

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ИНФОРМАТИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАСОРЕННОСТИ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2021 г. Т. И. Письман^а, М. Г. Ерунова^б, И. Ю. Ботвич^а, Д. В. Емельянов^а, Н. А. Кононова^а*,
А. В. Бобровский^с, А. А. Крючков^с, А. А. Шпедт^с, А. П. Шевырногов^а

^аИнститут биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

^бФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия

^сКрасноярский НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: nata_slyusar@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

В статье представлены результаты исследования оценки степени засоренности посевов пшеницы, полученные на основе использования оптических наземных и спутниковых спектральных данных спутников серии Dove (PlanetScore) с пространственным разрешением 3 м за 2019 г. Для дешифрирования наземных спектрометрических и космических снимков использованы вегетационные индексы: нормализованный вегетационный индекс – NDVI, относительный индекс хлорофилла – CIGreen, модифицированный почвенный вегетационный индекс – MSAVI2 и индекс устойчивости к видимой атмосфере – VARI. Показана возможность оценки степени засоренности сельскохозяйственных полей. Чем выше засоренность, тем ниже значения индексов. В течение вегетационного сезона обнаружено отличие динамики индекса VARI от динамики индексов NDVI, CIGreen и MSAVI2. Отмечена высокая корреляция между индексами NDVI, CIGreen, MSAVI2 и низкая – между индексом VARI и другими индексами. На основе карты пространственного распределения индекса CIGreen за дату 02.08.2019 г. показана возможность выявления засоренных участков сельскохозяйственных полей.

Ключевые слова: вегетационные индексы, PlanetScore, наземное спектрометрирование, геоботанические исследования, посевы пшеницы, Красноярский край

DOI: 10.31857/S0205961421030076

ВВЕДЕНИЕ

Среди задач текущего контроля состояния посевов сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) особое место занимает оценка санитарного состояния посевов, т.е. обнаружение очагов болезней, вредителей и выявление факта засоренности культуры сорняками (Михайленко, Воронков, 2016). К малоизученным факторам, влияющим на спектральную отражательную способность посевов и, соответственно, успешность детектирования их состояния по данным дистанционного зондирования, относится засоренность посевов (Thorp, Tian, 2004).

Сорные растения являются постоянным компонентом агроэкосистем. При высокой численности они снижают урожай и качество сельскохозяйственной продукции, а также затрудняют выполнение многих видов полевых работ, в том числе обработку почвы и уборку урожая. Засоренность посевов наиболее значимо проявляется при низком уровне агротехники и недостатке средств

у землевладельцев на приобретение агрохимикатов для борьбы с сорными растениями.

Характер и степень засоренности посевов, фенология сорняков на фоне фенологического развития культурных растений значительно варьирует от сезона к сезону. Это связано с особенностями метеорологических условий года, типа севооборота возделываемых культур, почвенных условий, агротехники (Petit et al., 2011; He Y. et al, 2020).

Вопросы влияния засоренности посевов на их спектральный облик до сих пор изучены недостаточно. Такие исследования ведутся, но в основном в связи с развитием подходов точного земледелия и локализации применения средств борьбы с сорной растительностью (Lamba, Brown, 2001; Martin et al., 2011; Pflanz et al., 2018). Однако в этих исследованиях не идет речь о дистанционном распознавании видов сорной растительности, так как более важное практическое значение имеет точность определения площадей ее распространения, а виды сорной растительности определя-

ют непосредственно в поле. Работы по изучению спектральной отражательной способности у разных видов сорняков и ее динамики в течение сезона вегетации до сих пор очень немногочисленны (Vrindts et al., 2002; Che'Ya et al., 2013).

Методы ДЗЗ имеют существенные преимущества перед традиционными наземными методами по возможности мгновенного обзора больших территорий, в том числе удаленных и труднодоступных, а также по регулярности съемок исследуемых объектов и территорий (Бондур, Воробьев, 2015). Уникальные возможности космических съемок в различных диапазонах электромагнитного спектра позволяют обеспечить цифровую многозональную съемку, большой потенциал заложен в возможности использования спутниковых данных для сельскохозяйственных проблем.

Однако задача использования ДЗЗ для определения очагов распространения сорных растений более сложна, чем традиционная задача определения видов сельскохозяйственных культур и их урожайности. Культивируемые растения занимают достаточно большие и однородные территории и обладают выраженными спектральными характеристиками в пределах одного вида. В отличие от них, сорняк произрастает неоднородно в пределах одного поля, и его спектральные характеристики сильно зависят как от типа основной культуры, так и от степени зараженности обследуемого участка (Архипова и др., 2014).

Большой объем информации о состоянии поверхности несет в себе отражение от нее солнечного света в различных спектральных диапазонах. В связи с этим одну из ведущих ролей в оценке состояния растительности занимают вегетационные индексы, полученные на основе данных дистанционного зондирования (Бондур, 2014; Бондур, Воробьев, 2015).

Целью данной работы является оценка степени засоренности посевов сельскохозяйственных культур на основе различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, VARI, CIGreen, MSAVI2), рассчитанных по наземным спектротометрическим и спутниковым данным PlanetScope в течение вегетационного сезона 2019.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования

Объектом исследования являются посевы сельскохозяйственных культур на территории землепользования Красноярского научно-исследовательского института сельского хозяйства (НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН) вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край).

Исследовались посевы яровой пшеницы Свирель (*Triticum vulgare*) с разной степенью засоренности за вегетационный период 2019 г. Использовались участки №№ 22 и 23 (рис. 1). На участке

№ 22 часть поля оставалась незасеянной (слева от пунктирной линии).

Поля расположены в южной части Красноярской лесостепи, в 5–7 км от г. Красноярска. Географические координаты: широта — 56°4'35"; долгота — 92°4'49". Территория землепользования — равнинная, южная, открытая, достаточно теплая часть лесостепи с выраженными остепенными участками, удобными для пашни.

Для оценки степени засоренности посевов пшеницы использованы геоботанические, наземные спектротометрические и спутниковые данные PlanetScope.

Геоботанические методы исследований

Для биологической оценки степени засоренности посевов зерновых культур используется визуальный метод учета сорняков. Он заключается в том, что исследуемое поле проходят по диагонали и через равные промежутки регистрируют сорняки всех видов. Данные наблюдений оценивают по четырехбалльной шкале:

1 балл — слабая степень засорения, сорняки встречаются единично (до 5% от числа культурных растений);

2 балла — средняя степень засорения, сорняки заметны среди культурных растений (до 25%);

3 балла — сильная степень засорения, количество сорняков близко к числу культурных растений (до 50%);

4 балла — очень сильная степень засорения, количество сорняков столько же или более культурных растений и рост последних сильно подавлен.

Количество сорняков подсчитывали на 0.1 м². Повторность — 45 точек учета. Каждая точка была привязана в системе географических координат. Одновременно со степенью засоренности посевов определены виды сорных растений (табл. 1) и проводилась наземная спектрофотометрическая съемка состояния посевов пшеницы и необработанного пара.

Наземные спектрофотометрические методы исследований

Отражательные спектральные свойства природных объектов принято выражать коэффициентом спектральной яркости (КСЯ). Наземные измерения коэффициентов спектральной яркости проводились одновременно с геоботаническими исследованиями 09.07.2019 г. на сельскохозяйственных полях в "точках" с разной степенью засоренности. Площадь "точки" составляет окружность диаметром 50 см.

