

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАСОРЕННОСТИ ПОСАДОК КАРТОФЕЛЯ В ПЕРИОДЫ ДО И ПОСЛЕ ПОЯВЛЕНИЯ ВСХОДОВ

В. В. Смук, А. М. Шпанев

*ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»
195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14,
E-mail: smuk@agrophys.ru; shpanev@agrophys.ru*

Поступила в редакцию 04 февраля 2019 г., принята к печати 21 ноября 2019 г.

В результате исследований, проведенных в период 2012–2017 гг. на полях агроэкологического стационара Меньковского филиала ФГБНУ АФИ (Ленинградская обл., Гатчинский район), установлено, что вегетационный индекс NDVI является надежным диагностическим критерием при определении засоренности поля в период до появления всходов картофеля. Коэффициенты корреляции между численностью сорняков на учетных площадках в довсходовый период и значениями индекса NDVI в разные годы и даты учетов варьировали в пределах 0,31–0,82 и являлись статистически значимыми. Дистанционный мониторинг засоренности посадок в довсходовый период наиболее эффективен при преобладании на поле многолетних видов сорных растений, имеющих более развитую вегетативную массу, о чем свидетельствует более тесная статистическая связь между индексом NDVI и численностью многолетних сорных растений ($r = 0,51–0,77$, $p \leq 0,05$). В послевсходовый период наличие культурных растений затрудняет оценку засоренности с помощью вегетационного индекса NDVI, что обуславливает необходимость выявления различий в спектральных характеристиках сорных растений и картофеля. В рамках настоящего исследования установлено, что большинство видов сорных растений имели достоверно более низкие значения во всех каналах видимой части спектра по сравнению с растениями картофеля. Слабо- и сильнозасоренные участки посадок картофеля также имели различия в спектральных характеристиках, на которых основана дешифровка при обработке аэрофотоснимков в ГИС-программах. Засоренные участки характеризовались значительно более низкими показателями красного (0,119 против 0,132) и голубого (0,817 против 0,972) каналов. Засоренность посадок картофеля довольно четко определялась при помощи дистанционных методов в предуборочный период, когда развитие сорных растений продолжалось, а вегетация культурных растений оканчивалась. Согласно результатам спектральной оценки, наличие большого количества сорной растительности приводило к существенному снижению значений красного (с 0,476 до 0,304) и голубого (с 0,483 до 0,351) каналов. Полученные результаты могут служить основой для определения особенностей пространственного размещения сорной растительности и пространственно-дифференцированного проведения гербицидных обработок в периоды до и после появления всходов картофеля.

Ключевые слова: картофель, сорные растения, дистанционный мониторинг, спектральная характеристика, вегетационный индекс NDVI.

REMOTE MONITORING OF WEED INFESTATION BEFORE AND AFTER POTATO EMERGENCE

V. V. Smuk, A. M. Shpanev

*Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220
E-mail: smuk@agrophys.ru; shpanev@agrophys.ru*

As a result of the studies conducted during 2012–2017 in the field experiment at Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute (Leningrad Region, Gatchinsky District), it was established that the NDVI vegetation index is a reliable diagnostic criterion for weed monitoring before potato emergence. The correlation coefficients between the number of weeds and the values of the NDVI index for the studied sites in the pre-emergence period varied within 0.31–0.82 for different years and dates of measurements and were statistically significant. Remote sensing of weed infestation during the pre-emergence period is most effective when perennial weed species (with more developed vegetative mass) prevail in the field. It is supported by a closer statistical relationship between the NDVI index and the number of perennial weeds ($r = 0.51–0.77$, $p \leq 0.05$). In the post-emergence period, the presence of cultivated plants makes assessment of weed infestation using the NDVI vegetation index difficult. Separation of weeds and potato plants requires extra knowledge in the spectral characteristics of both. In the framework of this study it was found that most weed species had significantly lower values in all channels of the visible part of the spectrum compared to potato plants. The decryption of aerial photographs in GIS programs is based on the differences in spectral characteristics of sites and these spatial characteristics were different for the sites with low and high weed infestation. The sites with high weed infestation were characterized by significantly lower rates of the red (0.119 versus 0.132) and blue (0.817 versus 0.972) channels. The weed infestation of potato crops was reliably determined using remote methods in the pre-harvest period, when the development of weeds

continued, and the vegetation of cultivated plants ended. According to the results of spectral estimation, the presence of a large number of weeds led to a significant decrease in the values of the red (from 0.476 to 0.304) and blue (from 0.483 to 0.351) channels. The obtained results can be used as a basis for determining the spatial distribution of weeds and for spatially differentiated herbicidal treatments in the periods before and after potato emergence.

