

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНО-ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР БЕЛАРУСИ

Е. В. КАЗЯК¹⁾, Ю. С. ДАВИДОВИЧ^{1), 2)}, Н. А. ШЕСТАКОВ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

Приведены результаты использования методов геоинформационного и статистического анализа для изучения спектрально-отражательных характеристик девяти наиболее типичных сельскохозяйственных культур Беларуси. Коэффициенты спектральной яркости и значения нормализованного относительного вегетационного индекса (NDVI) извлечены из мультиспектральных спутниковых снимков Landsat-8 в программном пакете ENVI (версия 5.2) и проанализированы на основе методов зональной статистики в программном комплексе ArcGIS (версия 10.2) и математико-статистического анализа в программе Statistica (версия 10). С применением корреляционного анализа осуществлена верификация спутниковых данных с соответствующими полевыми измерениями, а именно установлена достоверная сильная положительная линейная связь между значениями индекса NDVI, измеренными в полевых условиях специализированным прибором GreenSeeker, и значениями индекса NDVI, рассчитанными по спутниковым данным Landsat-8. Оценка характера распределения коэффициентов спектральной яркости и средних значений индекса NDVI в зависимости от вида сельскохозяйственной культуры проведена на основе дисперсионного анализа, позволившего выявить скрытые в спектральных данных закономерности. В частности, в результате применения процедуры множественных сравнений с помощью тестов *post hoc* установлено, какие именно виды культур достоверно отличались друг от друга и в какие даты наблюдались эти различия. Полученные научные результаты были систематизированы и представлены в виде таблиц. Содержащиеся в них данные позволили усовершенствовать алгоритм автоматизированного распознавания рассматриваемых в исследовании сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: коэффициенты спектральной яркости; вегетационный индекс; NDVI; корреляционный анализ; дисперсионный анализ; методы зональной статистики; Landsat-8; ГИС.

Благодарность. Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта 15-35-51243.

Образец цитирования:

Казяк ЕВ, Давидович ЮС, Шестаков НА. Результаты использования методов геоинформационного и статистического анализа для изучения спектрально-отражательных характеристик сельскохозяйственных культур Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2022;2:55–68.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-2-55-68>

For citation:

Kaziak AV, Davidovich YS, Shastakou MA. Results of using geoinformation and statistical analysis methods to study spectral reflectance characteristics of agricultural crops of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2022;2:55–68. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-2-55-68>

Авторы:

Елена Витальевна Казяк – старший преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Юрий Сергеевич Давидович – преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики¹⁾, стажер младшего научного сотрудника лаборатории оптико-физических измерений отдела аэрокосмических исследований²⁾.

Никита Алексеевич Шестаков – студент факультета географии и геоинформатики. Научный руководитель – Е. В. Казяк.

Authors:

Alena V. Kaziak, senior lecturer at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

alena.kaziak@gmail.com

Yury S. Davidovich, lecturer at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics^a, and trainee junior researcher at the laboratory of optical and physical measurements, department of aerospace studies^b.

davidoviyus@bsu.by

Mikita A. Shastakou, student at the faculty of geography and geoinformatics.

geo.shestakona@bsu.by

RESULTS OF USING GEOINFORMATION AND STATISTICAL ANALYSIS METHODS TO STUDY SPECTRAL REFLECTANCE CHARACTERISTICS OF AGRICULTURAL CROPS OF BELARUS

A. V. KAZIAK^a, Y. S. DAVIDOVICH^{a, b}, M. A. SHASTAKOU^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bA. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

Corresponding author: A. V. Kaziak (alena.kaziak@gmail.com)

The results of using geoinformation and statistical analysis methods to study spectral reflectance characteristics of the nine most typical agricultural crops of Belarus are presented. Spectral brightness coefficients and normalised difference vegetation index (NDVI) values were extracted from Landsat-8 multispectral satellite images in the software package *ENVI* (version 5.2) and analysed based on the methods of zonal statistics in the software complex *ArcGIS* (version 10.2) and mathematical and statistical analysis in the program *Statistica* (version 10). The verification of satellite data with the corresponding field measurements was carried out on the basis of correlation analysis, namely, a reliable strong positive linear relationship between the measured in the field by a specialised GreenSeeker instrument NDVI values and the calculated by Landsat-8 satellite data NDVI values was established. The character of the distribution of spectral brightness coefficients and average NDVI values depending on the type of agricultural crop was assessed using a dispersion analysis, which allowed revealing patterns hidden in the spectral data. In particular, after applying the procedure of multiple comparisons using *post hoc* tests, it was established which types of crops significantly differ from each other and for which dates these differences were observed. The obtained scientific results were systematised and presented in the form of corresponding tables. The data contained in the tables made it possible to improve the methodology of automated recognition of the crops considered in the study.

Keywords: spectral brightness coefficients; vegetation index; NDVI; correlation analysis; analysis of variance; zonal statistics methods; Landsat-8; GIS.

Acknowledgements. The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research according to the research project 15-35-51243.

Введение

В настоящее время в мире сельское хозяйство является одной из ведущих сфер использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1; 2].

Отражательные свойства сельскохозяйственных культур были достаточно хорошо изучены по материалам наземных и самолетных наблюдений [3; 4]. Однако большинство собранной во второй половине XX в. информации имеет существенные ограничения по использованию в современной цифровой среде.

