агроценозів є індикатором стану розвитку рослин у різні фенологічні фази у залежності від природно-кліматичних умов, обсягів і характеру опадів, рівня агротехнологічних заходів. Це дозволяє встановити рівень пластичності сортів та гібридів до кліматичних умов певних фізико-географічних зон та здійснити оцінювання урожайності сільськогосподарських культур. Для прогнозування урожайності необхідно здійснити детальний аналіз сезонних змін значень вегетаційного індексу для верифікації кривих вегетації рослин за різними сценаріями їх вирощування, попередніх польових дослідження та фактичного обліку урожаю окремих сортів та гібридів.

Моделювання стану покриття агроценозів, активності фотосинтетичних процесів, продукування

вмісту хлорофілу в різні фенологічні фази можна здійснювати через встановлення спектрально-відбивних ознаки рослин на супутникових знімках, що є необхідним етапом дослідження пластичності сортів і гібридів до природно-кліматичних умов. В свою чергу, це дозволяє удосконалювати технології вирощування сільськогосподарських культур шляхом корегування агротехнологічних заходів, оптимізувати строки сівби, впроваджувати застосувати рістрегулюючі препарати.

Соняшник є основною олійною культурою в Україні, у структурі сівозмін господарств частка цієї культури складає 25–28%. Насіння сучасних районованих сортів і гібридів містить 50–52% олії, а селекційних до 60%, тому вони потребують високого рівня вологозабезпечення [15–17]. У процесі вегетації рівень водоспоживання у соняшника змінюється: від появи сходів до утворення кошику рослини споживають близько 20% вегетаційної вологи; у період фенологічних фаз утворення кошику та цвітіння споживання сумарної вегетаційної вологи становить 60%. У зонах екстремального землеробства збільшення урожайності сільськогосподарських культур може досягатися з використанням багатофункціональних рістрегулюючих препаратів комбінованої дії. Такі препарати мають стимулюючу і фунгіцидну дію, підвищують стійкість рослин до патогенної мікрофлори.

Мета дослідження – встановлення просторово-часових закономірностей вегетаційного розвитку гібридів соняшника за різних кліматичних умов зони Степу на основі даних дистанційного зондування Землі та нормалізованого різницевого індексу рослинності.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження розвитку та продуктивності різних гібридів соняшнику в природно-кліматичних умовах зони Степу України проводили в період 2019–2021 рр. на дослідному полі Миколаївської державної сільськогосподарської дослідної станції Інституту зрошеного землеробства Національної академії аграрних наук (ДСДС ІЗЗ НААН) України (рис. 1). Досліди проводилися без зрошення. Загальна

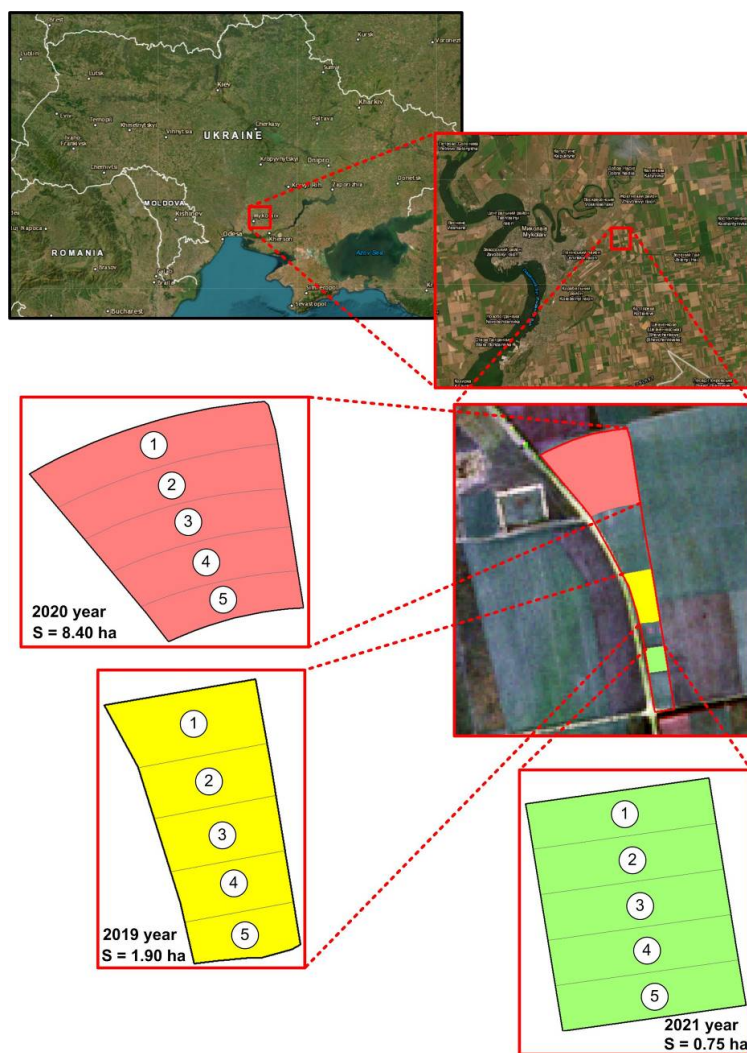


Рис. 1. Місце знаходження дослідних полів і порядок розташування посіві гібриду соняшнику у період 2019–2021 рр.: 1 – Оплот; 2 – Гектор; 3 – ДСЛ403; 4 – П64ГЕ133; 5 – 8Х477КЛ

площа дослідів: 2019 р. – 1,9 га, 2020 р. – 8,4 га, 2021 р. – 0,75 га.