Key words: potato, weeds, remote sensing, spectral characteristics, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

ВВЕДЕНИЕ

Посадки картофеля обычно характеризуются сильной засоренностью, а вредоносность сорных растений в них является весьма высокой, что обусловлено длительным периодом появления всходов и низкой конкурентоспособностью культуры (Редюк и др., 2008; Борисова, 2014; Смуk, Шпанев, 2016). В связи с этим особую актуальность приобретает своевременный мониторинг засоренности посадок картофеля, для проведения которого необходимо совершенствование существующих подходов и методов в соответствии с современным уровнем развития высоких технологий и их применения в сельском хозяйстве. В последние годы в нашей стране и за рубежом активно развивается дистанционный метод оценки засоренности агроценозов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), обеспечивающих съемку с высокой разрешающей способностью. Результаты анализа обработанных снимков свидетельствуют о перспективности использования БПЛА для определения мелкомасштабной засоренности посевов яровой пшеницы, основанного на различиях в спектральных характеристиках культурных и сорных растений, на протяжении всего периода вегетации культуры (Шпанев, 2015). Беспилотные летательные аппараты успешно применяются при дистанционной оценке засоренности посевов с.-х. культур сотрудниками Казахского НИИ защиты и карантина растений (Бадаев, Болтаев, 2013). С помощью БПЛА было осуществлено картирование засоренности полей кукурузы на ранних стадиях развития сорных растений, что позволило не проводить обработку 70% площадей с низким проективным покрытием сорняками (Reña et al., 2013). Использование БПЛА при мониторинге полей подсолнечника позволило с высокой точностью (85-100%) идентифицировать участки с пороговой плотностью сорных растений, указывающей на необходимость применения гербицидов (López-Granados et al., 2016).

Дистанционное определение засоренности агроценозов основано на использовании вегетационных индексов, которые характеризуют состояние и тип произрастающей растительности. При спектральной оценке засоренности посевов сельскохозяйственных культур широкое применение получил индекс NDVI. Так, была выявлена устойчивая положительная связь между проективным покрытием сорных растений и индексом NDVI посевов озимой пшеницы и ярового ячменя, на основании чего была проведена корректировка норм расхода рабочего раствора гербицидов (Полин и др., 2010). Подобные результаты были получены при мониторинге посевов указанных культур в Северо-Западном регионе РФ, позволившем выявить устойчивую положительную

корреляционную связь индекса NDVI с проективным покрытием ($r = 0,33-0,91$) и менее устойчивую – с численностью сорных растений ($r = 0,06-0,81$). При этом со снижением засоренности сила связи между обозначенными показателями ослабевала (Фесенко и др., 2016). По величине значений вегетационного индекса NDVI определяются степень засоренности паровых полей и необходимость проведения мероприятий по борьбе с сорными растениями (Антонов, Сладких, 2009). Использование вегетационного индекса NDVI позволило определить пики вегетации амброзии полыннолистной и идентифицировать очаги с ее высокой численностью в агроценозах юга России (Архипова и др., 2014). Согласно данным зарубежных исследователей, индекс NDVI успешно применяется для обнаружения сорных растений в посевах сои, кукурузы, подсолнечника и других культур (Gerhards, Christensen, 2003; Merotto et al., 2012; Samseemoung et al., 2012).

В отечественной и зарубежной литературе отсутствуют сведения о дистанционном мониторинге засоренности посадок картофеля, что определяет актуальность настоящего исследования.

Цель исследований заключалась в дистанционном определении засоренности посадок картофеля с использованием беспилотных летательных аппаратов и ГИС-программ для дешифровки аэрофотоснимков.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования по дистанционному определению засоренности посадок картофеля проводились на агроэкологическом стационаре Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская обл., Гатчинский район) в период 2012–2017 гг. Стационар представляет собой семипольный севооборот, в котором предшественником картофеля являются многолетние травы (тимофеевка луговая + клевер красный) 2-го года пользования. В рамках исследования изучался сорт картофеля Сударыня, допущенный к возделыванию в Северо-Западном регионе с 2009 г.

Дистанционный мониторинг засоренности посадок картофеля проводился с помощью беспилотных летательных аппаратов самолетного (2012–2014 гг.) и вертолетного (2015–2017 гг.) типов. БПЛА самолетного типа, разработанный в Агрофизическом НИИ, был оснащен двумя зеркальными камерами, что позволило получать снимки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Для получения снимков в видимом диапазоне использовалась камера Olympus E-510, характеризующаяся высокой разрешающей способностью, скоростью съемки и чувствительностью. Для получения снимков в инфракрасном диапазоне применялся

модернизированный цифровой фотоаппарат Canon EOS Rebel T1i, также была произведена замена установленного на матрицу светофильтра, пропускающего свет видимого диапазона, на светофильтр, пропускающий радиацию ближнего инфракрасного диапазона. Каждый из цифровых фотоаппаратов, используемых для аэрофотосъемки полей картофеля, был подключен к пульта дистанционного управления радиоуправляемого самолета.