Начиная с 1980-х гг. изучение спектральных свойств сельскохозяйственной растительности осуществляется на основе спутниковых данных [5; 6]. Современный этап исследований связан с развитием методов обработки преимущественно цифровых многозональных спутниковых снимков [7]. Исследования в данной области проводятся в нескольких направлениях: по спутниковым изображениям изучаются как спектральные свойства групп сельскохозяйственной растительности отдельных регионов России, Казахстана, Украины, Беларуси [8–10], так и узкие спектральные характеристики конкретных видов сельскохозяйственных культур [11–13]. В стратегии планирования агротехнологических решений очень широко применяется геостатистический подход [14]. Для анализа временной и пространственной изменчивости свойств сельскохозяйственных культур и почв в работе [15] были использованы многомерные геостатистические методики (факторный кригинг-анализ). В публикации [16] представлены результаты геостатистического анализа ряда показателей почвенно-растительного покрова, полученных в полевых условиях. При этом установлено, что большинство почвенных параметров достоверно взаимосвязаны и могут быть успешно картированы с применением кригинга, тогда как построение картограмм для растительного покрова на основе этой процедуры является менее эффективным. В статье [17] для статистического анализа спектральных данных сельскохозяйственных культур использованы вегетационные индексы, показатели спектрального расстояния и спектрального угла (по материалам гиперспектральной съемки).

Более детальное изучение работ по исследованию спектральных данных сельскохозяйственной растительности показало, что некоторые авторы утверждают о выявлении тех или иных спектральных

особенностей на основе лишь визуального анализа изображений и, как следствие, не могут подтвердить результаты конкретными количественными показателями. Часто исследования проводятся на основе крайне малых выборок полей, которые нельзя считать репрезентативными для установления каких-либо общих спектральных закономерностей. Нередко изучение спектров осуществляется по снимку только за одну дату, что не позволяет учитывать особенности сезонного развития посевов, существенным образом влияющие на изменение их спектрального отклика.

Цель настоящего исследования – систематизация и анализ количественной спектральной информации, собранной для выявления скрытых спектральных особенностей и закономерностей, которые легли бы в основу автоматизированного дешифрирования видов сельскохозяйственных посевов Беларуси.

Для реализации поставленной цели было необходимо отобрать репрезентативную выборку тестовых полей, сформировать архив спутниковых данных за разные даты в течение сезона вегетации, изучить методы цифровой обработки спутниковых снимков и выбрать наиболее эффективные инструменты геоинформационного и статистического анализа спектрально-отражательных характеристик, графически оформить и проанализировать результаты корреляционного и дисперсионного анализа коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) и значений нормализованного относительного вегетационного индекса (*normalised difference vegetation index*, NDVI), рассчитанных для тестовых полигонов.

Материалы и методы исследования

С учетом сложившейся в Беларуси системы земледелия и структуры посевных площадей в качестве объекта исследования были выбраны наиболее распространенные виды сельскохозяйственных культур – озимая и яровая пшеница, озимая тритикале, яровой ячмень, озимый рапс, кукуруза, многолетние травы, картофель и сахарная свекла. Указанные культуры ежегодно занимают более 90 % всех пахотных земель¹.

Исходя из базовых основ статистики, для каждого вида посевов были подготовлены репрезентативные выборки, насчитывающие не менее 30 полей с соответствующими посевами (табл. 1).

Таблица 1

Суммарная статистика по тестовым полигонам

Table 1

Summary statistics for test polygons

Культура	Количество полей	Общая площадь, га	Средний размер поля, га
Озимая пшеница	85	8340	76
Озимая тритикале	129	14 774	67
Озимый рапс	109	4624	56
Яровая пшеница	61	2980	83
Яровой ячмень	76	9569	78
Кукуруза	204	17 416	66
Многолетние травы	205	23 056	44
Картофель	60	3122	34
Сахарная свекла	75	7390	111
<i>Всего</i>	<i>1004</i>	<i>91 271</i>	–

Всего для анализа спектральных данных было отобрано более 1000 эталонных площадок, которые в силу своего размера уверенно дешифрировались по материалам космической съемки среднего и высокого пространственного разрешения. Информация о видовой структуре посевов базировалась на результатах полевых объездов территории.

Векторизация тестовых полигонов, создание электронной карты полей и внесение атрибутивной информации о произрастающих на полях культурах выполнены в лицензионном программном комплексе *ArcGIS* (версия 10.2).

В качестве источника спектральных данных сформирован архив мультиспектральных спутниковых снимков Landsat-8, в который вошли 120 изображений, покрывающих исследуемую территорию. Боль-

¹Сельское хозяйство Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. Минск, 2021. С. 47–48.

шой объем спутниковых данных обусловлен тем, что анализ спектральной информации осуществлялся не по единичным изображениям тестовых полей, а по набору из 5–8 сцен спутника Landsat-8 за разные даты в течение всего сезона вегетации (март – сентябрь).

Эффективность использования материалов ДЗЗ зависит от фотограмметрических особенностей исходного изображения и применяемых методов обработки. Именно на этапе выбора подходящих методов и алгоритмов работы часто возникают затруднения, так как методы в этой области являются преимущественно проблемно ориентированными и общего подхода к анализу изображений не существует [18]. Указанная проблема была решена путем комплексного использования трех групп методов – цифровой обработки материалов ДЗЗ, геоинформационного анализа и математико-статистической обработки данных.

