

УДК 631.58:631.46:581.5

**ЦИФРОВОЙ МОНИТОРИНГ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ
НА ОСНОВЕ БЕСПИЛОТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

О.А. Оленин, к.с.-х.н., agrotonik63@mail.ru, С.Н. Зудилин, д.с.-х.н., zudilin_sn@mail.ru, С.Н. Шевченко, д.с.-х.н., samniish@mail.ru, Ю.В. Осоргин, osrgin-jura@mail.ru, Самарский государственный аграрный университет, А.С. Чернов, ООО «ГИС-Р», kane163@gmail.com

Российская Федерация, 446442, Самарская обл., г. Кинель, ул. Учебная, 2, п. г. т. Усть – Кинельский

Приведены результаты исследований по цифровому мониторингу агрофитоценозов одновидовых и поливидовых посевов зерновых и зернобобовых культур на опытном поле Самарского ГАУ в 2018 г. (южная лесостепь Заволжья). Цифровой мониторинг проводили методом получения снимков высокого разрешения на различных стадиях вегетации полевых культур с применением беспилотных авиационных систем (БАС) по вегетационным индексам, в том числе индексу биомассы NDVI. Показатели агрофитоценозов в виде полевой статистики определяли по общепринятым методикам на основании ГОСТ. Результаты аэрофотосъемок калибровали по показаниям полевой статистики соответствующих участков опытных полей. По результатам 2018 г. наибольшая корреляция между вегетационным индексом биомассы NDVI и урожайностью зерна для озимых и яровых зерновых колосовых культур выявлена в фазе молочной спелости (до $r = 0,82$).

Ключевые слова: цифровая трансформация АПК, беспилотные технологии, беспилотные авиационные системы, цифровой мониторинг показателей агроэкосистем, мультиспектральная съемка, вегетационные индексы, структура урожая, урожайность зерна.

DOI: 10.25680/S19948603.2019.110.16

В Российской Федерации принят на законодательном уровне национальный проект «Цифровая экономика» – один из тринадцати национальных проектов в России на период с 2019 по 2024 г. (паспорт национальной программы утверждён решением президиума Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам 24.12.2018 г.) [1].

Национальный проект «Цифровая экономика» создан для решения, помимо прочих, следующих задач: преобразование приоритетных отраслей экономики и социальной сферы, включая здравоохранение, образование, промышленность, **сельское хозяйство**, строительство, городское хозяйство, транспортную и энергетическую инфраструктуру, финансовые услуги, посредством внедрения цифровых технологий и платформ. Таким образом, цифровая трансформация АПК становится приоритетной задачей для государственных органов власти, научно-исследовательских учреждений и образовательных заведений сферы АПК [2].

Развитие космических и беспилотных технологий, беспилотных авиационных систем и специального программного обеспечения позволит в земледелии и растениеводстве повысить мобильность, оперативность и качество мониторинга показателей агроэкосистем и связанных с ними природных экосистем в рамках адаптивно-ландшафтного земледелия [3-8].

В использовании беспилотной аэрофотосъемки наиболее перспективны следующие направления: построение цифровых моделей рельефа, анализ неоднородности плодородия земель по спектральным характеристикам, контроль за выполнением работ на полях, оценка вариабельности посевов по вегетационным индексам, термокарты посевов, выявление повреждений растительности от внешних воздействий [3, 4].

Цифровой мониторинг показателей агроэкосистем проводят на основе оценки вариабельности посевов по

вегетационным индексам, с помощью аэрофотосъемки на мультиспектральную камеру.

Имея данные мультиспектральной съемки, можно рассчитать множество вегетационных индексов: нормализованный индекс биомассы (NDVI) – позволяет проводить качественную и количественную оценки объема биомассы, оценивать интенсивность вегетации растений; улучшенный нормализованный индекс биомассы (ENVI) – подобно NDVI, но используется также и часть видимого спектра для более эффективного показания состояния здоровья растений; зеленый нормализованный индекс биомассы (GNDVI) – позволяет оценить содержание хлорофилла, степень старения, наличия стресса у растения; дифференцированный вегетационный индекс (DVI) – позволяет определить области затенения, почвы и растительности; застоя воды; зеленый дифференцированный вегетационный индекс (GDVI) – показывает количество азота в листьях, что может оптимизировать внесение удобрений исходя из реальных потребностей [3, 4].

