

ЗМІСТ

Вступ	5
Розділ 1. Сучасний досвід застосування даних аерокосмічного моніторингу для прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур.....	8
Розділ 2. Матеріали і методи науково-дослідної роботи	21
2.1. Методи математичної статистики	21
2.2. Розрахунок вегетаційних індексів	29
2.3. Методика побудови інтерактивних електронних мап.....	31
2.4. Джерела дослідних даних	31
Розділ 3. Моделювання продуктивності основних сільськогосподарських культур, вирощуваних в Україні, за даними супутникового моніторингу	41
3.1. Моделі локального характеру.....	41
3.1.1. Квасоля звичайна.....	41
3.1.2. Кукурудза зернова.....	48
3.1.3. Кукурудза цукрова.....	50
3.1.4. Сорго зернове	55
3.1.5. Соя	57
3.1.6. Пшениця озима.....	59
3.1.7. Шкали продуктивності сільськогосподарських культур.....	62
3.1.8. Графічна апроксимація моделей продуктивності сільськогосподарських культур	62
3.1.9. Урожайність рису за краплинного зрошення за даними нормалізованого диференційного вегетаційного індексу.....	65
3.1.10. Узагальнення результатів моделювання продуктивності сільськогосподарських культур за даними дистанційного зондування на локальному рівні.....	68
3.1.11. Порівняння ефективності прогнозування врожайності кукурудзи цукрової за даними супутникового NDVI та наземних вимірювань LAI.....	71
3.2. Моделі регіонального характеру.....	78
3.2.1. Урожайність основних сільськогосподарських культур у Херсонській області за величиною вегетаційних індексів VHI, ASI, WMVHI.....	78
3.2.2. Урожайність основних сільськогосподарських культур в Україні за величиною NDVI, NDMI, VHI, LST та PET	83

3.2.3. Урожайність картоплі, овочевих та плодово-ягідних культур у Херсонській області за величиною NDVI.....	88
3.2.4. Урожайність злакових культур у Херсонській області за величиною NDVI.....	92
3.2.5. Урожайність олійних і технічних культур у Херсонській області за величиною NDVI.....	97
3.2.6. Порівняння ефективності традиційних та сучасних методів машинного навчання для прогнозування продуктивності пшениці озимої на регіональному рівні	101
Висновки	105
Список використаних джерел.....	106

ВСТУП

Сільське господарство є однією з ключових галузей економіки України, і відіграє ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки, створенні робочих місць та забезпеченні сталого розвитку. У сучасних умовах глобальних змін клімату, порушення логістичних ланок через бойові дії, зростання населення планети та виснаження природних ресурсів виникає потреба у підвищенні ефективності сільськогосподарського виробництва за рахунок оптимізації агротехнологій і використання природних, трудових і матеріально-технічних ресурсів. Одним із головних напрямів забезпечення оптимальної продовольчої політики, особливо у галузі експортно-імпортних відносин для задоволення рівного доступу до якісних продуктів харчування у різних регіонах планети, є прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур, яке базується не тільки на емпіричних моделях, побудованих із використанням даних наземних спостережень і вимірювань, але і за допомогою даних аерокосмічного моніторингу. Сучасні технології дистанційного зондування Землі дозволяють отримувати оперативну, динамічну деталізовану інформацію про стан посівів сільськогосподарських культур і природної рослинності, властивості ґрунтів і водних об'єктів, а також метеорологічні та агрокліматичні умови, що відкриває нові перспективи для дослідження довкілля та оптимізації агровиробничих процесів у відповідності до умов середовища.

Актуальність обраної тематики зумовлена кількома факторами. По-перше, традиційні методи оцінки врожайності, такі як польові обстеження та вимірювання, є трудомісткими та високо витратними, та не завжди здатні врахувати просторову неоднорідність. Супутниковий моніторинг, у свою чергу, забезпечує доступ до великих обсягів даних із високою роздільною здатністю, що дозволяє проводити аналіз на регіональному та локальному рівнях. По-друге, кліматичні зміни ускладнюють прогнозування врожайності з використанням

моделей, які базуються виключно на результатах польових досліджень, виконаних у конкретній агроекологічній зоні. По-третє, впровадження точного землеробства, індустріалізація та цифровізація сільського господарства практично неможливо уявити у відриві від прогнозування продуктивності агроecosystem. Таким чином, дослідження в цій галузі мають як наукову, так і практичну цінність.