Для унификации данных и обеспечения возможности сопоставления спектральной информации разных сцен спутниковые снимки Landsat-8 прошли предварительную коррекцию с помощью модуля FLAASH (*fast line of sight atmospheric analysis of spectral hypercubes*) лицензионного программного пакета *ENVI* (версия 5.2). Изучение особенностей спектрального отклика различных видов посевов по спутниковым снимкам Landsat-8 осуществлялось двумя способами – на основе анализа КСЯ и путем расчета вегетационного индекса NDVI.

Изучение особенностей сезонной динамики КСЯ, посевов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра методами цифровой обработки материалов ДЗЗ. Для этих целей в программном пакете *ENVI* (версия 5.2) с помощью инструмента ROI (*region of interest*) на предварительно откалиброванные снимки для каждого вида изучаемых посевов были нанесены так называемые области интереса. Их местоположение определялось следующим образом: 1) для ROI отбирались участки с однородным спектральным откликом; 2) входящая в состав ROI территория была свободна от облачности; 3) ROI строились на одних и тех же участках для сравнения спектральных кривых, полученных по снимкам за разные даты.

Из каждой области обработки были извлечены КСЯ, и на их основе в программе *Microsoft Excel* построены графики сезонной динамики значений КСЯ, соответствующие синему ($\lambda = 480$ нм), зеленому ($\lambda = 560$ нм), красному ($\lambda = 650$ нм), ближнему инфракрасному (NIR) ($\lambda = 860$ нм) и коротковолновому инфракрасному (SWIR) ($\lambda = 1600$ нм) спектральным каналам спутника Landsat-8 (рис. 1), а также сформированы выборки для последующего математико-статистического анализа.

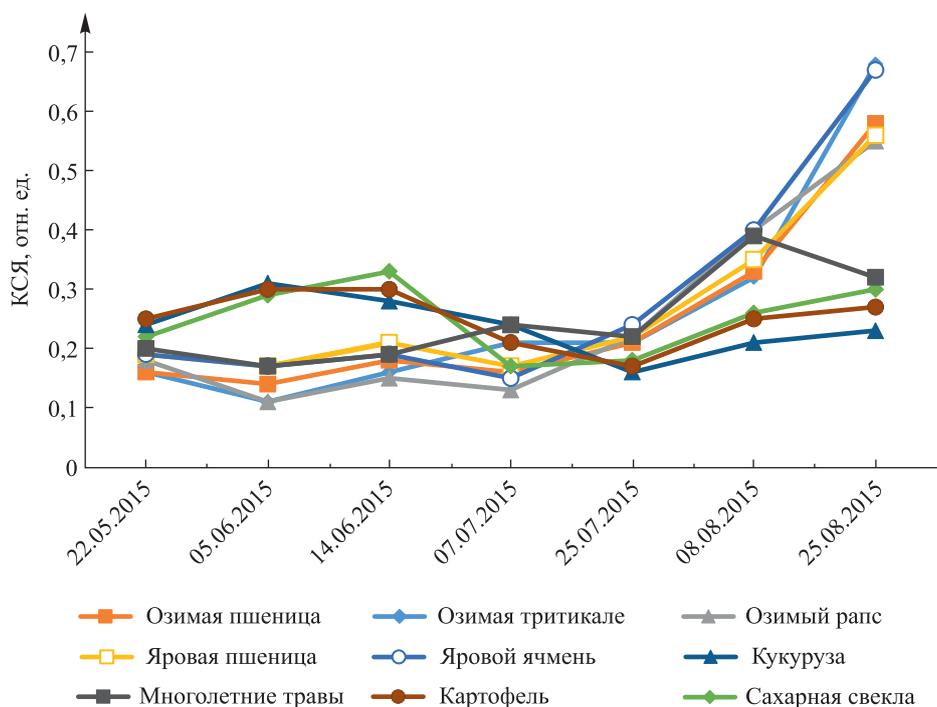


Рис. 1. Пример графика, отображающего распределение значений КСЯ в красном ($\lambda = 650$ нм) диапазоне электромагнитного спектра

Fig. 1. An example of a graph showing the distribution of the values of spectral brightness coefficients in the red ($\lambda = 650$ nm) range of the electromagnetic spectrum

Изучение особенностей сезонной динамики значений вегетационного индекса NDVI методами зональной статистики в ГИС. Вегетационные индексы – это показатели, полученные в ходе математических операций над разными спектральными каналами данных ДЗЗ и имеющие отношение к параметрам растительности в конкретном пикселе снимка. Одним из наиболее информативных индексов для изучения растительности считается вегетационный индекс NDVI [10]. Он вычисляется как разница интенсивностей отраженного света в ближнем инфракрасном и красном диапазонах, деленная на сумму их интенсивностей. Для расчета вегетационного индекса NDVI в среде *ArcGIS* был разработан алгоритм *NDVI_selection*, позволяющий в автоматизированном режиме строить временные ряды значений индекса NDVI. В качестве входных данных модель использует красный и ближний инфракрасный (четвертый и пятый) спектральные каналы снимков спутника Landsat-8, прошедших предварительную атмосферную коррекцию (рис. 2).