Вегетационные индексы дают общую картину состояния определенных показателей агрофитоценоза, так как являются относительными величинами (например, значения индекса NDVI от 0 до 1). Однако для сельхозпредприятий нужны конкретные данные в физических величинах, например, объем биомассы на поле или потенциальная урожайность зерна в т/га.

Цели данной работы: 1) разработать методику применения программно-аппаратного обеспечения космических и беспилотных технологий и БАС для цифрового мониторинга показателей агроэкосистем; 2) разработать цифровую платформу по переводу в режиме online вегетационных индексов в конкретные параметры показателей агрофитоценоза в физических единицах (например, в т/га, мг/кг и др.) применительно к разным культурам в различные фазы вегетации в данных почвенно-климатических условиях.

Задачи исследований: 1. Мониторинг состояния растительности по снимкам высокого разрешения на различных стадиях вегетации по индексу биомассы NDVI. 2. Мониторинг рельефа и геоморфологических условий. 3. Дешифрирование электронных карт засоренности посевов. 4. Дешифрирование электронных карт содержания азота в растениях посевов. 5. Составление термокарт посевов на основе тепловизионной съемки в различные фазы вегетации и в разное время суток. 6. 3-D моделирование агрофитоценозов. 7. Прогноз потенциальной урожайности на основе индекса биомассы NDVI.

Создание цифровой платформы по переводу результатов различных видов цифровых аэрофотосъемок в реальные физические показатели посевов напрямую зависит от степени наполненности баз статистических данных. Поэтому работа по созданию платформы рас-

считана на 3-4 года, по мере сбора и накопления данных полевой статистики по различным культурам.

Совместно с ООО «ГИС-Р» (г. Самара) лаборатория «АгроЭкология» при кафедре «Землеустройство, почвоведение и агрохимия» Самарского ГАУ в 2018 г. на опытных полях провела исследования по теме «Цифровой мониторинг показателей агроэкосистем на основе космических и беспилотных технологий как основа Цифрового органического земледелия» [9].

Опытный участок расположен в центральной части Самарской области, южная лесостепь Заволжья. Почва опытного участка – чернозем типичный среднесиловый тяжелосуглинистый. Агрохимические показатели слоя 0-40 см: содержание гумуса 5,9%, азота легкогидролизуемого 80-120 мг/кг, фосфора подвижного 135-145, калия обменного 150-195 мг/кг, $pH_{\text{сол.}}$ 6,9 (рис. 1).



Рис. 1. Опытные поля лаборатории «АгроЭкология» при кафедре «Землеустройство, почвоведение и агрохимия» Самарского ГАУ (американская спутниковая система Google Планета Земля, 06.07.2019)

Агрометеорологические условия 2017-2018 г. были не совсем благоприятные для возделывания большинства полевых культур: зимний период был теплее обычного на $9,2^{\circ}\text{C}$, среднесуточная норма осадков превышена на 137,4 %; май оказался засушливым с количеством осадков 20,7 мм, что в 1,6 раза ниже нормы; июль и август были теплее обычного на $3,1$ и $1,4^{\circ}\text{C}$ соответственно; осадки в летний период выпадали очень неравномерно: июнь и август были крайне засушливыми с количеством осадков, соответственно, в 2,1 и 3,6 раза ниже среднесуточной нормы.

Исследования проводили в полевом многофакторном стационарном опыте на полях двух шестипольных севооборотов с одновидовыми и поливидовыми (смешанными и совместными) посевами. Севооборот №1 (контроль) – одновидовые посевы: 1 – чистый пар; 2 – озимая пшеница; 3 – яровая пшеница твердая; 4 – горох; 5 – ячмень; 6 – подсолнечник. Севооборот №2 – поливидовые посевы: 1 – занятый пар (донник желтый); 2 – озимая пшеница + озимая вика; 3 – яровая пшеница твердая + ячмень + горох; 4 – озимая пшеница + яровая пшеница + горох (весенний посев); 5 – ячмень + горох; 6 – подсолнечник + донник желтый.

Мультиспектральную и тепловизионную (рано утром и днем) съемки проводили на полях полигона №2 (площадь 4 га): поле №1 – озимая пшеница; поле №2 – озимая пшеница + озимая вика; поле №3 – ячмень; поле №4 – яровая пшеница твердая + ячмень + горох (рис. 2).

