УДК 631/635: 004.896 DOI 10.31548/energiya2019.05.063

МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЮ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ, ОТРИМАНОГО ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА НА ПРИКЛАДІ ПШЕНИЦІ

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

В. П. Лисенко, доктор технічних наук, професор

Н. А. Пасічник, кандидат сільськогосподарських наук, доцент

О. О. Опришко, кандидат технічних наук, доцент

В. Є. Лукін, кандидат технічних наук, доцент

Ю. О. Росамаха, кандидат технічних наук

А. А. Руденський, старший викладач

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: ***rudenaa@gmail.com***

Анотація. *Контактні методики моніторингу станів рослинних насаджень не пристосовані для масових досліджень в масштабах промислових полів. Супутниковий моніторинг створювався передусім для об'єктивної оцінки перспектив отримання врожаю. Упровадження БПЛА дозволили в певній мірі підвищити точність результатів за рахунок високої розподільчої здатності сенсорного обладнання. У більшості випадків прогнозування ґрунтується на стандартних стресових індексах, таких як NDVI. Проте ці дослідження не дають інформації про кількісні показники врожаю, що потрібно господарствам для організації оптимальної логістики та використання збиральної техніки. Розробка методики інтерпретації результатів дистанційного моніторингу у вигляді значень вегетаційних (стресових) індексів в очікувані обсяги врожаю склало мету роботи. Дослідження проводились у 2019 р. в Київській області на виробничій ділянці посівів озимої пшениці у відокремленому підрозділі НУБіП України «Агрономічна дослідна станція». Урожай пшениці збирали з використанням комбайну John Deere 9670STS. При роботі комбайну дані фіксувались щосекунди. При цьому було отримано понад 14000 окремих ділянок при ширині жатки в 9 метрів. Дані були опрацьовані з використанням програмного продукту Trimble (R) Farm Works (R) Office і експортовані у вигляді табличних даних формату Microsoft Excel. Для дистанційного моніторингу було використано спеціалізовану спектральну систему SlantRange 3p, що було змонтовано на промисловій платформі DJI Matrice 600 Pro. Радіочастотну корекцію щодо змін освітлення система здійснювала за рахунок штатного зенітного сенсору. Обчислення результатів та побудову карт стресових індексів здійснювали із використанням програмного забезпечення розробника системи SlantView.*

На базі отриманих експериментальних даних було розроблено методику порівняння об'єктивних даних щодо врожаю, отриманих комбайном щодо кількості зерна та значеннями стресових індексів від БПЛА. Запропоновано до використання стресовий індекс, що дає можливість прогнозувати врожай (при цьому карта стресових індексів будувалась за 2 місяці до збирання врожаю). Зазначене дозволяє господарству оптимізувати використання наземного обладнання.

Ключові слова: ***SlantRange, stress індекс, БПЛА***

Актуальність. Контактні методики моніторингу станів рослинних насаджень не пристосовані для масових досліджень в масштабах промислових полів. Саме з цієї причини при появі авіації були проведенні дослідження щодо аерофотозйомки сільськогосподарських об'єктів (Левенгаупт, 1931; Селяков, 1932 та інші), які були розвинуті і на супутникові платформи I.Yu.Savin та інші [1] (2015).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Супутниковий моніторинг створювався передусім для об'єктивної оцінки перспектив отримання врожаю. Інформація про динаміку змін стану посівів була вкрай корисною зокрема для страхової галузі, ринок якої за даними платформи I.Yu.Savin та інші [2] (2018) оцінюється в 4,3 трильйони $. Так, у роботі Mathyam Prabhakar та інші [3] (2019) показано оцінку втрат врожаю від граду з використанням супутникових даних. А в роботі Y. R. Lai та інші [4] (2018) супутникові дані використані для оцінки втрат від повені. Упровадження БПЛА дозволили в певній мірі підвищити точність результатів щодо оцінки втрат, обумовлених градом та повінню, що доведено в роботах Geng Bai та інші [5] (2016) та A. Kyratzis та інші [6] (2015) відповідно. У більшості випадків прогнозування засновано на стандартних стресових індексах, таких як NDVI. Проте створено і спеціалізовані індекси, придатні для визначення якості посівів, як це показано в M.M.Saberioona та інші [7] (2014) і зокрема стану азотного живлення, як показано V.Lysenko та інші [8] (2017) та I.Korobiichuk та інші [9] (2018). Проте ці дослідження не дають інформації про кількісні показники врожаю, що потрібно господарствам для організації оптимальної логістики та використання збиральної техніки.