Для проведения наземной спектрометрии использовали полевой спектрометрический комплекс, состоящий из полевого портативного спектрометра Spectral Evolution PSR-1100F,

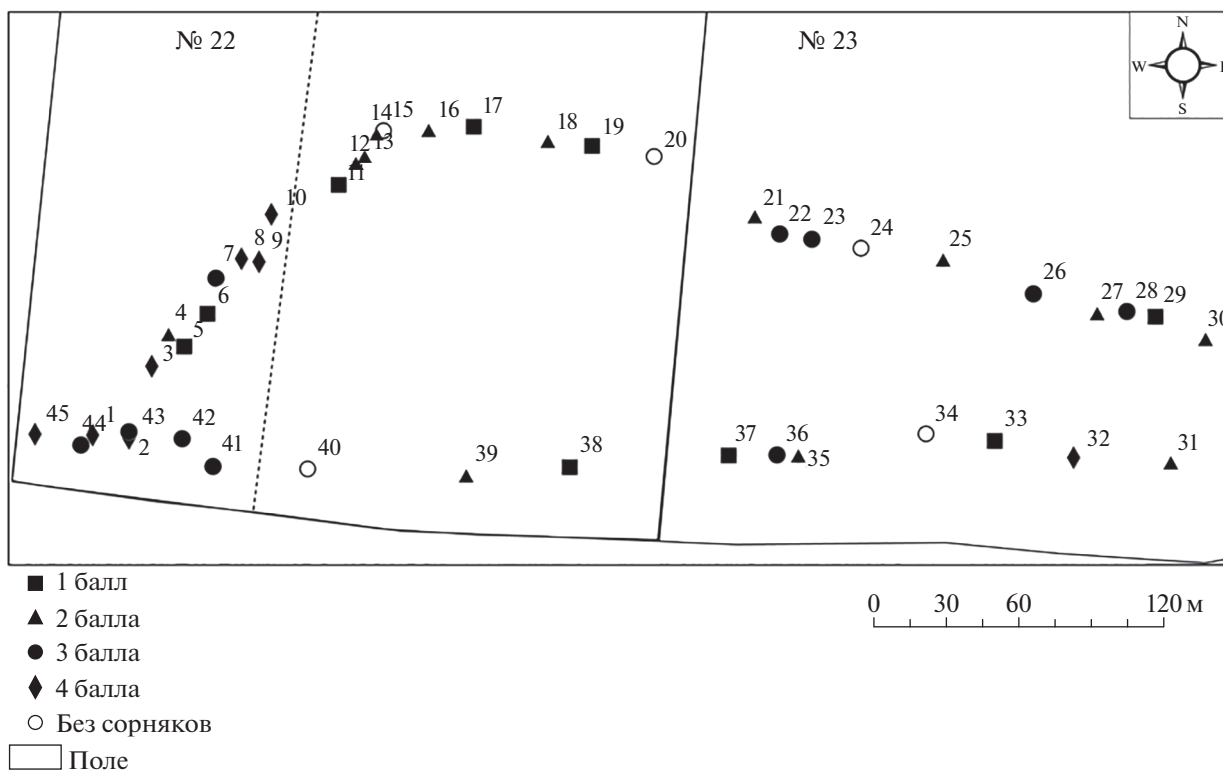


Рис. 1. Карта расположения точек с разной степенью засоренности полей, засеянных пшеницей (№№ 11–40) и не засеянных (№№ 1–10 и 41–45).

портативного компьютера PDA GETAC, калибровочного отражающего эталона (Spectral Evolution), цифрового фотоаппарата и соответствующего программного обеспечения (Шевырногов и др., 2018; Pisman et al., 2019). С помощью данного комплекса производились измерения коэффициента спектральной яркости объекта в диапазоне от 320 до 1100 нм. Полученные спектры имеют привязку к координатам местности по GPS, высоте местности, обеспечены соответствующей фотосъемкой и голосовыми заметками. Измерения КСЯ посевов пшеницы выполнялись с 11 до 15 ч местного времени, что на широте проводи-

мых работ обеспечивало достаточные условия освещения объектов (Сидько и др., 2014).

Спутниковые данные PlanetScore

Для дешифрирования сельскохозяйственных посевов с различной степенью засоренности использовались спутниковые данные PlanetScore. Крупнейшая группировка спутников компании PlanetScore предоставляет данные высокого пространственного разрешения (3 м) на ежедневной основе со спутников Dove (Planet Team, 2019). Спектральные каналы представлены четырьмя диапазонами: 455–515, 500–590, 590–670, 780–

Таблица 1. Виды сорняков, встречающиеся на полях с разной степенью засоренности

Виды сорняков	Число точек, в которых встречается сорняк
Просо сорнополевое (<i>Panicum capillare</i> L.)	15
Осот розовый (<i>Cirsium arvense</i> L.)	16
Марь белая (<i>Chenopodium album</i> L.)	5
Осот желтый (<i>Sonchus arvensis</i> L.)	9
Липучка оттопыренная (<i>Láppula myosotis</i> Moench.)	4
Конопля сорная (<i>Cannabis ruderalis</i> Janisch.)	7
Ширица запрокинутая (<i>Amaranthus retroflexus</i> L.)	4
Овсяг обыкновенный (<i>Avena fatua</i> L.)	4

Таблица 2. Формулы спектральных индексов по наземным спектрометрическим (Spectral Evolution PSR-1100F) и спутниковым (PlanetScore) данным

Вегетационный индекс	Формула расчета
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{b4 - b3}{b4 + b3}$
CIGreen (Green Chlorophyll Index)	$\frac{b4}{b2} - 1$
MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2)	$\frac{2b4 + 1 - \sqrt{(2b4 + 1)^2 - 8(b4 - b3)}}{2}$
VARI (Visible Atmospheric Resistant Index)	$\frac{b2 - b3}{b2 + b3 - b1}$

Примечание: $b1$ – $b4$ для спутниковой информации — величины спектрального отражения (СКО) соответствующих каналов (1–4) PlanetScore; для наземных измерений — усредненные значения КСЯ: $b1$ — в пределах длин волн от 455 до 515 нм, $b2$ — от 500 до 590 нм, $b3$ — от 590 до 670 нм, $b4$ — от 780 до 860 нм.

860 нм. Данные предоставляются на коммерческой основе и на некоммерческой — для исследователей с лимитом скачивания данных в 5000 км² в месяц.

По наземным спектрометрическим и спутниковым данным рассчитаны вегетационные индексы, представленные в табл. 2.

NDVI — нормализованный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index) — это индекс, показывающий наличие и состояние растительности (относительную биомассу). Этот индекс использует контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных — поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительности в инфракрасном канале (NIR) (Солпиева, Урмамбетова, 2018; Бондур, Воробьев, 2015).

CIGreen — относительный индекс хлорофилла (Green Chlorophyll Index), являющийся показателем фотосинтетической активности растительного покрова и используемый при оценке содержания хлорофилла a и b в листьях растений (Moran et al., 2000). Наибольшие значения индекса CIGreen коррелируют с наибольшим содержанием хлорофилла в листьях растений (Товстик и др., 2019). В диапазоне 1 и выше находится здоровая растительность с большим содержанием хлорофилла в листьях.

