Мониторинг показателей фотосинтетической деятельности и его использование для прогнозирования потенциальной урожайности сои

Михаил Геннадьевич Загоруйко, Марина Евгеньевна Бельшкينا,
Рашид Курбанович Курбанов, Наталья Ивановна Захарова
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия
vimsoya@yandex.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты диагностики фотосинтетической деятельности в посевах сои при помощи использования беспилотных летательных аппаратов. Мониторинг осуществлялся в два этапа в период интенсивного нарастания зеленой массы посевов до наступления фазы цветения сои в агроклиматических условиях Центрального района Нечерноземной зоны РФ. Изучены возможности применения беспилотных летательных аппаратов для контроля фотосинтетической деятельности растений сои и прогнозирования потенциальной урожайности. Для каждого из сортов были определены состав фотосинтетических пигментов в листьях растений сои, средние значения вегетационного индекса *CIGreen* и стандартное отклонение в фазы V2 – второй узел и R2 – полное цветение. На основе регрессионного уравнения были рассчитаны прогнозные значения урожайности. Полученные данные были оценены с помощью MAPE, точность прогнозирования составила 92,4–97,3 %.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты; мультиспектральная съемка; вегетационная карта; соя (*Glycine max* (L.) Merr.); раннеспелые сорта; фотосинтетическая деятельность.

Для цитирования: Загоруйко М. Г., Бельшкينا М. Е., Курбанов Р. К., Захарова Н. И. Мониторинг показателей фотосинтетической деятельности и его использование для прогнозирования потенциальной урожайности сои // Аграрный научный журнал. 2021. № 12. С. 9–12. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i12pp9-12>.

AGRONOMY

Original article

Monitoring of photosynthetic activity indicators and its use to control the moisture supply of soybean crops

Mikhail G. Zagoruyko, Marina E. Belyshkina, Rashid. K. Kurbanov, Natalia I. Zakharova
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
vimsoya@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of diagnostics of photosynthetic activity in soybean crops using the use of unmanned aircraft. Monitoring was carried out in two stages during the period of intensive growth of the green mass of crops before the onset of the soybean flowering phase in the agro-climatic conditions of the Central region of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation. The purpose of the research: to study the possibilities of using unmanned aerial vehicles to control the photosynthetic activity of soybean plants and predict potential yields. For each of the varieties, the composition of photosynthetic pigments in the leaves of soybean plants, the average values of the *clGreen* vegetation index and the standard deviation in phases V2 – the second node and R2 – full flowering were determined. Forecast yield values were calculated based on the regression equation. The data obtained were evaluated using MAPE, the prediction accuracy was 92.4–97.3%.

Keywords: unmanned aerial vehicles; multispectral survey; vegetation map; soybean (*Glycine max* (L.) Merr.); early ripening varieties; photosynthetic activity.

For citation: Zagoruyko M. G., Belyshkina M. E., Kurbanov R. K., Zakharova N. I. Monitoring of photosynthetic activity indicators and its use to control the moisture supply of soybean crops. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2021; (12): 9–12 (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i12pp9-12>.

Введение. Применение беспилотных летательных аппаратов в сельскохозяйственном производстве позволяет осуществлять контроль за посевами сои (*Glycine max* (L.) Merr.). Накопленная за определенный период информация позволяет анализировать производственный процесс в динамике и регулировать состояние посевов в режиме реального времени [1, 2, 5].

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются универсальным инструментом для сбора данных в сельскохозяйственном производстве. Благодаря использованию возможностей БПЛА обеспечивается переход к технологиям на основе точного земледелия [4]. Применение дронов для диагностики состояния посевов и готовых программных комплексов, которые могут обеспечить оперативный и качественный сбор и обработку данных, позволяет специалистам отрасли получать актуальную и своевременную информацию по мере необходимости, сокращать временной интервал между получением информации и принятием решений по корректировке мероприятий по уходу за посевами. Особенно важную роль применение БПЛА играет на селекционных и семеноводческих посевах.

БПЛА, оснащенные мультиспектральными камерами, обеспечивают сбор мультиспектральных и RGB-данных. На основе полученных данных строятся ортофотоплан, цифровая карта поля, рассчитываются вегетационные индексы.

сы. При оценке содержания хлорофилла в листьях используют вегетационные индексы, основанные на спектральных каналах NIR (ближний инфракрасный) и Green (зеленый) [10]. Данный выбор основан на высоких значениях отражения в этих спектральных каналах. Таким образом, данные, полученные с БПЛА, позволяют проводить оценку фотосинтетической активности селекционных посевов.

