

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ОЦЕНКА ФИТОСАНИТАРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛЕЙ САМАРСКОГО ПОЛИГОНА ПО ДАННЫМ ЭШЕЛОНИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА

© 2022 г. Е. Ф. Чичкова<sup>а</sup>, \*, Д. А. Грядунов<sup>б</sup>, В. В. Зайцев<sup>а</sup>, В. Г. Каплин<sup>с</sup>, Д. А. Кочин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup>Общество с ограниченной ответственностью «ПТЕРО», Москва, Россия

<sup>с</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Пушкин, Россия

\*E-mail: efchichkova@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.12.2021 г.

В данной работе проведена оценка состояния опытных полей (с посевами культуры тритикале и находящегося под паром) методом эшелонированного мониторинга. Исследованы возможности применения спектральных индексов, рассчитанных по данным многоспектральной съемки с космического аппарата (КА) WorldView-3, и индексов по данным аэросъемки беспилотного воздушного судна (БВС). Комплексный анализ данных, полученных одновременно по трем эшелонам мониторинга (наземные спектрорадиометрические измерения и описания, многоспектральная съемка БВС, космическая съемка) в период с 05 по 07 июня 2019 г., позволил получить характеристики засоренности полей. Результаты сравнения пороговых значений индексов вегетации по данным БВС в октябре 2018 г. и в июне 2019 г. дают возможность использовать динамический подход к созданию маски для выявления засоренности полей в зависимости от фазы вегетации культурных растений, а также мест их произрастания. Проведено сравнение различных вегетационных и почвенных индексов по выявлению степени засоренности посевов культуры на опытных полях. Наилучшие результаты по выявлению сорняков на поле под посевами показал нормализованный разностный ближний инфракрасный индекс (Normalized Difference Red Edge Index) по данным БВС. Для маскирования сорняков на поле под паром эффективным является почвенный индекс и индекс с поправкой на почву, полученные по космической съемке.

**Ключевые слова:** многоспектральная съемка, эшелонированный мониторинг, спутниковые данные, идентификация, сорные растения, индексы вегетации, почвенный индекс, аэросъемка, беспилотное воздушное судно

**DOI:** 10.31857/S0205961422050062

## ВВЕДЕНИЕ

Пространственная неоднородность почв, неравномерность развития и состояния растений, засоренность посевов сорняками, распространение вредителей, возбудителей болезней послужило основой для широкого внедрения в практику возделывания сельскохозяйственных культур технологий точного земледелия. Однако существует проблема в идентификации неоднородностей участков полей при обработке сельскохозяйственных полей удобрениями и средствами защиты растений в рамках точного земледелия (Корнилов, Лысов, 2019).

В частном случае требуется определить участки с преобладанием сельскохозяйственных культур, либо с преобладанием сорняковых растений. Решение подобной задачи позволило бы сократить количество подкормки (удобрений) и средств защиты растений (гербицидов) и осуществить их диф-

ференцированное внесение на поля в различные периоды созревания культур. Такой подход способствовал бы выравниванию условий развития растений, повышению их урожайности, снижению затрат на возделывание культур и себестоимости их продукции (Шпанев, 2016).

Оценка фитосанитарного состояния полей и лесных массивов — актуальная задача аэрокосмического многоспектрального зондирования. Для мониторинга растительности помимо традиционно используемых красного и ближнего инфракрасного диапазонов спектра оказались особенно полезны данные в крайне красном диапазоне спектра для изучения стадии развития, сорта и густоты растений (Railyan, Korobov, 1993a, 1993b). Спутниковые системы WorldView-2,3 позволяют производить съемку в 8 каналах видимого и ближнего инфракрасного спектральных диапазонов, что позволяет расширить возможности распознавания и картирования растительного покрова

(Karlson et al., 2016), включая анализ текстур (Ozdemir, Karnieli, 2011). В последние годы в точном земледелии при борьбе с сорняками все большее распространение получает предварительное картирование засоренности полей на основании снимков, полученных с космических спутников и БВС, оснащенных мультиспектральными камерами (Письман и др., 2021). Аэроснимки БВС имеют высокое разрешение, репрезентативны для картирования небольших по размерам полей и использования полученных электронных карт для мониторинга состояния посевов, их засоренности, урожайности, обеспеченности питательными элементами (Зубарев и др., 2019). В Великобритании для защиты пшеницы и ячменя от злостного однолетнего преимущественно озимого злакового сорняка *Alopecurus myosuroides* широко используется картирование засоренности им посевов с помощью БВС на основе 18 спектральных индексов и применение против него гербицидов на основе технологий точного земледелия (Sua et al., 2022).

С целью разработки методики получения масок сорняков на опытно-демонстрационном стационаре Самарского государственного аграрного университета (далее — полигоне) в 2018 и 2019 гг. были проведены поисковые работы специалистами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, компании «ПТЕРО» и Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений.

Методом эшелонированного мониторинга в данной работе получены данные нескольких уровней измерений и наблюдений характеристик растительного покрова на полигоне в период 02–04 октября 2018 г. и 05–07 июня 2019 г. Одновременно использовались данные высокого пространственного разрешения с КА WorldView-3 и БВС, оснащенного мультиспектральной камерой MicaSense RedEdge 3, наземные измерения и наблюдения.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ И МЕТОД МОНИТОРИНГА

В качестве объектов мониторинга выбраны два опытных поля: поле, засаженное озимой культурой тритикале (*Triticum secale*) осенью 2018 г. (объект 1 на рис. 1), и паровое поле после сбора урожая кукурузы (объект 2 на рис. 1). Исходная площадь покрытия космической съемкой на местности (рис. 1) составляет 25 км<sup>2</sup>. По данным КА WorldView-3, полученным 07 июня 2019 г., заметна разница полей по характеристикам нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI. На поле с тритикале на отдельных участках присутствуют микрогруппировки сорных растений, подтвержденные наземным обследованием, но по значениям NDVI они не различимы. На па-

ровом поле нет культуры, группировки сорняков больше по размерам и выражены более четко в поле индекса вегетации NDVI значениями более 0.35 (рис. 1).

Предлагаемый для оценки фитосанитарного состояния полей метод эшелонированного мониторинга состоит из нескольких этапов обработки и анализа данных. На первом этапе производится сбор данных от различных систем дистанционно-го и наземного базирования.

Следующий этап — обработка данных. Для наземных наблюдений она заключается в камеральной обработке полученных полевых измерений и наблюдений.

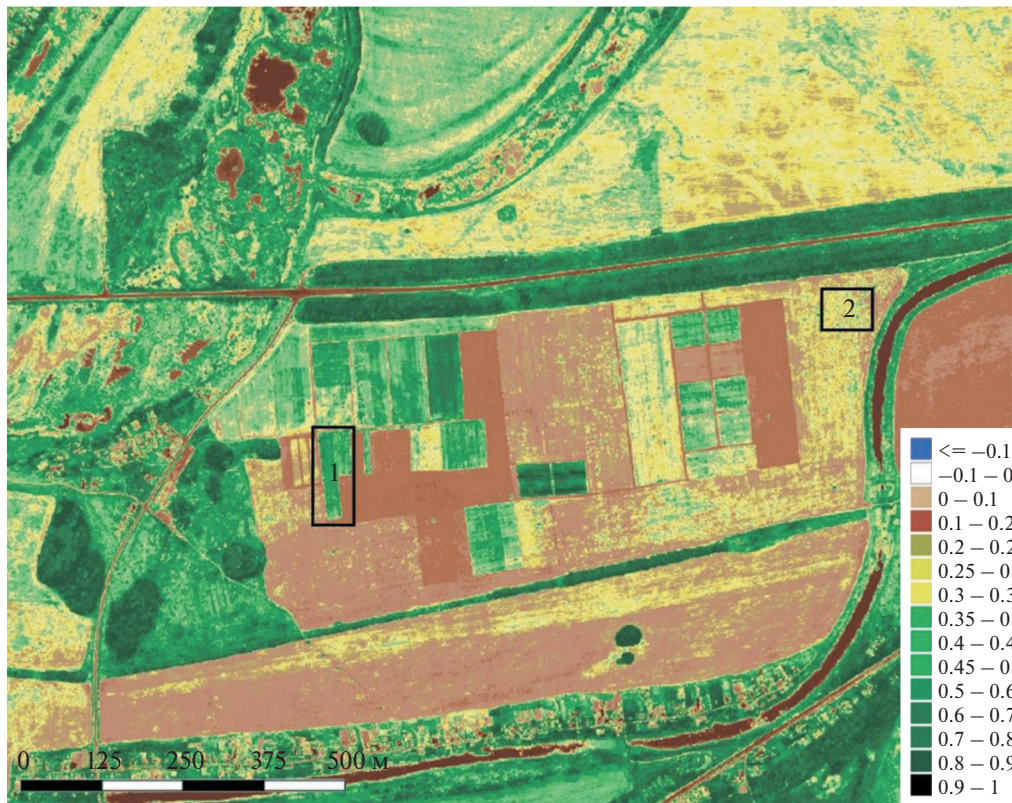
Данные ДЗЗ подвергаются предварительной и тематической обработке. Предварительная обработка данных включает в себя радиометрическую и геометрическую коррекцию трансформирование и приведение к картографической проекции. Тематическая обработка изображений позволяет получить характеристики (в данном случае рассчитать набор вегетационных индексов) на основе которых возможно идентифицировать заданные типы поверхностей.