MSAVI2 — модифицированный почвенный вегетационный индекс (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), устойчивый к влиянию почвы. Значения индекса изменяются от -1 до 1 (Qi et al., 1994).

VARI — индекс устойчивости к видимой атмосфере (Visible Atmospheric Resistant Index) (Gitelson et al., 2002). VARI разработан для выделения растительности в видимой части спектра, при ослаблении влияния разницы освещения и атмосферных явлений. Он идеально подходит для RGB или цветных изображений, использует все

три цветовых канала (Солпиева, Урмамбетова, 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сорные растения или сорняки — дикорастущие растения, обитающие на землях, используемых в качестве сельскохозяйственных угодий. Вред, который наносят сорные растения, связан как со снижением урожайности, так и с ухудшением качества сельскохозяйственной продукции. Культурные и сорные растения конкурируют друг с другом за воду, свет, питательные вещества и т.д.

По результатам геоботанических исследований определены степень засоренности посевов (рис. 1) и основные виды сорняков (табл. 1). В результате исследованы участки с засоренностью 1 балл — в 9 точках, 2 балла — в 13 точках, 3 балла — в 10 точках и 4 балла — в 8 точках.

Применение результатов наземных спектрометрических исследований необходимо для повышения точности дешифрирования космических снимков (Hutto et al., 2006; Hese, Schmulius, 2009; Pflugmacher, 2011). Для оценки состояния растительности на сельскохозяйственных полях необходимо произвести обработку большого массива данных и определить оптимальный вегетационный индекс. В связи с этим для оценки засоренности сельскохозяйственных посевов в работе проведен сравнительный анализ различных вегетационных индексов: NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI.

NDVI — самый популярный и распространенный вегетационный индекс, это показатель здоровья растения, который вычисляется по тому, как растение отражает и поглощает разные световые волны. Из недостатков NDVI — при достижении определенного порога развития растения индекс теряет чувствительность. Иными словами, если растение развивается очень активно, то по NDVI нельзя отличить аномально зеленое расте-

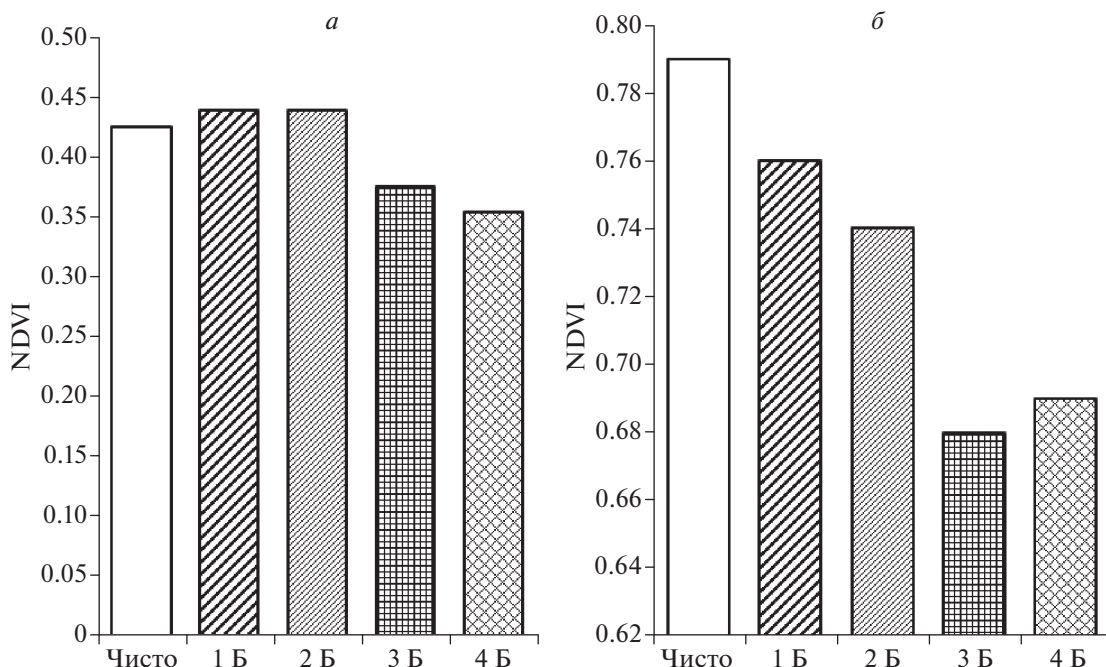


Рис. 2. Среднее значение NDVI посевов пшеницы с разной степенью засоренности по спутниковым данным (PlanetScore) (а) и по результатам наземного спектрометрирования (б), рассчитанное по данным 09.07.2019 г.

ние от “обычного” зеленого. Ну и как со всеми остальными индексами, их точность зависит от погоды: если над каким-то полем долгое время висят облака, то спутниковый снимок будет неточным (Икенов, 2019).

На рис. 2 представлены усредненные значения NDVI посевов пшеницы с различной степенью засоренности, рассчитанные по спутниковым данным – А и наземным спектрометрическим – Б. Так как наземные спектры сделаны с несколькими повторами, то усреднение NDVI посевов пшеницы с разной степенью засоренности позволяет повысить точность дешифрирования.

Данные, полученные со снимков PlanetScore (рис. 2, а) и с наземного спектрометра (рис. 2, б), показывают хорошую качественную сходимость. Усредненный NDVI для посевов пшеницы с высокой степенью засоренности ниже NDVI посевов пшеницы с низкой степенью засоренности. Однако значения NDVI по данным спектрометра в среднем почти в 2 раза выше, чем значения NDVI по снимку PlanetScore. Причиной этого, по нашему мнению, является расхождение пространственно-временных масштабов. Пространственное разрешение при наземном спектрометрировании равно окружности диаметром 50 см, при спутниковом – 3 м. При наземных измерениях исследуется ограниченное число растений на небольшом участке, в то время как спутниковые данные охватывают большой участок земли с большим количеством растений (Herrmann et al., 2013).

Снижение значений NDVI в период активной вегетации (до наступления фазы молочной спелости) свидетельствует о стрессовом состоянии посевов. Это может быть поражение посевов вследствие стихийных явлений (град, ливни, засуха, пожары), а также поражения вредителями. Примером фактора, влияющего на снижение NDVI, может быть дефицит влажности почвы и засоренность сельскохозяйственных посевов. Величина NDVI позволяет выявить проблемные зоны угнетенной растительности, давая возможность принимать решения, направленные на повышение урожайности (Шукилович и др., 2016).

Для дальнейшего анализа возможности оценки степени засоренности сельскохозяйственных посевов исследованы вегетационные индексы CIGreen, MSAVI2 и VARI, рассчитанные по спутниковым данным от 09.07.2019 г. (рис. 3).

Наряду с индексом NDVI, относительный индекс хлорофилла CIGreen также является показателем фотосинтетической активности растительного покрова (Mogan et al., 2000; Sims, Gamon, 2002). По спутниковым данным посевы пшеницы с низкой степенью засоренности и без засоренности имеют хлорофилльный индекс в диапазоне выше 1, с высокой степенью засоренности имеют хлорофилльный индекс в диапазоне ниже 1 (рис. 3, б). Наибольшие значения индекса CIGreen коррелируют с наибольшим содержанием хлорофилла в листьях растений, что говорит о “здоровье” растений (Товстик и др., 2019).