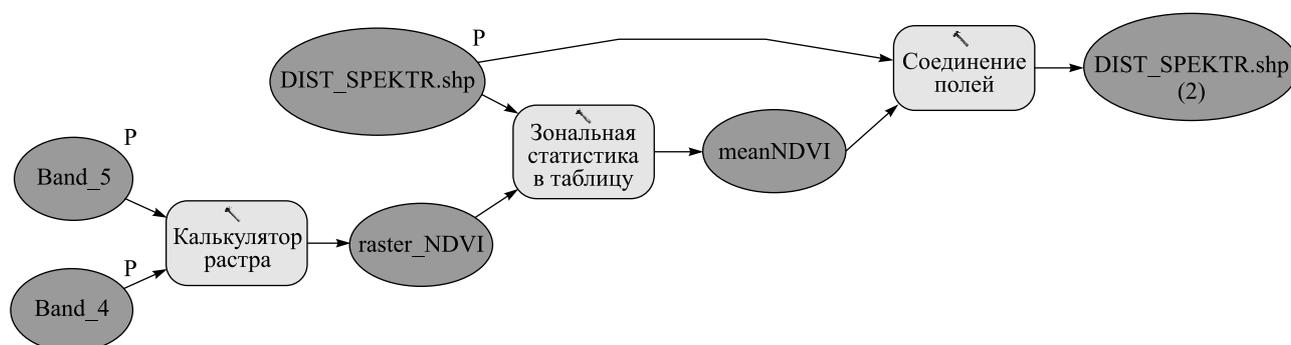


Рис. 2. Схема авторского алгоритма *NDVI_selection* для автоматизированного построения временных рядов значений индекса NDVI

Fig. 2. Scheme of the author's *NDVI_selection* algorithm for automated construction of NDVI values time series

В результате выполнения алгоритма *NDVI_selection* в атрибутивной таблице ГИС-проекта строится столбец с набором усредненных значений индекса NDVI для каждого анализируемого векторного контура (поля). Поскольку для построения временных рядов значений индекса NDVI за весь сельскохозяйственный сезон предполагается использование не менее 5–8 спутниковых снимков, алгоритм *NDVI_selection* позволяет существенно сократить затраты времени на ручную обработку информации, а также минимизирует количество случайных ошибок, возникающих при работе с большими массивами данных. Из программного комплекса *ArcGIS* значения индекса NDVI были экспортированы в программу *Microsoft Excel* для формирования выборок, необходимых на этапе математико-статистического анализа.

Математико-статистическая обработка КСЯ и значений вегетационного индекса NDVI. Для того чтобы подобрать наиболее эффективные статистические тесты, необходимо знать, для какого вида данных (параметрических или непараметрических) они будут применяться. Параметрические тесты (в сравнении с непараметрическими) являются более достоверными и чувствительными к выявлению закономерностей. Параметрические данные должны одновременно удовлетворять трем условиям: содержать в выборке не менее 30 наблюдений, быть непрерывными и иметь близкое к нормальному распределение [15].

Используемые в работе данные являются параметрическими, так как удовлетворяют вышеуказанным условиям. При этом нормальность распределения полученных значений КСЯ и вегетационного индекса NDVI была установлена на основании анализа следующих параметров: объема выборки, среднего арифметического, медианы, коэффициента асимметрии, коэффициента эксцесса, стандартного отклонения. Также к данным были применены тесты на нормальность Колмогорова – Смирнова (Kolmogorov – Smirnov), Лиллиефорса (Lilliefors) и Шапиро – Уилка (Shapiro – Wilk) и на их основе для каждого вида посевов построены соответствующие графики (рис. 3).

Уровень значимости (p), полученный по тестам Колмогорова – Смирнова и Лиллиефорса, был больше 0,2, а уровень значимости, полученный по тесту Шапиро – Уилка, превышал 0,05. В таком случае гипотеза нормальности не опровергается, т. е. выборка может иметь нормальное распределение.

После подготовки и проверки данных важно подобрать подходящий метод статистического анализа.

Корреляционный анализ – метод обработки статистических данных, с помощью которого измеряется теснота связи между двумя переменными [19].

Одной из важнейших задач при изучении спектрально-отражательных особенностей растительного покрова по материалам ДЗЗ является верификация спутниковых данных с соответствующими поле-

выми измерениями. Так как индекс NDVI можно измерить наземными (с помощью оптических датчиков) и дистанционными (с применением спутниковой съемки или аэрофотосъемки) методами, то его значения, полученные путем полевых измерений, и соответствующие им спутниковые значения были подвергнуты корреляционному анализу.

В качестве объекта анализа выбран участок с посевами озимой пшеницы площадью 130 га, расположенный в пределах одного из используемых в исследовании полей (координаты центра поля: $x = 516\,649,733$ м, $y = 5\,962\,352,635$ м (WGS 84 / UTM zone 35N)). Для этого участка по спутниковому снимку Landsat-8 построено индексное изображение, на котором хорошо виден разброс значений индекса NDVI, свидетельствующий о значительной неоднородности фитомассы озимой пшеницы в пределах тестового поля. По картограмме значений индекса NDVI создана выборка из 30 наиболее репрезентативных участков – исследовательских площадей для полевого отбора показателей NDVI (рис. 4).

