

УДК 528.8:632.51

06.01.01 – Общее земледелие, растениеводство  
(сельскохозяйственные науки)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОФОТОСЪЁМКИ  
МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КАМЕРОЙ ДЛЯ  
ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ ГЕРБИЦИДОВ**

Подушин Юрий Викторович  
канд. с.-х. наук, доцент, кафедра физиологии и  
биохимии растений  
SPIN-код: 9089-8888  
AuthorID: 554281  
[yrapod@mail.ru](mailto:yrapod@mail.ru)

Савинский Алексей Олегович  
Аспирант, кафедра физиологии и биохимии  
растений  
SPIN-код: 8663-1083  
AuthorID: 1115586  
[savinskiy.aleksey@yandex.ru](mailto:savinskiy.aleksey@yandex.ru)

Мязина Анна Николаевна  
Аспирант, кафедра физиологии и биохимии  
растений  
SPIN-код: 5684-9154  
AuthorID: 1018977  
[myazina\\_anna94@mail.ru](mailto:myazina_anna94@mail.ru)  
*Кубанский государственный аграрный  
Университет имени И.Т. Трубилина, Россия,  
Краснодар 350044, Калинина 13*

В работе представлены результаты мониторинга мелкочаечного полевого опыта беспилотным летательным аппаратом с мультиспектральной камерой. В опыте изучалось применение гербицидных обработок на посевах озимой пшеницы. Было показано, что мультиспектральная съёмка с больших высот, позволяет выявлять участки, засорённые большим количеством сорняков, на разных фазах вегетации озимой пшеницы и достоверно оценивать эффективность действия гербицидов. Наиболее восприимчивыми вегетационными индексами (ВИ) к наличию сорных растений в посевах озимой пшеницы являлись EVI2, CVI и CI rededge. В работе показано, что корректная интерпретация результатов дистанционного мониторинга по вегетационным индексам затруднительна без учёта видовых особенностей сорных растений и биологии их развития. Изучено взаимовлияние уровня обеспеченности элементами минерального питания растений и засорённости посевов на величину вегетационных индексов

Ключевые слова: ДИСТАНЦИОННОЕ  
ЗОНДИРОВАНИЕ, МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ

UDC 528.8:632.51

06.01.01 - General agriculture, crop production  
(agricultural sciences)

**USING AERIAL PHOTOGRAPHY WITH A  
MULTISPECTRAL CAMERA TO EVALUATE  
THE EFFECTIVENESS OF HERBICIDES**

Podushin Yuri Viktorovich  
Candidate in Agriculture, associate professor,  
Department of Plant Physiology and Biochemistry  
RSCI SPIN-code: 9089-8888  
AuthorID: 554281  
[yrapod@mail.ru](mailto:yrapod@mail.ru)

Savinsky Alexey Olegovich  
postgraduate student, Department of Plant  
Physiology and Biochemistry  
RSCI SPIN-code: 8663-1083  
AuthorID: 1115586  
[savinskiy.aleksey@yandex.ru](mailto:savinskiy.aleksey@yandex.ru)

Myazina Anna Nikolaevna  
postgraduate student, Department of Plant  
Physiology and Biochemistry  
RSCI SPIN-code: 5684-9154  
AuthorID: 1018977  
[myazina\\_anna94@mail.ru](mailto:myazina_anna94@mail.ru)  
*“Kuban State Agrarian University named after  
I.T. Trubilin”, Krasnodar 350044, Kalinina 13,  
Russia*

The article presents the results of monitoring a small-scale field experiment by an unmanned aerial vehicle with a multispectral camera. In the experiment, we studied the use of herbicide treatments on winter wheat crops. It has been shown that multispectral shooting from high altitudes makes it possible to identify areas clogged with a large number of weeds at different phases of winter wheat vegetation and reliably assess the effectiveness of herbicides. The most susceptible vegetation indices (In And) to the presence of weeds in winter wheat crops were EVI2, CVI and CI rededge. The work shows that the correct interpretation of the results of remote monitoring by vegetation indices is difficult without taking into account the specific features of weeds and the biology of their development. The mutual influence of the level of availability of elements of mineral nutrition of plants and the contamination of crops on the value of vegetation indices has been studied as well

Keywords: REMOTE SENSING,  
MULTISPECTRAL CAMERA, VEGETATION

КАМЕРА, ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ,  
ОЗИМАЯ ПШЕНИЦА, СОРНЫЕ РАСТЕНИЯ,  
ГЕРБИЦИДНАЯ ОБРАБОТКА,  
МИНЕРАЛЬНЫЕ УДОБРЕНИЯ

INDICES, WINTER WHEAT, WEEDS,  
HERBICIDE TREATMENT, MINERAL  
FERTILIZERS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-174-027>

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие беспилотных технологий и средств аэрофотосъёмки открыло перспективы их широкого применения в агрономической работе в качестве инструмента для мониторинга полевых опытов. В настоящее время для дистанционной оценки состояния растительных покровов известно более 150 различных вегетационных индексов [7]. С одной стороны, это говорит о высокой востребованности и перспективности практического использования спектральных характеристик растительных сообществ, а с другой – о недостатке индексов, по которым можно оценивать отдельные стороны функционирования фитоценозов.

Особое место в этой проблеме занимает контроль сорных растений, поскольку, с одной стороны сорняки, конкурируя с возделываемой культурой за элементы минерального питания, снижают её темпы формирования биомассы, в том числе и листовой поверхности, а с другой стороны, собственная листовая поверхность сорных растений, может вносить существенный вклад в изменение спектральных характеристик посева, тем самым осложняя интерпретацию получаемых данных. В более ранних исследованиях было подтверждено, что съёмка в инфракрасной и видимой областях спектра света позволяет выявлять наличие сорной растительности в посевах [2].