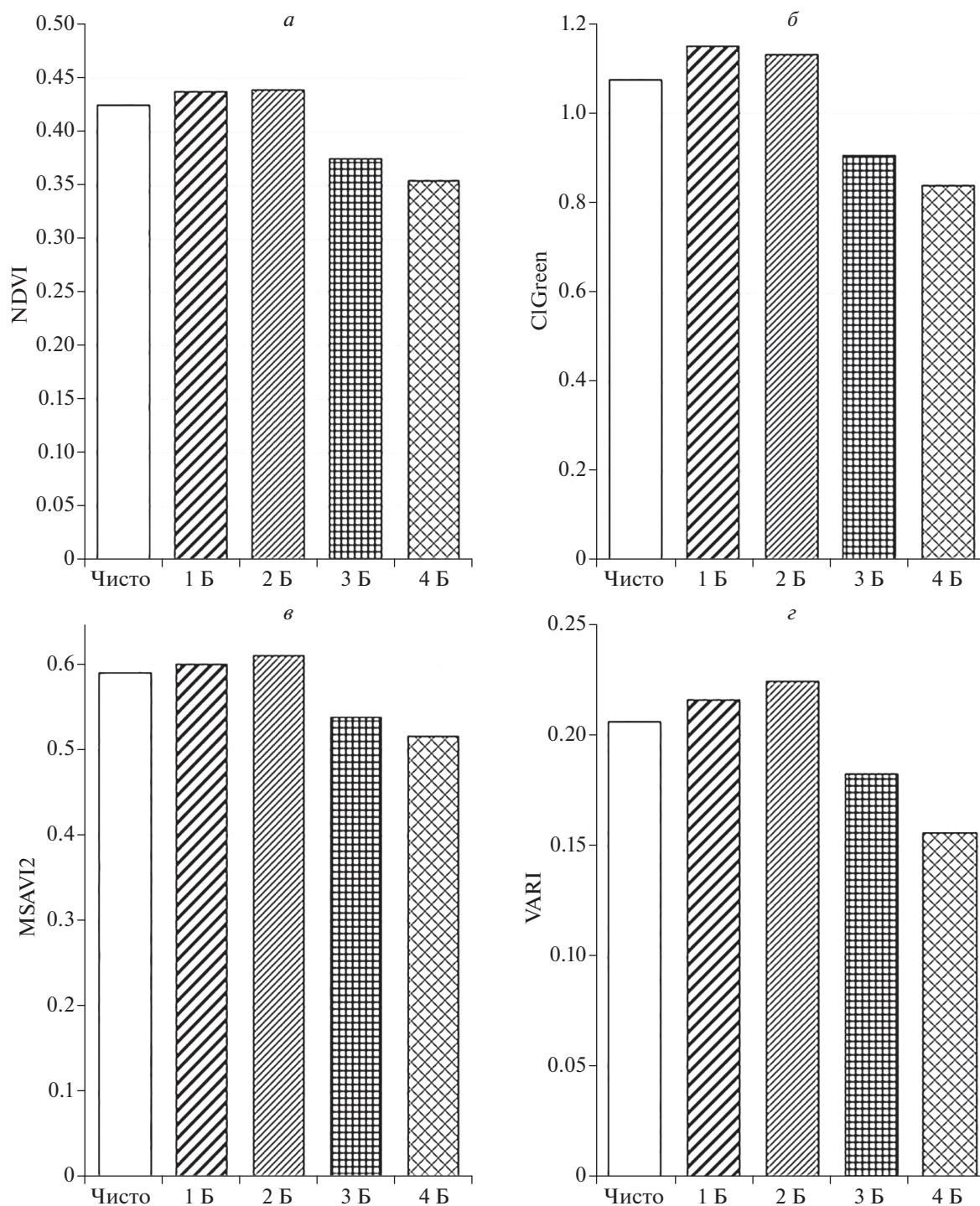


Рис. 3. Значения вегетационных индексов: NDVI (а), CIGreen (б), MSAVI2(в) и VARI (г) посевов пшеницы с разной степенью засоренности по спутниковым данным PlanetScore от 09.07.2019 г.

Почвенный индекс MSAVI2 и его преобразование являются чрезвычайно полезными инструментами для мониторинга засухи (Воронина, 2014; Гопп, 2019; Gaznayee, Al-Quraishi, 2019). Результаты показали, что наибольшее значение MSAVI2 составило 0.6 для посевов пшеницы с

низкой степенью засоренности и без засоренности (рис. 3, в). Высокое значение указывает на хорошую и здоровую растительность. Наименьшее значение MSAVI2 составило около 0.5 для посевов пшеницы с высокой степенью засоренности. Как правило, снижение значений почвенного ин-

Таблица 3. Корреляция между вегетационными индексами, рассчитанными по спутниковым данным Planet-Score (коэффициент детерминации, r^2)

Вегетационные индексы				
	NDVI	CIGreen	MSAVI2	VARI
NDVI	1	0.947	0.994	0.306
CIGreen	0.947	1	0.918	0.19
MSAVI2	0.994	0.918	1	0.355
VARI	0.306	0.19	0.355	1

декса MSAVI2 относится к уменьшению годового количества осадков, что считается жизненно важным фактором, влияющим на рост растительного покрова на исследуемой территории. В нашем случае погодные условия одинаковы для исследуемых сельскохозяйственных посевов с различной степенью засоренности. Поэтому можно говорить о влиянии степени засоренности на почвенный индекс MSAVI2.

При помощи индекса VARI можно выявить неоднородности на поле, поскольку данный индекс очень чувствителен к условиям освещения. Усредненный вегетационный индекс VARI посевов пшеницы с высокой степенью засоренности также ниже по сравнению с VARI посевов пшеницы с низкой степенью засоренности, как NDVI, CIGreen и MSAVI2 (рис. 3, з).

Таким образом, сравнительный анализ оценки влияния степени засоренности сельскохозяйственных полей на величину исследуемых индексов (NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI) по спутниковым данным за дату 09.07.2019 показал, что результаты идентичны. Выявлено качественное совпадение оценки степени засоренности посевов пшеницы по индексам NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI. Для посевов пшеницы с низкой степенью засоренности и без сорняка значения исследованных вегетационных индексов выше значений индексов посевов пшеницы с высокой степенью засоренности.

За вегетационный период все растения, как культурные, так и сорные, проходят определенные фенологические фазы развития. Происходящие при этом изменения отражаются на сезонной динамике их вегетационных индексов (Товстик и др., 2019).

Графики на рис. 4 показывают, как изменялись значения индексов NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI посевов пшеницы с различной степенью засоренности за вегетационный период 2019 г. по спутниковым данным. Анализ этих графиков позволяет сделать заключение, что имеются характерные для всех полей закономерности изменений исследуемых индексов. С 15 июня начинается стабильный рост значений индексов засеянных полей. Это соответствует процессу появления всходов и их росту, увеличению проективного покрытия

растительности. После 20 августа, с наступлением периода созревания, снижается содержание хлорофилла и, соответственно, уменьшается значение индексов.