Дослідні ділянки розташовані на малогумусних південних чорноземах із пилувато-важкосуглинковим гранулометричним складом. Вміст гумусу у ґрунтах варіює від 2,7 до 3,1%, глибина гумусового горизонту – 30–40 см. Реакція ґрунтового розчину наближена до нейтральної (рН 6,5–6,8), гідролітична кислотність в межах 2,00–2,52 мг екв. на 100 г ґрунту. Сума увібраних основ складає 32–35 мг екв. на 100 г ґрунту, ступінь насичення основами становить 95,7%. За вмістом рухомих елементів ґрунт дослідної ділянки характеризується середнім вмістом нітратного азоту в шарі ґрунту 0...20 см – 30,0 мг/кг та рухомого фосфору – 100 мг/кг і дуже високим вмістом обмінного калію – 300,0 мг/кг ґрунту.

У дослідженні використано фактичні дані приземної температури повітря (T , °C), сума атмосферних опадів (P , мм) за вегетаційний період за роками 2019, 2020, 2021 (метеорологічна станція Миколаїв).

Кліматичні норми для району досліджень розраховані за даними періоду 1970–2020 рр.

Програма наукових досліджень. Здійснено закладання двохфакторного польового дослідження, зокрема, фактор А – гібриди соняшнику високоолеїнового типу української та зарубіжної селекції, фактор В – позакореневі обробки рослин багатофункціональними рістрегулюючими препаратами з фунгіцидними властивостями.

Фактор А – українська селекція включала гібриди соняшнику Гектор і Оплот (оригінація – Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва), зарубіжна – ДСЛ403 та П64ГЕ133 (виробник Corteva, Brevant) та 8Х477КЛ (виробник Dow Seeds).

Фактор В – багатофункціональні рістрегулюючі препарати хімічного походження Архітект™ (ідентифікаційний номер 30652554/SDS_CPA_UA/UK) та біологічного походження – Хелафіт Комбі (реєстраційне посвідчення UA № А07743 від 02/09/2019 р.). Ділянки під кожним гібридом було

поділено на три частини: 1 – препарат Архітект™, 2 – препарат Хелафіт Комбі, 3 – контроль, внесення препаратів не проводилося, обробіток рослин здійснювався чистою водою. Препарати було внесено у розрахунку 1 л/га у вигляді позакореневих обробок у період формування 6–8 справжніх листків (ВВСН 16–18) макростадії «формування листків». Слід відмітити, що багатофункціональність препаратів обумовлена рістрегулюючими властивостями та фунгіцидним ефектом. Обробіток рослин проводився ранцевим обприскувачем до 11 години дня у безвітряну погоду. На контрольному варіанті обробіток рослин здійснювався чистою водою.

Повторність дослідів була триразова (2019 р., 2020 р., 2021р.). У 2019 році строк сівби – 24/04, збір урожаю – 26/08, у 2020 році сівба – 29/04, збір урожаю – 22/08, у 2021 році сівба – 10/05, збір урожаю – 12/09. Щороку гібриди соняшнику розташовувалися зі збереженням однакової послідовності (рис. 1) у межах типових ґрунтово-кліматичних умов, попередник – пшениця озима. Посівна площа ділянки першого порядку складала 168 м², облікова ділянка – 120 м².

Сівбу проводили сівалкою точного висіву УПС-8, норма висіву – 48,7 тис. шт./га. Всі обліки і спостереження виконувалися у відповідності до методики наукових досліджень в агрономії [18, 19], методичних рекомендацій Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН [20], існуючих ДСТУ 7011:2009 «Соняшник. Технічні умови» [21] і ДСТУ 6068:2008 «Насіння соняшнику. Сортові та посівні якості. Технічні умови» [22]. Вологість ґрунту визначалася термостатно-ваговим методом під час сівби та збирання культури [23]. Облік урожаю насіння проводили вручну, з подальшим перерахунком врожайності у тони з 1 гектара посівної площі із вологістю насіння 8% і чистоти насіння 100%.

Методи дешифрування космічних знімків та просторового аналізу. Просторово-часова диференціація вегетації гібридів соняшнику визначалася на основі розрахунку *normalized difference vegetation index* (NDVI) [13, 14, 24] за даними дешифрування космічних знімків Sentinel 2 із просторовим дозволом на місцевості 10×10 м на піксель.

Значення NDVI розраховано за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

де *NIR* – видимий та ближній інфрачервоний діапазон (Sentinel 2 – Band 8), *Red* – червоний діапазон електромагнітного спектра (Sentinel 2 – Band 4)

Значення NDVI має межі від 0 до 1,0. Відкритий ґрунт поля характеризується значеннями NDVI від 0,05 до 0,15. Значення NDVI на початок сівби за усіма роками дослідження становило 0,15. У період активної вегетації від макростадій «розвиток квіткових зачатків» (ВВСН 51–59) і до кінця макростадії

«цвітіння» (ВВСН 61–69) значення NDVI відображає стан розвитку посівів.

У дослідженнях використовували космічні знімки без наявності хмар над дослідним полем. Частота опрацювання знімків склала 10–16 днів, що надало можливості визначення значення NDVI для основних фенологічних фаз розвитку гібридів соняшнику, а саме: сходів (ВВСН 00-09), першої пари справжніх листків (ВВСН 10-12), утворення кошика (ВВСН 14-59), цвітіння (ВВСН 61-69), досягання (ВВСН 71-99).

Для покращення якості візуалізації картограм просторово-часового розподілу значень NDVI, підвищення достовірності інтерпретації вегетаційного індексу в межах окремих ділянок та характеристик неоднорідності вегетації гібридів соняшнику, було здійснено інтерполювання значень, отриманих на основі дешифрування космічних знімків Sentinel 2. Інтерполювання проведено із застосуванням методу геостатистичного аналізу радіально-базисної функції [25, 26]. Даний детерміністичний метод забезпечує встановлення точної інтепорляційної поверхні зміни значень NDVI із збереженням вхідних растрових даних. Обробка космічних знімків, побудова картограм та просторово-часовий аналіз здійснювався із застосуванням ліцензійного програмного продукту ArcGis 10.6.