Мета дослідження – розробка методики інтерпретації результатів дистанційного моніторингу у вигляді значень вегетаційних (стресових) індексів в очікувані обсягу врожаю.

Матеріали та методи дослідження. Висока вартість машинного часу збиральної техніки обумовлює доцільність керування його швидкісним режимом. Для цього можуть використовуватись додаткові бортові оптичні сенсори, що фіксують щільність врожаю, як показано в роботах Aitazaz A. Farooque та інші [10] (2013) та Federico Pallottino та інші [11] (2019). Такий підхід дозволяє зменшити тривалість збиральних робіт, проте не дає змоги оптимізувати вивезення готової продукції з поля автотранспортом. Кращим може стати впровадження концепції Інтернету речей, огляд якої для потреб рослинництва представлено Jesús Martín Talavera та інші [12] (2017), коли поєднуються різнорідні дані в технологіях big-data від різних джерел інформації. Аналіз таких геоінформаційних даних дозволить господарствам здійснювати планування збиральних робіт на новому рівні. Статистичну інформацію щодо врожаю можна отримати за результатами використання сучасних комбайнів, обладнаних програмно-апаратним комплексом обліку врожаю. Карти стресових індексів, в тому числі для маргінальних земель із фільтрацією сторонніх об'єктів, можна отримати за результатами використання БПЛА при каскадній фільтрації спектральних даних за методикою, описаною в V.Lysenko та інші [13] (2018) та S.A.Shvorov та інші [14] (2018). Але результати аналізу великих обсягів інформації, що стосуються виробничих полів, можуть містити похибки різноманітної природи.

Дослідження проводились в 2019 р. в Київській області на виробничій ділянці посівів озимої пшениці у відокремленому підрозділі НУБіП України «Агрономічна дослідна станція».

Урожай пшениці збирали з використанням комбайну John Deere 9670STS. Дані були опрацьовані з використанням програмного продукту Trimble (R) Farm Works (R) Office ver. 2018.05 і експортовані у вигляді табличних даних формату Microsoft Excel.

Результати досліджень та їх обговорення. За результатами аналізу було встановлено, що відповідною системою комбайна зафіксовано ділянки із високою врожайністю, в тому числі і при мінімальному використанні жатки (рис. 1).