В целом в течение вегетационного сезона обнаружено качественное сходство зависимости величин всех индексов от степени засоренности посевов пшеницы (рис. 4). Во время фазы активной вегетации растительности (июль, август) значения исследуемых вегетационных индексов для посевов пшеницы с низкой степенью засоренности (1 и 2 балла) выше значений вегетационных индексов для посевов пшеницы с высокой степенью засоренности (3 и 4 балла). Однако динамика индекса VARI отличается от динамики индексов NDVI, CIGreen и MSAVI2 (рис. 4 з). В некоторые даты величина индекса VARI находится в противофазе с величинами остальных индексов.

В результате анализа связи между вегетационными индексами NDVI, CIGreen и MSAVI2 выявлена высокая положительная корреляция ($r^2 =$ около 0.95) и низкая – между индексом VARI и индексами NDVI, CIGreen и MSAVI2 ($r^2 =$ около 0.3) (табл. 3). Это подтверждает отличие динамики индекса VARI от динамики остальных индексов в течение вегетационного сезона (рис. 4).

Индексы, устойчивые к влиянию атмосферы, такие как VARI, достигают уменьшения чувствительности к влиянию атмосферы ценой уменьшения динамического диапазона. Эти индексы используются для оценки доли растительности. В целом, они менее чувствительны к изменению растительного покрова, чем NDVI.

Если растительность невысока, они подвержены сильному влиянию почвенного слоя (Qi et al., 1994; Gitelson et al., 2003). Этим, вероятно, можно объяснить различие в динамике индекса VARI от динамики индексов NDVI, MSAVI2 и CIGreen, особенно в весенние и осенние месяцы.

На рис. 5 представлено пространственное распределение индекса CIGreen сельскохозяйственных полей с различной степенью засоренности. В августе (02.08.2019) CIGreen наилучшим образом отображает зависимость величины данного индекса от степени засоренности полей. Слева более темный прямоугольник обозначает незасеян-

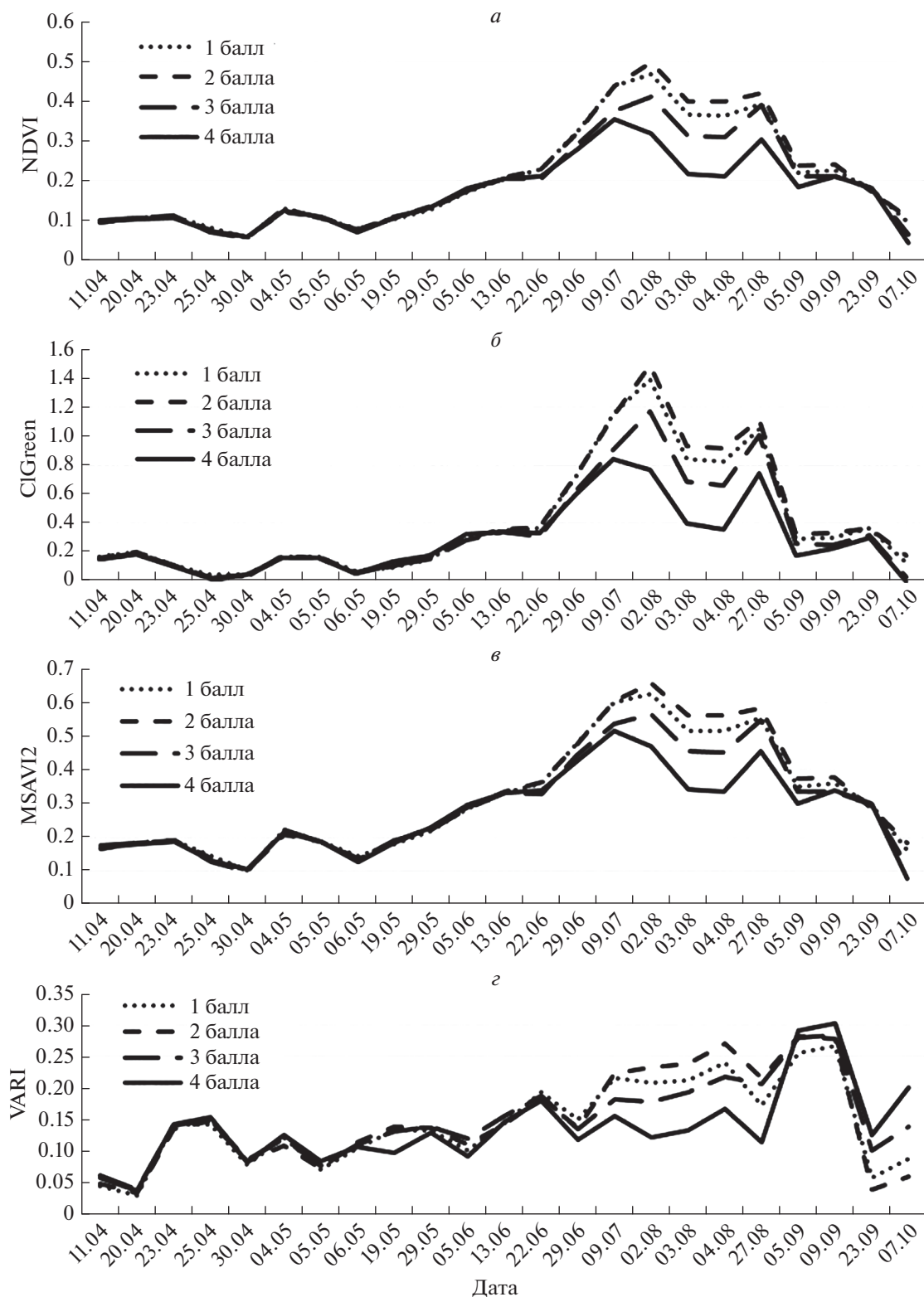
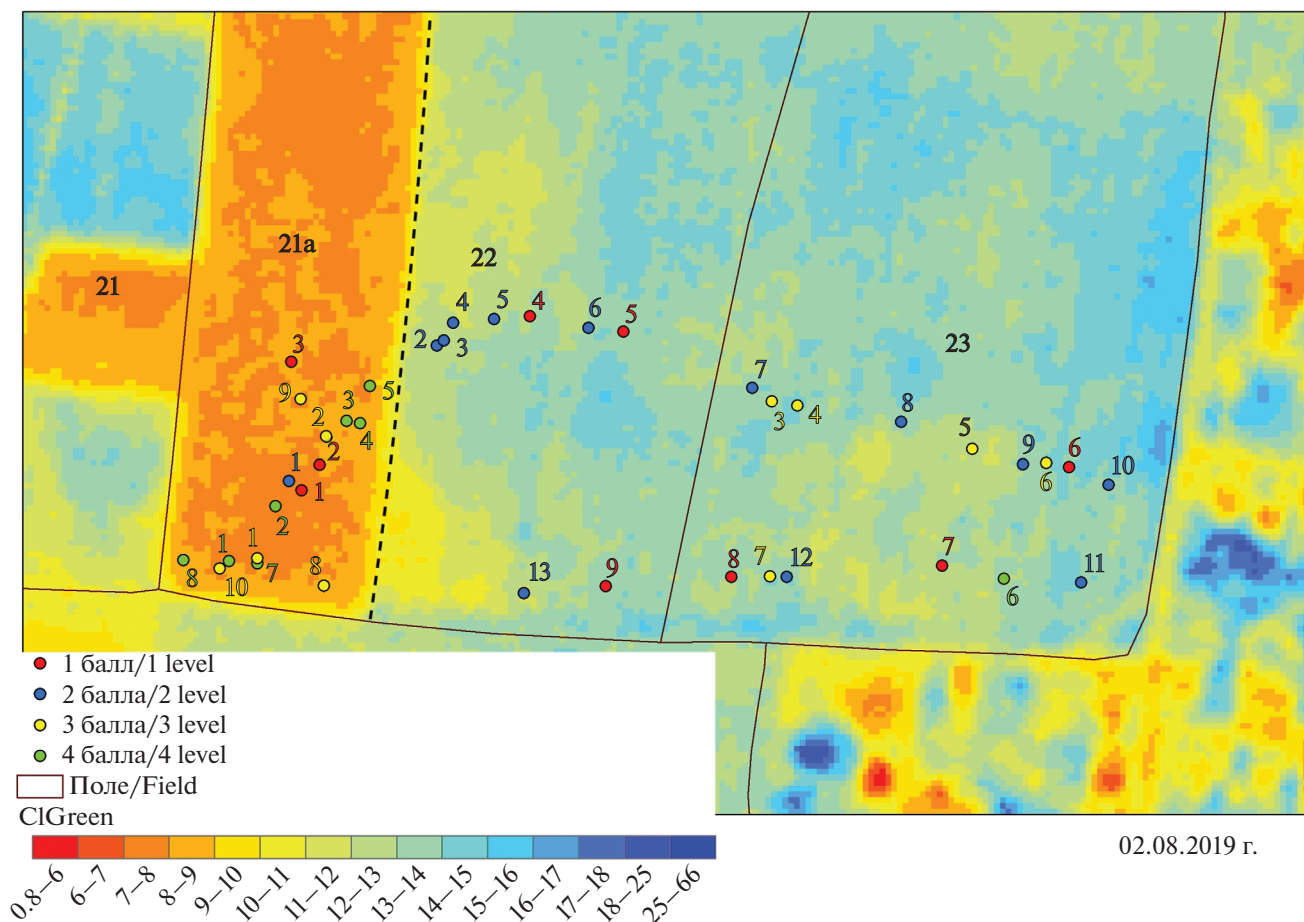


