

УДК 004.932.75, 004.4'236, 004.942, 621.317.3

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771422021268468>Ю. В. Бобков¹, к.т.н., доцент, А. А. Шевчук², магістрант**СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ КВАДРОКОПТЕРА ДЛЯ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА****Ua**

У роботі проаналізовані шляхи вирішення задач точного землеробства та запропоновано застосування квадрокоптера, оснащеного системою технічного зору для отримання зображень досліджуваної земельної ділянки.

Була розроблена структурна схема системи технічного зору квадрокоптера, що дало можливість визначити необхідні технічні характеристики та обрати відповідне промислове обладнання.

Наступним кроком була розробка алгоритму отримання карти завдань для техніки точного землеробства на базі високоякісних знімків від СТЗ квадрокоптера, супутникових знімків низької роздільної здатності та результатів агрохімічних аналізів. Розглянуто шляхи реалізації етапів алгоритму.

Для перевірки отриманих результатів були проведені дослідження на тестовій ділянці площею 57,4 га, що була розташована в Чаплинському районі Херсонської області. За допомогою обраного обладнання та розроблених алгоритмів були отримані знімки ділянки, сформований ортофотоплан з зонами однорідності сходу рослин та розроблена карта внесення добрив для техніки точного землеробства. Польові дослідження повністю підтвердили правильність розрахунків та роботоздатність запропонованих алгоритмів.

En

Precision farming is a modern direction of agricultural development, which opens new opportunities to increase the productivity of each land by taking into account its specific features. Its implementation requires an assessment of the spatial heterogeneity of soils and agricultural vegetation. This ensures the timely application of adequate agricultural measures in those places that need it.

In this work, ways of solving the problems of precision farming are analyzed. The expediency of using a quadcopter with a technical vision system to obtain high-resolution images of the studied land plot is shown.

Specialized systems of technical vision for the tasks of precision agriculture are currently not mass-produced. Therefore, a block diagram of the quadcopter's technical vision system was developed, which made it possible to determine the necessary technical characteristics and select the appropriate industrial equipment.

Necessary software and algorithms were developed for the technical vision system. The proposed algorithm is based on the use of high-quality images from the technical vision system of the quadcopter, low-resolution satellite images and the results of agrochemical analyzes. When processing data, individual images taken with a quadcopter camera are combined into a single orthofotoplan. Then NDVI indicators from satellite images and results of agrochemical analyzes are

¹ КПП імені Ігоря Сікорського² КПП імені Ігоря Сікорського

added to it. The identified zones of plant fertility make it possible to build a differentiated fertilizer application map and a map of the agro-operations task plan for precision farming equipment.

To verify the results, studies were conducted on a test site with an area of 57.4 hectares, which was located in the Chaplin district of Kherson region. With the help of the selected equipment and the developed algorithms, images of the area were obtained, an orthofotoplan with plant germination zones was formed, and a map of fertilizer application for precision farming equipment was developed. Field studies fully confirmed the correctness of the calculations and the performance of the proposed algorithms.

Вступ

Останні роки характеризуються стрімким зростанням технологічності сільськогосподарського виробництва, яке все ширше використовує найсучасніші технології для підвищення еколого-економічної ефективності, зокрема технології точного землеробства. Ідеологія точного землеробства передбачає просторово диференційований підхід до застосування технологій вирощування сільгоспкультур залежно від властивостей ґрунту, забезпеченості рослин поживними речовинами та вологою, стану рослин на певному етапі їх розвитку.

Особливістю сільського господарства в Україні є відсутність зонування родючості землі та врахування стану розвитку посівів, що не дозволяє мати ефективне з точки зору економіки землеробство та веде до виснаження ґрунтів та падіння врожайності.

Необхідною умовою ведення точного землеробства є детальна та динамічна оцінка просторової неоднорідності стану ґрунтів та сільськогосподарської рослинності, що забезпечує своєчасне застосування адекватних агрозаходів, у першу чергу внесення добрив та зрошування саме в тих місцях, що цього потребують. [1, 2]

У класичному варіанті для точного землеробства використовують комплекс супутникових та комп'ютерних технологій, що включає в себе технології глобального позиціонування (*GPS*), географічні інформаційні системи (*GIS*), технології оцінки врожайності (*Yield Monitor Technologies*), технологію змінного нормування (*Variable Rate Technology*) і технології дистанційного зондування землі. Вказані технології достатньо добре проаналізовані у літературі та базуються саме на отриманні супутникової інформації високої роздільної здатності із наступною її обробкою за допомогою спеціалізованих програмних комплексів. [1, 2]

Нажаль ці сучасні технологічні рішення потребують дуже значних вкладень як у апаратне, так і програмне забезпечення. У сьогоденних умовах України затрати на супутникові інформаційні системи та вартісне комерційне програмне забезпечення не можуть собі дозволити навіть

крупні агрохолдинги, не кажучи вже про середні, дрібні та фермерські господарства.