БПЛА вертолетного типа «Геоскан 401» способен выполнять полет в автоматическом режиме по заранее заданному маршруту на разной высоте и производить съемку с очень высоким разрешением (фотокамера Sony Nex5 (16 МП)). Оснащение БПЛА GPS-приёмником позволяет получать снимки с координатной привязкой, а наличие специального программного оборудования – автоматически сшивать серию снимков в единый ортофотоплан.

Дистанционная съемка посадок картофеля при помощи БПЛА самолетного типа производилась с высоты 500 метров, при помощи БПЛА вертолетного типа – 200 метров и разрешением 3 см пиксель⁻¹ с периодичностью один раз в 7–10 дней на протяжении всего периода вегетации культуры.

Дешифровка аэрофотоснимков осуществлялась с помощью созданных эталонов в программе ERDAS IMAGINE согласно представленным в литературе рекомендациям (Герасимов и др., 2002). При дистанционной оценке засоренности посадок картофеля также использовался нормализованный относительный индекс растительности NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), который тесно связан с индексом листовой поверхности и проективным покрытием вегетирующей растительности. Расчет данного индекса и составление NDVI карты исходных снимков осуществлялись с помощью программы QGIS.

Дистанционный мониторинг засоренности посадок картофеля сопровождался синхронными наземными учетами численности сорных растений на постоянных учетных площадках (Шпанев, Петрушин, 2017), размер которых составлял 1,4 м². Учетные площадки закладывались в количестве 36–54 штук ежегодно и располагались по всей территории поля в систематическом порядке. С помощью портативного ручного датчика GreenSeeker определялось значение вегетационного индекса NDVI для каждой выделенной учетной площадки (Фесенко и др., 2016). Наземная съемка проводилась при помощи той же

фотоаппаратуры, которая устанавливалась на БПЛА самолетного типа, что позволяло получать снимки каждой учетной площадки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

По фотоснимкам за 2017 г. проводился спектральный анализ листовой поверхности растений картофеля и преобладающих видов сорных растений в программе ERDAS IMAGINE. При анализе использовались результаты более 100 измерений растений картофеля и каждого из сорных растений. По результатам анализа определялись значения R, G, B каналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о широких перспективах использования индекса NDVI и портативного полевого прибора GreenSeeker при оценке засоренности поля в период до появления всходов картофеля. Так, была выявлена положительная связь между численностью сорных растений на постоянных учетных площадках и вегетационным индексом NDVI, величина которого позволяет определить долю растений, вегетирующих на единице площади поля, включая как культурные, так и сорные растения (табл. 1). Коэффициент корреляции между численностью сорняков на учетных площадках в довсходовый период и значением индекса составил 0,54 ($p \leq 0,05$) и 0,31 на 20-е и 26-е сутки после посадки картофеля в 2016 г., 0,67 ($p \leq 0,05$) и 0,82 ($p \leq 0,05$) – на 15-е и 26-е сутки после посадки в 2017 г. При первом учете наиболее тесная связь была установлена между индексом NDVI и плотностью произрастания в посадках картофеля многолетних злаковых сорных растений, которые преобладали над остальными видами ($r = 0,51–0,77$, $p \leq 0,05$). После массового появления однолетних двудольных сорняков вегетационный индекс стал сильно коррелировать также с их численностью ($r = 0,27$). Фактические значения индекса NDVI на участках с посадками картофеля в 2016 г. изменялись в пределах 0,19–0,28 (17 июня) и 0,26–0,46 (23 июня), в 2017 г. – 0,16–0,19 (15 июня) и 0,17–0,23 (26 июня). По мере роста и развития картофеля сила связи между засоренностью и индексом NDVI ослабевала. При учете, проведенном 10 июля, когда растения картофеля достигали высоты 5–10 см, коэффициент корреляции составил 0,17, а перед окучиванием (24 июля) – 0,37. В послевсходовый период по-прежнему наблюдалась тесная связь между засоренностью посадок пыреем ползучим (*Elitrigia repens* (L.) Nevski) и индексом NDVI ($r = 0,71$, $p \leq 0,05$).