На следующем этапе мониторинга проводится анализ полученных результатов в соответствии с данными наземных наблюдений и выбор вегетационных индексов. С учетом произведенных на каждом эшелоне измерений и наблюдений, а также анализа индексов мультиспектральной съемки рассчитывается маска сорняков. При построении маски сорняков используется пороговая методика.

На заключительном этапе оцениваются результаты проведенного мониторинга с возможными рекомендациями по усовершенствованию метода идентификации сорняков участков полей.

**Полевые обследования.** Выездные работы на опытных полях проводились в периоды 02–04 октября 2018 г., 05–07 июня и 16–17 октября 2019 г. Обследования сорняковых участков поля проводились с описанием следующих параметров: размер пятна (м), вид растения, проективное покрытие (%), численность (экз./м<sup>2</sup>). В итоге на опытном поле тритикале были выявлены 14 микрогруппировок, включавших 11 видов сорных растений, представленных в табл. 1. Следует отметить, что на долю микрогруппировок с доминированием смолевки карликовой и мари белой приходилось 65% выявленных группировок.

Для проведения полевых измерений в рамках данной работы использовался полевой спектро-радиометр Spectral Evolution PSR-1100 производства США. PSR-1100 представляет собой дисперсионную систему персонального информационного устройства, работающего в диапазоне 320–1100 нм с матричным детектором в 512 элементов, с номинальным спектральным разрешением — 3.2 нм, с полем зрения объектива — 4°. Спектрорадио-



**Рис. 1.** Территория съемки КА WorldView-3 07.06.2019. Опытные поля полигона (NDVI): 1 – поле тритикале; 2 – паровое поле.

метрические измерения приведены к значениям спектральной энергетической яркости объектов в единицах  $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}$ .

В работе (Каплин и др., 2020) подробно описаны полевые обследования опытного поля с озимой культурой в октябре 2019 г., а также представлены спектральные линии доминирующих сорняков и растения тритикале, полученные по данным измерений полевым спектрорадиометром PSR-1100 05–06 июня 2019 г. (наземный эше-

лон мониторинга). Пространственный захват точки измерения прибором PSR-1100 в зависимости от размеров листовой площади растений составлял от 0.015 до 0.03 м, при высоте съемки от 0, 20 до 0.50 м, соответственно. Измерения спектральной яркости культуры и доминирующих видов сорных растений проводились на обоих опытных полях с целью получить спектральные образы этих растений в качестве базовых образцов для распознавания растений по данным аэрокосмического зондирования. В итоге собрана

**Таблица 1.** Сорные растения по данным учета на опытном поле 05–07 июня 2019 г.

| № | Наименование группы                            | Вид сорного растения                                                                                                                  |
|---|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Корнеотпрысковые многолетние травы             | Осот полевой ( <i>Sonchus arvensis</i> ), латук татарский ( <i>Lactuca tatarica</i> ), вьюнок полевой ( <i>Convolvulus arvensis</i> ) |
| 2 | Травянистые двулетники или многолетники        | Смолевка карликовая ( <i>Silene nana</i> )                                                                                            |
| 3 | Травянистые однолетники, реже двулетники       | Незабудка полевая ( <i>Myosotis arvensis</i> )                                                                                        |
| 4 | Поздние яровые однолетники                     | Марь белая ( <i>Chenopodium album</i> ), щирица жминдовидная ( <i>Amaranthus blitoides</i> )                                          |
| 5 | Ранние яровые однолетники                      | Горец вьюнковый ( <i>Fallopia convolvulus</i> )                                                                                       |
| 6 | Ранние яровые, озимые или зимующие однолетники | Ромашка непахучая ( <i>Tripleurospermum inodorum</i> ), ярутка полевая ( <i>Thlaspi arvense</i> ), резюшка ( <i>Arabidopsis</i> sp.)  |

**Таблица 2.** Характеристики каналов съемки мультиспектральной камеры MicaSense RedEdge 3

| № | Наименование канала  | Центральное значение | Полоса пропускания | Обозначение канала |
|---|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | Синий                | 475 нм               | 20 нм              | Blue               |
| 2 | Зеленый              | 560 нм               | 20 нм              | Green              |
| 3 | Красный              | 668 нм               | 10 нм              | Red                |
| 4 | Красный крайний      | 717 нм               | 10 нм              | RE                 |
| 5 | Ближний инфракрасный | 840 нм               | 40 нм              | NIR                |

библиотека спектральных образов полей Самарского полигона для 18 видов растений за все периоды произведенных измерений спектрорадиометром PSR-1100 в том числе для 11 видов сорняков. В таблицах библиотеки, созданных на основе полевых описаний, содержится краткое описание растений, типов поверхностей, номер спектральных измерений, время и дата проведения съемок.

**Дистанционное зондирование.** Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для проведения исследований включали в себя результаты съемки заданных полей БВС и KA WorldView-3.

Для съемки с БВС (2-й эшелон мониторинга) использовалась профессиональная мультиспектральная камера MicaSense RedEdge 3. Данное устройство снимает в 5 независимых спектральных каналах в диапазоне 470–860 нм (табл. 2). Камера была установлена на гексакоптер, собранный на основе рамы DJI F550 с автопилотом SmartAP MAX. Съемка проводилась в октябре 2018 г. на высоте 25 и 100 м, в июне 2019 г. – 40 м.

Для корректировки результатов съемки использовались данные датчика падающего света и снимки калибровочной панели, идущих в комплекте с мультиспектральной камерой MicaSense RedEdge 3. Радиометрическая калибровка камеры MicaSense позволяет перейти от яркости пикселей изображения к абсолютным значениям спектральной яркости, выраженной единицами измерения Вт/(м<sup>2</sup> ср мкм).

Фотограмметрическая обработка данных мультиспектральной аэросъемки выполнялась в программном обеспечении Agisoft PhotoScan Professional Edition. Пространственное разрешение исходных снимков в центральной части кадра для съемки с высоты 25 м составило 0.017 м/пиксель, для 40 м – 0.027 м/пиксель, для 100 м – 0.068 м/пиксель. Пространственное разрешение ортофотопланов, построенных по данным мультиспектральной съемки и выгруженных для дальнейших расчетов индексов, для съемки с высоты 25 м составило 0.02 м/пиксель, для 40 м – 0.03 м/пиксель, для 100 м – 0.07 м/пиксель.