Важным шагом в разработке технологии оценки засорения посевов является исследование отражающей способности посевов, возделываемых в контролируемых условиях. В связи с этим изучение посевов в многофакторном стационарном опыте может, во-первых, дать ценную

<http://ej.kubagro.ru/2021/10/pdf/27.pdf>

первичную информацию для построения новых эффективных параметров для дистанционной оценки состояния посевов, а во-вторых, позволяет оценить применимость предлагаемых вегетационных индексов к решению конкретных задач растениеводства.

Возможности аэрофотосъемки для определения засоренности полей начали изучаться во второй половине 1990-х годов. Было показано что наиболее прогрессивным подходом в дистанционном мониторинге засоренности полей и оценки эффективности гербицидных обработок является использование мультиспектральных камер, установленных на беспилотные летательные аппараты [1, 2].

В связи с этим было предпринято исследование, в котором в условиях математически спланированного полевого опыта с помощью вегетационных индексов, получаемых в результате аэрофотосъемки посевов, изучалось влияние гербицидных обработок.

## УСЛОВИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служила озимая пшеница сорта Степь, возделываемая в многофакторном стационарном полевым опыте, заложенном в учебно-опытном хозяйстве «Кубань», г. Краснодар.

Из всех вариантов опыта было выбрано четыре, образующих вместе полный двухфакторный опыт.

Схема опыта:

Фактор А – внесение минеральных удобрений:

1. Без удобрений;
2. Вносились минеральные удобрения ( $N_{120}P_{60}K_{40} + N_{60} + N_{60}$ ).

Фактор В – проведение гербицидной обработки посевов:

1. Обработка не проводилась;
2. Посевы обрабатывались гербицидом Секатор турбо (75 мл/га)

Повторность опыта – трёхкратная. Контрольным был вариант без внесения минеральных удобрений и проведения гербицидных обработок.

При возделывании озимой пшеницы перед посевом проводили отвальную вспашку на глубину 20 - 22 см и трехкратное дискование на 10 – 12 см. В варианте с минеральными удобрениями под основную обработку вносили диаммофос с карбамидом ( $N_{120}P_{60}K_{40}$ ), в первую весеннюю обработку – аммиачную селитру ( $N_{60}$ ), во вторую – карбамид ( $N_{60}$ ).

В качестве гербицида использовался Секатор турбо (75 мл/га). Другие средства защиты растений на делянках не применялись.

Для мониторинга посевов применялся БПЛА самолётного типа Sensefly eBee SQ с мультиспектральной камерой Parrot sequoia. Съёмка производилась с высоты 75 м, разрешение получаемых снимков составляло 7 см/пиксель.

Мультиспектральная камера позволяла получать скорректированные по интенсивности освещения монохроматические снимки в нескольких участках спектра света:

- зелёном (530 - 570 нм);
- красном (640 - 680 нм);
- крайнем красном (730 - 740 нм);
- ближнем инфракрасном (770 – 810 нм).

По оценкам интенсивности отражённого в этих спектральных диапазонах света вычислялись вегетационные индексы, представленные в таблице 1.

Сшивку снимков в ортофотоплан производили с помощью программы *pix4Dmapper*. Дальнейший анализ и извлечение цифровой информации проводился в геоинформационной системе *Qgis*. Каждую делянку на ортофотоплане обрисовывали полигоном, а затем извлекали данные о средней яркости цвета на участке. В дальнейшем эти данные

экспортировались в МО Excel, где они статистически обрабатывались, проводился корреляционный и регрессионный анализ.

**Таблица 1** – Вегетационные индексы, используемые в исследовании

| № | Название индекса                       | Сокращение            | Формула                                   | Ссылка |
|---|--|-----------------------|---|--------|
| 1 | Green Chlorophyll Index                | CI <sub>green</sub>   | $\frac{Nir}{G} - 1$                       | [3]    |
| 2 | Red-edge Chlorophyll Index             | CI <sub>Rededge</sub> | $\frac{Nir}{RE} - 1$                      | [3]    |
| 3 | Enhanced Vegetation Index              | EVI <sub>2</sub>      | $2,5 * \frac{Nir - R}{Nir + 2,4 * R + 1}$ | [6]    |
| 4 | Green NDVI                             | GNDVI                 | $\frac{Nir - G}{Nir + G}$                 | [4]    |
| 5 | Normalized Difference Vegetation Index | NDVI                  | $\frac{Nir - R}{Nir + R}$                 | [8]    |
| 6 | Chlorophyll Vegetation Index           | CVI                   | $\frac{Nir}{G} * \frac{R}{G}$             | [9]    |
| 7 | Normalized difference red-edge index   | NDREI                 | $\frac{RE - G}{RE + G}$                   | [5]    |

Примечание: Nir – инфракрасный спектр; R – красный; RE – крайний красный; G – зеленый.

Климатические условия роста и развития озимой пшеницы в годы исследований существенно различались. В 2020 году активная вегетация озимой пшеницы началась на две-три недели раньше средних многолетних сроков из-за тёплой зимы. С середины марта до конца апреля развитие посевов резко замедлилось из-за холодной погоды с заморозками и дефицитом осадков. В конце апреля до второй декады мая наблюдалась почвенная засуха. Прошедшие в конце мая осадки смягчили неблагоприятные условия для роста и развития пшеницы. Июнь был жарким и засушливым.

В 2021 году озимые перезимовали хорошо, но в марте и апреле их развитие было замедленным из-за недостатка тепла. Погодные условия мая для развития озимых зерновых культур были оптимальными. В период

вегетации озимая пшеница дефицита во влаге в почве не испытывала, так как выпало достаточное количество осадков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Сорная растительность способна оказывать существенное влияние на спектральные характеристики посевов. В проведённом исследовании экранирование посевов сорными растениями было достаточным, чтобы между вариантами опыта, отличающимися гербицидной обработкой, выявлялись существенные различия (табл. 2 - 5).