Таблица 1. Спектральная характеристика засоренности поля в период до появления всходов картофеля

Год	Дата	Густота сорных растений, экз. м ⁻²	NDVI	Коэффициент корреляции
2016	17 июня	31–162	0,19–0,28	0,54*
	23 июня	71–201	0,26–0,46	0,31
2017	15 июня	76–188	0,16–0,19	0,67*
	26 июня	12–100	0,17–0,23	0,82*

* – достоверные коэффициенты корреляции при $P \geq 0,95$

Из данных за 2017 г. следует, что в довсходовый период слабозасоренные (до 50 экз. м⁻²) пыреем

ползучим посадки картофеля характеризовались значениями индекса 0,16–0,20, а средnezасоренные

(51–150 экз. м⁻²) – 0,21–0,25. В тот же период на сильнозасоренных (200–500 растений м⁻²) участках поля картофеля значение индекса NDVI составляло 0,27–0,38. Это позволило предположить, что для выявления пространственной неоднородности засоренности посадок картофеля с помощью индекса NDVI могут применяться не только наземные, но и дистанционные способы.

При возделывании картофеля по пласту многолетних трав выделяются два периода, приуроченные к проведению гербицидных обработок и имеющие ключевое значение для определения засоренности посадок с помощью дистанционных методов мониторинга.

Первый период наступает за 3–5 дней до появления всходов картофеля, когда регламентами предусмотрено применение глифосатсодержащих гербицидов по вегетирующим сорным растениям. С одной стороны, отсутствие культурных растений в указанный период упрощает дистанционное выявление сорной растительности, с другой стороны, значительную сложность представляет обнаружение малолетних сорных растений, которые находятся на начальных стадиях развития и имеют плохо развитую вегетативную массу. Иными словами, цифровая аппаратура не во всех случаях позволяет обнаружить их присутствие на поле. Например, в рамках настоящего эксперимента это удалось осуществить только в 2013 г., когда на одной половине поля не проводилась первая сплошная довсходовая обработка

почвенными орудиями и ко времени проведения гербицидной обработки поверхность почвы была в значительной степени покрыта сорными растениями. Дешифровка аэрофотоснимков, проведенная при помощи создания эталонов в программе ERDAS IMAGINE, позволила четко определить сильно- и слабозасоренные участки поля, имеющие соответствующие различия в спектральных характеристиках (рис. 1). Так, слабозасоренный участок характеризовался более высокими значениями во всех каналах видимой части спектра, в результате чего он отличался более насыщенным темным цветом.

В то же время дистанционный мониторинг позволяет определить засоренность посадок многолетними сорными растениями (особенно пыреем ползучим), которые на момент проведения обработки гербицидами сплошного действия имеют значительную надземную массу. Это подтверждают приведенные выше результаты наземного определения индекса NDVI на сильнозасоренных пыреем ползучим участках поля с посадками картофеля.

Посредством обработки снимков с БПЛА, сделанных за 3–5 суток до появления всходов культуры, с помощью программы ERDAS IMAGINE выявлена неравномерность пространственного распределения по полю картофеля в 2012 г. осота полевого (*Sonchus arvensis* L.) (рис. 2). Засоренные участки характеризовались значительно более низкими показателями красного и голубого каналов.

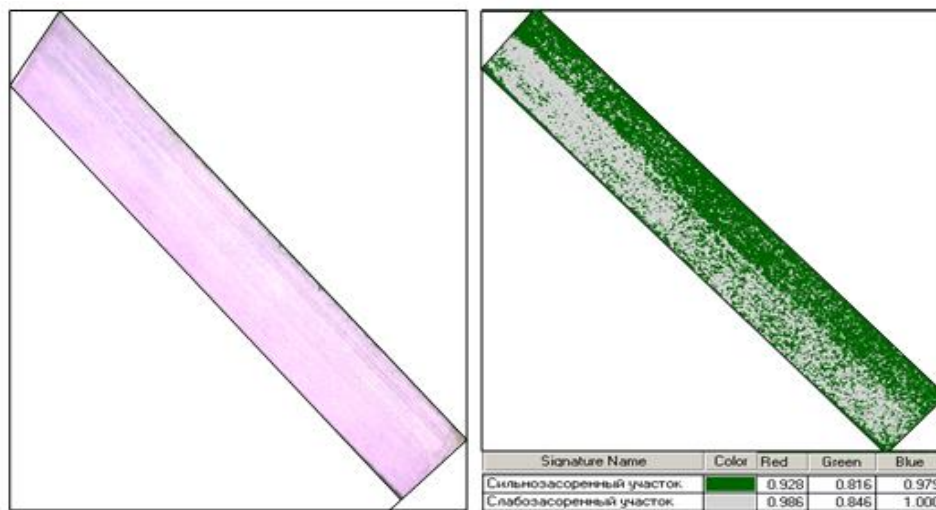


Рис. 1. Распознавание сильнозасоренных малолетними сорными растениями участков посадок картофеля в довсходовый период с помощью созданных эталонов в программе ERDAS IMAGINE (слева – исходный снимок в видимом диапазоне спектра, справа – после дешифровки)