У той же час існує альтернативний, більш економічний варіант, у разі якого для ведення точного землеробства застосовуються дані дистанційних моніторингових спостережень високої роздільної здатності отримані від безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оснащених системами технічного зору (СТЗ) [3]. Проте у цьому випадку доводиться вирішувати ряд супутніх достатньо складних задач, пов'язаних із вибором або розробкою необхідного обладнання та програмного забезпечення, просторовою прив'язкою отриманих даних та їх обробкою, застосуванням отриманих результатів для поопераційного ведення сільськогосподарських робіт. Цей варіант у сучасній літературі розглянутий недостатньо та не містить рекомендацій або конкретних шляхів реалізації для вирішення перелічених проблем.

Постановка задачі

Метою цієї роботи є розробка системи технічного зору та програмно-алгоритмічного комплексу для БПЛА мультироторного типу для отримання та обробки інформації високої роздільної здатності для вирішення задач точного землеробства, а також практична перевірка отриманих результатів.

Розробка структурної схеми СТЗ

Найчастіше для моніторингу сільгоспугідь застосовують БПЛА, зокрема, мультикоптери, що мають прийнятні технічні характеристики, прості у керуванні та мають відносно невисоку вартість. Серед існуючих видів мультикоптерів найбільшого поширення набули квадрокоптери, які у повній мірі відповідають переліченим вище критеріям. У загальному випадку можливі два основних шляхи:

- 1) розробка та виготовлення спеціалізованого квадрокоптера із заданими для вирішення вузькоспеціалізованої задачі характеристиками;
- 2) застосування серійної моделі квадрокоптера із прийнятними для вирішення поставленої задачі характеристиками.

Перший варіант є доцільним для випадків, коли планується використання достатньо значної кількості квадрокоптерів для великого сільськогосподарського підприємства на великих площах, або є значний попит від різних споживачів, наприклад, фермерських господарств і, відповідно, є замовлення на виготовлення таких квадрокоптерів. У цьому випадку виникає також необхідність створення програмно-інформаційного забезпечення для розробленого квадрокоптера, що потребує додаткових витрат. В умовах українських реалій такий шлях є передчасним.

Тому на сьогоднішній день, коли різноманітність пропозицій серійних квадрокоптерів постійно зростає, а їх ціна знижується, для окремих господарств, що переходять на технології точного землеробства, більш прийнятним є другий шлях – вибір та придбання серійного зразка квадрокоптера із стандартним базовим програмним забезпеченням для керування. У більшості випадків цей варіант є найбільш економічно обґрунтованим і саме він був прийнятий для реалізації поставлених задач. Основними характеристиками для вибору квадрокоптера при цьому будуть: максимальні висота, швидкість та тривалість польоту; корисне навантаження у вигляді фото- відеокамери.

Другим питанням при застосуванні квадрокоптерів у точному землеробстві є вибір або розробка СТЗ, характеристики якої будуть відповідати поставленій задачі. Слід зазначити, що саме від СТЗ будуть залежати отримані кінцеві результати. Спеціалізовані СТЗ для задач точного землеробства на сьогодні серійно не випускаються.

Тому для вирішення поставлених задач була розроблена наступна структурна схема СТЗ квадрокоптера (рис. 1).