Виклад основного матеріалу. Урожайність соняшнику переважно залежить від генетичних особливостей гібриду, його фітопотенціалу, ґрунтових та природно-кліматичних умов місцевості, елементів сортової агротехніки [27, 28]. Показником розвитку рослини є зміна активності його фотосинтетичних процесів і продукування вмісту хлорофілу на певній макростадії та фенологічній фазі. Дослідження змін фотосинтетичної активності гібридів соняшнику здійснювалося на основі аналізу значень NDVI, який є поширеним індексом для прогнозування продуктивності агроценозів.

Зональні умови дослідження характеризуються середньо-посушливими природно-кліматичними умовами. Середньостатистичне значення норми (період 1970–2020 рр.) температури повітря за вегетаційний період складає 18,0 °С, стандартне відхилення – 4,9 °С, рівнем варіації – 27,3%, сума середньомісячних температур – 89,9°С. Середньомісячне значення норми атмосферних опадів у вегетаційний період за 50 років (1970–2020 рр.) склало – 43,6 мм, стандартне відхилення – 12,6 мм, рівень варіації – 28,9%.

Добре розвинуті посіви соняшника за вегетаційний період споживають від 500 мм до 600 мм води, а мінімальна потреба у воді задовольняється при 300–400 мм атмосферних опадів. Значення норми суми атмосферних опадів території дослідження склало – 218 мм. Зокрема, у посушливих умовах зони Степу України рівень вологозабезпечення ґрунту є лімітуючим фактором формування продук-

тивності агроценозів. Визначено, що 60–70% сумарного водоспоживання соняшнику у період вегетації забезпечено атмосферними опадами, 30–40% – запасами вологи в ґрунті.

Сереньовологий рік (2019р.). У середньовологий рік середнє значення температури повітря за вегетаційний період склало 20,4°C, стандартне відхилення – 5,5°C, рівень варіації – 27,0%, сума середньомісячних температур – 102,0°C. Наближеним до типових умов кліматичних умов (норми) був 2019 рік, середньомісячне значення атмосферних опадів за вегетацію склало – 47,0 мм, стандартне відхилення – 13,3 мм, рівень варіації – 28,3%. За вегетаційний період у 2019 року сума атмосферних опадів склала – 235 мм. Передпосівні запаси вологи у метровому шарі ґрунту дослідних полів склали – 69 мм. Зокрема, друга половина терміну вегетації характеризувалася 23,9% дефіцитом відносно норми атмосферного зволоження та підвищенням температури на 11,5%, що викликало стрес у рослин, що стало причиною зниження урожайності.

У результаті дешифрування серії супутникових знімків у середньовологому році (2019 р.) на початку вегетаційного процесу (5 травня, 12 діб від строку сівби) у посівів гібридів соняшнику фіксовано дружні сходи (рис. 2) із середнім значенням індексу NDVI – 0,26±0,03 та незначним рівнем просторової варіації – 8,1%.

Після позакореневого обробітку гібридів соняшнику спостерігалася неоднорідна реакція рослин

на багатофункціональні рістрегулюючі препарати, що зафіксовано на супутниковому знімку 30 травня (37 діб від строку сівби). Слід відзначити позитивну реакцію і посилення розвиток рослин гібрида Оплот, значення NDVI варіювало в межах 0,54–0,77, гібрида Гектор із значеннями NDVI у межах 0,54–0,80 та гібрида ДСЛ403 із значеннями NDVI – 0,51–0,78. Пригнічена реакція на рістрегулюючі препарати спостерігалася у гібрида П64ГЕ133 зі значенням NDVI – 0,41–0,67 та гібрида 8Х477КЛ зі значенням NDVI 0,43–0,62. Наприкінці фенологічної фази «утворення кошику», 14 червня (52 доби від строку сівби) і початку фази «цвітіння», 19 червня (57 діб від строку сівби), зафіксовано гарний (0,55–0,7) та дуже гарний стан вегетації усіх гібридів соняшника (> 0,7). У це період середнє значення NDVI становило 0,72±0,06, рівень просторової неоднорідності – 8,2%. Однорідність вегетації рослин є являється підтвердженням комплексної дії продуктивних опадів та багатофункціональних рістрегулюючих препаратів.

Друга половина періоду вегетації гібридів соняшнику у 2019 році включає другу половину фази цвітіння (ВВСН 67-69) та макростадії «утворення плодів» (ВВСН 71-79), «дозрівання плодів і насіння» (ВВСН 80-89) і «відмирання» (ВВСН 92-99), які є складовими фенологічної фази досягання (ВВСН 71-99). Слід відмітити, що другий період вегетації рослин характеризувався стресовими умовами, обумовленими дефіцитом вологи та підвищеною температурою повітря. Це стало причиною різкого погіршення