В климатических условиях 2020 года растительный покров на делянках, обрабатываемых гербицидами, слабее отражал в зелёной, крайней красной и инфракрасной областях спектра света. А при длинах волн 680-640 нм (красный свет), наоборот, отражение света шло сильнее. В фазу трубкования озимой пшеницы (9.04 – 29.04.2020) наблюдаемые различия между вариантами становились существенно значимыми (табл. 1).

В период молочной спелости (27.05.2020) года ситуация резко менялась: засорённые посевы пшеницы начинали отражать свет более эффективно, чем контрольные варианты.

На основе, полученных мультиспектральной камерой данных, рассчитывались вегетационные индексы. Большинство из них показывало сходные результаты. После обработок гербицидами вегетационные индексы посевов озимой пшеницы показывали более низкие значения. Так NDVI в фазу трубкования (9.04) в варианте с обработкой гербицидами был равен 0,73, а в варианте без гербицидов – 0,79. EVI2 – 0,49 и 0,55 соответственно. То есть сорная растительность завышает значения ВИ посевов при недостатке элементов минерального питания в почве. Исключение составил индекс CVI, который в фазу трубкования показывал более высокие результаты на варианте, где проводилась обработка

гербицидами. Наиболее восприимчивыми ВИ к изучаемому фактору являлись индексы EVI2 и CI rededge.

**Таблица 2** – Изменение спектральных характеристик посевов озимой пшеницы после гербицидной обработки относительно безгербицидного варианта, % (варианты без внесения минеральных удобрений, 2020 год)

| Каналы спектра и ВИ               | Дата съёмки |      |       |             |             |            |             |             |      |
|-----------------------------------|-------------|------|-------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------|
|                                   | 19.02       | 7.03 | 17.03 | 9.04        | 29.04       | 6.05       | 14.05       | 27.05       | 5.06 |
| Зелёный<br>(530 - 570 нм)         | 10          | -2   | -3    | -6          | -9          | -2         | -1          | <b>-10*</b> | 2    |
| Красный<br>(640 - 680 нм)         | 14          | 3    | 4     | <b>20*</b>  | 7           | 4          | 3           | <b>-10*</b> | -1   |
| Крайний красный<br>(730 - 740 нм) | 10          | -6   | -8    | -8          | <b>-11*</b> | -4         | -1          | <b>-9*</b>  | 0    |
| Инфракрасный<br>(770 – 810 нм)    | 8           | -8   | -11   | -9          | <b>-14*</b> | -6         | <b>-5*</b>  | <b>-11*</b> | 0    |
| NDVI                              | -2          | -3   | -4    | <b>-8*</b>  | -6          | <b>-2*</b> | -2          | 0           | 1    |
| GNDVI                             | -1          | -3   | -3    | -2          | -2          | <b>-1*</b> | -1          | 0           | -1   |
| CI green                          | -4          | -8   | -10   | -5          | -7          | <b>-4*</b> | -5          | -1          | -2   |
| CI rededge                        | -7          | -8   | -12   | -8          | -13         | -4         | <b>-14*</b> | -4          | 1    |
| EVI2                              | 3           | -8   | -10   | <b>-12*</b> | <b>-15*</b> | -6         | <b>-5*</b>  | <b>-8*</b>  | 1    |
| CVI                               | 11          | -4   | -4    | <b>15*</b>  | 1           | 0          | -1          | <b>-11*</b> | -3   |

Отмеченные выше закономерности были характерны для посевов пшеницы с более низким уровнем минерального питания.

В случае применения рекомендуемых доз минеральных удобрений различия между засорёнными и чистыми от сорняков посевами были значительно меньше (табл. 3).

Отличался также и вклад сорных растений в спектр отражения солнечного света посевами. Посевы, обработанные гербицидами, по сравнению с неудобренными вариантами, хуже отражали красный свет в фазу трубкования (29.04) и лучше в фазу молочной спелости (27.05). Наблюдались различия и в других участках спектра (табл. 2, 3).

При хорошей доступности для пшеницы элементов минерального питания, универсальные растительные индексы не позволяли достоверно выявлять влияние сорных растений на спектр отражённого посевами света.

**Таблица 3** – Изменение спектральных характеристик посевов озимой пшеницы после гербицидной обработки относительно безгербицидного варианта, % (варианты с внесением минеральных удобрений, 2020 год)

| Каналы спектра и ВИ               | Дата съёмки |      |           |            |       |      |       |            |      |
|-----------------------------------|-------------|------|-----------|------------|-------|------|-------|------------|------|
|                                   | 19.02       | 7.03 | 17.03     | 9.04       | 29.04 | 6.05 | 14.05 | 27.05      | 5.06 |
| Зелёный<br>(530 - 570 нм)         | -10         | 2    | 7         | 0          | -6    | 0    | 2     | <b>7*</b>  | -1   |
| Красный<br>(640 - 680 нм)         | -7          | 7    | 5         | <b>-8*</b> | -5    | 3    | 2     | <b>10*</b> | 7    |
| Крайний красный<br>(730 - 740 нм) | -11         | -1   | <b>6*</b> | 3          | 0     | 0    | -1    | 2          | -5   |
| Инфракрасный<br>(770 – 810 нм)    | -11         | -1   | 3         | 1          | 1     | -1   | -1    | 1          | -7   |
| NDVI                              | 0           | -1   | 0         | 1          | 1     | -1   | 0     | -2         | -6   |
| GNDVI                             | 0           | -1   | -1        | 0          | 1     | 0    | -1    | -2         | -3   |
| CI green                          | -1          | -4   | -4        | 1          | 8     | -1   | -4    | -7         | -7   |
| CI rededge                        | 1           | -1   | -5        | -6         | 2     | -2   | -1    | -4         | -7   |
| EVI2                              | -7          | -2   | 2         | 1          | 1     | -1   | -1    | -1         | -10  |
| CVI                               | -8          | 3    | 2         | -7         | 2     | 2    | -2    | 3          | 1    |

В условиях 2021 года, который в отличие от 2020 не был засушливым, но отличался холодным мартом и апрелем, влияние сорных растений на посевы было существенно выше.