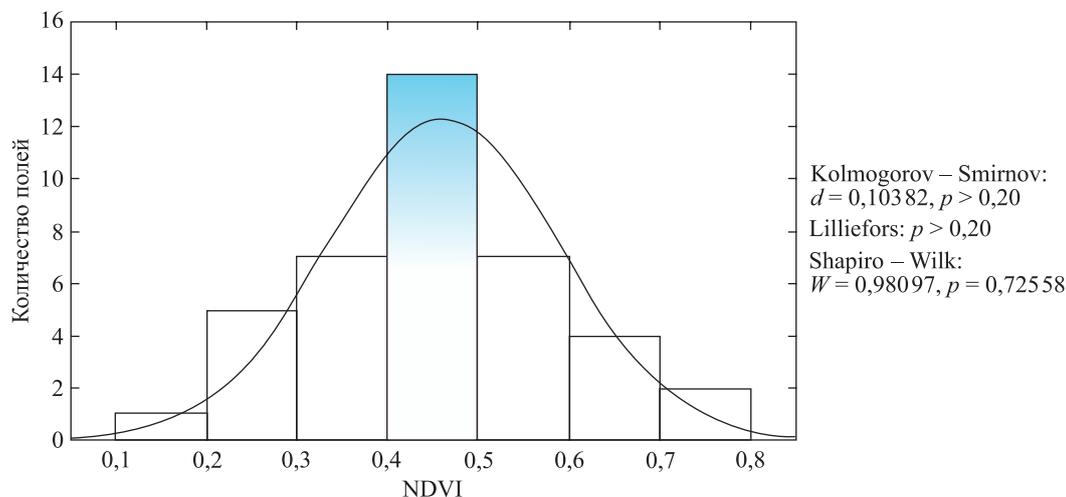


Рис. 3. Внешний вид графика, отображающего нормальное распределение (на примере значений индекса NDVI озимого рапса за 22.05.2015)

Fig. 3. The appearance of the graph showing the normal distribution (using the example of the NDVI values of winter rapeseed for 22.05.2015)

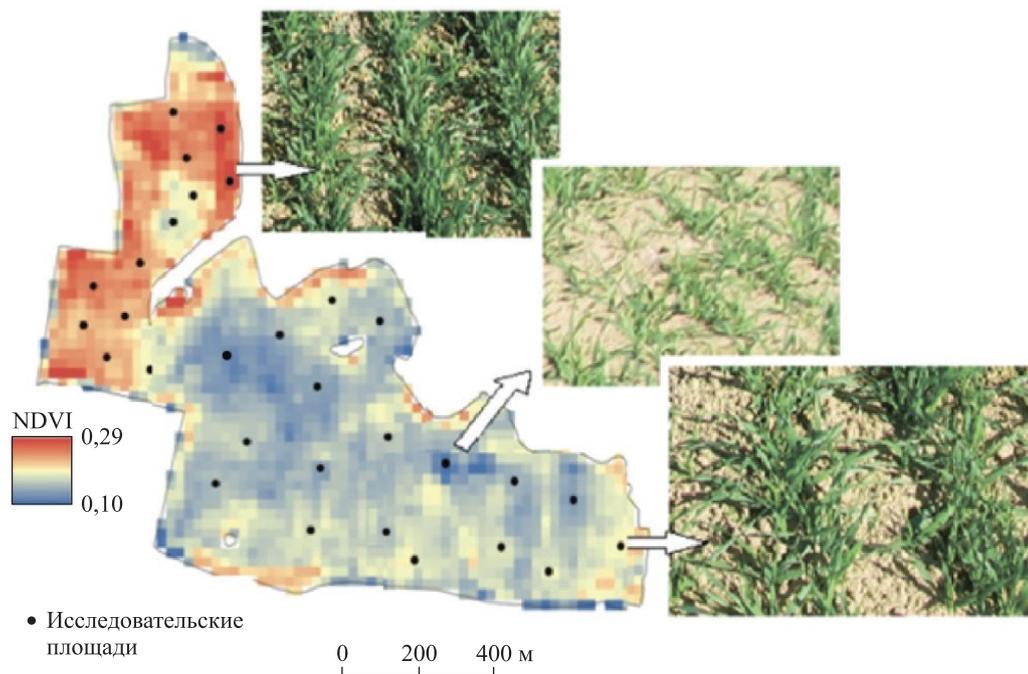


Рис. 4. Картограмма значений индекса NDVI (по спутниковым данным Landsat-8 за 11.04.2015) и внешний вид посевов в местах полевых измерений

Fig. 4. NDVI values cartogram (according to Landsat-8 satellite data for 11.04.2015) and the appearance of crops in field measurement sites

Координаты исследовательских площадей были занесены в GPS-приемник, с помощью которого определено расположение точек выборки на местности. На всех 30 участках измерены значения индекса NDVI с использованием специализированного прибора GreenSeeker, а также проведен визуальный осмотр культур в местах полевых наблюдений.

Мерой линейной взаимосвязи между переменными является коэффициент корреляции (r). Его значения по модулю могут варьироваться от 0 до 1. Принимается следующая характеристика тесноты корреляционной связи. Нулевой коэффициент корреляции говорит о том, что значения одной переменной совершенно не связаны со значениями другой переменной. Если коэффициент корреляции равен $0 \pm 0,4$, то связь считается слабой. Значения коэффициента корреляции в диапазоне от $\pm 0,4$ до $\pm 0,7$ указывают на среднюю тесноту связи, а значения в диапазоне от $\pm 0,7$ до $\pm 1,0$ говорят о сильной связи [20].

Для графической демонстрации наличия или отсутствия корреляции между двумя переменными используются диаграммы рассеяния – математические диаграммы, изображающие значения двух переменных в виде точек на декартовой плоскости. Отображаемые на диаграммах рассеяния паттерны позволяют увидеть разные типы корреляции (рис. 5).