Рис. 4. Динамика вегетационных индексов NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI посевов пшеницы в зависимости от степени засоренности в течение вегетационного сезона 2019 г. по спутниковым данным PlanetScore.

ное поле с сорными растениями. В данное время вегетационного периода сорные растения находятся в стадии цветения, в результате чего в них

почти не содержится хлорофилл. С этим связано низкое значение хлорофилльного индекса на незасеянном поле. На засеянных полях в начале ав-



02.08.2019 г.

Рис. 5. Карта пространственного распределения индекса CIGreen посевов пшеницы за дату 02.08.2019 (по спутниковым данным PlanetScore). Кружками обозначены точки, в которых проводились наземные геоботанические и спектрометрические измерения.

густа (02.08.2019 г.) пшеница находится в стадии конца цветения. На данный момент в ней содержится большое количество хлорофилла и в связи с этим выявлено высокое значение индекса CIGreen посевов. Следовательно, выявлена возможность дешифрирования сельскохозяйственных полей с разной степенью засоренности по спутниковым данным PlanetScore.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оценки степени засоренности посевов сельскохозяйственных культур на основе различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI), рассчитанных по наземным спектрометрическим и спутниковым данным PlanetScore в течение вегетационного сезона 2019 г., сделаны следующие выводы.

Показана возможность распознавания засоренных участков сельскохозяйственных полей. На основе наземных спектров и спутниковых данных за дату 09.07. 2019 г. выявлено, что для чистых участков (без засорения) и для участков с

низкой степенью засоренности (1 и 2 балла) значения NDVI, полученные по спутниковым данным, лежат в пределах (0.425–0.44). Для участков с сильной степенью засоренности (3 и 4 балла) значения NDVI лежат в пределах (0.35–0.375) (рис. 2, а). Для чистых участков и для участков с низкой степенью засоренности значения NDVI, полученные по наземным спектрометрическим данным, лежат в пределах (0.74–0.79). Для участков с сильной степенью засоренности значения NDVI лежат в пределах (0.68–0.69) (рис. 2, б).

Значения вегетационных индексов (NDVI, CIGreen, MSAVI2 и VARI), полученные по спутниковым данным, для чистых участков и для участков с низкой степенью засоренности достоверно выше, чем значения данных индексов для участков с высокой степенью засоренности (рис. 3).

В течение вегетационного сезона обнаружено качественное сходство зависимости величин всех индексов от степени засоренности посевов пшеницы. С увеличением засоренности посевов ве-

личина индексов уменьшается. Однако динамика индекса VARI отличается от динамики индексов NDVI, CIGreen и MSAVI2. В некоторые даты величина индекса VARI находится в противофазе с величинами остальных индексов.

В результате анализа корреляционных связей между вегетационными индексами NDVI, CIGreen и MSAVI2 выявлена высокая положительная корреляция и низкая — между индексом VARI и другими индексами.