Цель исследований – изучить возможности применения беспилотных летательных аппаратов для контроля фотосинтетической деятельности растений сои и прогнозирования потенциальной урожайности.

Методика исследований. Мониторинг посевов сои производили в несколько этапов в течение вегетационного периода в 2020 г. на научно-производственной базе Института семеноводства и агротехнологий – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (ИСА ФНАЦ ВИМ), который расположен на территории Рязанской области. Почва участка – темно-серая лесная, тяжелосуглинистая, $pH_{\text{соед}} = 5,25$ (ГОСТ 26483-85); содержание гумуса – 5,3 % (по Тюрину). Содержание подвижного фосфора – 34,0 мг и калия 19,2 мг на 100 г почвы, азота нитратного – 8,4 мг/кг (ГОСТ 26951-86), азота аммонийного – 1,57 мг/кг (ГОСТ 26489-85).

В качестве объектов исследования были выбраны сорта сои селекции ВНИИМК имени В.С. Пустовойта (Лира, Пума, Вита), ООО «Соевый комплекс» (Аванта, Бара, Дока), ВНИИ сои (Персона, Статная, Кружевница, Умка, Сентябринка, Соната, Лидия, Грация, Топаз).

Способ посева – обычный рядовой с шириной междурядий 15 см, норму высева подбирали с учетом обеспечения густоты стояния растений – 600 тыс. шт. на 1 га. Учет урожайности проводили методом сплошной уборки с приведением урожая семян к стандартной 14%-й влажности и 100%-й чистоте. Опыты проводили в соответствии со стандартными методиками [6]. Агротехника – общепринятая для зоны выращивания. Повторность однократная – осуществлялся мониторинг агроэкологических испытаний сортов сои. Площадь учетной делянки – 96 м². Схема опыта представлена на рис. 1.

Мониторинг осуществлялся в два этапа: 1-й этап – в период интенсивного нарастания зеленой массы растений до наступления фазы цветения сои – в фазу V2 (2-й узел); 2-й этап – в период образования генеративных органов растений – в фазу R2 (полное цветение).

В исследовании использовался квадрокоптер DJI Phantom 4 pro (Dajiang Innovation Technology Co., Китай). В виде полезной нагрузки применялась мультиспектральная камера Parrot Sequoia 4.0 с датчиком освещенности (рис. 2). Камера Parrot Sequoia имеет 4 монохромные камеры с разрешением в

1280 × 960 мм и делает снимки в четырех каналах: Green 530 – 570 нм; Red 640 – 680 нм; Red Edge 730 – 740 нм; near-IR 770 – 810 нм. Камера крепится к дрону с помощью специального подвеса, учитывающего сенсоры и датчики БПЛА (RU 2 728 846 C1) [7, 8]. Полеты совершались на высоте 30 м в течение 4 минут 48 секунд с поперечным и продольным перекрытием 75 и 75 % соответственно.

Для фотограмметрической обработки использовалось программное обеспечение Pix4D Mapper, шаблон Ag Multispectral [3]. Создавались высоко-детализированный ортофотоплан, карты отражений и карты вегетационного индекса Chlorophyll Index Green (CIGreen) [8]:

$$CIGreen = \frac{NIR}{G} - 1. \quad (1)$$

Индекс хлорофилла используется для расчета общего содержания хлорофилла в листьях. Значения CIGreen чувствительны к небольшим изменениям содержания хлорофилла a и b в листьях сельскохозяйственных растений.

Оценка прогнозирования осуществлялась с помощью MAPE (Mean Absolute Percent Error) – средняя абсолютная процентная ошибка:

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{T_t - P_t}{T_t}}{n} \times 100, \quad (2)$$

где T_t – полученные данные (True yield t/ha); P_t – Прогнозируемые данные (Predicted yield t/ha); n – количество исследуемых участков.

Рис. 1. Ортофотоплан посева сои в фазу V2 – второй узел

Рис. 2. Платформенное решение для мониторинга полей:
1) БПЛА DJI Phantom 4 pro; 2) Сенсор освещенности Parrot Sequoia;
3) Мультиспектральная камера Parrot Sequoia; 4) подвес

$$P = 1 - \text{MAPE}. \quad (3)$$

Результаты исследований. Состав фотосинтетических пигментов в листьях растений сои разных регионов происхождения не имел значительных сортовых различий, однако была выявлена зависимость содержания хлорофилла *a* и *b* от условий увлажнения вегетационного периода. Для оценки содержания хлорофилла *a* и *b* в листьях растений использовался вегетационный индекс ClGreen (рис. 3).