При дефиците элементов минерального питания в почве обработка посевов гербицидами однозначно приводила к снижению интенсивности отражения света посевами озимой пшеницы во всех спектрах света, фиксируемых мультиспектральной камерой. В красной области спектра света в определённые периоды вегетации засорённые и чистые варианты отличались более чем на 30 % (табл. 4).



Показания ВИ отличались. Значения NDVI, CI rededge в конце вегетации были достоверно выше в вариантах, обработанных гербицидами. GNDVI, CI green, EVI2, CVI – на засорённых участках.

Наиболее восприимчивыми вегетационными индексами в условиях 2021 года являлись CI rededge и CVI.

**Таблица 4** – Изменение спектральных характеристик посевов озимой пшеницы после гербицидной обработки относительно безгербицидного варианта, % (варианты без внесения минеральных удобрений, 2021 год)

| Каналы спектра и ВИ            | Дата съёмки |             |             |             |             |             |             |             |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                | 05.04       | 20.04       | 06.05       | 12.05       | 28.05       | 01.06       | 07.10       | 10.06       |
| Зелёный (530 - 570 нм)         | <b>-8*</b>  | <b>-16*</b> | <b>-12*</b> | <b>-22*</b> | <b>-15*</b> | -7          | -3          | 0           |
| Красный (640 - 680 нм)         | 1           | -6          | -5          | <b>-31*</b> | <b>-25*</b> | <b>-31*</b> | <b>-28*</b> | <b>-20*</b> |
| Крайний красный (730 - 740 нм) | <b>-15*</b> | -23         | <b>-16*</b> | <b>-17*</b> | <b>-20*</b> | <b>-18*</b> | <b>-15*</b> | <b>-13*</b> |
| Инфракрасный (770 – 810 нм)    | -14         | -24         | -17         | <b>-19*</b> | <b>-17</b>  | <b>-10*</b> | <b>-5*</b>  | <b>-5*</b>  |
| NDVI                           | -3          | -3          | -2          | 2           | 2           | <b>5*</b>   | <b>6*</b>   | <b>4*</b>   |
| GNDVI                          | -2          | -3          | -1          | 1           | 0           | -1          | -1          | <b>-2*</b>  |
| CI green                       | -9          | -11         | -7          | 5           | -2          | -5          | -3          | <b>-6*</b>  |
| CI rededge                     | 4           | -2          | -1          | -6          | 10          | <b>22*</b>  | <b>29*</b>  | <b>20*</b>  |
| EVI2                           | -13         | -18         | -13         | <b>-10*</b> | -8          | -2          | 2           | 0           |
| CVI                            | <b>-5*</b>  | -14         | -10         | <b>-28*</b> | -26         | <b>-34*</b> | <b>-30*</b> | <b>-25*</b> |

При достаточном уровне минеральных элементов питания в почве влияние засорения посевов на их спектральные свойства было сходным с неудобренными вариантами, но носило более слабый характер (табл. 5).

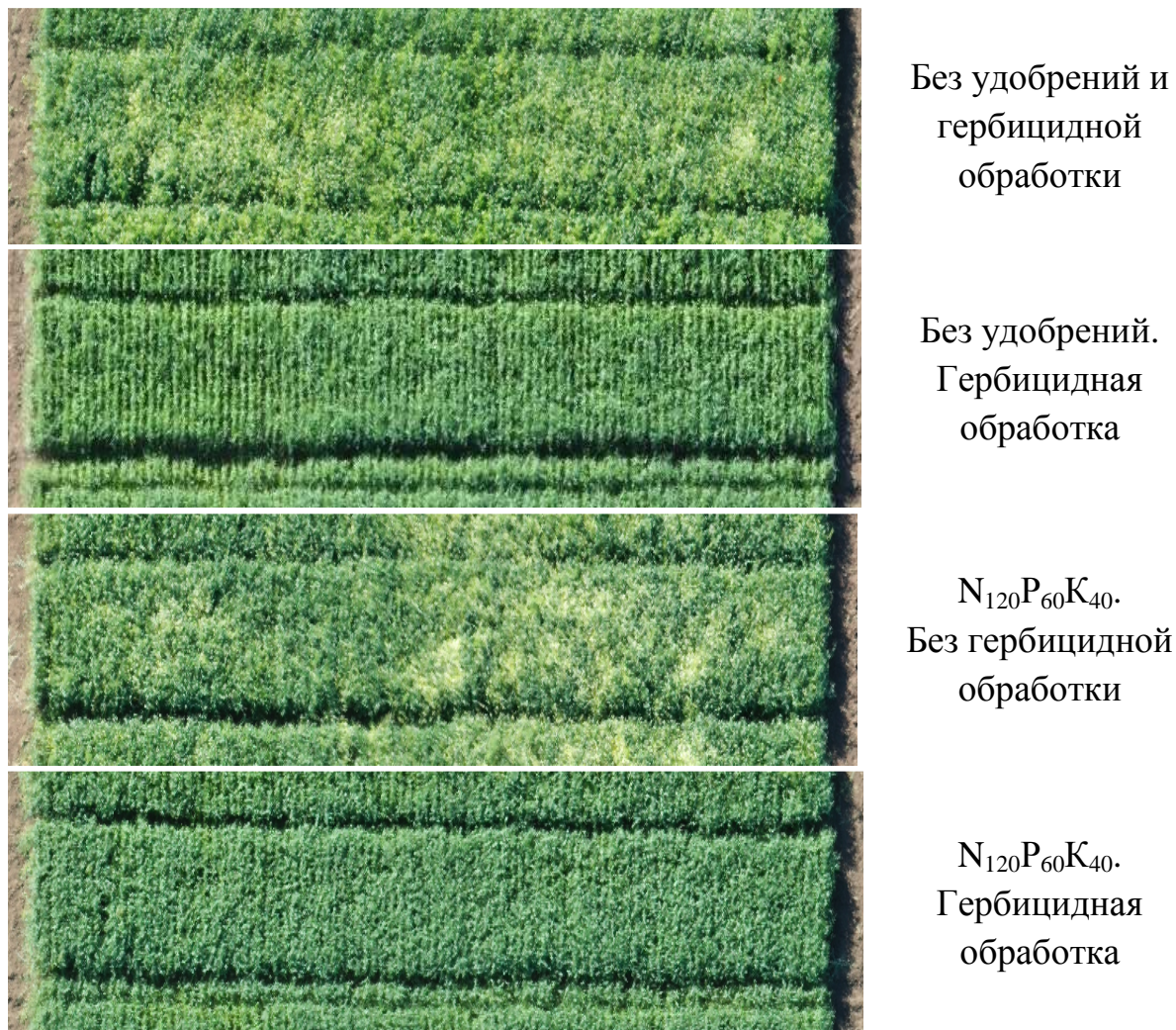
**Таблица 5** – Изменение спектральных характеристик посевов озимой пшеницы после гербицидной обработки относительно безгербицидного варианта, % (варианты с внесением минеральных удобрений, 2021 год)