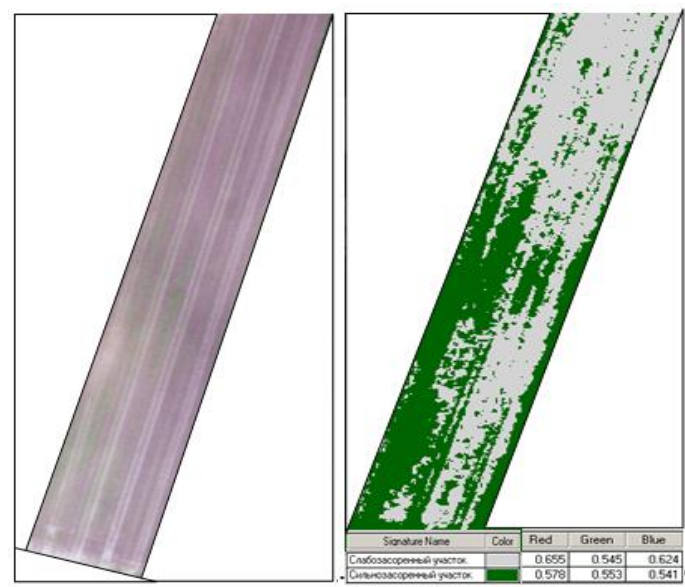


Рис. 2. Распознавание сильнозасоренных многолетними сорными растениями участков посадок картофеля в довсходовый период с помощью созданных эталонов в программе ERDAS IMAGINE (слева – исходный снимок в видимом диапазоне спектра, справа – после дешифровки)

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности дистанционного обнаружения участков с сильной засоренностью многолетними сорными растениями в довсходовый период и пространственно-дифференцированного внесения глифосатов с учетом фактического распространения сорняков по площади поля.

Второй период применения гербицидов на посадках картофеля наступает, когда культурные растения достигают высоты 10–15 см. Наличие культурных растений в данный период затрудняет определение засоренности с помощью вегетационного индекса NDVI и вызывает необходимость разработки

узкозональных индексов, основанных на спектральных особенностях сорной растительности. При этом разные виды сорных растений имеют свой спектр отражения листовой поверхности. Большинство из них достоверно характеризовались более низкими по сравнению с растениями картофеля значениями во всех каналах видимой части спектра (табл. 2). Подобные результаты были получены ранее в отношении доминантных видов сорных растений в посевах яровой пшеницы, засоренные участки которых отличались светло-зеленым цветом, визуально отмечаемым на аэрофотоснимках (Шпанев, Лекомцев, 2012).

Таблица 2. Спектральная характеристика сорных растений и картофеля при определении засоренности посадок при высоте культуры 10–15 см

Растения	Каналы		
	R	G	B
Картофель	0,601	0,773	0,511
Марь белая	0,523	0,709	0,489
Пырей ползучий	0,611	0,776	0,557
Пикульники	0,554	0,732	0,504
Фиалка полевая	0,567	0,723	0,546
Клевер красный	0,569	0,758	0,497
Пастушья сумка	0,616	0,800	0,597
Бородавник обыкновенный	0,564	0,737	0,370
<i>HCP₀₅</i>	<i>0,020</i>	<i>0,014</i>	<i>0,014</i>

Определенные результаты по определению засоренности удалось получить при анализе аэрофотоснимка, сделанного в 2014 г., когда на поле имелся участок, на котором не проводилась обработка гербицидом Титус (рис. 3). Спектральная характеристика данного участка, полученная с помощью программы QGIS, была следующей:

значения каналов R, G, B – 0,119, 0,127, 0,817; вегетационный индекс NDVI – 0,16. Часть поля, обработанная гербицидом, характеризовалась более высокими значениями красного (0,132) и голубого (0,972) каналов, но меньшим значением индекса NDVI (0,09).



Рис. 3. Аэрофотоснимок и NDVI карта посадок картофеля в послевсходовый период при высоте культурных растений 10–15 см, созданная в программе QGIS (слева – исходный снимок в видимом диапазоне спектра, справа – NDVI карта)

Засоренность посадок картофеля довольно четко определялась при помощи дистанционных методов в предуборочный период, когда развитие сорных растений продолжалось, а вегетация культурных растений оканчивалась. Согласно результатам спектральной оценки, наличие большого количества сорной растительности приводило к существенному снижению значений красного (с 0,476 до 0,304) и голубого (с 0,483 до 0,351) каналов (рис. 4). В отечественной литературе также имеются сведения об успешном применении индекса NDVI для

определения засоренности посевов зерновых культур осотом полевым в период созревания, что открывает возможность для дифференцированного проведения обработок гербицидами сплошного действия после уборки культуры (Жукова, 2011). Согласно данным зарубежного исследования, дистанционный мониторинг позволил с высокой точностью (78-90%) идентифицировать засоренные участки в посевах сои на заключительных фазах развития культуры (Koger et al., 2003).