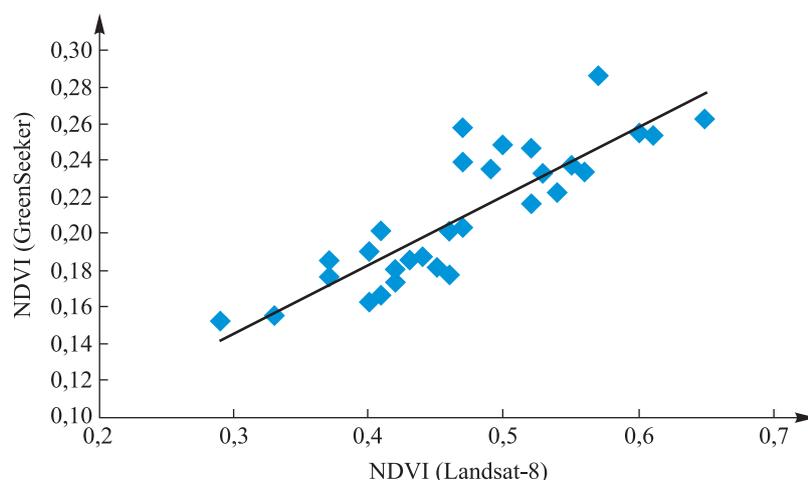


Рис. 5. Диаграмма рассеяния значений индекса NDVI, полученных наземными (GreenSeeker) и спутниковыми (Landsat-8) методами

Fig. 5. Scattering diagram of NDVI values obtained by ground-based (GreenSeeker) and satellite (Landsat-8) methods

В рассматриваемом случае коэффициент корреляции составил 0,84 (при уровне значимости, меньшем 0,05), т. е. диаграмма рассеяния продемонстрировала положительный линейный тип корреляции. Таким образом, можно утверждать, что между полевыми и спутниковыми (рассчитанными по данным Landsat-8) значениями индекса NDVI существует достоверная сильная положительная линейная связь.

Дисперсионный анализ (*analysis of variance*, ANOVA) является одним из методов математической статистики, направленным на поиск зависимостей в экспериментальных данных путем исследования значимости различий их средних значений. На его основе можно утверждать о достоверности установленных различий. Как правило, дисперсионный анализ данных применяется при сравнении трех и более выборок [19].

С учетом того что используемые в исследовании данные распределены по девяти выборкам (по одной выборке на каждый вид исследуемых культур), эти данные были подвергнуты процедуре однофакторного дисперсионного анализа (с уровнем значимости 0,05).

Для проведения дисперсионного анализа необходимо сформулировать и проверить гипотезу, а также рассчитать ее вероятность. Поскольку в настоящем исследовании рассматривались спектральные данные двух типов (КСЯ и значения индекса NDVI), были сформулированы две гипотезы. В качестве первой гипотезы выдвинуто предположение о том, что такой фактор, как вид культуры, влияет на значения КСЯ, полученные в определенные временные срезы. По аналогии составлена вторая гипотеза, предполагающая, что вышеуказанный фактор влияет на значения индекса NDVI.

Для визуализации результатов были построены диаграммы размаха (ящичковые диаграммы) – графики, использующиеся в описательной статистике для сравнения распределений между несколькими группами или наборами данных (рис. 6) [21].

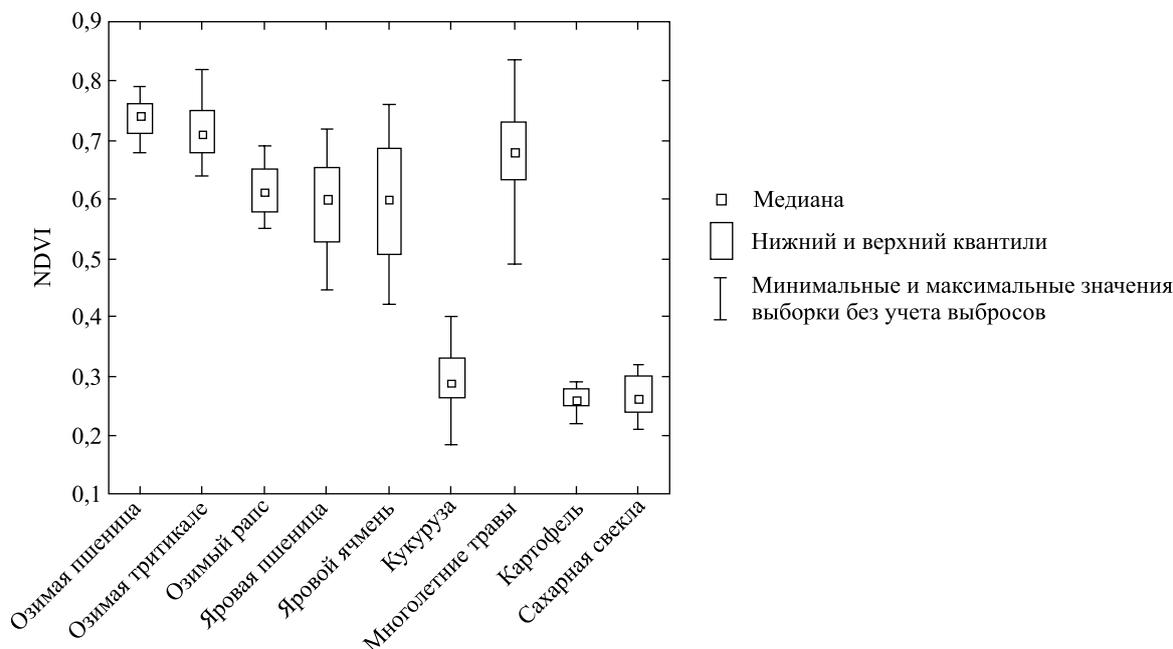


Рис. 6. Пример ящичковой диаграммы, отображающей характер распределения усредненных значений индекса NDVI культур (по спутниковым данным за 22.05.2015)