| Каналы спектра и ВИ            | Дата съёмки |       |       |             |            |             |             |            |
|--------------------------------|-------------|-------|-------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
|                                | 05.04       | 20.04 | 06.05 | 12.05       | 28.05      | 01.06       | 07.10       | 10.06      |
| Зелёный (530 - 570 нм)         | -2          | -1    | -2    | <b>-16*</b> | -6         | <b>-16*</b> | <b>-12*</b> | <b>-8*</b> |
| Красный (640 - 680 нм)         | <b>8*</b>   | 1     | 0     | <b>-22*</b> | -2         | -15         | -9          | -6         |
| Крайний красный (730 - 740 нм) | -6          | -2    | -3    | -9          | -2         | <b>-11*</b> | <b>-8*</b>  | -9         |
| Инфракрасный (770 – 810 нм)    | -8          | -4    | -3    | -1          | 11         | -1          | -1          | -4         |
| NDVI                           | <b>-3*</b>  | -1    | 0     | <b>3*</b>   | 2          | 3           | 2           | 0          |
| GNDVI                          | <b>-2*</b>  | -1    | 0     | <b>4*</b>   | <b>4*</b>  | <b>5*</b>   | 4           | 1          |
| CI green                       | <b>-7*</b>  | -4    | -2    | <b>21*</b>  | <b>21*</b> | <b>21*</b>  | 15          | 5          |
| CI rededge                     | <b>-7*</b>  | -5    | 0     | <b>20*</b>  | <b>30*</b> | <b>26*</b>  | <b>19*</b>  | 10         |
| EVI2                           | <b>-7*</b>  | -3    | -2    | 3           | 8          | 2           | 1           | -2         |
| CVI                            | 1           | -3    | -1    | -7          | <b>16*</b> | 0           | 2           | -1         |

Растительные индексы в фазу трубкования (5.04) были выше на участках, засорённых сорняком. В дальнейшем ситуация в посевах постепенно менялась и после цветения ВИ были уже выше на незасорённых участках.

Наиболее восприимчивыми вегетационными индексами в этом случае являлись CI rededge и CI green.

По внешнему виду посевов в опыте видно, что наблюдаемые различия между вариантами действительно связаны с сорными растениями (рис. 2).