В настоящее время наилучшими возможностями из спутниковых систем для решения задач точного земледелия, проведения оценки засоренности полей, выявления вредителей и болезней

сельскохозяйственных культур, а значит, и прогнозирования урожайности, обладает KA WorldView-3, оснащенный сенсором VNIR. Параметры восьмиканальной съемки с пространственным разрешением 1.24 м в надире представлены в табл. 3. Панхроматическое изображение возможно получить с пространственным разрешением 0.31 м. Для проведения эшелонированного мониторинга была использована съемка KA WorldView-3, произведенная 07 июня 2019 г. при безоблачной погоде. Уровень обработки снимков – Standard Ortho-Ready, включающий радиометрическую и геометрическую коррекцию, коррекцию искажений датчика и трансформацию к картографической проекции. Спутниковые данные представляют собой значения спектральной яркости на верхней границе атмосферы для каждого пикселя изображения. Атмосферная коррекция снимков не проводилась. Формат данных – GeoTIFF (UTM WGS-84).

По полученным данным KA WorldView-3 были рассчитаны характеристики различных вегетационных и почвенных индексов в соответствии с обозначениями табл. 3 по следующим формулам:

–  $NDVI = (b7 - b5)/(b7 + b5)$  – нормализованный разностный вегетационный индекс, показатель количества фотосинтетически активной биомассы (рис. 2, а). Оригинальная формула индекса (Rouse, 1973) была в дальнейшем трансформирована в различные варианты нормализованных разностных индексов;

–  $FCI = (b7 - b6)/(b7 + b6)$  – индекс лесов и урожаев (Forest and Crop Index). FCI аналогичен индексу NDRE (Normalized Difference Red Edge Index), использующему информацию канала крайнего красного диапазона спектра (Gitelson and Merzlyak, 1997), который оптимально подходит для наблюдения и анализа состояния растительного покрова по оценке содержания хлорофилла, протеина и азота (Hunt et al., 2011) (рис. 2, б);

–  $SIPi = (b7 - b2)/(b7 - b5)$  – структурный индекс интенсивности пигментов (Structure Insensitive Pigment Index) используется для мониторинга здоровья растительности, обнаружения их стрессового состояния, производства сельскохозяйственных культур и анализа доходности (Penuelas et al., 1995);



**Таблица 3.** Характеристики каналов съемки КА WorldView-3 в мультиспектральном видимом и ближнем инфракрасном диапазонах

| № п/п | Наименование канала | Спектральный диапазон (мкм) | Центральное значение | Обозначение   |
|-------|---------------------|-----------------------------|----------------------|---------------|
| 1     | Фиолетовый          | 0.40–0.45                   | 0.425                | b1 – Coastal  |
| 2     | Синий               | 0.45–0.51                   | 0.480                | b2 – Blue     |
| 3     | Зеленый             | 0.51–0.58                   | 0.545                | b3 – Green    |
| 4     | Желтый              | 0.585–0.625                 | 0.605                | b4 – Yellow   |
| 5     | Красный             | 0.63–0.69                   | 0.660                | b5 – Red      |
| 6     | Крайний красный     | 0.705–0.745                 | 0.725                | b6 – Red Edge |
| 7     | Ближний ИК-1        | 0.77–0.895                  | 0.833                | b7 – Nir–1    |
| 8     | Ближний ИК-2        | 0.86–1.04                   | 0.950                | b8 – Nir–2    |

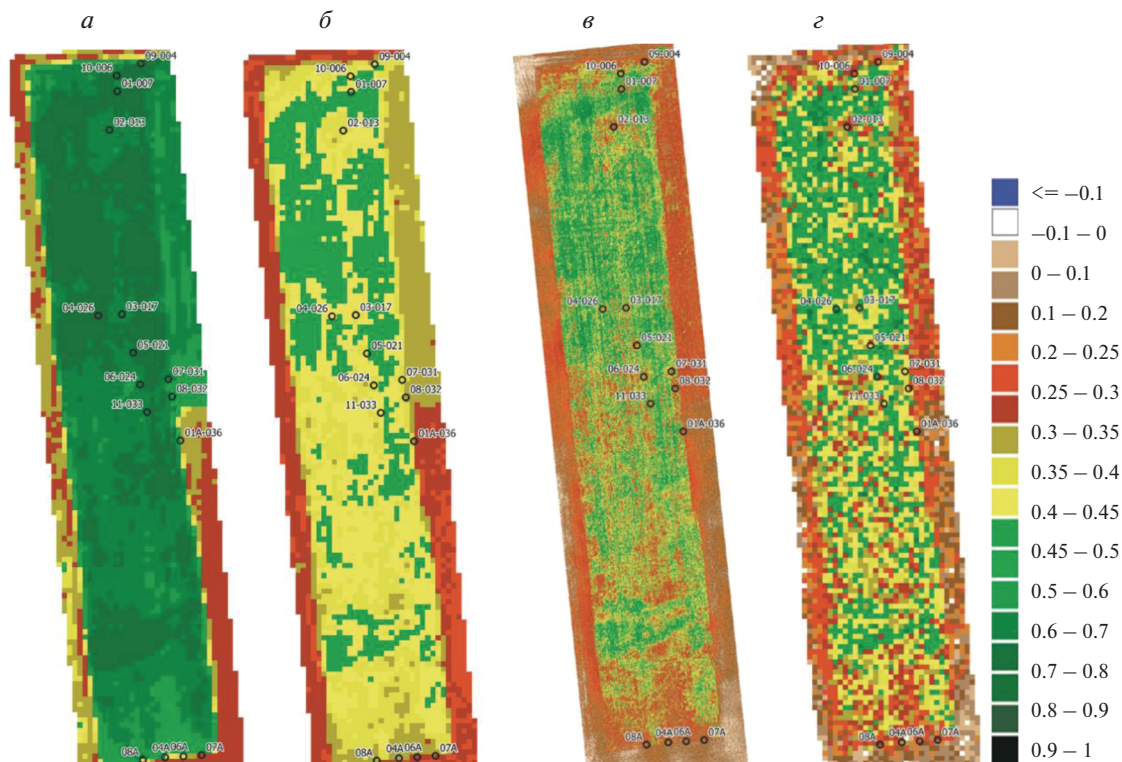
–  $NDSI = (b3 - b4)/(b3 + b4)$  – нормализованный разностный почвенный индекс (Normalized Difference Soil Index). Наличие уникального желтого канала  $b4$  в съемочной аппаратуре КА WorldView-2,3 позволяет идентифицировать области, в которых почва открыта, ничем не заслонена. Индекс не имеет широкого применения (рис. 7, б);

–  $SAVI = (b7 - b5)/(b7 + b5 + L)(1 + L)$ , где  $L = [0; 1]$ ,  $L = 0$  для наибольшего индекса облиственности,  $L = 1$  для наименьшего, оптимальное значение  $L = 0.5$  – вегетационный индекс с поправкой

на почву (Soil-Adjusted Vegetation Index), минимизирующий влияние почвы с помощью коэффициента коррекции (Huete, 1988);

–  $OSAVI = (b7 - b5)/(b7 + b5 + L)$ , где  $L = 0.16$  – оптимизированный вегетационный индекс с поправкой на почву (Revised Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index), учитывающий влияние почвы при не сомкнутости кроны растительности (Rondeaux et al., 1996).

В результате произведенной съемки с БВС камерой MicaSense RedEdge 3 были рассчитаны ха-

**Рис. 2.** Вегетационные индексы на опытном поле с тритикале по данным: а – NDVI КА WorldView-3, 07.06.2019; б – FCI КА WorldView-3, 07.06.2019; в – NDRE БВС, 05.06.2019; з – передискретизированный NDRE БВС, 05.06.2019.