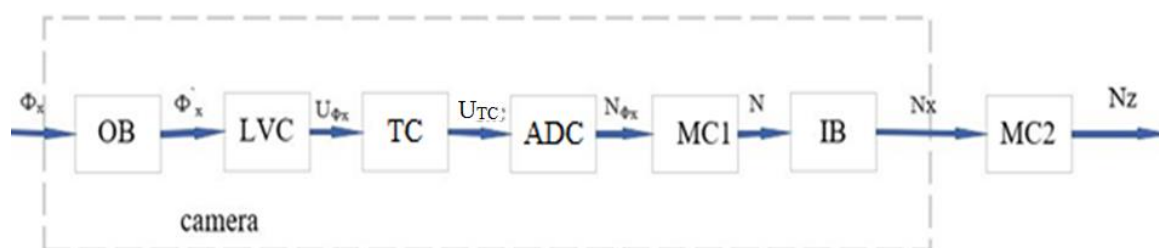


Рис. 1. Структурна схема СТЗ

На рис. 1 позначено: *OB* – оптичний блок; *LVC* – оптичний сенсор (фото-матриця); *TC* – блок узгодження; *ADC* – аналого-цифровий перетворювач; *MC1*, *MC2* – мікроконтролери; *IB* – інтерфейсний блок; Φ_x , Φ_x' - світловий потік на вході та виході оптичного блоку, відповідно; U_{Φ_x} , U_{TC} – напруги на вході та виході блоку узгодження, відповідно; N_{Φ_x} , N , N_x , N_z – коди на виходах аналого-цифрового перетворювача, мікроконтролеру *MC1*, інтерфейсного блоку та мікроконтролеру *MC2*, відповідно. Сукупність блоків *OB*, *LVC*, *TC*, *ADC*, *MC1* та *IB* представляє собою цифрову фото- відео-камеру.

Авторами було проведено аналіз структурної схеми та отримані математичні рівняння для визначення основних технічних характеристик блоків структурної схеми, що у рамках цієї роботи не наводяться, оскільки є предметом окремого розгляду. У більшості випадків для мінімізації витрат доцільно застосовувати серійні фото- відео-камери (далі просто камери), визначивши, за отриманими авторами співвідношеннями, їх необхідні характеристики.

Для вирішення задач точного землеробства можуть застосовуватись:

- камери, які проводять зйомку у видимому діапазоні;
- *NIR*-модифіковані камери, що працюють у ІЧ-діапазоні;
- мультиспектральні камери, які дозволяють здійснювати зйомку як у видимому так і у ІЧ-діапазоні.

Звичайно ж, мультиспектральна зйомка є найбільш інформативною завдяки можливості більш детального змістовного дешифрування знімків, у тому числі через розрахунки допоміжних індексів, наприклад індексу *NDVI*, який традиційно використовують для оцінки поточного стану рослинності.

Однак, мультиспектральні камери, призначені для зйомки із БПЛА, є досить дорогими. Проте їх розвиток настільки стрімкий, що можна очікувати, що у найближчі роки вони стануть значно доступнішими. Прикладом сучасної мультиспектральної камери для БПЛА є *Parrot Sequoia*, що з'явилась на ринку із березня 2016 року та коштує зараз близько 3500 \$. Маючи вагу всього 108 г, вона здатна проводити одночасне знімання у 4-х вузьких спектральних каналах – зеленому (*G*, 550 нм), червоному (*R*, 660 нм), граничному червоному (*Red Edge*, 735 нм), та ближньому інфрачервоному (*NIR*, 790 нм) та проводити звичайну (*RGB*) зйомку 16 Мп камерою.

Практичний досвід показує, що навіть знімання звичайною фотокамерою із високої роздільною здатністю дозволяє отримати гарні результати щодо оцінки стану посівів та прогнозу врожаїв. Це обумовлено особливістю даних, отриманих за допомогою фотозйомки із БПЛА, особливо квадрокоптера, а саме:

- висока та навіть надвисока просторова роздільна здатність, що обумовлена кількома факторами, зокрема: вибором камери із високою роздільною здатністю, відносно низькою висотою та швидкістю польоту, що дозволяє досягти високої деталізації даних (знімків);
- можливість планувати та виконувати зйомку у найбільш зручний для досягнення заданої мети час.

Саме це є найсуттєвішою перевагою БПЛА перед супутниковою зйомкою. Тому було прийнято рішення щодо застосування для поставлених задач точного землеробства серійного квадрокоптера, оснастивши його СТЗ із застосуванням серійної камери.

Мікроконтролер *MS2* для СТЗ може бути виконаний на базі одноплатного мікрокомп'ютера, що розміщується на квадрокоптері. Проте обробка великої кількості відеоінформації та реалізація алгоритмів розпізнавання образів потребують дуже великих обчислювальних потужностей [4]. Для одноплатного мікрокомп'ютера час обробки у більшості випадків є настільки значним, що не може відбуватись у реальному часі.