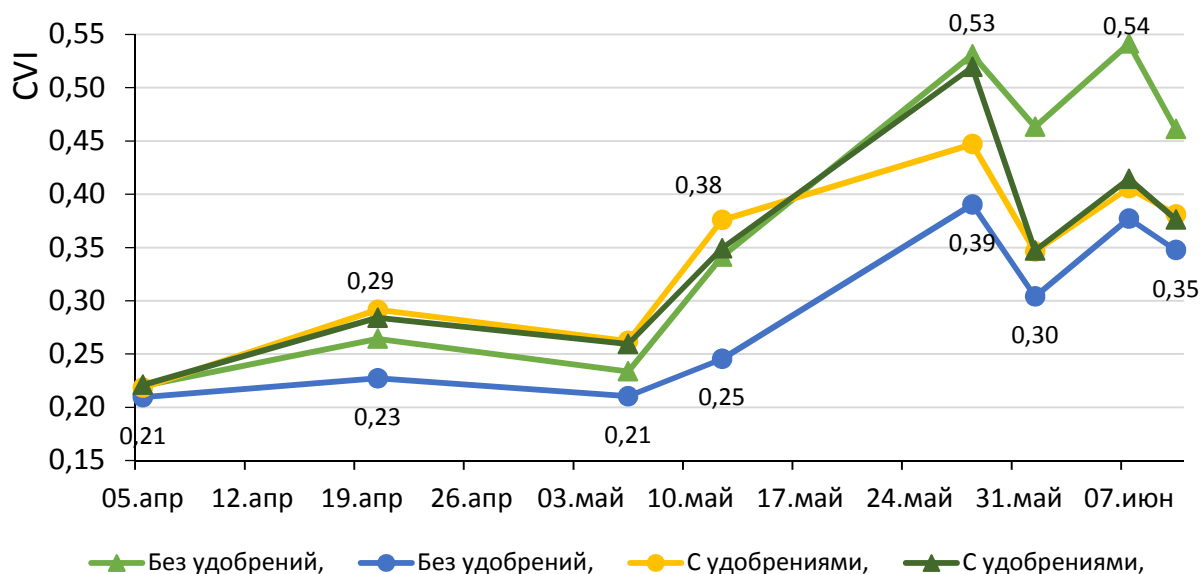


**Рисунок 1** – Внешний вид делянок в опыте. 20 мая 2021 г.

На фотографиях сорняки (ясколка полевая) формируют более светло-зелёный покров над посевами пшеницы. Большие различия между неудобренными вариантами обусловлены в первую очередь тем, что сорные растения закрывают тёмные междурядья, делая посев суммарно более светлым. В случае с удобренными посевами междурядья выражены слабее за счёт более мощных растений пшеницы. В этом случае различия между засорёнными и чистыми делянками формируются за счёт разности цветов культурного и сорного растений.

Эти факты позволяют понять почему на участках с разным уровнем минерального питания растительные индексы, направленные на

различение одного и того же фактора – сорных растений, показывают столь отличающиеся значения.

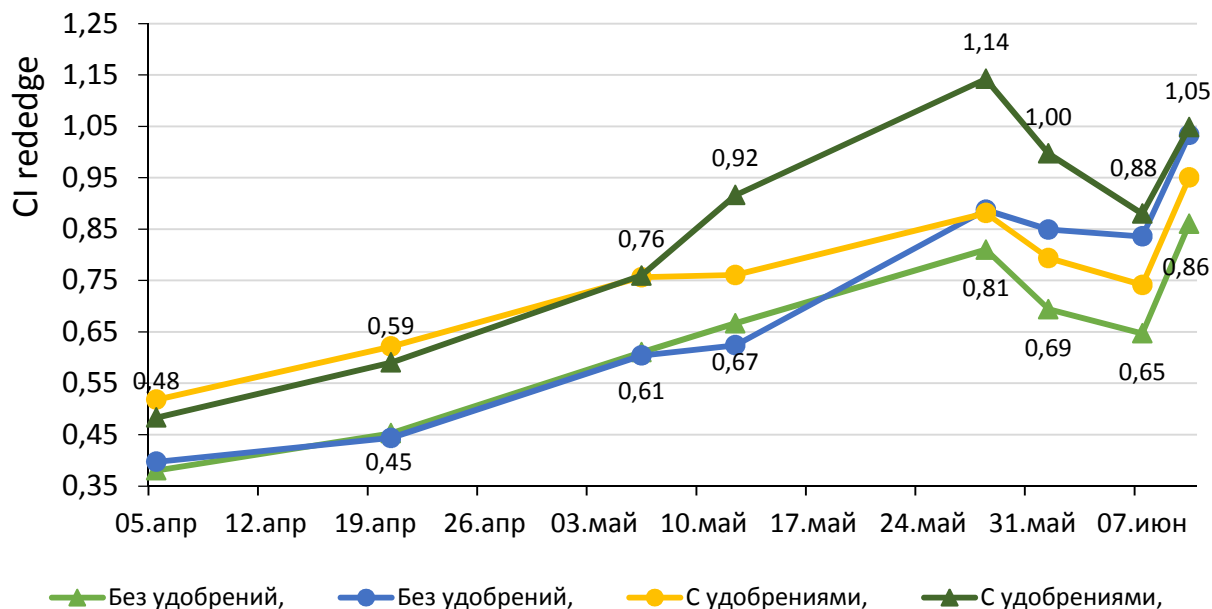


**Рисунок 2** – График динамики изменения индекса CVI у посевов с разным уровнем минерального питания и защиты растений, 2021 г.

На рисунках 2 - 4 представлены графики изменения во времени двух наиболее чувствительных к наличию сорных растений в посевах растительных индексов CVI и CI rededge. Эти индексы направлены на оценку содержания хлорофиллов в листьях растений. Также на графиках представлен индекс NDVI, на который в равной степени влияет плотность растительной массы и содержание в них фотосинтетических пигментов.

На графиках наглядно просматривается, что начиная со второй декады мая параметры посева, определяющие величину CVI и CI rededge, начинают существенно меняться. При этом наблюдается рост различий между отдельными вариантами. По индексу CVI видно, что изменения сильнее всего затрагивают засорённые участки. Индекс CI rededge также указывает на большие изменения на засорённых удобренных делянках.