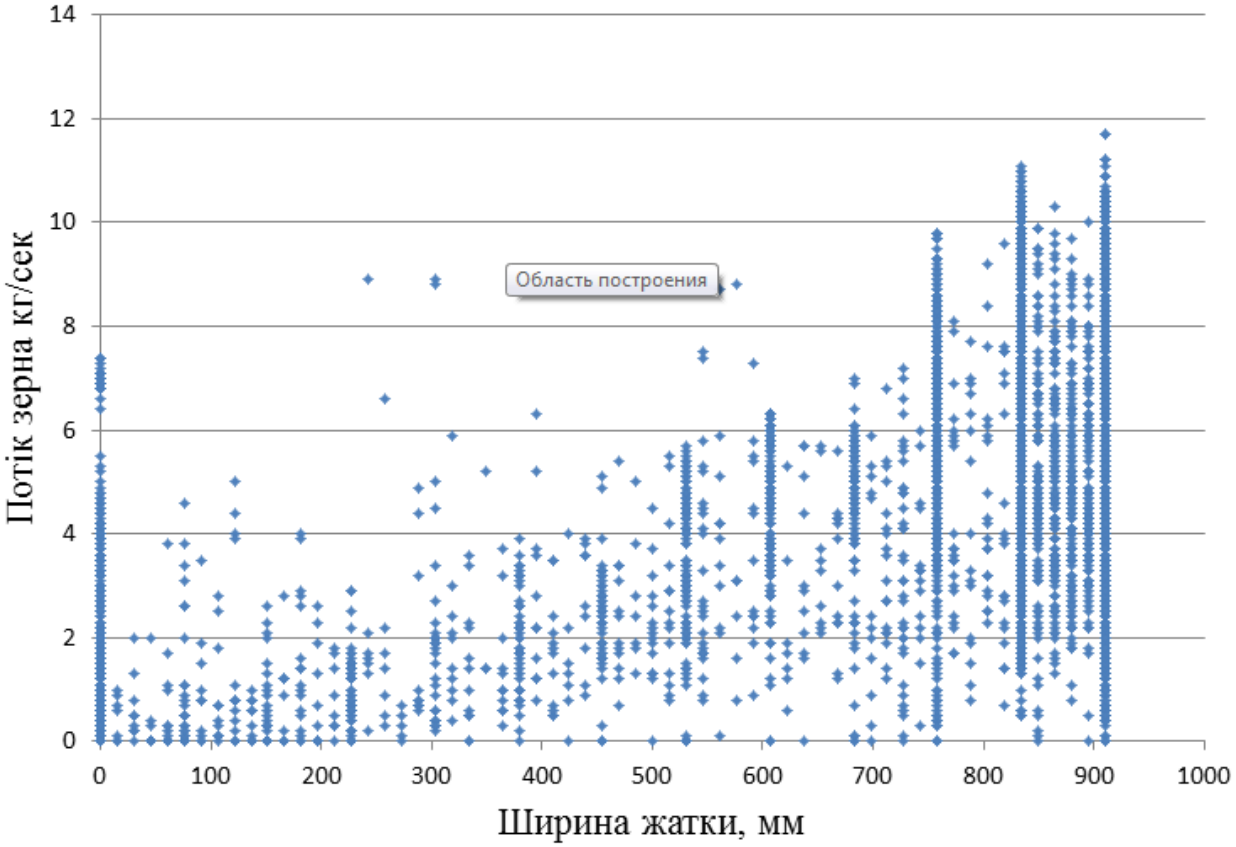
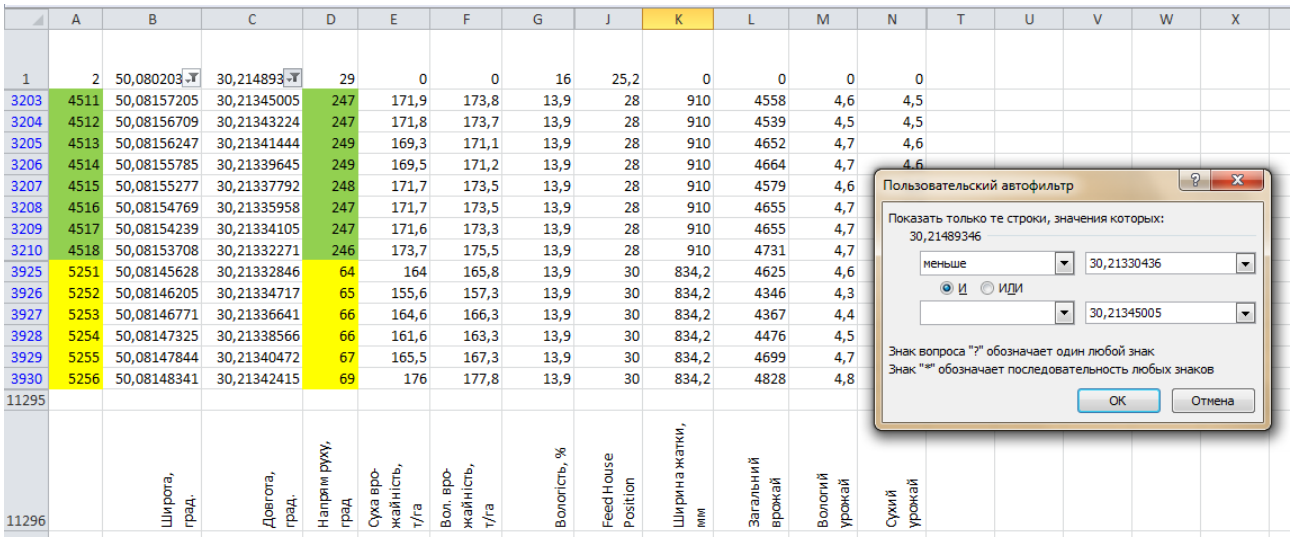