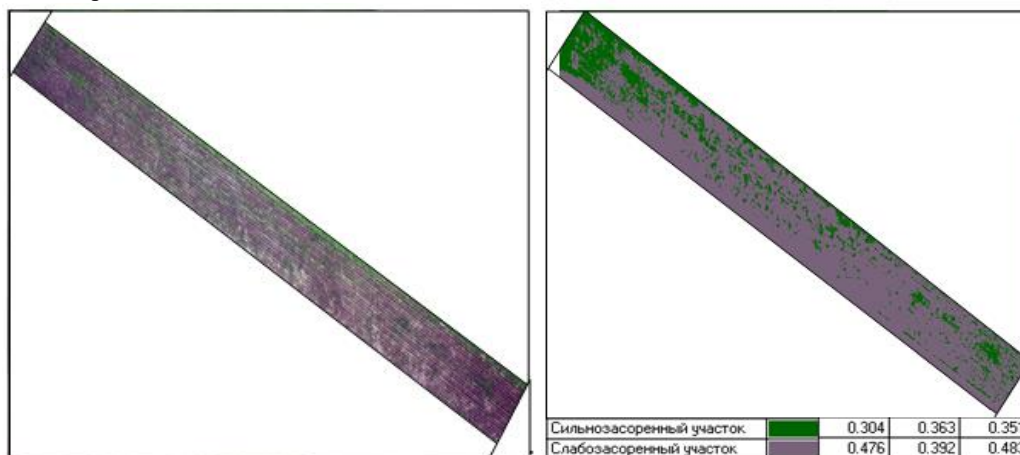


Рис. 4. Распознавание сильнозасоренных участков посадок картофеля в предуборочный период с помощью созданных эталонов в программе ERDAS IMAGINE (слева – исходный снимок в видимом диапазоне спектра, справа – после дешифровки)

ВЫВОДЫ

При сравнении значений вегетационного индекса NDVI, полученных с помощью наземных портативных приборов и беспилотных летательных аппаратов, с результатами визуальной оценки засоренности поля, выполненной традиционными методами, установлено, что данный индекс может быть использован для определения засоренности поля до появления на нем всходов картофеля. Выявлена тесная связь величины NDVI с численностью многолетних сорных растений (0,51–0,77, $p \leq 0,05$). Коэффициенты корреляции между величиной NDVI и

численностью других видов сорной растительности были ниже, а связь между показателями была статистически недостоверной.

В послевсходовый период наличие культурных растений затрудняет оценку засоренности с помощью вегетационного индекса NDVI, что обуславливает необходимость выявления различий в спектральных характеристиках сорных растений и картофеля. В рамках настоящего исследования установлено, что большинство видов сорных растений имели достоверно более низкие значения во всех каналах видимой части спектра по сравнению с растениями картофеля. Слабо- и сильнозасоренные участки

посадок картофеля также имели различия в спектральных характеристиках, на которых основана дешифровка при обработке аэрофотоснимков в ГИС-программах. Засоренные участки характеризовались значительно более низкими показателями красного (0,119 против 0,132) и голубого (0,817 против 0,972) каналов.

Полученные результаты могут служить основой для определения особенностей пространственного размещения сорной растительности и пространственно-дифференцированного проведения гербицидных обработок в периоды до и после появления всходов картофеля.