Для каждого из сортов были определены средние значения вегетационного индекса ClGreen и стандартное отклонение в фазы V2 – второй узел и R2 – полное цветение (см. таблицу).

Значения вегетационного индекса ClGreen для рассматриваемых сортов

Сорт	1-й этап мониторинга: V2 – второй узел			2-й этап мониторинга: R2 – полное цветение			Урожайность, т/га
	среднее значение вегетационного индекса ClGreen	стандартное отклонение	оценка содержания хлорофилла в листьях растений	среднее значение вегетационного индекса ClGreen	стандартное отклонение	оценка содержания хлорофилла в листьях растений	
Персона	1,60	0,55	Среднее	2,36	0,64	Среднее	1,45
Статная	1,62	0,55	Среднее	2,31	0,61	Среднее	1,64
Кружевница	1,55	0,54	Среднее	1,99	0,54	Низкое	1,81
Умка	1,45	0,48	Низкое	1,99	0,56	Низкое	1,72
Сентябринка	1,62	0,57	Среднее	2,31	0,61	Среднее	1,69
Соната	1,37	0,41	Низкое	1,67	0,46	Низкое	1,53
Лидия	2,02	0,68	Высокое	3,07	0,61	Высокое	1,76
Грация	2,19	0,67	Высокое	3,1	0,59	Высокое	1,68
Топаз	2,02	0,62	Высокое	2,74	0,61	Среднее	1,54
Лири	2,11	0,62	Высокое	2,83	0,61	Среднее	1,88
Пума	2,21	0,72	Высокое	3,01	0,7	Высокое	1,92
Вита	2,15	0,69	Высокое	2,61	0,71	Среднее	1,85
Аванта	1,96	0,60	Среднее	2,71	0,66	Среднее	1,94
Бара	1,97	0,67	Среднее	2,59	0,85	Среднее	1,89
Дока	1,65	0,53	Среднее	1,74	0,68	Низкое	1,78

В соответствии со средними значениями индекса все сорта сои по оценке содержания хлорофилла в листьях делятся на три группы:

- на 1-м этапе мониторинга: высокое $\text{ClGreen} > 2$; среднее $1,5 < \text{ClGreen} < 2$; низкое $1,5 < \text{ClGreen}$;
- на 2-м этапе мониторинга: высокое $\text{ClGreen} > 3$; среднее $2 < \text{ClGreen} < 3$; низкое $2 < \text{ClGreen}$.

Высокие значения на 1-м этапе мониторинга были установлены у шести сортов: Лидия, Грация, Топаз селекции ВНИИ сои и Лири, Пума, Вита селекции ВНИИМК имени В.С. Пустовойта, на 2-м этапе – только у трех сортов: Лидия, Грация, Пума. Таким образом, сорта сои Топаз, Лири и Вита уступали сортам Лидия, Грация и Пума по динамике нарастания зеленой массы.

Средние значения на 1-м этапе мониторинга были зафиксированы у семи сортов сои. Это были сорта селекции ВНИИ сои – Персона, Статная, Кружевница и Сентябринка, а также сорта селекции ООО «Соевый комплекс» – Аванта, Бара, Дока. На 2-м этапе мониторинга средние значения были зафиксированы у восьми сортов сои. Следует отметить, что высокие показатели ClGreen были зафиксированы на обоих этапах мониторинга у сортов сои Лидия, Грация селекции ВНИИ сои и Пума селекции ВНИИМК имени В.С. Пустовойта. Низкие значения ClGreen на обоих этапах мониторинга были зафиксированы у сортов Соната и Умка селекции ВНИИ сои. При этом сорта Пума, Вита, Аванта, Бара, Дока имеют высокие значения стандартного отклонения по результатам 2-го этапа мониторинга, что говорит о неравномерности развития посевов.

В результате анализа средних значений вегетационного индекса ClGreen и урожайности по сортам была обнаружена высокая корреляционная связь: на 1-м этапе мониторинга – $r = 0,9$; на 2-м этапе мониторинга – $r = 0,94$. На рис. 4 представлены кривые зависимости исследуемых данных.

Полученные регрессионные уравнения (при $R^2 = 0,81$ и $R^2 = 0,88$ на 1-м и 2-м этапах проведения мониторинга соответственно) выглядят следующим образом:

$$y = 0,55x + 0,74; \quad (4)$$

$$y = 0,36x + 0,86. \quad (5)$$

где x – средние значения вегетационного индекса ClGreen; y – урожайность, т/га.