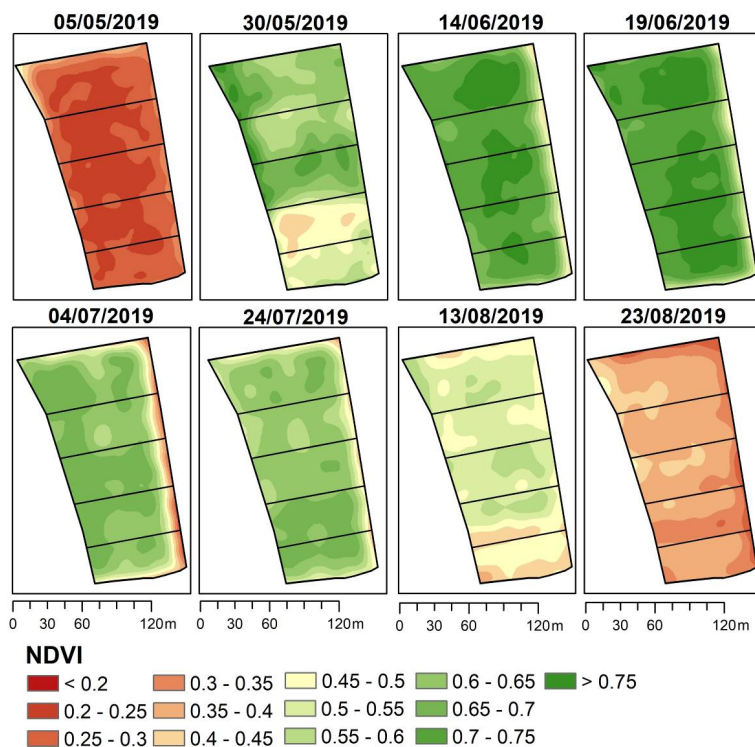


Рис. 2. Сезонний розподіл NDVI гібридів соняшнику на дослідному полі (2019 р.)

фотосинтетичних процесів і скорочення терміну макростадії «утворення плодів». 04 липня (72 доби від строку сівби) зафіксовано середнє значення NDVI – $0,63 \pm 0,09$ з помітними проявами неоднорідності формування продуктивності гібридів соняшнику, рівень просторової варіації – 14,1% (рис. 5).

У вегетаційний період макростадії «дозрівання плодів і насіння», 24 липня і 13 серпня, зафіксовано швидке дозрівання насіння гібридів П64ГЕ133 та 8Х477КЛ. В макростадії «відмирання» від періоду повної стиглості (вологість насіння близько 10%, ВВСН 92) до збирання урожаю (23 серпня) середнє значення NDVI склало 0,37, 26 серпня – 0,30.

Сухий рік (2020 р.). Середнє значення температури повітря за вегетаційний період становило $19,0^{\circ}\text{C}$, стандартне відхилення – $6,3^{\circ}\text{C}$, рівнем варіації – 33,3%, сума середньомісячних температур – $94,8^{\circ}\text{C}$. Зафіксовано, що в останні 10–15 років підвищилася частота аномальних проявів зливого характеру. У липні місяці 2020 року спостерігалось екстремальне підвищення вегетаційного індексу в період цвітіння соняшнику (ВВСН 61-69), але зливовий характер атмосферних опадів не мав позитивної енергії та пролонгованої дії на формування продуктивності гібридів соняшнику. Зокрема, у сухому році (2020 р.) зафіксовано високе значення стандартної похибки (84,1 мм) та рівень варіації сезонних

змін атмосферних опадів (139,7%), які підтверджують їх аномальних прояви у вегетаційний період. За вегетаційний період сума атмосферних опадів склала 295 мм (у липні випало нетипово аномальна кількість 70,5% частки вегетаційного періоду, непродуктивні опади зливого характеру). Передпосівні запаси вологи у метровому шарі ґрунту дослідних полів склали – 41 мм.

У 2020 році зафіксовано екстремально сухі умови для вирощування гібридів соняшнику, що стало причиною скорочення вегетаційного періоду та термінів окремих фенологічних фаз рослин. Зокрема, початок вегетації у 2020 році характеризувався низьким рівнем ґрунтового зволоження та незначною кількістю надходження атмосферних опадів. Це обумовило слабку енергію сходів рослин та критично низький рівень фотосинтетичних процесів на початку фенологічної фази утворення кошику (рис. 3).

Після обробітку посівів у період формування 6–8 справжніх листків зафіксовано сповільнені реакції усіх гібридів на дію багатофункціональних рістрегулюючих препаратів, це обумовлено стресовими кліматичними умовами. За даними дешифрування супутникового знімку за 19 травня (21 доба від строку сівби) розраховано низький рівень значення NDVI – $0,23 \pm 0,02$ (рис. 6) із незначним рівнем варіації – 8,2%.