Рис. 1. Статистичні дані, отримані на основі використання комбайну John Deere 9670STS

Можливим поясненням цього є інерційність системи, оскільки геодані щодо позиціонування фіксувались щосекунди, а зерно від жатки до бункеру транспортувалось 5-6 секунд. Вочевидь ці дані є помилковими і відповідно ділянки із шириною жатки менш ніж 800 мм не використовувались для визначення залежності стресових індексів від очікуваної врожайності. У цьому діапазоні ширини жатки представлено увесь діапазон врожайності, отже він є прийнятним для створення залежності.

Для побудови залежності між врожайністю та спектральними показниками слід обрати ділянки, де врожайність рівномірно розподілена полем. Враховуючи інерційність наземного обладнання, для забезпечення точності при визначенні спектральних параметрів рослин обирають максимально можливу за площею

ділянку з однаковою врожайністю, у тому числі із числа тих, що фіксуються при паралельному проходженні комбайну. Наземна система використовує збереження геоданих у форматі градусів із десятковими дробами, що відрізняється від класичної системи із градусами, хвилинами та секундами. Каскадна фільтрація геоданих здійснюється послідовно за довготою та широтою відповідно до координат ділянок, що визначались за результатами моніторингу із використанням БПЛА (рис. 2).



	A	B	C	D	E	F	G	J	K	L	M	N
1	2	50,080203	30,214893	29	0	0	16	25,2	0	0	0	0
3203	4511	50,08157205	30,21345005	247	171,9	173,8	13,9	28	910	4558	4,6	4,5
3204	4512	50,08156709	30,21343224	247	171,8	173,7	13,9	28	910	4539	4,5	4,5
3205	4513	50,08156247	30,21341444	249	169,3	171,1	13,9	28	910	4652	4,7	4,6
3206	4514	50,08155785	30,21339645	249	169,5	171,2	13,9	28	910	4664	4,7	4,6
3207	4515	50,08155277	30,21337792	248	171,7	173,5	13,9	28	910	4579	4,6	
3208	4516	50,08154769	30,21335958	247	171,7	173,5	13,9	28	910	4655	4,7	
3209	4517	50,08154239	30,21334105	247	171,6	173,3	13,9	28	910	4655	4,7	
3210	4518	50,08153708	30,21332271	246	173,7	175,5	13,9	28	910	4731	4,7	
3925	5251	50,08145628	30,21332846	64	164	165,8	13,9	30	834,2	4625	4,6	
3926	5252	50,08146205	30,21334717	65	155,6	157,3	13,9	30	834,2	4346	4,3	
3927	5253	50,08146771	30,21336641	66	164,6	166,3	13,9	30	834,2	4367	4,4	
3928	5254	50,08147325	30,21338566	66	161,6	163,3	13,9	30	834,2	4476	4,5	
3929	5255	50,08147844	30,21340472	67	165,5	167,3	13,9	30	834,2	4699	4,7	
3930	5256	50,08148341	30,21342415	69	176	177,8	13,9	30	834,2	4828	4,8	
11295												
11296		Широта, град.	Довгота, град.	Напрям руху, град	Суха вро-жайність, т/га	Вол. вро-жайність, т/га	Вологість, %	Feed House Position	Ширина жатки, мм	Загальний врожай	Вологий урожай	Сухий урожай

Рис. 2. Вибір ділянок за геоданими в табличному редакторі Excel при одночасній фільтрації за широтою та довготою (стовпці B та C)