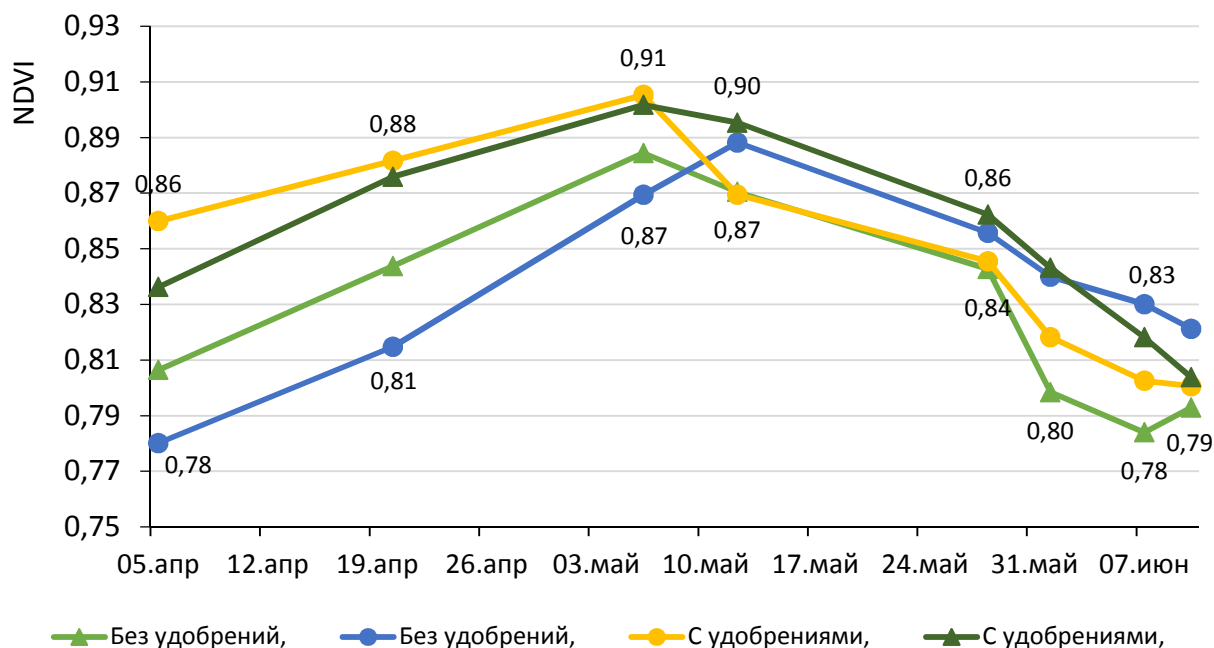
В случае с NDVI ситуация иная (рис. 4). Наибольшие различия между вариантами прослеживаются на более ранних этапах вегетации в фазу кущения - трубкования.



**Рисунок 3** – График динамики изменения индекса CI rededge у посевов с разным уровнем минерального питания и защиты растений, 2021 г.

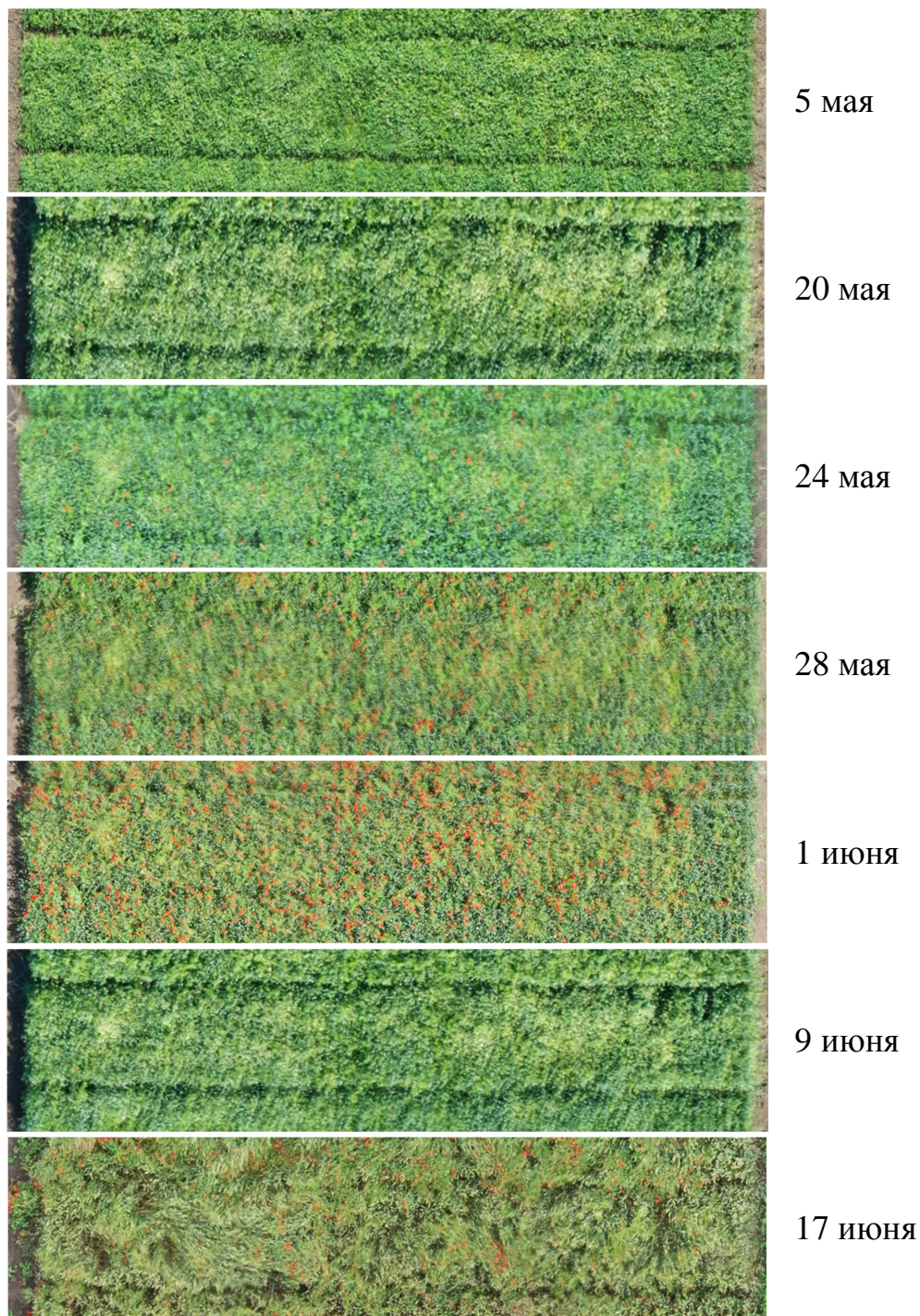
В этот период происходит нарастание вегетативной массы растений. Скорость закрытия почвы растениями в основном зависит от количества доступных элементов минерального питания, поэтому на удобренных участках NDVI выше. На делянках без удобрений сорная растительность, прикрывая почву в междурядьях, вносит дополнительный вклад в величину NDVI. На более позднем этапе вегетации, когда растения достигли своих максимальных размеров, NDVI менее информативен.