Основні методи та алгоритми прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур на основі даних дистанційного зондування Землі включають як традиційні підходи, так і сучасні інноваційні рішення. Серед традиційних методів варто виділити кореляційно-регресійний аналіз, який використовує зв'язок між спектральними індексами (наприклад, NDVI – нормалізований диференційний вегетаційний індекс) та фактичною врожайністю. Цей підхід є простим у реалізації, але має обмеження через лінійність припущень. Більш сучасні методи базуються на машинному навчанні, зокрема на алгоритмах типу Random Forest (ансамблеве навчання), Support Vector Machines (SVM, метод опорних векторів) та нейронних мережах (наприклад, CNN – згорткові нейронні мережі). Ці алгоритми здатні обробляти великі масиви даних, враховувати нелінійні залежності та інтегрувати різноманітні джерела інформації – від супутникових знімків до метеорологічних даних. Також активно розвиваються моделі на основі часових рядів, які дозволяють прогнозувати динаміку розвитку сільськогосподарських культур впродовж вегетаційного періоду. Важливим етапом є попередня обробка даних аерокосмічного моніторингу, яка включає корекцію атмосферних впливів, геоприв'язку, виключення нетипових або спотворених знімків, підготовку зображень до математичної обробки та їх класифікацію.

Незважаючи на значний прогрес у сфері інформатизації агропромислового комплексу, прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур за даними аерокосмічного моніторингу донині стикається з низкою викликів та невирішених проблем. Однією з таких є якість і доступність

супутникових даних: хмарність та інші атмосферні явища можуть перешкоджати отриманню чітких супутникових знімків, а низька роздільна здатність унеможлиблює аналіз великих за площею ділянок і полів. Іншою проблемою є потреба у калібруванні моделей для різних культур, регіонів і кліматичних зон, що вимагає значних обчислювальних ресурсів та польових даних для валідації. Крім того, інтеграція даних із різних джерел (супутники, агрономічні дрони, наземні датчики) ускладнює процес через їхню неоднорідність і різний формат. Побудова якісних моделей вимагає крім збору даних їх кваліфікованої обробки спеціалістами, а це вимагає витрат на оплату праці відповідних експертів, їх тренування та інтеграцію в науковий і практичний агропростір. Нарешті, й інший економічний аспект – висока вартість доступу до комерційних платформ супутникових даних та комерційного програмного забезпечення – обмежує широке впровадження технологій у країнах, що розвиваються. Безкоштовні сервіси не завжди надають необхідний рівень деталізації та обсяг супутникових даних, а обробка «сирих» супутникових знімків і побудова складних моделей вимагає навичок у роботі з ГІС програмним забезпеченням та вміння програмувати.

Таким чином, представлена наукова праця, присвячена прогнозуванню продуктивності сільськогосподарських культур за даними аерокосмічного моніторингу, має на меті систематизувати сучасні підходи до вирішення цієї задачі, проаналізувати ефективність методів і алгоритмів, а також окреслити шляхи подолання існуючих проблем, запропонувати нові підходи та удосконалити традиційні на основі реальних експериментальних даних для ефективного науково-практичного застосування. Робота спрямована на створення наукової основи для розробки методичних засад, точних і доступних інструментів прогнозування продуктивності агроєкосистем, які сприятимуть розвитку сталого сільськогосподарства в Україні умовах глобальних викликів XXI століття.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ АЕРОКОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій та геоінформаційних систем області застосування аерокосмічного моніторингу в агросфері постійно розширюються. Одним із перспективних напрямів використання аерофотозйомки в агрономії є моделювання та прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур на основі величини розрахункових вегетаційних індексів.

Прогнозування врожайності є важливим завданням сучасної аграрної науки. Точне завчасне прогнозування врожайності, особливо у країнах, що розвиваються, є ключовим аспектом попередження голоду, посилення продовольчої безпеки та забезпечення сталого розвитку. Крім того, моделювання продукційних процесів має і менш стратегічне, але не менш важливе, значення і для агровиробників, оскільки дозволяє оперативно відстежувати та реагувати на несприятливі умови, які можуть знизити кількісні або якісні параметри майбутнього врожаю, шляхом коригування та оптимізації агротехнології (Horie et al., 1992).