Специфікою точного землеробства є отримання великої кількості даних від різних джерел та у різний час. Тобто повна обробка у реальному часі не є можливою та обов'язковою. Тому доцільно або повне перенесення обробки всієї інформації на потужну наземну обчислювальну станцію, або проведення попередньої обробки фото- відео-інформації від камери за допомогою одноплатного мікрокомп'ютера із наступною реалізацією алгоритмів розпізнавання образів та врахування даних інших джерел інформації на наземній обчислювальній станції. Перевагою першого варіанта є мінімізація затрат, оскільки функції *MC2* переносяться на наземну обчислювальну станцію і він не потрібний як окремий блок на квадрокоптері. А відповідно достатньо використання звичайного серійного квадрокоптера із камерою.

Відповідно був обраний квадрокоптер типу *DJI Mavic 2 Pro* із наступними основними характеристиками: максимальна швидкість польоту 72 км/год; максимальна висота – 6000 м; час польоту – 31 хв.

За отриманими у роботі результатами були розраховані необхідні за роздільною здатністю характеристики камери із урахуванням характеристик обраного квадрокоптера, а саме, роздільна здатність не менше 18 Мп, апертура на рівні $f/3 - f/10$. За цими характеристиками була обрана камера *Mavic 2 Pro*, що повністю відповідає за конструктивними кріпленнями обраному квадрокоптеру та має роздільну здатність 20 Мп, і апертуру $f/2,8 - f/11$.

Розробка алгоритму роботи СТЗ

Кінцевою метою обробки агротехнічної інформації є отримання карти завдань для техніки точного землеробства.

Для вирішення цієї задачі використовувались наступні джерела інформації:

1. Зображення поверхні землі отримане з супутників *Sentinel - 2* програми *Copernicus*. *Copernicus* – це супутникова програма нагляду і моніторингу земної поверхні, започаткована Європейською місією. Знімки *Sentinel - 2* добре підходять до потреб сільського господарства, так як вони мають роздільну здатність 10 метрів, оновлюються кожні 3–5 днів та є у вільному доступі. На основі цих знімків розраховується індекс вегетації *NDVI*, що є показником стану розвитку рослини, та створюється відповідна карта ділянки. Зрозуміло, що роздільної здатності 10 метрів недостатньо для техніки точного землеробства.
2. Знімки досліджуваної земельної ділянки (поля), отримані за допомогою СТЗ квадрокоптера. Оскільки площа досліджуваної ділянки може бути достатньо великою та досягати десятків і навіть сотень гектарів, то для її охопту квадрокоптер повинен робити знімки з великої висоти. Але при цьому знижується просторова точність вирішення задачі за рахунок

втрати дрібних деталей (окремих рослин), які є суттєвими. Альтернативним шляхом, що застосовувався в цій роботі, є отримання серії знімків земельної ділянки з невеликої висоти (близько 120 метрів) із наступним об'єднанням (зшиванням) зображень в одне ціле. Значну роль при цьому має точна координатна прив'язка знімків до географічних координат ділянки. Процес є достатньо складним, але дозволяє запобігти втраті даних.

3. Результати агрохімічного обстеження ґрунту. Як правило, такий аналіз роблять не рідше, ніж раз на чотири роки. Ґрунтові зразки відбирають або вручну, або за допомогою спеціального обладнання і потім відправляють у відповідну сертифіковану лабораторію для дослідження. Ґрунт досліджують більш ніж по 30 параметрам, основними з яких є кислотність, вміст фосфору, калію і гумусу. За його результатами складають у *GIS (Geographic Information System)* програмах цифрові карти властивостей полів.

Виходячи із послідовності обробки знімків для отримання карти завдань для сільськогосподарської техніки точного землеробства було запропоновано наступний загальний алгоритм роботи СТЗ квадрокоптера, наведений на рис. 2.

Розглянемо більш детально реалізацію основних етапів обробки.

Зображення окремих частин земельної ділянки формуються при виконанні польотного завдання таким чином, щоби вони перекривалися приблизно на 80 %. На наступному етапі зображення сортуються за часом зйомки.