Список литературы

- Антонов В. Н., Сладких Л. А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ // Геоматика. 2009. № 4. С. 50–53.
- Архипова О. Е., Качалина Н. А., Тютюнов Ю. В., Ковалев О. В. Оценка засоренности антропогенных фитоценозов на основе данных дистанционного зондирования Земли (на примере амброзии полыннолистной) // Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 15–26.
- Бадаев Е. А., Болтаев М. Д. Дистанционный мониторинг фитосанитарного состояния сельхозугодий // Фитосанитарная оптимизация агроэкосистем. СПб., 2013. Т. 1. С. 14–17.
- Борисова Е. Е. Значение севооборота и предшественников в снижении засоренности сельскохозяйственных культур // Вестник НГИЭИ. 2014. № 6(37). С. 13–21.
- Герасимов Ю. Ю., Кильпелайнен С. А., Соколов А. П. Геоинформационные системы: Обработка и анализ растровых изображений. М., 2002. 118 с.
- Жукова Е. Ю. Оценка состояния растительности агроценозов Минусинской котловины на основе спутниковой информации // Флора и растительность Сибири и Дальнего Востока: Чтения памяти Л.М. Черепнина. Красноярск, 2011. Т. 2. 419 с.
- Полин В. Д., Березовский Е. В., Ларина Н. В. Использование оптических датчиков «GREENSEEKER» при применении гербицида // Доклады ТСХА. 2010. Вып. 282. Ч. 1. С. 310–313.
- Редюк С. И., Голубев А. С., Кириленко Е. И., Маханькова Т. А., Долженко В. И. Действие гербицидов разных классов на сорные растения в посадках картофеля // Современные средства, методы и технологии защиты растений. Новосибирск, 2008. С. 167–169.
- Смук В. В., Шпанев А. М. Засоренность посадок картофеля, размещенных по пласту многолетних трав в Ленинградской области // Вестник защиты растений. 2016. № 2(88). С. 38–42.
- Фесенко М. А., Шпанев А. М., Смук В. В. Оценка оптических характеристик посевов с помощью прибора GreenSeeker // Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления. СПб., 2016. С. 390–394.
- Шпанев А. М., Лекомцев П. В. Новые подходы к методике учета сорных растений // Защита и карантин растений. 2012. № 8. С. 38–41.
- Шпанев А. М. Перспективы определения засоренности посевов с помощью беспилотного летательного аппарата // Применение средств дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве. СПб., 2015. С. 85–88.
- Шпанев А. М., Петрушин А. Ф. Методологические основы изучения оптических характеристик фитосанитарного состояния посевов // Агрофизика. 2017. № 4. С. 48–57.
- Koger C. H., Shaw D. R., Watson C. E., Reddy K. N. Detecting Late-Season Weed Infestations in Soybean (*Glycine max*) // Weed Technology, 2003, v. 17, issue 4, pp. 696–704. DOI: 10.1614/WT02-122.
- Gerhards R., Christensen S. Real-time weed identification, decision making and path spraying in corn, sugarbeet, winter wheat and winter barley // Weed Res, 2003, v. 43. no. 6, pp. 385–392.
- López-Granados F., Torres-Sánchez J., Serrano-Pérez A., de Castro A. I., Mesas-Carrascosa F. J., Peña J. M. Early season weed mapping in sunflower using UAV technology: variability of herbicide treatment maps against weed thresholds // Precision Agriculture, 2016, v. 17, pp. 183–189. DOI: 10.1007/s11119-015-9415-8
- Merotto J. A., Bredemeier C., Vidal R. A., Goulart I. C. G. R., Bortoli E. D., Anderson N. L. Reflectance indices as a diagnostic tool for weed control performed by multipurpose equipment in precision agriculture // Planta daninha, 2012, v. 30, no. 2. DOI: 10.1590/S0100-83582012000200024.
- Peña J. M., Torres-Sánchez J., de Castro A. I., Kelly M., López-Granados F. Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images // PLoS ONE, 2013, no 8(10), DOI: 10.1371/journal.pone.0077151
- Samseemoung G., Soni P., Jayasuriya H. P. W., Salokhe V. M. Application of low altitude remote sensing (LARS) platform for monitoring crop growth and weed infestation in a soybean plantation // Precision Agriculture, 2012, v. 13, issue 6, pp. 611–627. DOI: 10.1007/s11119-012-9271-8.