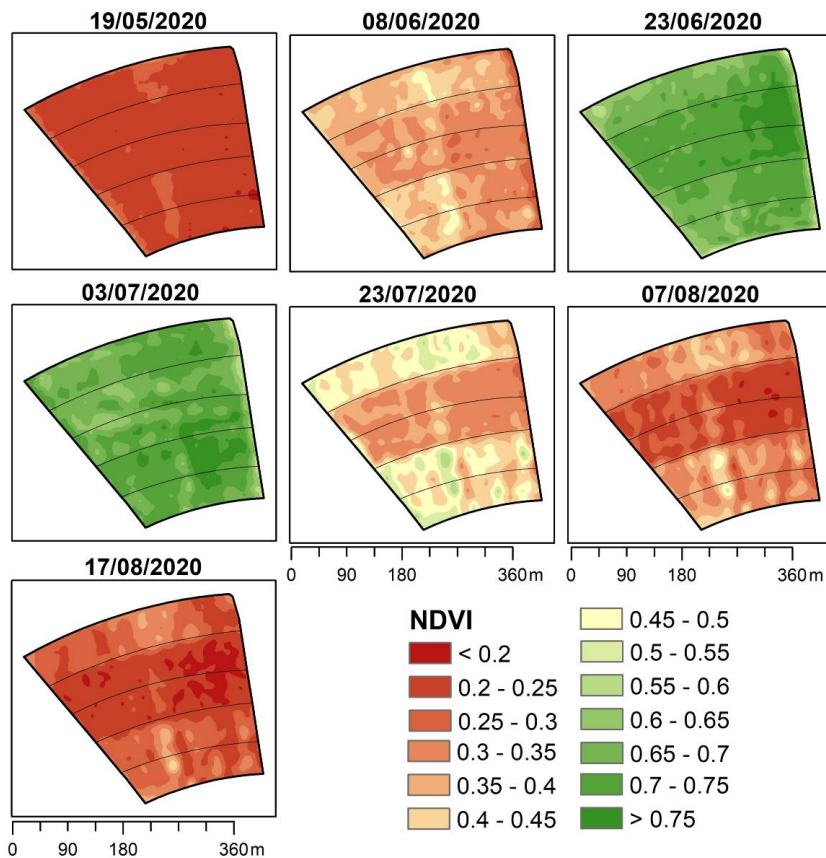


Рис. 3. Сезонний розподіл NDVI гібридів соняшнику на дослідному полі (2020 р.)

Дефіцит опадів спричинив подальше пригнічення розвитку рослини, що підтверджено результатами дешифрування супутникового знімку за 8 червня (41 доба від строку сівби), значення NDVI склало $0,36 \pm 0,04$ із суттєвим рівнем варіації – 10,3%. Червень 2020 року характеризувався зливовими опадами, що активізувало дію рістрегулюючих препаратів на фотосинтетичні процеси у гібридів соняшнику. На початку фази цвітіння, 23 червня (56 доба від строку сівби), значення NDVI становило $0,70 \pm 0,03$ із незначним рівнем варіації – 4,9%.

Кінець фази цвітіння, 3 липня (56 доба від строку сівби), також характеризувався високими значеннями NDVI – $0,69 \pm 0,03$ із рівнем варіації – 9,8%. Нестача атмосферного та ґрунтового вологозабезпечення у другій половині вегетації рослин стала причиною різкого зниження фотосинтетичної активності гібридів соняшнику та з відповідним скороченням терміну макростадії «утворення плодів» (ВВСН 71-79), стимулювала прискорення «дозрівання плодів і насіння» (ВВСН 80-89) і «відмирання» (ВВСН 92-99) рослин, 23 липня (86 доба від строку сівби) значення NDVI склало $0,41 \pm 0,04$ із рівнем варіації – 9,8%. Станом на 7 серпня (101 доба від строку сівби) значення NDVI становило $0,30 \pm 0,04$ із високим рівнем варіації – 12,2%.

У макростадію «відмирання» рослин, 17–18 серпня (112 доба від строку сівби), значення NDVI – $0,25 \pm 0,03$ із високим рівнем просторової варіації – 11,6%. Висока просторова варіація обумовлена значною просторовою неоднорідністю рослин в результаті стресу, викликаного кліматичними умовами. Встановлено, що гібриди соняшника Гектор та ДСЛ403 в сухі періоди дозрівали швидше. Процес неоднорідного дозрівання різних гібридів виокремлюється двома вершинами на гістограмі (рис. 7) та характеризується значним розсіюванням на графіку семіваріограми. Нестача вологи стала причиною погіршення фотосинтетичних процесів, суттєвим зниженням вмісту хлорофілу у рослинах, скороченням термінів важливих фенологічних фаз та періоду вегетації гібридів соняшника в цілому.

Вологий рік (2021 р). Середнє значення температури повітря за вегетаційний період становило $18,4^{\circ}\text{C}$, стандартне відхилення – $6,6^{\circ}\text{C}$, рівнем варіації – 35,8%, сума сердньомісячних температур – $92,2^{\circ}\text{C}$. Середньомісячне значенням атмосферних опадів склало – 72,8 мм, стандартним відділенням – 32,4 мм, та підвищеним рівнем варіації – 44,5%. За вегетаційний період сума атмосферних опадів склала – 364 мм. Передпосівні запаси вологи у метровому шарі ґрунту дослідних полів становили – 89 мм.

Початок вегетаційного періоду у 2021 році характеризувався сприятливими кліматичними умовами у передпосівний період, що забезпечило високий рівень вологозабезпечення ґрунту в період сівби. Це обумовило високу енергію та рівномірність сходів,

які зафіксовані 14 травня (5 діб від строку сівби), значення індексу NDVI – $0,25 \pm 0,03$, рівень просторової варіації – 6,2% (рис. 4).

Після обробки посівів, 8 червня (21 доба від строку сівби), спостерігалася висока неоднорідність реакції гібридів на багатофункціональні рістрегулюючі препарати, це обумовлено перерозподілом вологи на полі та пластичністю гібридів до кліматичних умов Степу. Значення NDVI становило $0,42 \pm 0,04$ із високим рівнем просторової варіації – 14,0%. У цей період зафіксовано високу фотосинтетичну здатність гібрида Оплот, значення NDVI сягало рівня 0,56. Порівняно невисокий рівень фотосинтезу мали гібриди ДСЛ403 (NDVI – 0,39) і П64ГЕ133 (NDVI – 0,40).

В період фенологічної фази цвітіння рослини посівів соняшника усіх гібридів характеризувалися високим рівнем фотосинтетичного процесу, 23 червня (45 доба від строку сівби) значення NDVI склало $0,75 \pm 0,06$ із рівнем просторової варіації – 8,5%. Систематичне надходження продуктивних атмосферних опадів та високе вологозабезпечення ґрунту в першій частині періоду вегетації обумовили пролонгацію фенологічної фази цвітіння, що сприяло підвищенню продуктивності рослин. У 2021 році фаза цвітіння становила 33 дні, що в 2,3 рази триваліше за попередні 2019 і 2020 роки. Максимальне значення NDVI у період цвітіння – 0,89–0,93. Високий рівень NDVI зафіксовано у фенологічну фазу досягання макростадії «утворення плодів» – 0,74 (76 доба від строку сівби) та макростадії «дозрівання плодів і насіння» – 0,54 (95 доба від строку сівби).