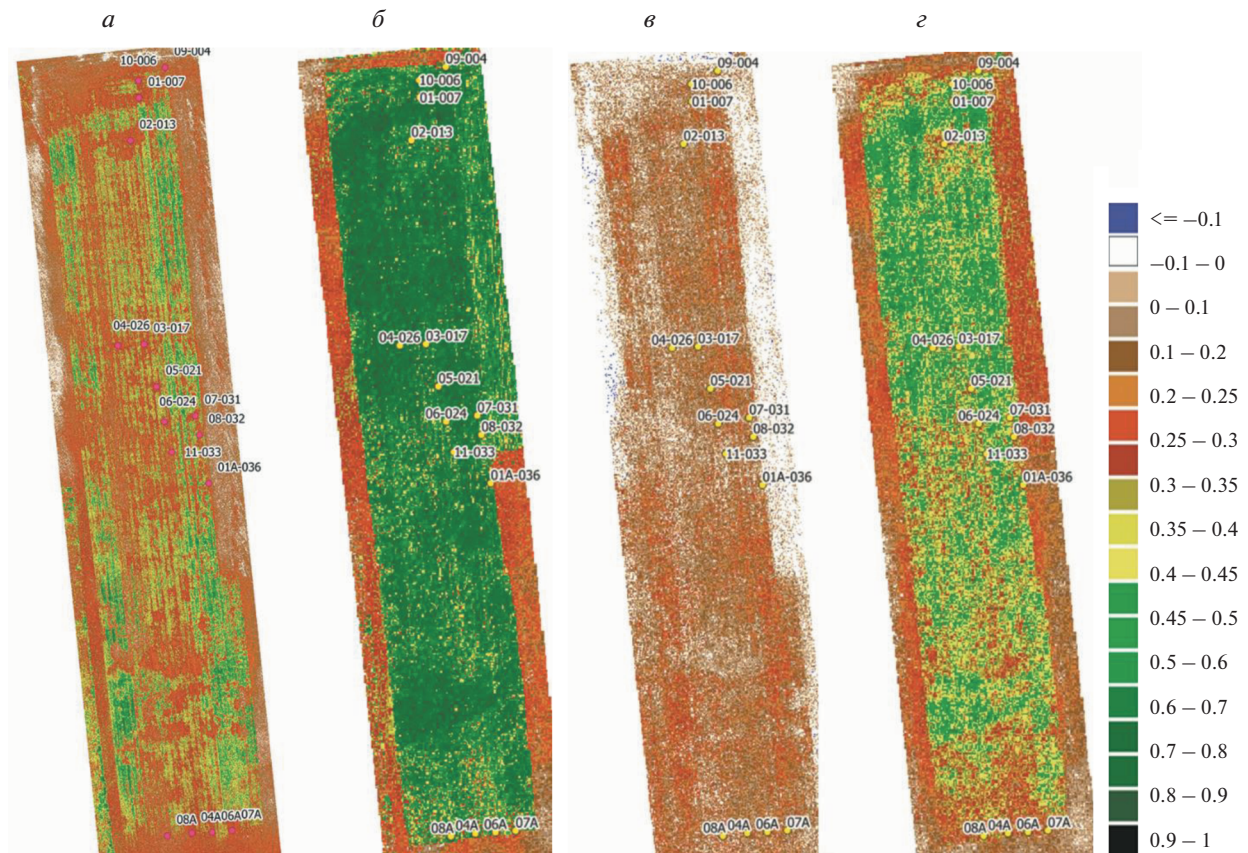


Рис. 3. Динамика роста культуры тритикале по характеристикам съемки БВС: а – NDVI, 03.10. 2018; б – NDVI, 05.06. 2019; в – NDRE, 03.10. 2018; з – NDRE, 05.06.2019.

рактические в соответствии с обозначениями таблицы 2:

–  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$  – нормализованный разностный вегетационный индекс (рис. 3, а, 3, б);

–  $NDRE = (NIR - RE) / (NIR + RE)$  – нормализованный разностный Red Edge индекс, аналогичный индексу FCI по используемым каналам и функционалу. (рис. 3, в, 3, з).

Нормализация данных индексов производится с целью уменьшения влияния атмосферы и для облегчения сравнения наборов данных различных измерений.

#### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ, А ТАКЖЕ НАЛИЧИЯ СОРНЫХ РАСТЕНИЙ НА ЗАДАННЫХ ПОЛЯХ.

**Поле с посевом тритикале.** В табл. 4 представлены данные наблюдений и измерений, проведенных методом эшелонированного мониторинга на поле тритикале в период 2018–2019 годов. Точки измерений выбраны в местах густого произраста-

ния сорняков. Оценка проективного покрытия (отношение проекций побегов и листьев вида к общей площади участка) производилось в процентах для наблюдений только за период 05–07.06. 2019 г. Нанесенные разметки станций наземных наблюдений представлены на рис. 2, 3 для опытного поля с культурой тритикале.

Наиболее показательным по решению задач распознавания с/х культур и сорняковых растений по данным БВС считается индекс вегетации NDRE (Boiarskii, Hasegawa, 2019), что и было подтверждено результатом визуального анализа пространственного распределения каждого индекса в оригинальном масштабе съемок.

Сравнение построенных изображений всего набора вегетационных индексов (FCI, NDVI, SAVI, SIPI), рассчитанных по данным KA WorldView-3 для поля тритикале за 07 июня 2019, показало, что для идентификации сорняков наиболее перспективным является индекс FCI. При анализе индексов учитывались уровень детализация сорняковых зон при сопоставлении с данными наземных описаний. Также FCI имеет схожие характеристики спектральных диапазонов, в которых производится расчет индекса NDRE БВС. Индекс

**Таблица 4.** Значения индексов вегетации в точках экспедиционных наблюдений на поле с культурой тритикале

| № точки | БВС       |           |           |           |              | КА WorldView-3, 2019 год |      |      |      | Проективное покрытие (%) |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------------------|------|------|------|--------------------------|
|         | NDVI 2018 | NDRE 2018 | NDVI 2019 | NDRE 2019 | NDRE 2019 II | FCI                      | NDVI | SAVI | SIPI |                          |
| 01-007  | 0.15      | 0.08      | 0.32      | 0.07      | 0.24         | 0.40                     | 0.68 | 1.00 | 0.59 | 95                       |
| 10-006  | 0.06      | 0.00      | 0.44      | 0.26      | 0.12         | 0.33                     | 0.60 | 0.90 | 0.51 | 45                       |
| 03-017  | 0.13      | 0.04      | 0.42      | 0.18      | 0.44         | 0.27                     | 0.50 | 0.76 | 0.40 | 38                       |
| 02-013  | 0.19      | 0.03      | 0.37      | 0.07      | 0.21         | 0.29                     | 0.57 | 0.85 | 0.48 | 97                       |
| 06-024  | 0.17      | 0.11      | 0.50      | 0.26      | 0.35         | 0.26                     | 0.54 | 0.80 | 0.44 | 70                       |
| 05-021  | 0.15      | 0.04      | 0.50      | 0.23      | 0.26         | 0.29                     | 0.60 | 0.91 | 0.52 | 79                       |
| 07-031  | 0.16      | -0.02     | 0.31      | 0.10      | 0.29         | 0.27                     | 0.51 | 0.77 | 0.42 | 41                       |
| 04-026  | 0.11      | 0.01      | 0.41      | 0.24      | 0.36         | 0.33                     | 0.61 | 0.91 | 0.51 | 96                       |
| 11-033  | 0.16      | 0.00      | 0.54      | 0.33      | 0.33         | 0.31                     | 0.56 | 0.84 | 0.47 | 30–80                    |
| 08-032  | 0.11      | 0.00      | 0.35      | 0.06      | 0.28         | 0.25                     | 0.47 | 0.71 | 0.39 | 38                       |
| 07A     | 0.13      | 0.01      | 0.28      | 0.16      | 0.19         | 0.15                     | 0.20 | 0.29 | 0.10 | 58                       |
| 01A-036 | 0.11      | 0.01      | 0.32      | 0.12      | 0.15         | 0.25                     | 0.41 | 0.61 | 0.32 | 40                       |
| 04A     | 0.14      | 0.07      | 0.29      | 0.18      | 0.08         | 0.21                     | 0.42 | 0.63 | 0.33 | 32                       |
| 06A     | 0.11      | 0.01      | 0.24      | 0.10      | 0.19         | 0.20                     | 0.28 | 0.42 | 0.19 | 30–70                    |
| 09-004  | 0.12      | 0.02      | 0.26      | 0.10      | 0.13         | 0.30                     | 0.59 | 0.88 | 0.50 | 28                       |
| 08A     | 0.10      | 0.03      | 0.27      | 0.17      | 0.15         | 0.21                     | 0.33 | 0.49 | 0.24 | 25                       |