Рис. 3. Вегетационная карта ClGreen в фазу R2 – полное цветение

Рис. 4. Зависимость урожайности и значений *CIGreen* в фазы V2 – второй узел и R2 – полное цветение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельшикина М. Е. Современное состояние и перспективы мирового и российского рынков сои // Аграрная Россия. 2013. № 6. С. 7–11.
2. Гатаулина Г. Г., Бельшикина М. Е. Рост и развитие раннеспелых сортов сои при разных сроках посева в Московской области // Кормопроизводство. 2012. № 3. С. 26–28.
3. Курбанов Р. К., Захарова О. М., Захарова Н. И., Горшков Д. М. Программное обеспечение для мониторинга и контроля показателей селекционных процессов посевов сои // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 3 (32). С. 122–132.
4. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Перспективные научно-технические проекты в сфере механизации и роботизации сельского хозяйства // Формирование единого научно-технологического пространства союзного государства: проблемы, перспективы, инновации. 2017. С. 333–343.
5. Сеферова И. В., Мисюрин Т. В., Никишкина М. А. Эколого-географическая оценка биологического потенциала скороспелых сортов и осеверение сои // Сельскохозяйственная биология. 2007. № 5. С. 42–47.
6. Синеговская В. Т., Наумченко Е. Т., Кобозева Т. П. Методы исследований в полевых опытах с соей; ФГБНУ «Всероссийский НИИ сои». Благовещенск, 2016. 116 с.
7. Kurbanov R. K., Litvinov M. A. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. In: International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering (ERSME-2020) in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012062. IOP Publishing Ltd, Rostov-on-Don, Russia. 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012062>.
8. Lu N., Wang W.H., Zhang Q. F., Li D., Yao X. et al. Estimation of nitrogen nutrition status in winter wheat from unmanned aerial vehicle based multi-angular multispectral imagery // Frontiers in plant science. 2019. No. 10. P. 1601.
9. Vico G., Way D. A., Hurry V., Manzoni S. Can leaf net photosynthesis acclimate to rising and more variable temperatures? / Plant, Cell & Environment. 2019. Vol. 42. No. 6. P. 1913–1928.
10. Yue J., Feng H., Tian Q., Zhou C. A robust spectral angle index for remotely assessing soybean canopy chlorophyll content in different growing stages // Plant methods. 2020. No.16. P. 104.

REFERENCES

1. Belyshkina M. E. The current state and prospects of the world and Russian soybean markets. Agrarian Russia. 2013;(6):7–11. (In Russ.).
2. Gataulina G. G., Belyshkina M. E. Growth and development of early-ripening soybean varieties at different sowing dates in the Moscow region. *Feed production*. 2012;(3):26–28. (In Russ.).
3. Kurbanov R. K., Zakharova O. M., Zakharova N. I., Gorshkov D. M. Software for monitoring and control of indicators of breeding processes of soybean crops. *Innovations in agriculture*. 2019;3(32):122–132. (In Russ.).
4. Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S. Promising scientific and technical projects in the field of mechanization and robotization of agriculture. Formation of a unified scientific and technological space of the Union state: problems, prospects, innovations; 2017. P. 333–343. (In Russ.).
5. Seferova I. V., Misyurina T. V., Nikishkina M. A. Ecological and geographical assessment of the biological potential of precocious varieties and soybean sowing. *Agricultural biology*. 2007;(5):42–47. (In Russ.).
6. Sinegovskaya V. T., Naumchenko E. T., Kobozeva T. P. Research methods in field experiments with soy. All-Russian Research Institute of Soy. Blagoveshchensk; 2016. 116 p. (In Russ.).
7. Kurbanov R. K., Litvinov M. A. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. In: International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering (ERSME-2020) in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012062. IOP Publishing Ltd, Rostov-on-Don, Russia. 2020.
8. Lu N., Wang W.H., Zhang Q.F., Li D., Yao X. et al. Estimation of nitrogen nutrition status in winter wheat from unmanned aerial vehicle based multi-angular multispectral imagery. *Frontiers in plant science*. 2019;(10):1601.
9. Vico G., Way D. A., Hurry V., Manzoni S. Can leaf net photosynthesis acclimate to rising and more variable temperatures? *Plant, Cell & Environment*. 2019;42(6):1913–1928.
10. Yue J., Feng H., Tian Q., Zhou C. A robust spectral angle index for remotely assessing soybean canopy chlorophyll content in different growing stages. *Plant methods*. 2020;(16):104.

Статья поступила в редакцию 22.11.2021; одобрена после рецензирования 24.11.2021; принята к публикации 26.11.2021.
The article was submitted 22.11.2021; approved after reviewing 24.11.2021; accepted for publication 26.11.2021.