Основною метою алгоритму зшивки фотографій є формування єдиного ортофотоплану із множини окремих знімків, що отримані за допомогою СТЗ квадрокоптера. Ці знімки мають достатньо високу роздільну здатність (3890 x 2144). Спочатку необхідно позбавитись пустих пікселів у зображенні за допомогою розмиття Гауса із розміром ядра [5, 5]. Потім знаходяться однакові точки на сусідніх зображеннях за допомогою алгоритму виділення ключових точок *SIFT (Scale-invariant feature transform)*. Далі застосовуються процедури об'єднання однакових точок окремих знімків між собою та формується основне зображення, до якого послідовно додається кожне наступне зображення. Час побудови ортофотоплану залежить від кількості зображень, площі ділянки, яка розглядається, та продуктивності обладнання, що застосовується. Ортофотоплан є базовим зображенням досліджуваної ділянки для здійснення наступних операцій точного землеробства.

Ідентифікація однорідності родючих зон є одним із головних завдань точного землеробства. Вона допомагає знайти у полі найбільш та найменш ефективні ділянки, диференціювати для них внесення добрив та хімічних речовин, що підвищує економічну ефективність агрооперацій. Критерієм однорідності родючих зон є кількість вирощуваних рослин на один

квадратний метр. Для зернових культур, наприклад, нормою є 400 рослин на квадратний метр. Розроблений алгоритм включає наступні етапи:

1. перетворення кольорового простору із *RGB* у *HSV*;
2. виділення контурів алгоритмом *Canny*;
3. скелетонізацію масивів інформації;
4. визначення різниці у кількості ключових точок між регіонами за допомогою алгоритму рядків Хафа.

Скелетований орфтофотоплан є основою, до якої далі додаються інші шари інформаційних точок, такі як *shp*-файл із результатами агрохімічного аналізу та *KML*-файл із показниками *NDVI*. Додаткові шари уточнюють показники досліджуваної ділянки за вмістом агрохімічних елементів та поточним станом дозрівання рослин.

Ідентифіковані зони родючості рослин (наприклад: для зернових малоефективні, із густиною менше ніж 400 точок на квадратний метр, і ефективні із густиною більше ніж 400 точок на квадратний метр) дозволяють побудувати диференційовану карту внесення добрив та карту плану завдань агрооперації для техніки точного землеробства.

Практичні результати

Наведемо деякі практичні результати, що були отримані у ході проведення робіт за технологією точного землеробства із застосування розробленої СТЗ квадрокоптеру. Дослідження проводились на тестовій ділянці площею 57,4 га, що була розташована у Чаплинському районі Херсонської області.

За допомогою обраного обладнання був отриманий знімок ділянки та сформований орфтофотоплан із зонами однорідності сходу рослин (рис. 3).

Наступними кроками було:

- отримання супутникового знімку в форматі *NDVI* малої роздільної здатності (рис. 4);
- проведення агрохімічного аналізу за окремими мікроелементами ґрунту.

Результати аналізів за вмістом рухомого фосфору та рухомих форм сірки наведені на рис. 5.

Аналіз результатів показує, що досліджувана ділянка має досить неоднорідний агрохімічний склад за вказаними хімічними елементами (рис. 5). Ці зони мають безпосередній зв'язок із зонами родючості, які відображені на *NDVI* знімку (рис. 4). Мала роздільна здатність *NDVI* знімку не дає можливості використовувати його для конструювання завдань агрооперацій для спеціальної техніки для точного землеробства.