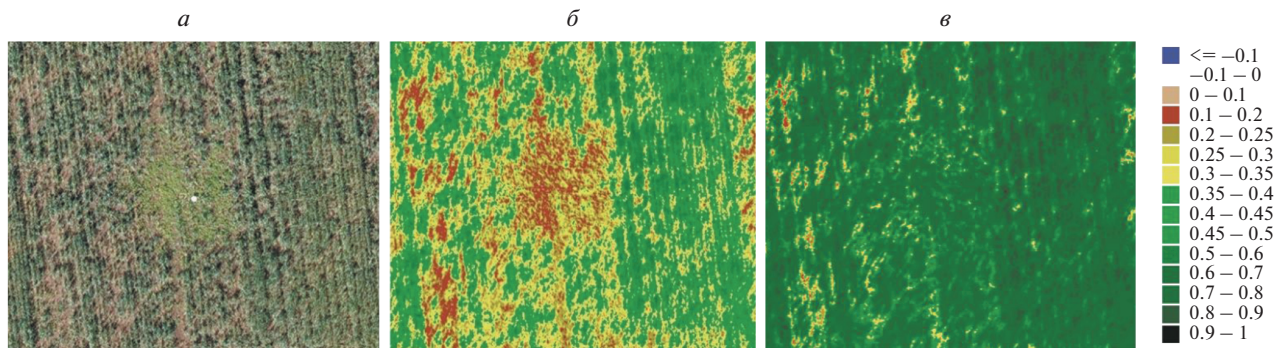
SIPI по всем точкам обследования сорняков повторяет значения NDVI с диапазоном значений 0.1. Индексы NDVI, SAVI и SIPI имеют одинаковые тенденции изменений значений для точек табл. 4. Функционально для решения заданной задачи эти индексы не отличаются от NDVI, который, в свою очередь имеет слабоградиентное поле в диапазоне значений 0.4–0.6 для всей растительности (тритикале – сорняки) и не может использоваться для пороговой идентификации сорняковых зон. Следует отметить, что на поле № 1 существуют участки с сорняками (точки 10-006, 05-021, 04-026 и 09-004), которые для каждого индекса КА WorldView-3 имеют примерно одинаковые значения в разницей в диапазоне 0.04.

Для упрощения сравнения однотипных по используемым каналам многоспектральной съемки индексов была проведена процедура передискретизации. Для индекса NDRE БВС пространственное разрешение пикселей (0.03 м) было приведено к разрешению FCI КА WorldView-3 (2 м). Пример передискретизации для индекса NDRE 2019 приведен на рис. 2, в–г). В столбце “NDRE 2019 II” табл. 4 приведены значения индекса NDRE II для всех станций наземных наблюдений. Разница в значениях индексов FCI и NDRE II для девяти точек из 17 сократилась до диапазона 0.04. В 3 точках значения исходного NDRE превысили NDRE II, что подтверждает мозаичность внутри самого участка сорняков. Был проведен корреляционный анализ численных значений индексов FCI и NDRE. При общем количестве выборки из 4751 пар значений коэффициент

корреляции составил 0.85883. Доверительный интервал коэффициента корреляции определяется диапазоном значений 0.85879–0.85888 при вероятности 95%. Значения полученных статистических характеристик подтверждают значимую связь между рядами двух индексов. Таким образом, использование результатов передискретизации доказывает сходство индексов FCI, NDRE 2019, полученных по съемкам с разницей в два дня при одинаковых погодных условиях.

Анализ полей распределения индексов FCI и NDRE (рис. 2, б, 2, в) в оригинальных масштабах показал, что различия пространственного разрешения съемочной аппаратуры КА и БВС обуславливают генерализованное изображение по спутниковой съемке и детализированное по БВС. Индекс NDRE в точках наземных наблюдений сорняков имеет значения 0.07–0.35, в зонах культуры тритикале – 0.30–0.60. Для идентификации сорняков на поле № 1 в этот период вегетации не удастся обозначить порог. Выявленным признаком сорняковых точек является их расположение в зонах наиболее больших градиентов индекса NDRE в диапазоне измеренных значений 0.00–0.35. Этот признак указывает, в первую очередь на неоднородность типов поверхности вблизи очага сорняков при большом проективном покрытии растений, а также внутри самого очага с захватом оголенной почвы. Для индекса FCI в зоне сорняка отмечаются значения 0.20–0.40, в зонах культуры тритикале – 0.30–0.45. То есть FCI имеет более сглаженное поле значений с большим перекрытием диапазона произрастания





**Рис. 4.** Участок опытного поля с тритикале, точка № 05-021 по данным БВС: а – RGB-изображение, б – NDRE; в – NDVI БВС.

культуры и сорняков. Порог для идентификации сорняка по значениям FCI определить нельзя.

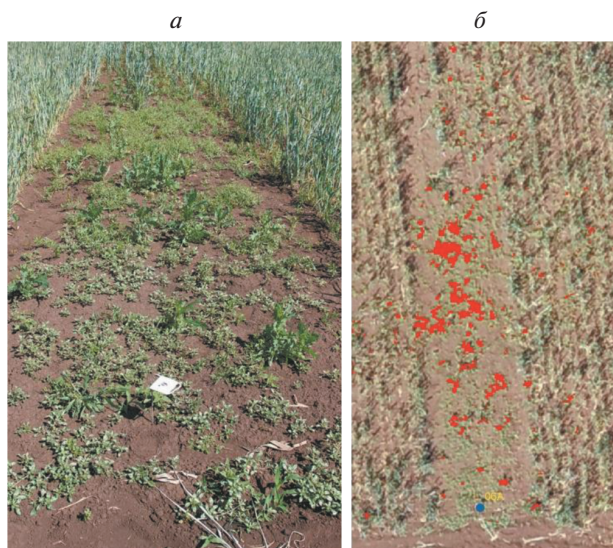
При сопоставлении восстановленных индексов вегетации по съемкам БВС 03 октября 2018 г. и 05–07 июня 2019 года удалось проследить некоторые базовые элементы построения методики распознавания сорняков. Всходы озимых полей тритикале (рис. 3, а, 3, в) весьма неравномерны и выражены четкими линиями посадок. В это время растение тритикале опережает сорные растения по всхожести, по высоте растений и ширине листа. Это показали наземные наблюдения опытного поля. Почвенный вспаханный слой обозначен значениями NDVI от 0.025 до 0.20 и значениями NDRE от  $-0.10$  до  $0.00$ . Как показывают июньские индексы (рис. 3, б, 3, г, табл. 4), высокие значения индексов вегетации (NDVI –  $0.60$ ; NDRE –  $0.45$ ) присущи именно этим зонам оголенной почвы в октябре. То есть сорняки занимают свободные от посева пространства поля. Отслеживание изменений в значениях индексов NDRE и NDVI на различных стадиях созревания культур и развития сорняков (в данном случае, на стадиях всхода озимых и колошения культуры тритикале) повышает достоверность идентификации сорняковых растений на полях по данным ДЗЗ, а его результаты дают основание для использования динамического подхода к созданию маски засоренности полей. Важным аспектом при анализе типов растений является наличие спектральных образов этих растений, относящихся к определенным фазам развития сельскохозяйственных культур и сорняков.