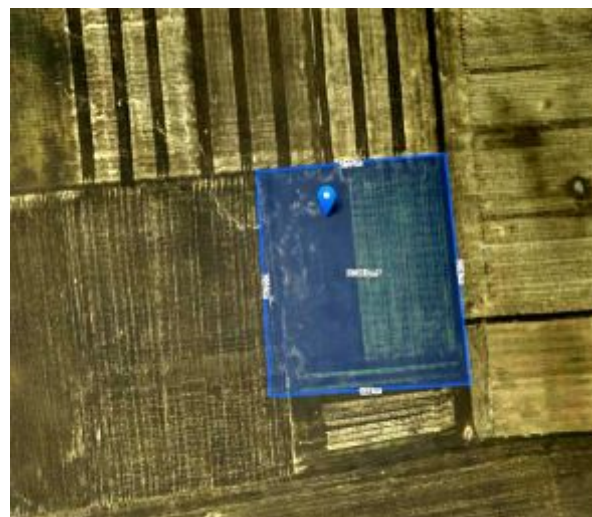


Рис. 2. Полигон №2, площадь 4 га

Полученные значения вегетационных индексов и температуры (после обработки материалов аэрофотосъемки из специальной цифровой платформы «Агро-ГИС» компании ООО «ГИС-Р») необходимо сопроводить данными полевой статистики для накопления базы данных, на основе которой в итоге будет разработана цифровая платформа по переводу результатов съемок в виде вегетационных индексов в реальные физические показатели (оптимально – в режиме on-line) [9, 10].

Для выполнения задачи сбора полевой статистики была разработана предварительная методика, которая в 2019 г. будет корректироваться:

1. На каждом поле выбирают девять характерных типовых площадок размером 1×1 м (площадь 1 м²), значительно различающихся между собой по основным показателям агрофитоценоза (засоренность, структура травостоя, вредители и болезни растений культур). В центре площадки ставят маркер: высота – 1,50 м, верхнюю часть (15 см) окрашивают в красный цвет, присваивают номер. Определяют координаты маркера по спутниковой навигации WGS84.

2. На каждой площадке в день полетной сессии (или в течение 1-2, максимум 3 дней после сессии) проводили следующие наблюдения и определения: количество растений культуры / масса растений культуры / количество сорняков / масса сорняков / видовой состав сорняков / высота растений культуры и длина колоса / вредители и болезни / кустистость растений культуры / цвет и состояние растений культуры / фото. Данные заноси-

ли в специальные таблицы в процессе измерений непосредственно в поле.

3. После полного созревания растений культуры с выбранных площадок полностью (с 1 м²) собирались растения полевых культур в снопы для обработки структуры урожая, которая определялась в лаборатории.

4. Собранный полевой статистика обрабатывалась, систематизировалась и аккумулировалась в специальные таблицы в виде баз данных.

5. Завершающий этап работы: привязка собранной полевой статистики к результатам съемок (мультиспектральная, тепловизионная и оптическая).

По координатам на электронной карте определялось местонахождение конкретного маркера, вырезалась площадка вокруг маркера, которая заносилась в таблицу с показателями агрофитоценоза с данной площадки.

В качестве примера приведем результаты цифрового мониторинга поля №1 (озимая пшеница) из полигона №2 (табл. 1).

1. Показатели агрофитоценоза: поле №1, озимая пшеница, фаза – цветение (14.06.2018)

Показатель	№ маркера								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NDVI	0,606	0,566	0,611	0,477	0,660	0,620	0,432	0,483	0,209
Температура поверхности почвы, °C	25,18	29,30	25,54	28,23	26,82	25,40	32,74	33,85	39,85
Высота местности, м	38,17	38,23	38,14	38,13	38,06	38,16	37,96	38,23	38,12
Густота растений оз. пш., шт/м ²	198	189	199	98	190	137	132	131	4
Засоренность, шт/м ²	27	30	72	115	30	50	117	201	198
Биомасса сорняков, г/м ²	10,8	12	43,2	115	18	60	93,6	201	1425,6
Биомасса растений оз. пш., г/м ²	4356	4536	3582	1568	4560	3562	3432	2620	32
Состояние растений оз. пш. (по 5 баллам)	4	5	3	2	3,5	4,5	3	2	1
Виды сорняков	Горец птичий	Марь белая	Марь белая, выюнок полевой	Марь белая, выюнок полевой	Марь белая, выюнок полевой	Марь белая, выюнок полевой	Марь белая, выюнок полевой	Марь белая, выюнок полевой, запрокинутая	Марь белая, осот желтый, щирица запрокинутая, трехреберник, портулак огородный
WGS84	53,24 50,72	53,24 50,72	53,24 50,72	53,24 50,72	53,24 50,72	53,24 50,72	53,24 50,72	53,24 50,72	53,24 50,72
Биомасса, всего, т/га	43,67	45,48	36,25	16,83	45,78	36,22	35,26	28,21	14,58

Показатели агрофитоценоза на девяти маркерах определялись: 19 мая (фаза – кушение озимой пшеницы), 14 (цветение) и 25 (молочная спелость) июня, 24 июля (полная спелость, за 7 дней до уборки).