Високий рівень вологозабезпечення, використання комплексних багатофункціональних рістрегулюючих препаратів, продовження тривалості фази цвітіння забезпечили сприятливі умови утворення плодів та дозрівання насіння соняшнику. Наприкінці макростадії «дозрівання плодів і насіння», 6 вересня (119 доба від строку сівби), значення NDVI становило 0,39, у макрофазу «відмирання» та збору урожаю, 12 вересня, значення NDVI становило 0,32. Просторова варіація у період вегетації рослин була обумовлена просторовою диференціацією ґрунтової вологи, неоднорідністю реакції гібридів соняшнику на рістрегулюючі препарати та різним рівнем пластичності гібридів до погодних умов зони Степу.

Аналіз урожайності гібридів соняшнику. Результатами експериментальних польових досліджень та аналізом зміни стану посівів гібридів соняшника за різних кліматичних умов встановлено ефективність внесення багатофункціональних рістрегулюючих препаратів для покращення умов вегетації рослин з метою підвищення урожайності гібридів соняшника (табл. 1).

Позитивна реакція на внесення рістрегулюючих препаратів та пластичність до екстремальних погодних умов спостерігалася у гібридів соняшника

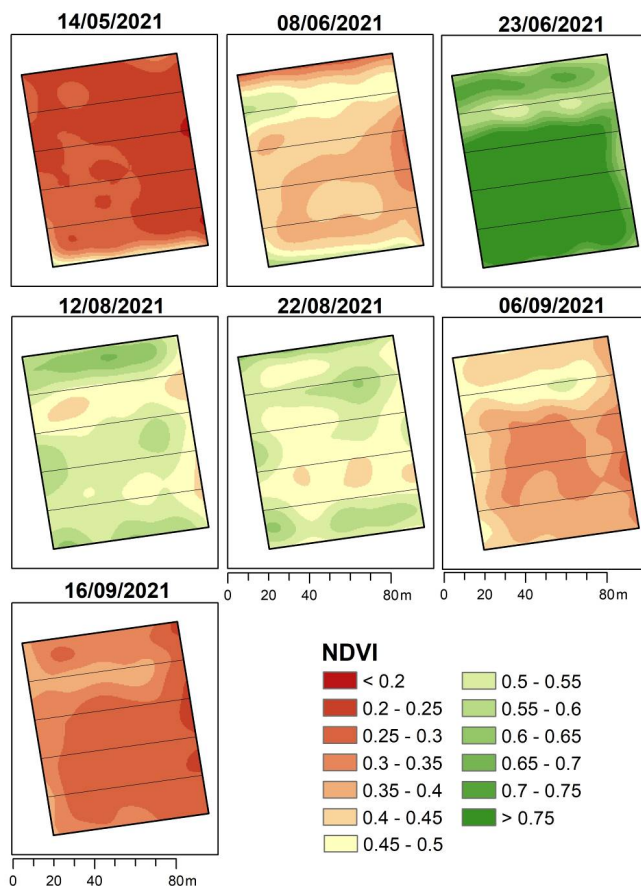


Рис. 4. Сезонний розподіл NDVI гібридів соняшнику на дослідному полі (2021 р.)

Таблиця 1

Урожайність соняшника залежно від позакоренових обробіток рістрегулюючими препаратами за роки проведення досліджень, т/га

Гібриди (фактор А)	Препарат (фактор В)	Роки			Середнє за 3 роки
		2019	2020	2021	
Оплот	Без препаратів (контроль)	2,82	1,98	2,88	2,56
	Архітект™	3,07	2,01	3,12	2,73
	Хелафіт Комбі	3,10	2,04	3,11	2,75
Гектор	Без препаратів (контроль)	1,92	1,54	2,04	1,83
	Архітект™	2,14	1,68	2,23	2,02
	Хелафіт Комбі	2,10	1,72	2,22	2,01
ДСЛ 403	Без препаратів (контроль)	2,44	1,83	2,54	2,27
	Архітект™	2,55	1,88	2,86	2,43
	Хелафіт Комбі	2,60	1,93	2,90	2,48
П64ГЕ133	Без препаратів (контроль)	2,71	1,90	2,92	2,51
	Архітект™	2,88	1,95	3,05	2,63
	Хелафіт Комбі	2,89	2,02	3,10	2,67
8Х477КЛ	Без препаратів (контроль)	2,22	1,68	2,41	2,10
	Архітект™	2,37	1,71	2,96	2,35
	Хелафіт Комбі	2,37	1,74	3,09	2,40
НІР05, т/га	Фактор А	0,09	0,07	0,09	–
	Фактор В	0,12	0,11	0,10	–
	Взаємодія факторів А і В	0,25	0,21	0,24	–

Оплот і П64ГЕ133, що підтверджено збільшенням їх урожайності. Урожайність зазначених гібридів була вищою у сухий рік – на 0,10–0,34 т/га, у середньовологий – на 0,38–0,86 т/га, у вологий – на 0,26–0,87 т/га. Низьку пластичність та зниження урожайності показав гібрид Гектор. Середніми показниками урожайності характеризувалися гібриди ДСЛ 403 та 8Х477КЛ, у сухий рік урожайність їх була нижчою ніж у середньовологий на 18,1–34,5%, а у вологий зросла на 0,3–30,4%.