Для проведення досліджень було використано спеціалізовану спектральну систему SlantRange 3p, яка була змонтована на промисловій платформі DJI Matrice 600 Pro. Моніторинг проводили 25 червня 2019 р. при сонячній погоді. Висота польоту БПЛА становила 100±2 метри. Радіочастотну корекцію щодо змін освітлення система здійснювала за рахунок штатного зенітного сенсору. Обчислення результатів та побудову карт стресових індексів здійснювали із використанням програмного забезпечення розробника системи SlantView. На відміну від комбайну система надає користувачу інформацію щодо розподілу стресових індексів передусім в графічному форматі, що створює і табличні дані. Саме графічний інтерфейс обумовлений високою розподільчою здатністю спектральних сенсорів для БПЛА. При роботі комбайну дані фіксувались щосекунди. При цьому було отримано понад 14000 точок вимірів при ширині

жатки в 9 метрів (при сантиметровій розподільчій здатності SlantRange було б отримано кілька мільйонів результатів, що суттєво ускладнює розрахунки. Проте в ручному режимі інтерфейс програми передбачає можливість надання цифрового значення індексу для відповідної ділянки поля (рис. 3).

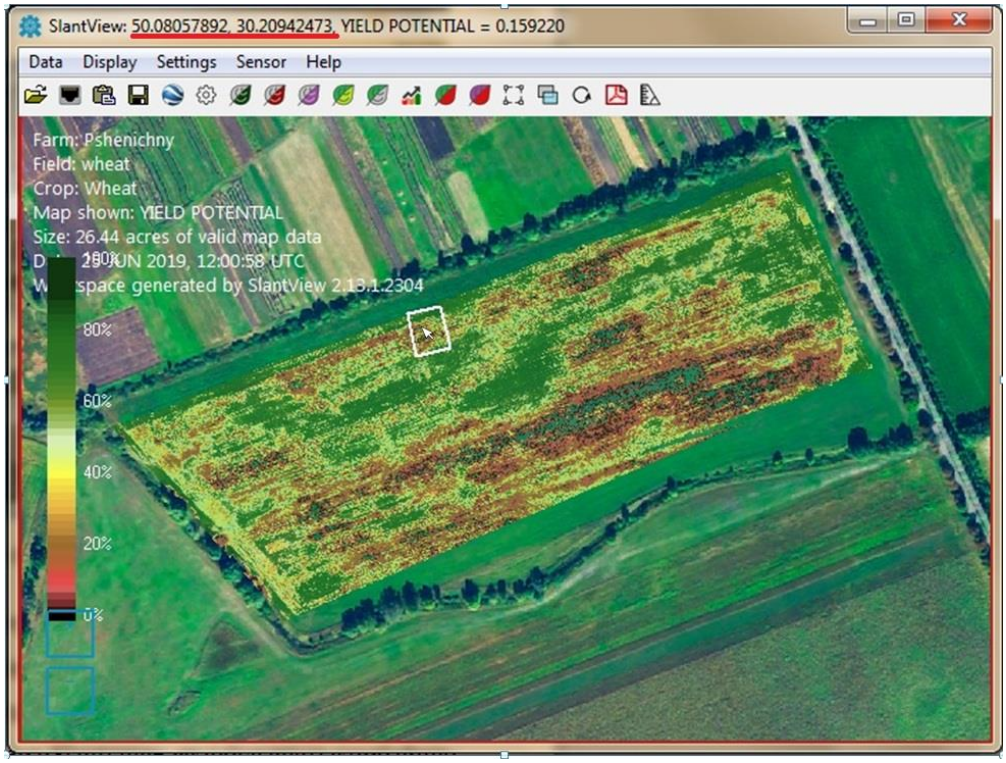


Рис. 3. Інтерфейс програми SlantView, де у рядку заголовку виводяться геодані ділянки, на яку наведено курсор та значення відповідного індексу

Для автоматичного розпізнавання карти стресових індексів можна використовувати інші програмні продукти для математичної обробки графічних даних (наприклад MathCad, як це показано в роботі N.A.Pasichnyk та інші [15] (2019)). Для градуювання щодо значення стресових індексів розробником передбачено відповідну кольорову палітру. Оскільки для полегшення орієнтації користувача, система як фон для зображення розподілу стресових індексів використовує супутниковий знімок місцевості, то при здійсненні розпізнавання від має бути дезактивований. При комп’ютерному розпізнаванні карти, тобто переведенні в числові значення індексів, слід враховувати, що наведена шкала кольорів має 50 градацій, в той час як на карті стресові індекси мають більшу розподільчу здатність. Для визначення індексу на основі палітри, можуть використовуватись градуювальні залежності або спеціальні класифікатори, які є

індивідуальними для кожного з представлених в програмі SlantView стресових індексів.