На рис. 4 представлены восстановленные характеристики опытного поля тритикале вблизи точки № 05-021 по данным БВС в крупном масштабе. Как видно из рис. 4, а, вблизи данной точки с абсолютным преобладанием по численности (до  $208 \text{ экз./м}^2$ ) и по проективному покрытию территории (до  $65\%$ ) сорняка смолевки карликовой визуально даже на синтезированном RGB изображении легко распознается сорняк. При

этом важную роль для идентификации сорняка играет текстура изображения, создаваемая именно индексом NDRE растения смолевки и просветами почвы (рис. 4, б). Поэтому в сорняковом очаге нет повышенных значений спектральной яркости, которые следовало ожидать по полученному на основе измерений спектрорадиометра PSR-1100 спектральному образу смолевки карликовой. Количественные характеристики значений индексов NDRE ( $0.23$ ) и FCI ( $0.29$ ) NDRE П ( $0.26$ ) близки (табл. 4), но не позволяют идентифицировать сорняк на поле тритикале по пороговой методике. Поэтому невозможно построение маски сорняков по вегетационным индексам на всем поле № 1. Индекс NDVI БВС (рис. 4, в), в этом случае, не позволяет распознать сорняковые зоны. По данным многоспектральной съемки БВС наилучшее распознавание сорняковых видов растительности на фоне культуры тритикале на поле происходит по индексу NDRE, в то время как индекс NDVI не дает значимых результатов.

На рис. 5 представлен участок опытного поля в районе точки наблюдений 06-А. На фотографии 5, а видно распределение сорняковых растений между рядами культуры тритикале в следующем порядке: на первом плане – щирца жминдовидная, преобладающее по высоте растение – латук татарский, на заднем плане – смолевка карликовая. На рис. 5, б показана векторная маска сорняка, рассчитанная по данным радиометра БВС на основе выбранного локального порога индекса вегетации NDRE, нанесенная на RGB-изображении.

Подобная маска, рассчитанная по оперативным данным БВС, может стать одним из показателей наличия сорняков на полях сельхозкультур в текущий момент времени и фазы развития растений. Таким образом, используя динамические пороги, возможно разработать маску сорняка для наиболее популярных типов культур и сорняков в зависимости от фазы вегетации растений, а также мест произрастания.



**Рис. 5.** Участок опытного поля тритикале, точка 06-А: *а* — фотосъемка участка, *б* — маска сорняка по данным БВС.

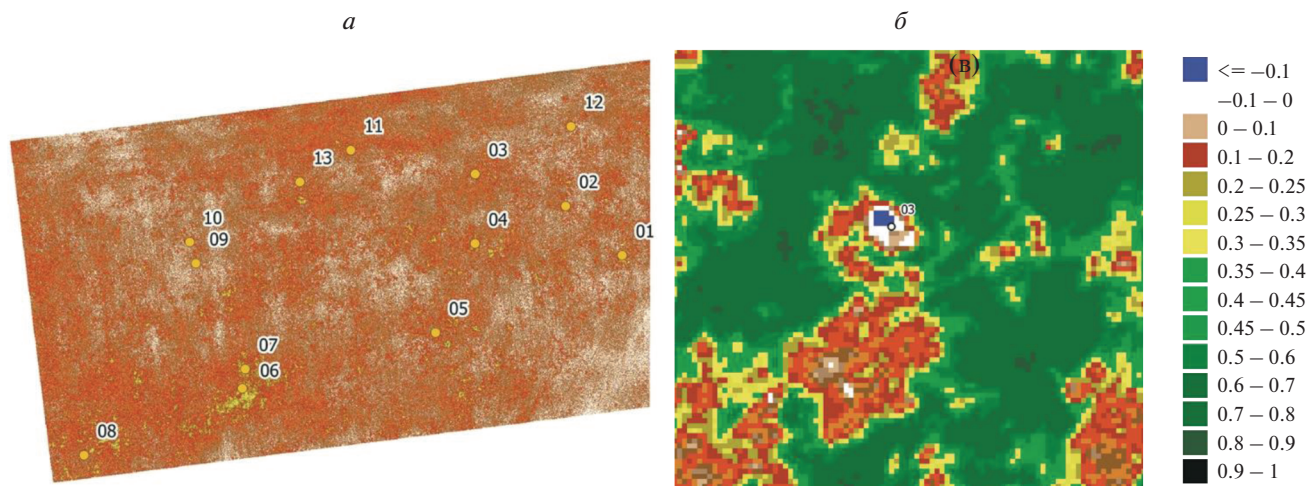
**Паровое поле.** Выделение сорняков на паровом поле зависит, в первую очередь, от надежной идентификации типа поверхности “Вспаханный почвенный покров поля” (почва). Обнаруженный растительный покров на паровом поле относится к типу сорняк. Для идентификации сорняков на паровом поле были проанализированы индексы, рассчитанные по космической съемке и съемке БВС, а именно, NDVI, FCI, NDRE, NDSI, SAVI и OSAVI.

Размещение точек наземных наблюдений на паровом поле представлено на изображении индекса NDRE БВС (6а). По данным БВС наблюдается большая зернистость на изображениях индекса

NDRE, связанная с неоднородностью почвы, большой увлажненностью и неравномерностью покрытия разреженной растительностью большого количества разных сорняков (рис. 6). Поэтому для решения задач точного земледелия важно учитывать масштаб участков обработки полей, чтобы избежать излишний уровень детализации и выбрать правильный индекс. С этой точки зрения, использование NDRE БВС для парового поля не всегда обосновано.

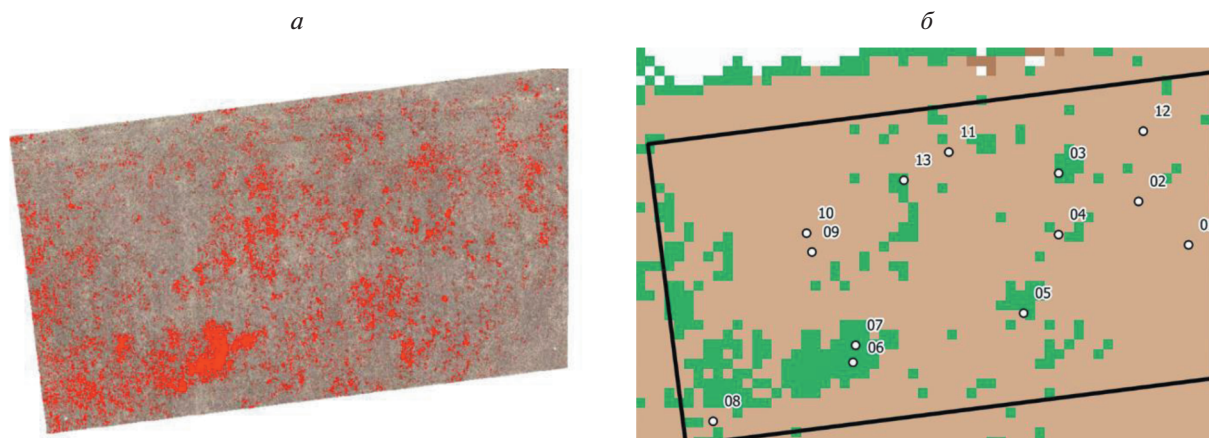
На рис. 7, *а* представлена маска сорняков парового поля, построенная по пороговым значениям индексов NDRE БВС. Растительный покров отделялся от открытых почвенных участков поля по пороговому значению NDRE равному 0.15. Значения NDRE ниже 0.15 соответствуют почвенному покрову с незначительными очагами разреженной растительности (светло-бежевый цвет), значения, лежащие в диапазоне от 0.15 до 1, соответствуют растениям, в данном случае — маске сорняка (красный цвет).

Были рассчитаны также численные значения индексов по спутниковой съемке KA WorldView-3 в каждой точке наблюдений (табл. 5). Оценка обилия для парового поля в табл. 5 произведена по шкале обилия Друде. При оценке обилия по шкале Друде приняты обозначения: сор. 3 (очень много) при среднем наименьшем расстоянии между растениями 0–0.2 м, сор. 2 (много) — 0.2–0.4 м, сор. 1 (довольно много) — 0.4–1 м, Sp. (спорадично, единично, редко) — 1–1.5 м. Точки наземных наблюдений 3, 5, 6, 7, 13 находятся в зонах типа “растительность” по значениям NDVI KA WorldView-3 больше 0.4 что подтверждается оценкой обилия “много” и “очень много”. Остальные точки наблюдений находятся в зонах разреженной растительности с преобладанием почвенного покрова. Следует отметить, что вегетационные



**Рис. 6.** Индекс NDRE (БВС) *а* — поле под паром, *б* — в окрестностях точки № 3.





**Рис. 7.** Маска сорняка парового поля по пороговым значениям *а* – индекса NDRE БВС; *б* – индекса NDSI KA WorldView-3.