Построена карта пространственного распределения индекса CIGreen сельскохозяйственных полей разной степени засоренности за 02.08.2019 г. по спутниковым данным PlanetScore с пространственным разрешением 3 м. Полученная карта позволяет оценить масштабы засоренности сельскохозяйственных полей на больших территориях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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) // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 15–26.
- Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е. Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.
- Воронина П.В., Мамаш Е.А. Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 3. С. 76–102.
- Гопн Н.В., Савенков О.А., Смирнов А.В. Цифровое картографирование урожайности яровой пшеницы на основе вегетационных индексов и оценка ее изменений в зависимости от свойств антропогенно — преобразованных почв // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 125–139.
- Икенов И.А. Информационная система оценки состояния растительности на сельскохозяйственных полях // Вестн. науки. 2019. Т. 4. № 5(14). С. 485–491.
- Михайленко И.М., Воронков И.В. Методы обнаружения сорняков, болезней и вредителей растений по данным дистанционного зондирования // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 72–83.
- Сидько А.Ф., Ботвич И.Ю., Письман Т.И., Шевырнов А.П. Угловое распределение отражательных характеристик агроценозов по наземным дистанционным измерениям // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2014. № 6. С. 665–673.
- Солнцева Ж.А., Урмамбетова Т.К. Оценка состояния еловых лесов по спутниковым данным LANDSAT 8 на примере государственного национального парка “Чон-кемин” // Вестн. Кыргызского гос. ун-та строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2018. Т. 1(59). С. 36–40.
- Товстик Е.В., Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я. Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2 // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 34–40.
- Шевырнов А.П., Письман Т.И., Кононова Н.А., Ботвич И.Ю., Ларько А.А., Высоцкая Г.С. Сезонная динамика растительности залежных земель Красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.
- Шукилович А.Ю., Федотова Е.В., Маглинец Ю.А. Применение сенсора MODIS для оперативного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 7. С. 1035–1044. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-7-1035-1044>
- Che'Ya N., Gupta M., Doug G., Lisle A., Basnet B., Campbell G. Spectral discrimination of weeds using hyperspectral radiometry // Proc. 5th Asian conf. Precis. Agric. (ACPA). 25–28 June. Jeju, Korea, 2013. P. 325.
- Gaznayee H.A., Al-Quraishi A.M.F. Analysis of Agricultural Drought, Rainfall, and Crop Yield Relationships in Erbil Province, the Kurdistan Region of Iraq based on Landsat Time-Series MSAVI2 // J. Adv. Res. in Dynamical & Control Systems. 2019. V. 11, 12. P. 536–545. <https://doi.org/10.5373/JARDCS/V11SP12/20193249>.
- Gitelson A., Stark R., Grits U., Rundquist D.C. Vegetation and Soil Lines in Visible Spectral Space: A Concept and Technique for Remote Estimation of Vegetation Fraction // Int. J. Remote Sens. 2002. V. 23. P. 2537–2562.
- Gitelson A.A., Vina A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C., Keydan G., Leavitt B. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30(5). P. 1248. <https://doi.org/10.1029/2002GL016450>
- He Y., Chen F., Jia H., Wang L., Bondur V.G. Different drought legacies of rain-fed and irrigated croplands in a typical Russian agricultural region // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 11. P. 1700.
- Herrmann I., Shapira U., Kinast S., Karnieli A., Bonfil D.J. Ground-level hyperspectral imagery for detecting weeds in wheat fields // Precis. Agric. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9321-x>
- Hese S., Schmullius C. High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia // Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf. 2009. V. 11. № 2. P. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2008.12.002>
- Hutto K.C., Shaw D.R., Byrd J.D., King R.L. Differentiation of turfgrass and common weed species using hyperspectral radiometry // Weed Sci. 2006. V. 54. № 2. P. 335–339. <https://doi.org/10.1614/WS-05-116R.1>
- Lamba D.W., Brown R.B. PA — precision agriculture: remote-sensing and mapping of weeds in crops // J. Agr. Eng. Res. 2001. V. 78(2). P. 117–125. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0630>
- Martin M.P., Barreto L., Riaco D., Fernandez-Quintanilla C., Vaughan P. Assessing the potential of hyperspectral remote sensing for the discrimination of grassweeds in winter cereal Crops // Int. J. Remote Sens. 2011. V. 32(1). P. 49–67. <https://doi.org/10.1080/01431160903439874>
- Moran J.A., Mitchell A.K., Goodmanson G., Stockburger K.A. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison

- son of methods // *Tree Physiol.* 2000. V. 20. P. 1113–1120. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.16.1113>
- Petit S., Boursault A., Guilloux M., Munier-Jolain N., Reboud X.* Weeds in agricultural landscapes. A review // *Agron. Sustain. Dev.* 2011. V. 31(2). P. 309–317. <https://doi.org/10.1051/agro/2010020>
- Pflanz M., Nordmeyer H., Schirrmann M.* Weed mapping with UAS Imagery and a Bag of Visual Words based image classifier // *Remote Sens.* 2018. V. 10(10). P. 1530. <https://doi.org/10.3390/rs10101530>
- Pflugmacher D., Krankina O., Cohen W.B., Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Kennedy R.E., Nelson P., Loboda T.V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V.I.* Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia // *Remote Sens. Environ.* 2011. V. 115. P. 3539–3553.
- Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N.* The Information Content of Spectral Vegetation Indices in the Interpretation of Satellite Images of Cultivated Fields // *Biophys.* 2019. V. 64. № 4. P. 588–592.
- Planet Team.* Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth; Planet Company: San Francisco, CA, USA, 2018; Available online: <https://api.planet.com> (accessed on 10 January 2019).
- Qi I., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S.* A modified soil adjusted vegetation index // *Remote Sens. Environ.* 1994. V. 48. № 2. P. 119–126.
- Sims D.A., Gamon J.A.* Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages // *Remote Sens. Environ.* 2002. P. 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Thorp K., Tian L.F.* A review on remote sensing of weeds in agriculture // *Precis. Agric.* 2004. V. 5(5). P. 477–508. <https://doi.org/10.1007/s11119-004-5321-1>
- Vrindts E.J. De Baerdemaeker J., De Baerdemaeker, Ramon H.* Weed detection using canopy reflection // *Precis. Agric.* 2002. V. 3(1). P. 63–80. <https://doi.org/10.1023/A:1013326304427>

Informative Value of Spectral Vegetation Indices for Assessment of Weediness of Agricultural Crops According to Ground-Based and Satellite Data

T. I. Pisman¹, M. G. Erunova², I. Yu. Botvich¹, D. V. Emelyanov¹, N. A. Kononova¹, A. V. Bobrovsky³, A. A. Kryuchkov³, A. A. Shpedt³, and A. P. Shevyrnogov¹

¹*Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

²*Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS”, Krasnoyarsk, Russia*

³*Krasnoyarsk Agricultural Research Institute of Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS”, Krasnoyarsk, Russia*

The article presents the research results of assessing the degree of weediness of wheat crops, obtained by using optical ground-based and satellite spectral data from Dove satellites (PlanetScope) with a spatial resolution of 3 m for 2019. For interpretation of ground-based spectrometric and satellite images, vegetation indices were used: normalized vegetation index – NDVI, relative chlorophyll index – ClGreen, modified soil vegetation index – MSAVI2 and index of resistance to visible atmosphere – VARI. The possibility of assessing the degree of weediness of agricultural fields is shown. The higher the contamination, the lower the index values. During the growing season, a difference between the dynamics of the VARI index and the dynamics of the NDVI, ClGreen, and MSAVI2 indices was found. There was a high correlation between the NDVI, ClGreen, MSAVI2 indices and a low correlation between the VARI index and other indices. According to the map of the spatial distribution of the ClGreen index for the date 02.08.2019, the possibility of identifying contaminated areas of agricultural fields is shown.

Keywords: vegetation indices, PlanetScope, ground spectrometry, geobotanical research, wheat crops, Krasnoyarsk region

REFERENCES

- Arkipova O.E., Kachalina N.A., Tyutyunov Yu.V., Kovalev O.V.* Otsenka zasorennosti antropogennykh fitotsenozov na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli (na primere ambrozii polynnostnoy) [Weediness assessment of anthropogenic phytocenoses on the basis of satellite remote sensing data (a case example of common ragweed)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2014. № 6. P. 15–26 (In Russian).
- Bondur V.G.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2014. V. 50. № 9. P. 840–852.
- Bondur V.G., Vorobev V.E.* Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2015. V. 51. № 9. P. 949–968.
- Gopp N.V., Savenkov O.A., Smirnov A.V.* Tsifrovoye kartografirovaniye urozhaynosti yarovoy pshenitsy na osnove vegetatsionnykh indeksov i otsenka eye izmeneniy v zavisimosti ot svoystv antropogenno-preobrazovannykh pochv [Digital mapping of spring wheat yield based on vegetation indices and estimation of its changes depending on the properties of anthropogenically transformed soils] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2019. T. 16. № 3. P. 125–139 (In Russian).
- He Y., Chen F., Jia H., Wang L., Bondur V.G.* Different drought legacies of rain-fed and irrigated croplands in a typical Russian agricultural region // *Remote Sensing.* 2020. V. 12. № 11. P. 1700.
- Ikenov I.A.* Informatsionnaya sistema otsenki sostoyaniya rastitelnosti na sel'skokhozyaystvennykh polyakh [Information system for assessing the state of vegetation in agricul-