Доведено, що позакореневе застосування комбінованих рістрегулюючих препаратів позитивно вплинуло на підвищення продуктивності гібридів сояшника. Так, найвищою середньою урожайністю за 2019–2021 роки характеризувався гібрид сояшника Оплот – 2,75 т/га (обробка біологічним рістрегулюючим препаратом Хелафіт Комбі).

В результаті аналізу реакції різних гібридів сояшнику на багатофункціональні рістрегулюючі препарати визначено, що препарат хімічного походження Архітект™ порівняно із контролем, забезпечив прибавку урожайності в сухий рік – від 1,5% до 9,1%, у середньовологий рік – в межах 4,5–11,5%, вологий рік – від 4,5% до 22,8%. Зокрема, використання біологічного препарату Хелафіт Комбі забезпечило прибавку урожаю гібридів сояшнику у сухий рік – в межах 3,0–11,7%, у середньовологий рік – від 6,6% до 9,9%, вологий рік – в межах 6,2% до 28,2%.

У результаті досліджень встановлено перевагу дії біологічного препарату Хелафіт Комбі над хімічним Архітект™ в 1,2 рази. Висока чутливість до препаратів у сухий та середньовологий роки зафіксовано у гібрида Гектор, прибавка урожайності становить 9,1–11,7%. У вологий рік використання препаратів забезпечило високу прибавку урожайності гібрида ДСЛ403, в межах 12,6–14,2%, і гібрида 8Х477КЛ, в межах 22,8–28,2%. Встановлено залежність реакції гібридів сояшника на багатофункціональні рістрегулюючі препарати від пластичності цих гібридів до природно-кліматичних умов зони Степу. Зафіксовано незначну реакцію на застосування рістрегулюючих препаратів у гібридів сояшника Оплот і П64ГЕ133, які мають високий рівень пластичності до природно-кліматичних умов зони Степу. У 80% варіантів кращі значення прибавки урожайності зафіксовано при застосуванні біологічного рістрегулюючого препарату Хелафіт Комбі. Застосування препарату біологічного походження Хелафіт Комбі перевищило рівень продуктивності агроценозів у порівнянні із препаратом хімічного походження Архітект™ на 1,1–5,4%.

Головні висновки. Встановлено просторово-часову залежність продуктивності сояшника від пластичності гібридів та внесення рістрегулюючих препаратів на основі аналізу диференціації вегетаційного індексу, який визначено за допомогою дешифрування супутникових знімків Sentinel 2 в період вирощування у 2019, 2020, 2021 роках. Встановлено, що зміни кліматичних умов суттєво впливають на інтенсивність фотосинтетичних процесів, продукування хлорофілу та фенологічні фази рослин. Доведено, що у сухий рік (2020 р.) було скорочення тривалості фази цвітіння гібридів сояшника, зафіксовано низький рівень вегетаційного індексу NDVI у фазу утворення кошику (0,22–0,40) та фазу досягання (0,30–0,40). У середньовологий рік в першій половині вегетації зафіксовано сприятливі умови розвитку рослин та позитивну реакцію на внесення багатофункціональних рістрегулюючих препаратів, а друга половина вегетації характеризувалася зниженням вологозапасу ґрунту та скороченням фази цвітіння гібридів сояшника. У вологий рік зафіксовано пролонгацію фази цвітіння, високі значення вегетаційного індексу протягом усіх фенологічних фаз розвитку рослин, позитивна реакція на багатофункціональні рістрегулюючі препарати. Доведено ефективність застосування багатофункціональних рістрегулюючих препаратів. Їх внесення сприяло прибавці урожайності гібридів сояшника: у сухий рік – 1,5–11,7%, середньовологий – 4,5–11,5%, вологий рік – 4,5–28,2%. Спостерігалось зменшення споживання вологи рослинами у сухий рік – в межах 1,2–10,0%, середньовологий рік – 3,8–8,6%, вологий рік – 3,7–21,9%. Встановлена залежність реакції гібридів сояшника від пластичності гібрида до природно-кліматичних умов зони Степу гібрида та дії багатофункціональних рістрегулюючих препаратів. Визначено підвищену чутливість до рістрегулюючих препаратів у сухий та середньовологий роки гібрида Гектор, прибавка урожайності становила 9,1–11,7%. У вологий рік використання препаратів забезпечило високу прибавку урожайності гібрида ДСЛ403 – 12,6–14,2%, і гібрида 8Х477КЛ – 22,8–28,2%. Незначну реакцію на застосування рістрегулюючих препаратів зафіксовано у гібридів сояшника Оплот і П64ГЕ133, прибавка урожайності – 1,5–9,9%. Отримані результати досліджень являються основою для прогнозування розвитку посівів гібридів сояшника з подальшим визначенням урожайності, що дозволяє встановити можливий рівень ефективності вирощування гібридів сільськогосподарськими виробниками у кліматичних умовах зони Степу.

Література

1. Lisetskii F., Pichura V. Steppe Ecosystem Functioning of East European Plain under Age-Long Climatic Change Influence. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9(18). P. 1–9. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i18/93780
2. Dudiak N.V., Potravka L.A., Stroganov A.A. Soil and Climatic Bonitation of Agricultural Lands of the Steppe Zone of Ukraine. *Indian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 46 (3). P. 534–540.