Во время каждой сессии определяли структуру посевов озимой пшеницы. Данные заносили в единую таблицу по результатам конкретной аэрофотосессии.

В дальнейшем, на основе итоговых таблиц всех аэрофотосессий (в данном случае – четыре даты) составляли заключительную таблицу цифрового мониторинга по данному полю (табл. 2).

Полевые статистические данные, приведенные в таблице 2, служат составной частью базы данных, на основе которой разрабатывают цифровую платформу по переводу в режиме on-line вегетационных индексов в конкретные физические параметры (т/га, мг/кг и т.д.) показателей агрофитоценоза применительно к разным культурам в разные фазы развития в данных почвенно-климатических условиях.

По статистическим данным заключительной таблицы №2 рассчитаны коэффициенты корреляции между био-

массой всего и биомассой зерна и вегетационными индексами биомассы NDVI.

Расчеты показали высокую корреляцию индекса NDVI с физическими показателями биомассы по датам: 14 июня (цветение озимой пшеницы) и 25 июня (молочная спелость). Однако, максимальная корреляция с биомассой зерна культуры отмечена в фазе молочной спелости озимой пшеницы, т.е. 25 июня: 1. NDVI от 19.05 – биомасса, всего, т/га – $r = 0,14$; 2. NDVI от 19.05 – биомасса зерна, т/га – $r = 0,25$; 3. DVI от 14.06 – биомасса, всего, т/га – $r = 0,39$; 4. NDVI от 14.06 – биомасса зерна, т/га – $r = 0,22$; 5. NDVI от 25.06 – биомасса, всего, т/га – $r = 0,19$; 6. NDVI от 25.06 – биомасса зерна, т/га – $r = 0,36$.

Следовательно, наибольший коэффициент корреляции между вегетационным индексом биомассы NDVI и урожайностью зерна озимой пшеницы выявлен в фазе молочной спелости озимой пшеницы ($r = 0,36$).

В 2019 г. необходимо провести мультиспектральную съемку посевов озимой пшеницы в начале фазы молочно-восковая спелость.

2. Показатели агрофитоценоза: поле №1, озимая пшеница, итоговая

Показатель	№ маркера								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NDVI: от 19.05 (кущение)	0,555	0,720	0,693	0,345	0,530	0,584	0,649	0,670	0,067
от 14.06 (цветение) см. табл. 1	0,606	0,566	0,611	0,477	0,660	0,620	0,432	0,483	0,209
от 25.06 (молочная спелость)	0,690	0,547	0,463	0,378	0,499	0,408	0,568	0,454	0,214
Число зерен с 1 колоса/масса 1000 зерен, г	42/46,8	36/58,3	35/40,4	38/44,0	33/45,5	41/43,4	42/44,36	37/48,3	34/44,8
Масса зерна, т/га	5,33	6,84	4,12	2,32	3,68	4,22	3,19	3,09	4,27
Биомасса, всего, т/га	8,80	9,75	7,90	5,40	7,90	9,40	5,80	5,30	7,75

По такой же методике проводили цифровой мониторинг остальных полей полигона №2: поле №2 – озимая пшеница + озимая вика; поле №3 – ячмень; поле №4 – яровая пшеница твердая + ячмень + горох.

Подсчет коэффициентов корреляции между индексами NDVI и физическими показателями биомассы, всего и биомассы зерна, показал, что наибольшая корреляция на поле №2 отмечена также в фазе молочная спелость озимой пшеницы (с биомассой зерна, $r = 0,82$); на поле №3 – в фазе начало колошения ячменя (с биомассой зерна, $r = 0,97$).

Таким образом, НИР по итогам 2018 г. выявила, что заявленные основные цели достижимы, и требуются накопление базы данных (минимум – за 3-4 года) результатов аэрофотосъемки и сбора полевой статистики показателей агрофитоценозов.

В полевом сезоне 2019 г. будет продолжено накопление базы данных как основы для разработки цифровой платформы по переводу в режиме on-line вегетационных индексов в конкретные физические параметры основных показателей агрофитоценозов.