При виборі індексів (спектральних каналів) для розрахунку кількісної характеристики врожаю потрібно використовувати залежності, що забезпечують достатню чутливість та високу роздільну здатність. Тому отримані результати експериментів апроксимували у вигляді лінійної залежності (таблиця).

1. Результати апроксимації для стресових індексів наявних у ПЗ SlantView

№	Назва	Кутовий коефіцієнт	Коефіцієнт детермінації
1	Green NDVI	0.024	0.586
2	Red NDVI	0.033	0.605
3	Red edge NDVI	0.026	0.330
4	Stress	-0.032	0.849
5	Veg. fraction	0.165	0.627
6	Yield potential	0.134	0.600
7	Green chlorophyll index	0.060	0.665
8	Red edge chlorophyll index	0.040	0.719

У таблиці представлено дві групи індексів, а саме три варіанти стандартного індексу NDVI (1-3), та фірмові індекси розробника обладнання (4-8), рівняння розрахунку для яких користувачам не надаються. Як видно з наведених даних, найбільший коефіцієнт детермінації було отримано для стресового індексу Stress. Порядок величини кутового коефіцієнту, що відповідає за чутливість та роздільну здатність, для апроксимованої лінійної залежності у індексу Stress відповідає стандартним індексам NDVI, проте діапазон індексу вдвічі менший, відповідно при однакових значеннях чутливість буде вдвічі більше. Найбільша чутливість була зафіксована у індексу Veg. Fraction, тому його також можна вважати перспективним для створення залежності між стресовими індексами та врожайністю.

Найкращі результати були отримані для фірмових індексів розробника обладнання, які відсутні на іншому обладнанні. Наявні на 2019 р. версії програмного забезпечення ver. 2.13.1.2304 від 19 червня 2019 р. не передбачають генераторів стресових індексів, що наявні в альтернативних платформах, таких як PostFight Terra 3D. Відповідно, для розширення спектру можливого спектрального сенсорного обладнання доцільно опрацювати не готові індекси, а вихідні спектральні канали. Програма SlantView для налагодження апаратної фільтрації сторонніх включень (ґрунт, тінь тощо) передбачає надання користувачу в окремому вікні зображення для кожного з спектральних каналів окремо. Відповідно є можливість вилучити вихідні дані спектральних каналів, окремо скориговані за освітленням. При роботі з окремими каналами можна або створити власні індекси з кращою характеристикою.

Висновки і перспективи.

1. Співставлення врожайності пшениці озимої та станів цих рослин за 2 місяці до зазначеної процедури за результатами спектрального аналізу із використанням БПЛА дозволив встановити зв’язок між кількісними характеристиками врожайності та розподілами стресових індексів.

2. Із досліджених індексів найкращий результат лінійної апроксимації експериментальної залежності з коефіцієнтом детермінації 0,845 між врожайністю та числовим значенням спектральної характеристики показав індекс Stress, розроблений компанією SlantRange.

3. Найвища чутливість була отримана за результатами використання індексу Veg. Fraction, запропонованого SlantRange, завдяки чому він також є перспективним для прогнозування врожаю.

References

1. Savin, I. Yu., Vernyuk, Yu .I., Faraslis, G. (2015) The possible use of pilotless aircrafts for operative monitoring of soil productivity. Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute, 80, 95-105.

2. Savin, I. Yu., Kozubenko, I. S. (2018) Possibilities of satellite data usage in agricultural insurances. RUDN Journal of Agronomy and animal industries, 13 (4), 336-343.