- tural fields] // *Vestn. nauki*. 2019. T. 4. № 5(14). P. 485–491 (In Russian).
- Mikhaylenko I.M., Voronkov I.V.* Metody obnaruzheniya sornyakov, bolezney i vrediteley rasteniy po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Methods for detection of weeds, pests and diseases of plants from remote sensing data] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. T. 13. № 3. P. 72–83 (In Russian).
- Sid'ko A.F., Botvich I.Yu., Pis'man T.I., Shevyrnogov A.P.* Uglovoe raspredelenie otrazhatel'nykh harakteristik agrocenozov po nazemnym distantsionnym izmereniyam [Angular distribution of the reflective characteristics of agrocecosis ground remote sensing] // *Zhurn. Sib. feder. un-ta. Tekhnika i tekhnologii*. 2014. № 6. P. 665–673 (In Russian).
- Solpiyeva Zh.A., Urmambetova T.K.* Otsenka sostoyaniya elovykh lesov po sputnikovym dannym LANDSAT 8 na primere gosudarstvennogo natsionalnogo parka "Chon-kemin" [Assessment of the state of spruce forests using LANDSAT 8 satellite data on the example of the "Chon-Kemin" State National Park] // *Vestn. Kyrgyzskogo gos. un-ta stroitelstva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*. 2018. T. 1(59). P. 36–40 (In Russian).
- Tovstik E.V., Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya.* Identifikatsiya uchastkov massovogo rosta borshchevika Sosnovskogo s pomoshchyu spektralnykh indeksov po dannym Sentinel-2 [Identification of sites of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden. using spectral indices according to Sentinel-2 images] // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2019. № 3. P. 34–40 (In Russian).
- Shevyrnogov A.P., Pisman T.I., Kononova N.A., Botvich I.Yu., Larko A.A., Vysotskaya G.S.* Sezonnaya dinamika rastitelnosti zaleznykh zemel Krasnoyarskoy lesostepi po nazemnym i sputnikovym dannym [Seasonal dynamics of fallow land vegetation in Krasnoyarsk forest steppe according to ground and satellite data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2018. № 6. P. 39–51 (In Russian).
- Shukilovich A.Yu., Fedotova E.V., Maglinets Yu.A.* Primeneniye sensora MODIS dlya operativnogo monitoringa zemel selskokhozyaystvennogo naznacheniya [Using Modis data for agricultural areas monitoring] // *Zhurn. Sib. feder. un-ta. Tekhnika i tekhnologii*. 2016. T. 9. № 7. P. 1035–1044 (In Russian). DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-1035-1044
- Che'Ya N., Gupta M., Doug G., Lisle A., Basnet B., Campbell G.* Spectral discrimination of weeds using hyperspectral radiometry // *Proc. 5th Asian conf. Precis. Agric. (ACPA)*. 25–28 June. Jeju, Korea, 2013. P. 325.
- Gaznayee H.A., Al-Quraishi A.M.F.* Analysis of agricultural drought, rainfall, and crop yield relationships in Erbil Province, the Kurdistan Region of Iraq based on Landsat time-series MSAVI2 // *J. Adv. Res. in Dynamical & Control Systems*. 2019. V. 11, 12. P. 536–545. doi: 5373/JARDCS/V11SP12/20193249.
- Gitelson A., Stark R., Grits U., Rundquist D.C.* Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction // *Int. J. Remote Sens.* 2002. V. 23. P. 2537–2562.
- Gitelson A.A., Vina A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C., Keydan G., Leavitt B.* Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30(5). P. 1248. DOI: 10.1029/2002GL016450
- Herrmann I., Shapira U., Kinast S., Karnieli A., Bonfil D. J.* Ground-level hyperspectral imagery for detecting weeds in wheat fields // *Precis. Agric.* 2013. DOI: 10.1007/s11119-013-9321-x
- Hese S., Schmullius C.* High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia // *Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf.* 2009. V. 11. № 2. P. 130–141. DOI: 10.1016/j.jag.2008.12.002
- Hutto K.C., Shaw D.R., Byrd J.D., King R.L.* Differentiation of turfgrass and common weed species using hyperspectral radiometry // *Weed Sci.* 2006. V. 54. № 2. P. 335–339. DOI: 10.1614/WS-05-116R.1
- Lamba D.W., Brown R.B.* PA – precision agriculture: remote-sensing and mapping of weeds in crops // *J. Agr. Eng. Res.* 2001. V. 78(2). P. 117–125. DOI: 10.1006/jaer.2000.0630
- Martin M.P., Barreto L., Riaco D., Fernandez-Quintanilla C., Vaughan P.* Assessing the potential of hyperspectral remote sensing for the discrimination of grassweeds in winter cereal Crops // *Int. J. Remote Sens.* 2011. V. 32(1). P. 49–67. DOI: 10.1080/01431160903439874
- Moran J.A., Mitchell A.K., Goodmanson G., Stockburger K.A.* Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods // *Tree Physiol.* 2000. V. 20. P. 1113–1120. DOI: 10.1093/treephys/20.16.1113
- Petit S., Boursault A., Guilloux M., Munier-Jolain N., Reboud X.* Weeds in agricultural landscapes. A review // *Agron. Sustain. Dev.* 2011. V. 31(2). P. 309–317. DOI: 10.1051/agro/2010020
- Pflanz M., Nordmeyer H., Schirrmann M.* Weed mapping with UAS Imagery and a Bag of Visual Words based image classifier // *Remote Sens.* 2018. V. 10(10). P. 1530. DOI: 10.3390/rs10101530
- Pflugmacher D., Krankina O., Cohen W.B., Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Kennedy R.E., Nelson P., Loboda T.V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V.I.* Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia // *Remote Sens. Environ.* 2011. V. 115. P. 3539–3553.
- Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y. N.* The information content of spectral vegetation indices in the interpretation of satellite images of cultivated fields // *Biophys.* 2019. V. 64. № 4. P. 588–592.
- Planet Team. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth; Planet Company: San Francisco, CA, USA, 2018; Available online: <https://api.planet.com> (accessed on 10 January 2019).
- Qi I., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S.* A modified soil adjusted vegetation index // *Remote Sens. Environ.* 1994. V. 48. № 2. P. 119–126.
- Sims D.A., Gamon J.A.* Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sens. Environ.* 2002. P. 337–354. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X
- Thorp K., Tian L.F.* A review on remote sensing of weeds in agriculture // *Precis. Agric.* 2004. V. 5(5). P. 477–508. DOI: 10.1007/s11119-004-5321-1
- Voronina P.V., Mamash E.A.* Klassifikatsiya tematicheskikh zadach monitoringa selskogo khozyaystva s ispolzovaniyem dannyykh distantsionnogo zondirovaniya MODIS [Classification of thematic tasks of agricultural monitoring using MODIS remote sensing data] // *Vychislitelnyye tekhnologii*. 2014. T. 19. № 3. P. 76–102 (In Russian).
- Vrindts E.J. De Baerdemaeker J., De Baerdemaeker, Ramon H.* Weed detection using canopy reflection // *Precis. Agric.* 2002. V. 3(1). P. 63–80. DOI: 10.1023/A:1013326304427