Перші моделі продуктивності сільськогосподарських культур базувалися переважно на результатах польових експериментів, мали виключно емпіричний характер, і застосовували прості методи математичної статистики (переважно у вигляді регресійних моделей) для виконання прогнозних розрахунків. Не дивлячись на те, що зазначені підходи до сьогодні широко використовуються в аграрній науці, розвиток технічних можливостей і залучення даних дистанційного зондування Землі паралельно із інформаційними технологіями та новітніми

способами обробки великих масивів даних у системах машинного навчання, включно з глибоким навчанням у штучних нейронних мережах різної конфігурації, сприяли суттєвому прогресу щодо перегляду та оновлення підходів до прогнозування продуктивності агроєкосистем на основі даних супутникового моніторингу (Wang et al., 2018; Kumari & Prasad, 2024). Kumari et al. (2024) зазначають, що у той час як традиційними методами математичної статистики важко досягти гарних результатів у прогнозуванні продуктивності сільськогосподарських культур, залучення інтегративної комбінації машинного навчання та великих масивів даних, отриманих за допомогою засобів аерокосмічного моніторингу, до вирішення даного завдання відкрило нові перспективи для подальшого розвитку галузі.

Активне залучення даних супутникового моніторингу до проблематики прогнозування продуктивності сільськогосподарських земель започатковано ще у 60–70-ті роки минулого століття, паралельно з бурхливим розвитком аерокосмічного моніторингу та інформаційних технологій (Idso et al., 1977). На сьогоднішній день існує низка наукових робіт, результати яких підтверджують широкі можливості, які відкриває залучення даних дистанційного зондування Землі у прогнозування продуктивності агроєкосистем на різному рівні та у різних агроєкологічних зонах і агровиробничих умовах. Більшість із них виконано із залученням розрахункових вегетаційних індексів, хоча є і роботи, які залучають власне набори чистих супутникових знімків. Так, Qiao et al. (2021) залучили часову серію MOD09A1 та MYD11 із роздільною здатністю 500 м для прогнозування врожайності пшениці та кукурудзи на регіональному рівні. Прогнозування виконували шляхом розробки гібридної тривимірної згорткової штучної нейронної мережі з рекуррентним шаром та оновленою функцією розрахунку втрат моделі під час прогнозування врожаю. За рахунок інноваційного підходу дослідники змогли досягти вражаючих результатів: коефіцієнт детермінації коливався в межах 0,80–0,87 для пшениці та 0,66–0,74 для кукурудзи,

за середньоквадратичних похибок 0,62–0,68 та 0,82–0,87 т/га, відповідно.

Подібним чином, розроблена спеціалізована нейронна мережа YieldNet дозволила за знімками MOD09A1 та MYD11 спрогнозувати продуктивність сої та зернової кукурудзи на регіональному рівні для 1132 та 1076 провінцій США за 1–4 місяці до збирання врожаю з похибкою 8,74 та 8,70 %, відповідно, за величини коефіцієнтів кореляції на рівні 0,80–0,88 та 0,71–0,85 (Khaki et al., 2021). Зниження похибки прогнозування відбувалося із наближенням часу зчитування супутникових знімків до періоду збирання. Максимальну точність прогнозу одержано для жовтня місяця у випадку кукурудзи на зерно, та для вересня – у випадку сої (в цілому період охоплював серпень-жовтень місяці).

Одним із широко вживаних у науково-практичній діяльності є нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI), який є опосередкованим маркером стану здоров'я рослин, накопичення зеленої вегетативної маси, а також потенційної фотосинтетичної активності рослин, а тому може бути використаний для вивчення процесів формування продуктивності сільськогосподарських культур. Зв'язок між величинами NDVI та поглиненої фотосинтетично активної радіації (ФАР) згідно Gamon et al. (1995) є сильним і майже лінійним. Роботи Sellers (1985) та Myneni et al. (1995) підтверджують вищевказане. Отже, тісний зв'язок між цими показниками настановує на припущення про наявність прямого взаємозв'язку між величиною NDVI та врожайністю сільськогосподарських культур, оскільки остання напряму залежить від ефективного поглинання ФАР (Zhu et al., 2010; Raines, 2011). Тому NDVI є перспективним вегетаційним індексом для прогнозування продуктивності, особливо в системах точного землеробства, оскільки сучасний техніко-технологічний рівень індустріалізації виробництва продукції рослинництва вимагає нових підходів до оперативного моделювання, програмування та прогнозу продуктивності сільськогосподарських культур. Застосування даних супутникового моніторингу дозволяє

виконувати оперативне та високоточне прогнозування врожайності на основі NDVI, і зазвичай знижує собівартість розробки прогностичних моделей (Kouadio et al., 2014). Крім того, супутникові знімки на хмарних платформах точного землеробства надаються регулярно, мають достатню деталізацію і ж придатними для оперативного прогнозу врожайності як для невеликих ділянок і окремих полів, так і на регіональному рівні (Maas, 1988; Atzberger, 2013).