References

- Antonov V. N., Sladkikh L. A. Monitoring sostoyaniya posevov i prognozirovaniye urozhaynosti yarovoy pshenitsy po dannim DZZ [Monitoring of crop conditions and yield forecasting of spring wheat based on remote sensing data of the Earth] // *Geomatika*, 2009, no. 4, pp. 50–53.
- Arkipova O. E., Kachalina N. A., Tyutyunov Yu. V., Kovalyov O. V. Otsenka zasorennosti antropogennikh fitotsenozov na osnove dannikh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (na primere ambrozii polinnolistnoy [Assessment of contamination of anthropogenic phytocenoses on the basis of data of remote Earth sensing (for example, ragweed)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, no. 6, pp. 15–26.
- Badaev E. A., Boltaev M. D. Distantsionnyy monitoring fitosanitarnogo sostoyaniya selkhozogodiy [Remote monitoring of phytosanitary condition of agricultural lands] // *Fitosanitarnaya optimizatsiya agroekosistem*. Saint-Petersburg, 2013, t. 1, pp. 14–17.
- Borisova E. E. Znachenie sevooborota i predchestvennikov v snizhenii zasorennosti selskokhozyaystvennykh kultur [The importance of crop rotation and predecessors in reducing crop infestation] // *Vestnik NGIEI*, 2014, no. 6, pp. 13–21.
- Gerasimov YU. YU., Kilpelyuynen S. A., Sokolov A. P. *Geoinformatsionnye sistemy: obrabotka i analiz rastrovikh izobrazheniy* [Geographic information systems: processing and analysis of raster images]. Moscow, 2002. 118 p.
- Zhukova E. YA. Otsenka sostoyaniya rastitelnosti agrotsenozov Minusinskoy kotlovini na osnove sputnikovoy informatsii [Assessment of vegetation of agricultural lands of the Minusinskaya basin on the basis of satellite information] // *Flora i rastitelnost Sibiri i Dalnego Vostoka*. Krasnoyarsk, 2011, t. 2. 419 p.
- Polin V. D., Berezovskiy E. V., Larina N. V. Ispolzovanie opticheskikh datchikov GREENSEEKER pri primeneni gerbitsida [The use of optical sensors «GREENSEEKER» when applying the herbicide] // *Doklady TSKHA*, 2010, no. 282, 1, pp. 310–313.
- Redyuk S. I., Golubev A. S., Kirilenko E. I., Makhankova T. A., Dolzhenko V. I. Deystvie gerbitsidov raznykh klassov na sornie rasteniya v posadkakh kartofelya [Effect of herbicides of different classes on weeds in potato plantings] // *Sovremennye sredstva, metody i tekhnologii zashchity rasteniy*. Novosibirsk, 2008, pp. 167–169.
- Smuk V. V., Shpanev A. M. Zasorennost posadok kartofelya, razmeshchennykh po plastu mnogoletnykh trav v Leningradskoy oblasti [Infestation of potato plantings placed on the layer of perennial grasses in the Leningrad region] // *Vestnik zashchity rasteniy*, 2016, no. 2, pp. 38–42.
- Fesenko M. A., Shpanev A. M., Smuk V. V. Otsenka opticheskikh kharakteristik posevov s pomoshchyu pribora GREENSEEKER [Evaluation of optical characteristics of crops using the device GREENSEEKER] // *Agroekosistemy v estestvennykh i reguliruemnykh usloviyakh: ot teoreticheskoy modeli k praktike pretsizionnogo upravleniya*. Saint-Petersburg, 2016, pp. 390–394.
- Shpanev A. M., Lekomtsev P. V. Novye podkhodi k metodiki ucheta sornikh rasteniy [New approaches to the treatment of weeds] // *Zashchita i karantin rasteniy*, 2012, no. 8, pp. 38–41.
- Shpanev A. M. Perspektivi opredeleniya zasorennosti posevov s pomoshchyu bespilotnogo letatel'nogo apparata [Prospects of contamination of crops with unmanned aerial vehicle] // *Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v selskom khozyaystve*. St. Petersburg, 2015, pp. 85–88.
- Shpanev A. M., Petrushin A. F. Metodologicheskie osnovy izucheniya opticheskikh kharakteristik fitosanitarnogo sostoyaniya posevov [Methodological bases of studying of optical characteristics of a phytosanitary condition of crops]. *Agrofizika*, 2017, no. 4, pp. 48–57.
- Koger C. H., Shaw D. R., Watson C. E., Reddy K. N. Detecting Late-Season Weed Infestations in Soybean (*Glycine max*) // *Weed Technology*, 2003, v. 17, issue 4, pp. 696–704. DOI: 10.1614/WT02-122.
- Gerhards R., Christensen S. Real-time weed identification, decision making and path spraying in corn, sugarbeet, winter wheat and winter barley // *Weed Res*, 2003, v. 43, no. 6, pp. 385–392.
- López-Granados F., Torres-Sánchez J., Serrano-Pérez A., de Castro A. I., Mesas-Carrascosa F. J., Peña J. M. Early season weed mapping in sunflower using UAV technology: variability of herbicide treatment maps against weed thresholds // *Precision Agriculture*, 2016, v. 17, pp. 183–189. DOI: 10.1007/s11119-015-9415-8
- Merotto J. A., Bredemeier C., Vidal R. A., Goulart I. C. G. R., Bortoli E. D., Anderson N. L. Reflectance indices as a diagnostic tool for weed control performed by multipurpose equipment in precision agriculture // *Planta daninha*, 2012, v. 30, no. 2. DOI: 10.1590/S0100-83582012000200024.
- Peña J. M., Torres-Sánchez J., de Castro A. I., Kelly M., López-Granados F. Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images // *PLoS ONE*, 2013, no 8(10), DOI: 10.1371/journal.pone.0077151
- Samseemoung G., Soni P., Jayasuriya H. P. W., Salokhe V. M. Application of low altitude remote sensing (LARS) platform for monitoring crop growth and weed infestation in a soybean plantation // *Precision Agriculture*, 2012, v. 13, issue 6, pp. 611–627. DOI: 10.1007/s11119-012-9271-8.