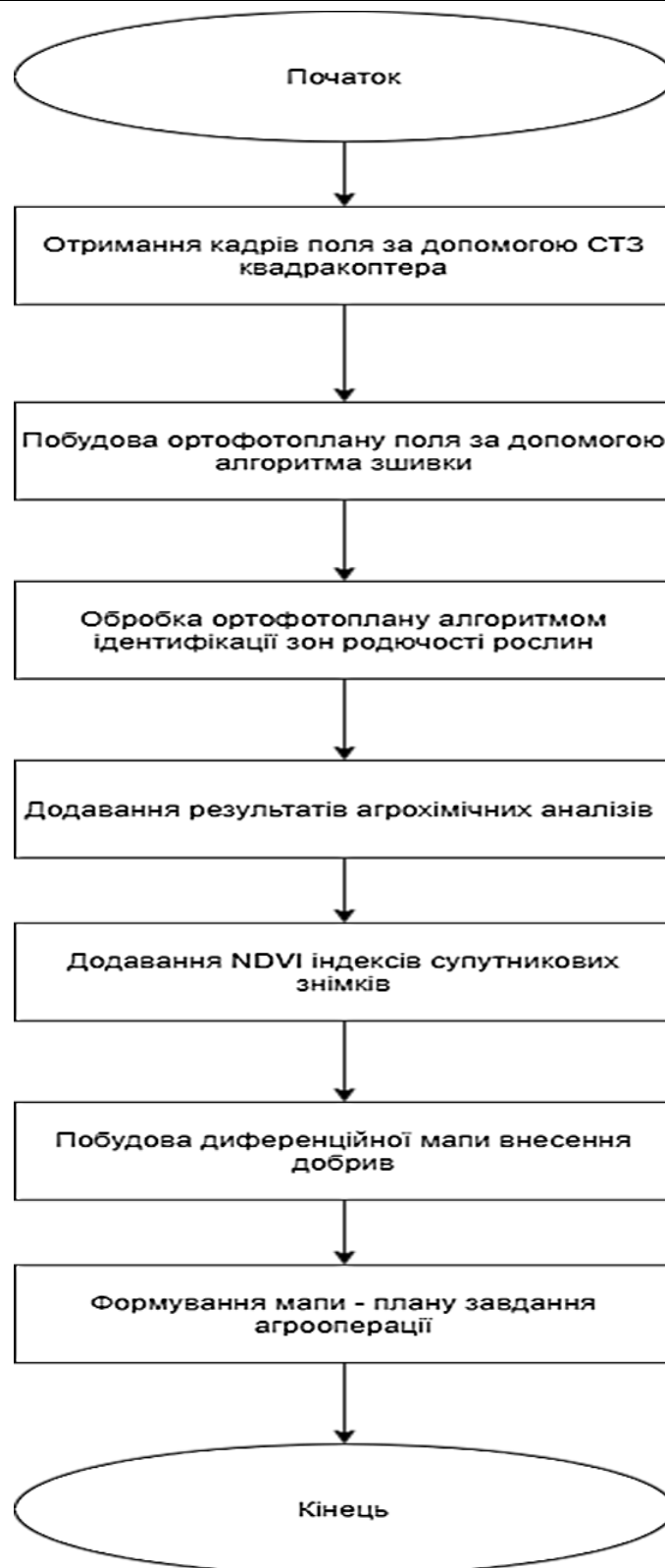


Рис. 2. Загальний алгоритм СТЗ квадрокоптера для точного землеробства

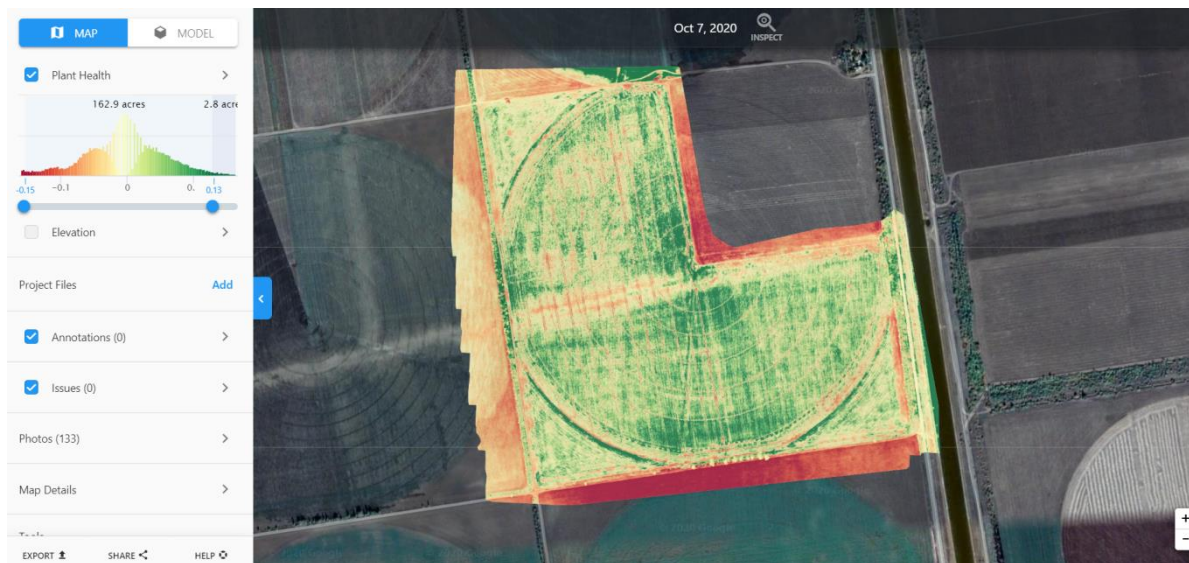


Рис. 3. Ортофотоплан із зонами однорідності сходу рослин

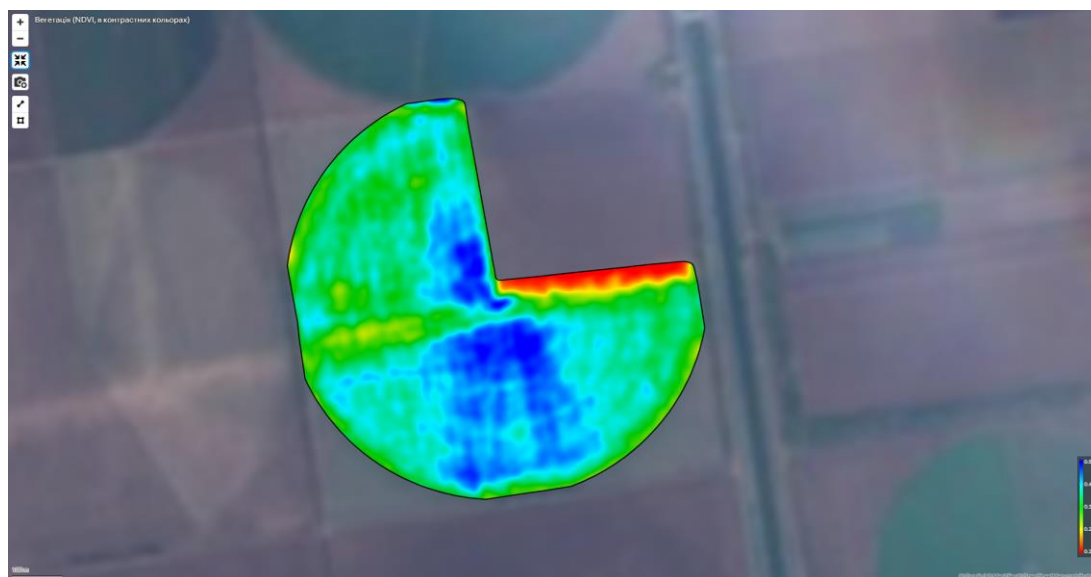


Рис. 4. Супутниковий знімок NDVI малої роздільної здатності

Для вирішення проблеми були застосовані результати, отримані за допомогою СТЗ нашого квадрокоптеру. Для цього за допомогою алгоритму ідентифікації щільності зросту рослин були відображені зони родючості ортофотопланом з надвисокою просторовою роздільною здатністю та помірною похибкою геоприв'язки (рис. 3). Саме ці результати дозволили розробити карту завдань агрооперацій для техніки точного землеробства. У якості прикладу на рис. 6 наведена карта для внесення добрива Амофос розкидачем *Suzuki Sulky*, обладнаного системами для точного землеробства.