В Україні для прогнозування врожаїв найбільш широко застосовуваним є нормалізований диференційний вегетаційний індекс. Так, наприклад, урожайність ярого ячменю на обласному рівні в зоні Центрального Лісостепу було спрогнозовано методами регресійного аналізу. У період «сівба – сходи – 3-й листок» регресійна модель урожайності ячменю ярого мала коефіцієнт детермінації 0,875; у період «сходи – 3-й листок – кущення» коефіцієнт детермінації склав 0,927; у період «кущення – початок виходу в трубку» – 0,968; у період «вихід в трубку – початок колосіння» – 0,963; у період «коло-сіння» – 0,977. Таким чином, часова серія NDVI забезпечувала високоточне раннє прогнозування продуктивності ячменю ярого на регіональному рівні, причому відмічено певну залежність між якістю прогнозу та періодом використання даних вегетаційного індексу (Кравчук та ін., 2013).

В умовах Центрального Лісостепу України емпіричними математичними методами було розроблено модель прогнозування врожайності біомаси міскантусу гігантського за даними часової серії NDVI, розрахованими за аерокосмічними знімками Sentinel-2. На жаль, точність математичної моделі авторами дослідження оцінено не було (Квак та ін., 2019).

Цікаві результати було отримано в результаті регресійного моделювання продуктивності пшениці озимої за величиною супутникового вегетаційного індексу NDVI (за даними з MOD13). В середньому, лінійні регресійні моделі забезпечили гарну якість прогнозування врожайності культури: для періоду 2000–2009 рр. коефіцієнт детермінації склав 0,75; для періоду 2000–2010 рр. – 0,69. Варто відзначити широке

варіювання результатів прогнозування за природно-кліматичними зонами України. Так, мінімально точні прогнози було одержано для зони Полісся (коефіцієнт детермінації за періодами дослідження склав 0,433–0,479), середня точність – у зоні Лісостепу (0,667–0,680), і максимальна – у зоні Степу (0,796–0,804). Отже, можливості аерокосмічного моніторингу в прогностичних моделях урожайності пшениці озимої залежать не тільки від математичних алгоритмів і якості знімків, але і від агрокліматичних умов (Колотий, 2012). Подібних висновків дійшли й інші дослідники. Так, Семенова (2015) розробила ряд множинних регресійних моделей для прогнозу врожайності ярого ячменю за аерокосмічними даними, попередньо розрахувавши такі вегетаційні індекси як NDVI, NDWI та ECBI (регіональний індекс блокування). Вегетаційні індекси було розраховано за знімками MODIS роздільною здатністю 250 м з бази даних проєкту GLAM (Global Agriculture Monitoring Project). Максимальна якість прогнозів була одержана для зони Степу, і дещо менша – для інших природно-кліматичних зон України. Стандартна похибка моделювання в зоні Степу склала 0,33 т/га (при цьому мінімальна – у Херсонській та Миколаївській областях – 0,23 і 0,25 т/га), коефіцієнт детермінації становить 0,75–0,95 (у Лісостепу – 0,74–0,91).

Застосування методів квадратичної регресії до прогнозування врожайності пізніх ярих культур за величиною NDVI на півдні України дозволило з високою точністю змоделювати продуктивність таких культур як сорго зернове (середня відносна похибка 17,62 %), кукурудза зернова (8,75 %) і соя (3,75 %). За результатами регіонального моделювання продуктивності озимих культур (пшениці та ячменю) відповідно до величини таких вегетаційних індексів як NDVI та EVI розроблено шкали врожайності, які мають високу точність: похибка 5,7–6,5 %, коефіцієнт детермінації 0,89–0,90 для пшениці озимої; 8,9–10,6 %, коефіцієнт детермінації 0,77–0,82, відповідно. Дещо нижчу точність математичного прогнозування зафіксовано для вегетаційного індексу EVI, не дивлячись на