Fig. 6. An example of a box diagram showing the nature of the distribution of the average NDVI values of crops (according to satellite data for 22.05.2015)

На основе полученных диаграмм проведена оценка характера распределения КСЯ и средних значений индекса NDVI в зависимости от вида сельскохозяйственной культуры. В первом приближении установлено, что исследуемые значения имеют определенные различия. Однако с помощью дисперсионного анализа было невозможно выяснить, между какими именно группами посевов существуют значимые различия. По этой причине после общего дисперсионного анализа для определения того, какое из нескольких сравнений является значимым, проведена процедура множественных сравнений с помощью тестов *post hoc* (по критерию Шеффе). В результате получены матрицы, показывающие, какие именно виды культур достоверно отличались друг от друга и в какие даты наблюдались данные различия (табл. 2).

Таблица 2

Матрица результатов теста *post hoc* для выборок с неравным объемом (на примере значений индекса NDVI за 22.05.2015)

Table 2

Matrix of *post hoc* test results for samples with unequal volume (using the example of NDVI values for 22.05.2015)

Культура	Уровень разделимости								
	Озимая пшеница	Озимая тритикале	Озимый рапс	Яровая пшеница	Яровой ячмень	Кукуруза	Многолетние травы	Картофель	Сахарная свекла
Озимая пшеница	–	0,475 981	0,000 010	0,000 010	0,000 010	0,000 010	0,000 037	0,000 010	0,000 010
Озимая тритикале	0,475 981	–	0,000 010	0,000 010	0,000 010	0,000 010	0,001 145	0,000 010	0,000 010
Озимый рапс	0,000 010	0,000 010	–	0,575 951	0,529 459	0,000 010	0,002 231	0,000 010	0,000 010
Яровая пшеница	0,000 010	0,000 010	0,575 951	–	1,000 000	0,000 010	0,000 012	0,000 010	0,000 010
Яровой ячмень	0,000 010	0,000 010	0,529 459	1,000 000	–	0,000 010	0,000 010	0,000 010	0,000 010
Кукуруза	0,000 010	0,000 010	0,000 010	0,000 010	0,000 010	–	0,000 010	0,447 905	0,568 428

Окончание табл. 2
Ending table 2

Культура	Уровень разделимости								
	Озимая пшеница	Озимая тритикале	Озимый рапс	Яровая пшеница	Яровой ячмень	Кукуруза	Многолетние травы	Картофель	Сахарная свекла
Многолетние травы	<i>0,000 037</i>	<i>0,001 145</i>	<i>0,002 231</i>	<i>0,000 012</i>	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>	–	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>
Картофель	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>	0,447 905	<i>0,000 010</i>	–	1,000 000
Сахарная свекла	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>	<i>0,000 010</i>	0,568 428	<i>0,000 010</i>	1,000 000	–

Примечание. Курсивом выделены значения достоверно отличающихся от других посевов культур ($p < 0,05$). Остальные значения соответствуют культурам с более высокой долей ошибок в их определении ($p > 0,05$).

Чем выше степень отличия значений индекса NDVI конкретного вида культуры от всех остальных, тем выше вероятность его эффективного дешифрирования.

Результаты и их обсуждение

Анализ значений КСЯ посевов, полученных для разных диапазонов электромагнитного спектра, позволил сделать ряд заключений об особенностях их спектрального отклика.

1. КСЯ посевов, относящихся к одному виду, но произрастающих на разных тестовых полигонах, были схожи (при условии, что в выбранные для ROI эталонные области попали здоровые, неугнетенные культуры). Отсюда следует, что на спектрально-отражательные характеристики посевов в большей степени влияют локальные условия произрастания и возделывания, чем расположение агроэкосистем в пределах физико-географических областей.

2. Ни в одну из исследуемых дат не выявлено периодов, когда по снимку за одну дату имелись бы достоверные отличия значений КСЯ одновременно для всех видов посевов.

3. КСЯ за одну и ту же дату съемки значительно отличались для одних видов посевов и имели крайне близкие значения для других видов. На основе статистического анализа значений спектрального отклика исследуемые культуры разделены на три группы. К первой группе отнесены озимые зерновые культуры, ко второй – яровые зерновые культуры, к третьей – кукуруза, картофель и сахарная свекла. У посевов озимого рапса и многолетних трав выявлены уникальные особенности спектрального отклика, не позволяющие соотнести их ни с одной из вышеперечисленных групп.

4. В пределах выделенных групп определены наиболее информативные периоды для видового распознавания посевов. Результаты математико-статистической оценки базовых статистических характеристик представлены в табл. 3.