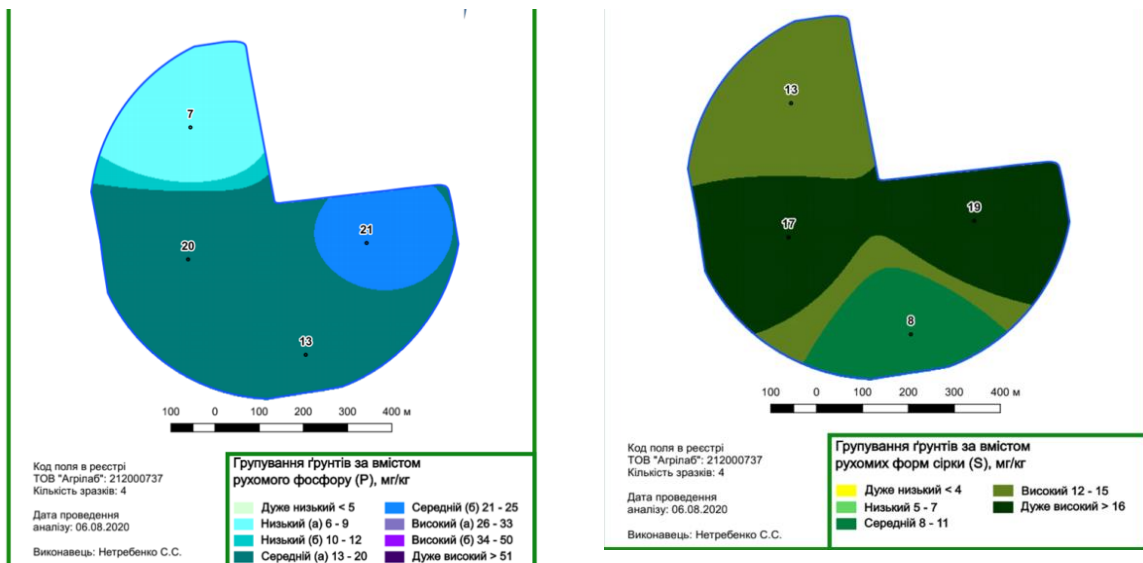


Рис. 5. Результати агрохімічного аналізу за мікроелементами ґрунту

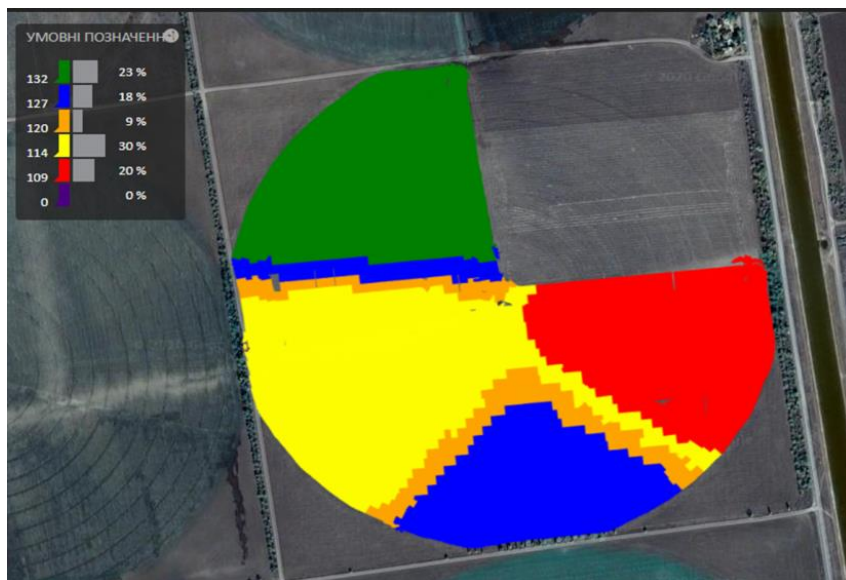


Рис. 6. Карта завдання для внесення добрива Амофос

Висновки

Розроблено апаратно-програмний комплекс БПЛА мультироторного типу для вирішення задач точного землеробства, а саме:

- розроблена структурна схема СТЗ та визначені її характеристики, на основі чого було обрано відповідне серійне обладнання;
- розроблений алгоритм ідентифікації зон родючості сходів рослин та побудови карти завдань для техніки точного землеробства за отриманими від СТЗ знімками та відповідне програмне забезпечення, що мають новизну.

Проведені польові дослідження повністю підтвердили правильність розрахунків та роботоздатність запропонованих алгоритмів.

Список використаної літератури

1. *Бикбулатова Г. Г.* (2008) *Технология точного земледелия* / Г. Г. Бикбулатова // Омский научный вестник, № 2 (71). С. 45-49.
2. *Махотлова М. Ш.* (2016) *Технологии и основные направления точного земледелия* / М. Ш. Махотлова // Символ науки, № 1. С. 51-53.
3. *Ачасов А. Б.* (2015) *Щодо використання БПЛА для оцінки стану посівів* / А. Б. Ачасов., А. О. Ачасов., Г. В. Тітенко, О. Ю. Селіверстов, А. О. Сєдов // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Екологія», вип. 13. С. 13-18.
4. *Гонсалес Р.* (2005) *Цифровая обработка изображений*. / Р. Гонсалес, Р. Вудс – М.: Техносфера. – 1072 с.