3. Loison R, Audebert A., Debaeke Ph., Hoogenboom G., Leroux L., Oumarou P., Gérardaux E. Designing cotton ideotypes for the future: Reducing risk of crop failure for low input rainfed conditions in Northern Cameroon. *European Journal of Agronomy*. 2017. Vol. 90. P. 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.08.003>
4. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Stroganov A., Dyudyaeva O. Spatial differentiation of regulatory monetary valuation of agricultural land in conditions of widespread irrigation of steppe soils. *Journal of water and land development*. 2021. No. 48 (I–III). P. 182–196; <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.136161>
5. Пічуря В.І., Потравка Л.О., Білошкурєнко О.С., Вознюк Н.М. Закономірності багаторічних змін клімату у зоні Степу України. *Науковий збірник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2022. № 3 (99). С. 89–104.
6. Pichura V., Potravka L., Vdovenko N., Biloshkurenko O., Strachuk N., Baysha K. Changes in Climate and Bioclimatic Potential in the Steppe Zone of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23 (12). P. 189–202. <https://doi.org/10.12911/22998993/154844>
7. Пічуря В.І., Потравка Л.О., Руття О.В. Просторово-часовий аналіз і прогноз кліматичних змін в зоні Степу України. *Екологічні науки*. 2022. № 6 (45). С. 110–118. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.18>
8. Kotova N. and Makhortyk S. Human adaptation to past climate changes in the northern Pontic steppe. *Quaternary International*. 2012. Vol. 220(1–2). P. 88–94.
9. Török P., Neuffer B., Heilmeyer H., Bernhardt K.-G., Wesche K. Climate, landscape history and management drive Eurasian steppe biodiversity. *Flora*. 2020. Vol. 271. 151685. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151685>
10. Domaratskiy E.O., Zhuykov O.G., Ivaniv M.O. Influence of Sowing Periods and Seeding Rates on Yield of Grain Sorghum Hybrids under Regional Climatic Transformations. *Indian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 45(4). P. 785–789.
11. Domaratskiy Ye., Kozlova O., Kaplina A. Economic Efficiency of Applying Environmentally Friendly Fertilizers in Production Technologies in the South of Ukraine. *Indian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 47 (3). P. 624–629.
12. Domaratskiy Ye., Bazaliy V., Dobrovol'skiy A., Pichura V., Kozlova O. Influence of Eco-Safe Growth-Regulating Substances on the Phytosanitary State of Agroecosystems of Wheat Varieties of Various Types of Development in Non-Irrigated Conditions of the Steppe Zone. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23(8). P. 299–308. <https://doi.org/10.12911/22998993/150865>
13. Essaadia A., Abdellah A., Ahmed A., Abdelouahed F., Kamal E. The normalized difference vegetation index (NDVI) of the Zat valley, Marrakech: comparison and dynamics. *Heliyon*. 2022. Vol. 8 (12). e12204. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12204>
14. Ding Y., He X., Zhou Zh., Hu J., Cai H., Wang X., Li L., Xu J., Shi H. Response of vegetation to drought and yield monitoring based on NDVI and SIF. *CATENA*. 2022. Vol. 2019. 106328. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106328>
15. Koutroubas S.D., Antoniadis V., Damalas Ch.A., Fotiadis S. Sunflower growth and yield response to sewage sludge application under contrasting water availability conditions. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 154. 112670. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112670>
16. Domaratskiy Ye. Leaf Area Formation and Photosynthetic Activity of Sunflower Plants Depending on Fertilizers and Growth Regulators. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22(6). P. 99–105. <https://doi.org/10.12911/22998993/137361>
17. Jan A.U., Hadi F., Ditta A., Suleman M., Ullah M. Zinc-induced anti-oxidative defense and osmotic adjustments to enhance drought stress tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Environmental and Experimental Botany*. 2022. Vol. 193. 104682. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104682>
18. Ермантраут Е.Р., Бобро М.А., Гопцій Т.І. та ін. *Методика наукових досліджень в агрономії: навчальний посібник*. Харківський національний аграрний університет ім. С.В. Докучаєва. Харків, 2008. 64 с.
19. Дідора В.Г., Смаглій О.Ф., Ермантраут Е.Р. *Методика наукових досліджень в агрономії: навчальний посібник*. Київ: Центр учбової літератури, 2013. 264 с.
20. Кириченко В.В., Сивенко В.І., Макляк К.М., Буряк Ю.І., Коломацька В.П., Лебеденко С.О., Сивенко О.А., Огурцов Ю.С., Андрієнко В.В., Сагаров О.З., Шепілов Б.П., Святченко С.І., Брагін О.М. *Вирощування насіння гібридів соняшнику: Методичні рекомендації*. Харків, 2014. 28 с.
21. ДСТУ 7011:2009. *Соняшник. Технічні умови*. https://elevator.com.ua/sites/default/files/docs/dstu_7011.pdf
22. ДСТУ 6068:2008. *Насіння соняшнику. Сортові та посівні якості*. Технічні умови. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=74272
23. Папіш І. *Практикум з фізики ґрунту*. Частина 2. Гідрофізика ґрунтів. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2001. 36 с.
24. Beyer M., Ahmad R., Yang B., Rodríguez-Bocca P. Deep spatial-temporal graph modeling for efficient NDVI forecasting. *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 4. 100172. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100172>
25. Kamińska A., Grzywna A. Comparison of deterministic interpolation methods for the estimation of groundwater level. *Journal of Ecological Engineering*. 2014. Vol. 15 (4). P. 55–60. DOI: 10.12911/22998993.1125458
26. Pichura V., Potravka L., Strachuk N., Drobitko A. Space-Time Modeling Steppe Soil Fertility Using Geo-Information Systems and Neuro-Technologies. *Bulgarian journal of agricultural science*. 2023. Vol. 29 (1). <https://www.agrojournal.org/>
27. Flagella Z., Rotunno T., Tarantano E., Caterina R.D. and Caro A.D. Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *European Journal of Agronomy*. 2022. Vol. 17(3). P. 221–230. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00012-6)
28. Ibrahim H.M. Response of Some Sunflower Hybrids to Different Levels. *APCBEE Procedia*. 2012. Vol. 4. P. 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.11.030>