По результатам 2018 г. наибольшая корреляция между индексом биомассы NDVI и урожайностью зерна для озимых и яровых зерновых колосовых культур выявлена в фазе молочная спелость (до $r = 0,82$). Определены основные оптимальные фазы развития зерновых колосовых культур для цифрового мониторинга: кущение; цветение; молочная спелость.

Литература

1. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». [Электронный ресурс] // URL:

<http://government.ru/rugovclassifier/614/events/> (дата обращения: 14.07.2019).

2. Концепция научно-технологического развития цифрового сельского хозяйства «Цифровое сельское хозяйство» [Электронный ресурс] // URL: <http://www.viapi.ru/download/2018/Цифровое%20сельское%20хозяйств%20o.pdf> (дата обращения: 14.07.2019).

3. Фахрутдинов Р. Р., Барышников Н. А., Гусева С. А. Беспилотные технологии в АПК – перспективы и востребованность на рынке / [Электронный ресурс]. URL: <http://docplayer.ru/64559340-Oblasti-primeneniya-bpla.html> (дата обращения: 14.07.2019).

4. Фахрутдинов Р. Р., Барышников Н. А., Гусева С. А. Опыт применения мультиспектральной съемки в области сельского хозяйства / [Электронный ресурс]. URL: <https://ssau.ru/pagefiles/final%20002%20web.pdf> (дата обращения: 14.07.2019).

5. Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // ГеоМатика. – 2009. – № 3. – С. 28-32.

6. Ерошенко Ф. В., Барталев С. А., Сторчак И. Г., Плотников Д. Е. Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. – Т. 13. – №4. – С. 99-112.

7. Сладких Л. А., Захватов М. Г., Сапрыкин Е. И., Сахарова Е. Ю. Технология мониторинга состояния посевов по данным дистанционного зондирования Земли на юге Западной Сибири // ГеоМатика. – 2016. – №2. – С. 39-48.

8. Зубкова К. И., Куревлева Т. Г., Пермитина Л. И. Оценка погрешности расчета NDVI при использовании эмпирических методов учета влияния атмосферы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016. – Т. 3. – Вып. 2. – С. 24-30.

9. АгроГИС. Руководство пользователя. [Электронный ресурс] // URL: <https://gis2.prom.aero> (дата обращения: 14.07.2019).

10. Biologization and efficiency of crop rotation types under conditions of the forest-steppe zone of the Volga region / A. L. Toigildin [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2018. Vol. 9. № 6. P. 1063-1070.

DIGITAL MONITORING OF AGRO-PHYTOCENOSIS INDICATORS BASED ON UNMANNED TECHNOLOGIES

O.A. Olenin¹, C.N. Zudilin¹, S.N. Shevchenko¹, Yu.V. Osorgin¹, A.S. Chernov²

¹ Samara State Agrarian University, Uchebnaya ul., 2, 446442 Kinel, Russia, E-mail: agrotonik63@mail.ru, zudilin_sn@mail.ru, samniush@mail.ru, osrgin-jura@mail.ru,

² GIS-R, 22-go partysyezda ul. 173A, 4443081 Samara, Russia, E-mail: kane163@gmail.com

The aim of the research is to develop a method for digital monitoring of indicators of agroecosystems based on unmanned technologies with the translation of digital aerial photographs into real parameters of indicators of agrophytocenoses in physical units. The results of studies on digital monitoring of agrophytocenoses of single-species and poly-species crops of grain and leguminous crops in the experimental field of the Samara State Agrarian University in 2018 (southern forest-steppe of the Volga region) are presented. Digital monitoring was carried out by the method of obtaining high-resolution images at various stages of vegetation of field crops using unmanned aerial systems (UAS) according to vegetation indices, including the biomass index NDVI. Digital monitoring was carried out by the method of obtaining high-resolution images at various stages of growing field crops using unmanned aerial systems (UAS). Agrophytocenoses in the form of field statistics were determined using generally accepted methods based on GOST. The results of aerial surveys were calibrated according to the indications of field statistics of the corresponding sections of the experimental fields. According to the results of 2018, the largest correlation between the vegetative index of biomass NDVI and grain yield for winter and spring cereal crops was revealed in the milk ripeness phase (up to $r = 0,82$).

Key words: digital transformation of the agricultural sector, unmanned technologies, unmanned aerial systems, digital monitoring of agroecosystem indicators, multispectral imaging, vegetation indices, crop structure, grain yield