3. Mathyam Prabhakar, Gopinath, K. A., Reddy, A. G .K., Thirupathi, M., Ch. Srinivasa Rao (2019). Mapping hailstorm damaged crop area using multispectral

satellite data. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 22 (1), 73-79.

4. Lai, Y.R. , Pringle, M.J., Kopittke, P.M., Menzies, N.W., Orton, T.G., Dang, Y.P. (2018). An empirical model for prediction of wheat yield, using time-integrated Landsat NDVI. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 72, 99-108.

5. Geng Bai, Yufeng Ge, Waseem Hussain, P. Stephen Baenziger, George Graef (2016). A multi-sensor system for high throughput field phenotyping in soybean and wheat breeding. Computers and Electronics in Agriculture, 128, 181-192/

6. Kyratzis, A., Skarlatos, D., Fotopoulos, V., Vamvakousis, V., Katsiotis, A. (2015). Investigating Correlation among NDVI Index Derived by Unmanned Aerial Vehicle Photography and Grain Yield under Late Drought Stress Conditions. Procedia Environmental Sciences, 29, 225-226.

7. Saberioona, M.M., Amina, M.S.M., Anuarb, A.R., Gholizadehc, A., Wayayokd, A., Khairunniza-Bejoda Smart, S. (2014) Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,.32, 35–45.

8. Lysenko, V., Opryshko, O., Komarchuk, D., Pasichnyk, N., Zaets, N., Dudnyk, A. (2017) Usage of Flying Robots for Monitoring Nitrogen in Wheat Crops. The 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 1, 30-34.

9. Korobiichuk, I., Lysenko, V., Opryshko, O., Komarchyk, D., Pasichnyk, N., Juś, A. (2018). Crop monitoring for nitrogen nutrition level by digital Automation 2018. AUTOMATION 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, 743. Springer, Cham, 595-603.

10. Aitazaz A. Farooque, Young K. Chang, Qamar U. Zaman, Dominic Groulx, Arnold W. Schumann, Travis J. Esau (2013). Performance evaluation of multiple ground based sensors mounted on a commercial wild blueberry harvester to sense plant height, fruit yield and topographic features in real-time Computers and Electronics in Agriculture, 91, 135-144/

11. F. Pallottino, F.Antonucci, C.Costa, C.Bisaglia, S.Figorilli, P.Menesatti (2019). Optoelectronic proximal sensing vehicle-mounted technologies in precision agriculture: A review Computers and Electronics in Agriculture, 162, 859-873.

12. Jesús Martín Talavera, Luis Eduardo Tobón, Jairo Alejandro Gómez, María Alejandra Culman, Juan Manuel Aranda, Diana Teresa Parra, Luis Alfredo Quiroz, Adolfo Hoyos, Luis Ernesto Garreta (2017). Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. Computers and Electronics in Agriculture, 142 (A), 283-297.

13. Lysenko, V., Komarchuk, D., Pasichnyk, N., Opryshko, O., Awtoniuk, M., Martsyfei, A. (2018). Information Support of Remote Monitoring of Grain Crops Biomass Amount as the Feedstock to Load Biogas Reactors. 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, 35-38.

14. Shvorov, S.A., Komarchuk, D. S., Pasichnyk, N. A., Opryshko, O. O., Gunchenko, Yu. A., Kuznichenko, S. D. (2018). UAV Navigation and Management System Based on the Spectral Portrait of Terrain. 2018 IEEE 5th International

Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC 2018, Proceedings, 68-71.