индексы, рассчитанные по космической съемке, работают для территорий с разреженным растительным покровом плохо из-за большего влияния в спектре отражения компонентов почвы.

Поэтому были выбраны индексы SAVI и OSAVI, корректирующие (минимизирующие влияние почвы). Анализ данных табл. 5 позволяет сделать вывод, что для борьбы с сорняками на поле, находящемся под паром, почвенный индекс NDSI является наиболее показательным и удобным благодаря пороговому значению близкому к нулю (в данном случае, 0.025). Основная задача построения маски по данным почвенного индекса NDSI – выделение наиболее густых зарослей сорняков на паровом поле. Маска сорняков, построенная по индексу NDSI, дана на рис. 7, *б* (зеленый цвет).

Ориентируясь на результаты идентификации сорняка по данным NDRE БВС, были получены также пороговые значения масок сорняка для индексов SAVI (0.64) и OSAVI (0.50).

В табл. 6 представлены рассчитанные значения площадей как характеристики фитосанитарного состояния полей № 1 и № 2 по данным БВС и KA WorldView-3 в разные периоды съемки. В этой таблице также приведены пороговые значения для идентификации растительного и почвенного покрова. В случае опытного поля № 2 приведенные пороговые значения индексов отделяют сорняки от почвы.

Качество идентификации сорняков по индексам KA WorldView-3 оценивается по численному

**Таблица 5.** Значения индексов по данным KA WorldView-3 в точках экспедиционных наблюдений на поле под паром, июнь 2019 г.

| Номер точки | KA WorldView-3 |      |      |       |       | Оценка обилия сорняков |
|-------------|----------------|------|------|-------|-------|------------------------|
|             | NDVI           | FCI  | SAVI | OSAVI | NDSI  |                        |
| 01          | 0.35           | 0.19 | 0.52 | 0.41  | 0.00  | сор. 1–сор. 2          |
| 02          | 0.38           | 0.19 | 0.57 | 0.44  | 0.02  | сор. 1                 |
| 03          | 0.46           | 0.24 | 0.60 | 0.53  | 0.04  | сор. 2–сор. 3          |
| 04          | 0.31           | 0.18 | 0.47 | 0.36  | –0.00 | сор. 1                 |
| 05          | 0.40           | 0.22 | 0.59 | 0.46  | 0.02  | сор. 3                 |
| 06          | 0.69           | 0.29 | 1.03 | 0.80  | 0.09  | сор. 3                 |
| 07          | 0.66           | 0.28 | 0.98 | 0.76  | 0.08  | сор. 3                 |
| 08          | 0.36           | 0.20 | 0.53 | 0.41  | –0.02 | сор. 2                 |
| 09          | 0.27           | 0.19 | 0.40 | 0.31  | –0.00 | сор. 1                 |
| 10          | 0.31           | 0.20 | 0.46 | 0.35  | 0.00  | сор. 1                 |
| 11          | 0.32           | 0.19 | 0.47 | 0.36  | 0.01  | сор. 1                 |
| 12          | 0.32           | 0.20 | 0.47 | 0.37  | –0.00 | сор. 1                 |
| 13          | 0.47           | 0.25 | 0.71 | 0.55  | 0.03  | сор. 1–сор. 2          |

**Таблица 6.** Площади растительного и почвенного покрова на опытных полях в разные периоды съемки ДЗЗ

| Дата съемки | Индекс               | Пороговое значение | Наименование поля | Тип поверхности   | Площадь           |                |
|-------------|----------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
|             |                      |                    |                   |                   | (м <sup>2</sup> ) | (%)            |
| 03.10.2018  | NDRE БВС             | 0.15               | Поле тритикале №1 | Почва<br>Растения | 18551<br>397      | 97.90<br>2.10  |
| 05.06. 2019 | NDRE БВС             | 0.15               | Поле тритикале №1 | Почва<br>Растения | 6802<br>12162     | 35.87<br>64.13 |
| 05.06. 2019 | NDRE БВС             | 0.15               | Паровое поле №2   | Почва<br>Растения | 6163<br>857       | 87.79<br>12.21 |
| 07.10.2019  | SAVI<br>WorldView-3  | 0.64               | Паровое поле №2   | Почва<br>Растения | 6124<br>848       | 87.74<br>12.16 |
| 07.06. 2019 | OSAVI<br>WorldView-3 | 0.50               | Паровое поле №2   | Почва<br>Растения | 6172<br>800       | 88.53<br>11.47 |
| 07.06. 2019 | NDSI<br>WorldView-3  | 0.025              | Паровое поле №2   | Почва<br>Растения | 6028<br>944       | 86.46<br>13.54 |

показателю площадей типов поверхностей, определяемых по каждому набору данных, при сравнении с площадью маски NDRE БВС, построенной по данным сверхвысокого пространственного разрешения (0,03 м). Разница в площадях составляет 10.2% для NDSI, – 1.1% для SAVI, – 6.6% для OSAVI от 100% площади NDRE. С учетом точности съемки KA WorldView-3 (6.5 м) и большим по-пиксельным захватом территории (2 м) представленные индексы являются эффективными для идентификации сорняка на полях под паром.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено сравнение различных вегетационных и почвенных индексов по выявлению степени засоренности посевов культуры на опытных полях методом эшелонированного мониторинга. По спектральным индексам ДЗЗ и полевым описаниям сорняков получены характеристики фитосанитарного состояния полей полигона Самарской области на период проведения съемок.

В итоге проведенного исследования и анализа полученных результатов также можно сделать следующие выводы:

- для распознавания сорняков на опытном поле, засеянном сельскохозяйственными культурами, наилучшие результаты показали данные многоспектральной съемки с БВС, а именно индекс NDRE;
- для распознавания сорняковых растений по данным многоспектрального спутникового зондирования при наличии диапазонов 0.705–0.745 и 0.77–0.895 (мкм) наиболее подходит индекс FCI;
- рассчитанные по спутниковой съемке почвенный индекс NDSI и корректирующие влияние

почвы индексы SAVI и OSAVI являются эффективными для маскирования сорняков на поле под паром;

– обнаруженные изменения в значениях индексов NDRE и NDVI по данным БВС на различных стадиях созревания культур и развития сорняков (в данном случае, на стадиях всхода озимых и колошения культуры тритикале) дают возможность разработать динамический подход к созданию маски для выявления засоренности полей методом эшелонированного мониторинга;

– при разработке метода построения маски засоренности опытного поля с культурой тритикале по данным спектрального индекса NDRE БВС рекомендуется учитывать выявленный признак, а именно, расположение сорняка в зонах наиболее больших градиентов индекса NDRE БВС, а также возможность применения пороговой методики совместно с проведением текстурного анализа.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность Самарскому государственному аграрному университету за разрешение и активное содействие в проведении научных исследований на опытных полях полигона.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чащин А.Н., Заболотнова М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2019. № 2. С. 47–51. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.5>
- Каплин В.Г., Корнилов Т.В., Кочин Д.А., Федченко В.Г., Чичкова Е.Ф. Эшелонированный мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в лесостепи Самарской

области // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Вып. 674. 2020. С. 195–199.

Корнилов Т.В., Лысов А.К. Цифровые технологии дистанционного мониторинга для дискретного внесения средств защиты растений // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 98. С. 17–27.

Крючков А.А., Шнедт А.А., Шевырногов А.П. Информативность спектральных вегетационных индексов для оценки засоренности посевов сельскохозяйственных культур по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 3. С. 55–66.

<https://doi.org/10.31857/S0205961421030076>

Письман Т.И., Ерунова М.Г., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Кононова Н.А., Бобровский А.В., Шпанев А.М. Отечественный и зарубежный опыт применения гербицидов в системе точного земледелия // Агрофизика. 2016. № 2. С. 24–34.