**Рисунок 4** – График динамики изменения индекса NDVI у посевов с разным уровнем минерального питания и защиты растений, 2021 г.

По графикам вегетационных индексов видно, что кривая изменения ВИ со временем имеет сложную форму с несколькими максимумами. В первую очередь колебания индексов обусловлены уровнем освещённости в период аэрофотосъёмки, но свой вклад в величину ВИ могут вносить и сорные растения. На рисунке 5 видно, что в период исследования на засорённых посевах наблюдалось цветение двух видов сорных растений: ясколки и мака-самосейки. Соответственно в такой период большое количество цветов растений изменяет величину растительных индексов, порождая колебания на графиках динамики изменения ВИ.



**Рисунок 5** – Изменение внешнего вида контрольной делянки (без внесения удобрений и гербицидных обработок) в период исследования, 2021 г.

Таким образом исследования подтвердили, что мультиспектральная съёмка посевов с больших высот, позволяет выявлять области посевов, засорённые большим количеством сорняков. Наиболее эффективными

индексами при этом являлись EVI2, CVI и CI rededge. Несмотря на это, использование мультиспектральной съёмки с дальнейшим расчётом усреднённых стандартных ВИ не представляется эффективным подходом, так как:

- сорняки, имеют отличный от основной культуры цвет и в зависимости от вида могут как занижать, так и завышать значения ВИ;
- необходимо учитывать фазу цветения растений, так как появление большого количества цветов сорных растений резко меняет цвет посевов;
- само культурное растение может изменять ВИ, в зависимости от почвенно-климатических факторов, сопутствующих его развитию.

Таким образом, чтобы правильно обнаруживать дистанционно по вегетационным индексам массовое появления в посевах сорняков, необходимо учитывать видовые особенности сорных растений и биологию их развития. Также важно понимать роль сопутствующих факторов, определяющих вид самой культуры в посевах, например, доступность элементов питания в почве. На данный момент времени корректное использование мультиспектральной съёмки для оценки распространения сорняков возможно только для оценки площади поражения посевов на полях после предварительного наземного обследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края в рамках научного проекта №19-416-233031 р\_мол\_а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Лысов А. К. Методологические подходы для решения задач по дискретному внесению пестицидов /А. К. Лысов // Plant Protection News: – 2018. № 3. С. 5–9.
2. Шпанев А. М. Отечественный и зарубежный опыт применения гербицидов в системе точного земледелия / А. М. Шпанев // Агрофизика: – 2016. (2). С. 24–34.
3. Gitelson A. A. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves / A. A.Gitelson, Y. Gritz, M. N. Merzlyak // Journal of plant physiology: – 2003. № 3 (160). С. 271–282.



4. Gitelson A. A. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS / A. A. Gitelson, Y. J. Kaufman, M. N. Merzlyak // Remote sensing of Environment: – 1996. № 3 (58). С. 289–298.
5. Hassan M. A. Time-series multispectral indices from unmanned aerial vehicle imagery reveal senescence rate in bread wheat / M. A. Hassan, M. Yang, A. Rasheed, X. Jin, X. Xia, Y. Xiao & Z. He // Remote Sensing: – 2018. № 6 (10). С. 809.
6. Jiang Z. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band / Z. Jiang, A. R. Huete, K. Didan, T. Miura // Remote sensing of Environment: – 2008. № 10 (112). С. 3833–3845.
7. Mulla D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps 5 /D. J. Mulla // biosystems engineering: – 2013. № 358 (114). С. e371.
8. Rouse J. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation /J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, J. C. Harlan, // NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt: – Md. 1974. (371).
9. Vincini M. Comparison of narrow-band and broad-band vegetation indices for canopy chlorophyll density estimation in sugar beet./M. Vincini, E. Frazzi, P. D'alessio // Wageningen Academic Publishers: – 2007.С. 189–196.

#### References

1. Ly`sov A. K. Metodologicheskie podxody` dlya resheniya zadach po diskretnomu vneseniyu pesticidov /A. K. Ly`sov // Plant Protection News: – 2018. № 3. С. 5–9.
2. Shpanev A. M. Otechestvenny`j i zarubezhny`j opy`t primeneniya gerbicidov v sisteme tochnogo zemledeliya / A. M. Shpanev // Agrofizika: – 2016. (2). С. 24–34.
3. Gitelson A. A. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves / A. A. Gitelson, Y. Gritz, M. N. Merzlyak // Journal of plant physiology: – 2003. № 3 (160). С. 271–282.
4. Gitelson A. A. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS / A. A. Gitelson, Y. J. Kaufman, M. N. Merzlyak // Remote sensing of Environment: – 1996. № 3 (58). С. 289–298.
5. Hassan M. A. Time-series multispectral indices from unmanned aerial vehicle imagery reveal senescence rate in bread wheat / M. A. Hassan, M. Yang, A. Rasheed, X. Jin, X. Xia, Y. Xiao & Z. He // Remote Sensing: – 2018. № 6 (10). С. 809.
6. Jiang Z. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band / Z. Jiang, A. R. Huete, K. Didan, T. Miura // Remote sensing of Environment: – 2008. № 10 (112). С. 3833–3845.
7. Mulla D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps 5 /D. J. Mulla // biosystems engineering: – 2013. № 358 (114). С. e371.
8. Rouse J. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation /J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, J. C. Harlan, // NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt: – Md. 1974. (371).
9. Vincini M. Comparison of narrow-band and broad-band vegetation indices for canopy chlorophyll density estimation in sugar beet./M. Vincini, E. Frazzi, P. D'alessio // Wageningen Academic Publishers: – 2007.С. 189–196.