15. Pasichnyk, N. A., Opryshko, O. O., Komarchuk, D. S., Miroshnyk, V. O. (2019). Experience in using mathcad to analyze data from UAVS for remote sensing of crops. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy. Seriia: Ahronomiia, 244-250.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫМ С ПОМОЩЬЮ БПЛА НА ПРИМЕРЕ ПШЕНИЦЫ

С. А. Шворов, В. Ф. Лысенко, Н. А. Пасечник, А. А. Опрышко, В. Е. Лукин, Ю. А. Росамаха, А. А. Руденский

Аннотация. *Контактные методики мониторинга состояний растительных насаждений не приспособлены для массовых исследований в масштабах промышленных полей. Спутниковый мониторинг создавался прежде всего для объективной оценки перспектив получения урожая. Внедрение БПЛА позволило в определенной степени повысить точность результатов за счет высокого разрешения сенсорного оборудования. В большинстве случаев прогнозирование основано на стандартных стрессовых индексах, таких как NDVI. Однако, эти исследования не дают информации о количественных показателях урожая, что нужно хозяйствам для организации оптимальной логистики и использования уборочной техники. Разработка методики интерпретации результатов дистанционного мониторинга в виде значений вегетационных (стрессовых) индексов в ожидаемые объемы урожая составило цель работы. Исследования проводились в 2019 г. в Киевской области на производственном участке посевов озимой пшеницы в подразделении НУБиП Украины «Агрономическая опытная станция». Урожай пшеницы собирали с использованием комбайна John Deere 9670STS. При работе комбайна данные фиксировались каждую секунду. При этом было получено более 14000 точек измерений при ширине жатки в 9 метров. Данные были обработаны с использованием программного продукта Trimble (R) Farm Works (R) Office и экспортированы в виде табличных данных формата Microsoft Excel. Для дистанционного мониторинга была использована специализированная спектральная система SlantRange 3p, которую смонтировали на промышленной платформе DJI Matrice 600 Pro. Радиочастотную коррекцию при изменении освещенности система осуществляла за счет штатного зенитного сенсора. Вычисления результатов и построение карт стрессовых индексов осуществляли с использованием программного обеспечения разработчика системы SlantView.*

На базе полученных экспериментальных данных была разработана методика сравнения объективных данных урожая, полученных комбайном о количестве зерна, и значениями стрессовых индексов от БПЛА. Предложено к использованию стрессовый индекс, что позволяет прогнозировать урожай (при этом карта стрессовых индексов строилась за 2 месяца до сбора урожая). Это позволяет хозяйству оптимизировать использование наземного оборудования.

Ключевые слова: ***SlantRange, stress индекс, БПЛА***

THE METHOD OF DETERMINING OF YIELD BASED ON THE RESULTS OF REMOTE SENSING OBTAINED USING UAV ON THE EXAMPLE OF WHEAT

S. Shvorov, V. Lysenko, N. Pasichnyk, O. Opryshko, U. Rosamaha, V. Lukin, A. Rudenskiy

Abstract. *The methods of contact monitoring of conditions of plants are not adapted for large-scale industrial field studies. Satellite monitoring was primarily created to objectively evaluate the prospects for harvesting. Usage of UAVs has allowed to improve the accuracy of the results due to the high resolution of the sensor equipment. In most cases, the prediction is based on standard NDVI stress indexes. However, these results do not provide information on quantitative of yield indicators that farms need in order to optimize logistics and use harvesting equipment. The development of a methodology for interpreting the results of remote monitoring of vegetation/stress indices into future volumes of the crop was the goal of this work.*

Researches were conducted in 2019 in the Kiev region on the production area of winter wheat crops in NULES "Agronomic Research Station". Wheat was harvested using a John Deere 9670STS combine. During the operation of the harvesting the data of John Deere 9670STS were recorded every second. In this case, more than 14,000 separate sections were obtained with a header width of 9 meters. Data were processed using Trimble (R) Farm Works (R) Office software and exported as Microsoft Excel. A specialized SlantRange 3p spectral system was used for remote monitoring, which was mounted on the DJI Matrice 600 Pro industrial platform. The radio frequency correction for changes in lighting was done by standard anti-aircraft sensor. The results were calculated and the stress index maps were constructed using the software of the SlantView system developer.

In usage obtained experimental data was developed the method of comparing the objective harvest data obtained by the harvester in terms of grain count and UAV stress index values. Was proposed to use a stress index, which makes it possible to predict the value of future harvest (the map of the stress indices was built 2 months before the harvest). It results can be used by farm to optimize the use of ground equipment.

Key words: ***SlantRange, stress index, UAV***