Boiarskii B., Hasegawa H. Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll // Content. International Conference on Applied Science, Technology and Engineering / J. Mech Continua Math. Sci. Special Issue. 2019. V. 4. P. 20–29.

<https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>

Gitelson A.A., Merzlyak M.N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves // Int. J. Remote Sens. 1997. V. 18. P. 2691–2697.

Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sens. Environ. 1988. V. 25. P. 295–309.

Hunt J., Raymond E., Daughtry C., Eitel J., Long D. Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index // J. Agronomy. 2011. V. 103. 1090–1099.

Karlson M., Ostwald M., Reese, H., Bazié H.R., Tankoano B. Assessing the potential of multi-seasonal Worldview-2 imagery for mapping west african agroforestry tree species // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2016. V. 50. P. 80–88.

Ozdemir I., Karnieli A. Predicting forest structural parameters using the image texture derived from Worldview-2 multispectral imagery in a dryland forest // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2011. V. 13. P. 701–710.

Penuelas J., Baret F., Filella I. Semi-Empirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance // Photosynthetica. 1995. V. 31. P. 221–230.

Railyan V.Y., Korobov R.M. Canonical correlation relationships among spectral and phytometric variables for twenty winter wheat fields // Remote Sens. Environ. 1993. V. 43. P. 1–10.

[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90059-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90059-7)

Railyan V.Y., Korobov R.M. Red edge structure of canopy reflectance spectra of triticale // Remote Sens. Environ. 1993. V. 46. P. 173–182.

[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90093-D](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90093-D)

Rondeaux G., Steven M., Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices // Remote Sens. Environ. 1996. V. 55. P. 95–107.

Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS /Third ERTS Symposium. NASA SP-351. 1973. V. 1. P. 309–317.

Sua J., Yib D., Coombesc M., Liuc C., Zhaia X., McDonald-Maiera K., Chenc W. Spectral analysis and mapping of blackgrass weed by leveraging machine learning and UAV multispectral imagery // Comput. Electron. Agri. 2022. V. 192.

<https://doi.org/10.20392/045cd572-ecc8-4dfd-b003-c0d0c621510e>

## Assessment of the Phytosanitary Condition of the Fields of the Samara Test Site According to Tiered Monitoring Data

E. F. Chichkova<sup>1</sup>, D. A. Gryadunov<sup>2</sup>, V. V. Zaitsev<sup>1</sup>, V. G. Kaplin<sup>3</sup>, and D. A. Kochin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Limited Liability Company PTERO, Moscow, Russia

<sup>3</sup>All-Russian Research Institute of Plant Protection, Pushkin, Russia

The assessment of the phytosanitary condition of experimental fields with triticale (*Triticum secale*) and fallow field was carried out by the method of tiered monitoring. The possibilities of using spectral indices calculated from the multispectral survey data from the WorldView-3 satellite and indices from the survey of an unmanned aerial vehicle (UAV) have been investigated. A comprehensive analysis of the data obtained simultaneously for three level of monitoring (ground-based spectroradiometric measurements and descriptions, multispectral survey of UAVs, space survey) in the period from 05 to 07 June 2019, allowed us to obtain spatial characteristics of the density and distribution of weeds. The results of comparing the threshold values of vegetation indices according to UAV data in October 2018 and in June 2019 make it possible to use a dynamic approach to creating a mask to identify weed infestation of fields depending on the phase of vegetation of cultivated plants, as well as their places of growth. A comparison of various vegetation and soil indices was carried out to identify the degree of weed infestation of crops in experimental fields. The Normalized Difference Red Edge Index of the UAV showed the best results in detecting weeds in the field under crops. To mask weeds in a fallow field, the soil index and soil-adjusted index obtained from satellite imagery are effective.

**Keywords:** multispectral survey, tiered monitoring, satellite data, identification, weeds, vegetation indices, soil index, aerial survey, unmanned aerial vehicle



## REFERENCES

- Boiarskii B., Hasegawa H.* Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll // Content. International Conference on Applied Science, Technology and Engineering / J. Mech Continua Math. Sci. Special Issue. 2019. V. 4. P. 20–29. <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- Gitelson A.A., Merzlyak M.N.* Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves // Int. J. Remote Sens. 1997. V. 18. P. 2691–2697.
- Huete A.R.* A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sens. Environ. 1988. V. 25. P. 295–309.
- Hunt J., Raymond E., Daughtry C., Eitel J., Long D.* Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index // J. Agronomy. 2011. V. 103. 1090–1099.
- Kaplin V.G., Kornilov T.V., Kochin D.A., Fedchenko V.G., Chichkova E.F.* Eshelonirovannyj monitoring posevov sel'sko-hozyajstvennykh kul'tur v lesostepi Samarskoj oblasti [Tiered monitoring of agricultural crops in the forest-steppe of Samara region] // Proceedings of the A.F. Mozhaysky Military-Space Academy. V. 674. 2020. P. 195–199. (In Russian)
- Karlson M., Ostwald M., Reese H., Bazié H.R., Tankoano B.* Assessing the potential of multi-seasonal Worldview-2 imagery for mapping west african agroforestry tree species // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2016. V. 50. P. 80–88.
- Kornilov T.V., Lysov A.K.* Cifrovye tekhnologii distantsionnogo monitoringa dlya diskretnogo vneseniya sredstv zashchity rastenij [Digital technologies of remote monitoring for discrete application of plant protection agents] // Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock production. 2019. № 98. P. 17–27. (In Russian).
- Kryuchkov A.A., Shpedt A.A., Shevyrnogov A.P.* Informativnost' spektral'nykh vegetatsionnykh indeksov dlya otsenki zasorennosti posevov sel'skokhozyaystvennykh kul'tur po nazemnym i sputnikovym dannym [Informativ of Spectral Vegetation Indices for Assessing Weed Infestation of Agricultural Crops Based on Ground and Satellite Data] // Izvestiya, atmospheric and oceanic physics. 2021. № 3. P. 55–66. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961421030076>
- Ozdemir I., Karnieli A.* Predicting forest structural parameters using the image texture derived from Worldview-2 multispectral imagery in a dryland forest // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2011. V. 13. P. 701–710.
- Penuelas J., Baret F., Filella I.* Semi-Empirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance // Photosynthetica. 1995. V. 31. P. 221–230.
- Pis'man T.I., Erunova M.G., Botvich I.Yu., Emel'yanov D.V., Kononova N.A., Bobrovskiy A.V., Shpanev A.M.* Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt primeneniya gerbitsidov v sisteme tochnogo zemledeliya [Russian and foreign experience application of herbicides in the system of precision farming] // Agrophysics. 2016. № 2. P. 24–34. (In Russian)
- Railyan V.Y., Korobov R.M.* Canonical correlation relationships among spectral and phytometric variables for twenty winter wheat fields // Remote Sens. Environ. 1993. V. 43. P. 1–10. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90059-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90059-7)
- Railyan V.Y., Korobov R.M.* Red edge structure of canopy reflectance spectra of triticale // Remote Sens. Environ. 1993. V. 46. P. 173–182. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90093-D](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90093-D)
- Rondeaux G., Steven M., Baret F.* Optimization of soil-adjusted vegetation indices // Remote Sens. Environ. 1996. V. 55. P. 95–107.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS /Third ERTS Symposium. NASA SP-351. 1973. V. 1. P. 309–317.
- Sua J., Yib D., Coombesc M., Liuc C., Zhaia X., McDonald-Maiera K., Chenc W.* Spectral analysis and mapping of blackgrass weed by leveraging machine learning and UAV multispectral imagery // Comput. Electron. Agri. 2022. V. 192. <https://doi.org/10.20392/045cd572-ecc8-4dfd-b003-c0d0c621510e>.
- Zubarev Yu.N., Fomin D.S., Chashchin A.N., Zabolotnova M.V.* Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v sel'skom khozyaystve [The use of unmanned aerial vehicles in agriculture] // Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra. 2019. № 2. P. 47–51. (In Russian). <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.5>