Таблица 3

Наличие достоверных различий в спектральном отклике посевов (на основе однофакторного дисперсионного анализа)

Table 3

The presence of significant differences in the spectral response of crops (based on one-factor analysis of variance)

Дата	Длина волны электромагнитного излучения				
	$\lambda = 480$ нм	$\lambda = 560$ нм	$\lambda = 650$ нм	$\lambda = 860$ нм	$\lambda = 1600$ нм
<i>Озимая тритикале и озимая пшеница</i>					
20.05.2015	–	–	–	–	–
05.06.2015	–	–	–	+	–
14.06.2015	–	–	–	–	–
07.07.2015	–	–	–	–	–
25.07.2015	–	–	–	–	–
08.08.2015	–	–	–	–	–

Дата	Длина волны электромагнитного излучения				
	$\lambda = 480$ нм	$\lambda = 560$ нм	$\lambda = 650$ нм	$\lambda = 860$ нм	$\lambda = 1600$ нм
<i>Яровой ячмень и яровая пшеница</i>					
20.05.2015	–	+	+	–	+
05.06.2015	–	–	–	–	+
14.06.2015	–	–	–	–	–
07.07.2015	–	–	–	+	–
25.07.2015	–	–	–	–	–
08.08.2015	–	–	–	–	–
<i>Кукуруза, картофель и сахарная свекла</i>					
20.05.2015	–	–	–	–	–
05.06.2015	–	–	–	–	–
14.06.2015	–	–	–	–	–
07.07.2015	–	–	–	–	–
25.07.2015	–	–	–	–	–
08.08.2015	–	+	–	+ (кукуруза)	–
24.08.2015	–	+ (кукуруза)	+ (кукуруза)	+	+
18.09.2015	–	+	+	+ (картофель)	+

Пр и м е ч а н и я: 1. Знаком «плюс» обозначено достоверное отличие видов культур, знаком «минус» – отсутствие достоверного отличия (уровень значимости 0,05). 2. Если достоверные отличия наблюдаются только у одного вида в пределах группы, в скобках приводится название этого вида.

Наиболее узкие временные рамки дешифрирования определены для посевов озимых зерновых культур. Информативный для разделения озимой пшеницы и озимой тритикале период захватывает промежуток с начала до середины июня и наблюдается только в ближнем инфракрасном канале.

Для яровых зерновых культур наиболее информативными для классификации были спектральные данные, полученные в зеленом, красном и ближнем коротковолновом инфракрасном (SWIR) каналах в период со второй половины мая до начала июня, а также в ближнем инфракрасном (NIR) канале в начале июля.

У посевов кукурузы, картофеля и сахарной свеклы наиболее достоверные различия наблюдаются во второй половине августа – начале сентября в ближних инфракрасных каналах. При этом различия в значениях КСЯ чаще всего отмечались для одного из трех видов посевов в пределах группы.

Геоинформационная обработка и математико-статистический анализ значений индекса NDVI также способствовали получению новых научных сведений.

1. Осуществлена верификация спутниковых данных Landsat-8 с соответствующими полевыми измерениями. С учетом результатов корреляционного анализа и сильной положительной связи, выявленной между полевыми и дистанционными значениями индекса NDVI, сделан вывод, что мультиспектральные снимки спутника Landsat-8 могут быть использованы в качестве альтернативного полевым данным источника информации о количестве фотосинтетически активной фитомассы и характере сезонного развития посевов.

2. На основе сопоставления сроков увеличения или снижения значений индекса NDVI у различных видов культур, а также анализа базовых статистических характеристик сделан вывод, что сезонные значения индекса NDVI могут использоваться при детектировании отдельных видов или групп сельскохозяйственных культур. По характеру распределения значений индекса NDVI исследуемые посевы объединены в три группы. В первую группу попали озимые зерновые культуры, озимый рапс и многолетние травы, во вторую – яровые зерновые культуры, в третью – сахарная свекла, кукуруза и картофель. Результаты математико-статистической оценки представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Достоверность взаимного отличия значений индекса NDVI исследуемых культур
в разные периоды времени (на основе дисперсионного анализа)**

Table 4

**The reliability of the mutual difference of the NDVI values of the studied cultures
in different time periods (based on the analysis of variance)**

Дата	Первая группа				Вторая группа		Третья группа		
	Озимая пшеница	Озимая тритикале	Озимый рапс	Многолетние травы	Яровая пшеница	Яровой ячмень	Сахарная свекла	Кукуруза	Картофель
09.03.2015	+				-		-		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.03.2015	+				-		-		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10.04.2015	+				-		-		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19.04.2015	+				-		-		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26.04.2015	+				-		-		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12.05.2015	-				-		-		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22.05.2015	-				-		+		
	-	-	+	-	-	-	-	-	-
06.06.2015	-				-		+		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14.06.2015	-				+		-		
	-	-	-	-	-	-	-	-	+
07.07.2015	-				-		-		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.07.2015	+				+		+		
	-	-	-	+	-	-	+	-	-
08.08.2015	-				-		+		
	-	-	-	+	-	-	+	-	-
25.08.2015	-				-		+		
	-	-	-	+	-	-	+	-	+
17.09.2015	-				-		+		
	-	-	-	+	-	-	+	+	+

Примечания: 1. Знаком «плюс» обозначено достоверное отличие от остальных групп или видов культур, знаком «минус» – отсутствие достоверного отличия. 2. Для каждой даты в верхней строке указана достоверность распознавания групп посевов, а в нижней строке – результаты разделения отдельных видов посевов.

За весь сезон вегетации возможность достоверного разделения трех групп посевов одновременно по единичному снимку была установлена лишь в одну дату – 25.07.2015. Это можно объяснить тем, что во второй половине июля посевы озимых культур преимущественно убраны с полей и характеризуются более низкими значениями индекса NDVI, чем яровые зерновые культуры. В остальное время можно было отделить лишь одну группу посевов от двух других групп.

Для первой группы оптимальные сроки отмечены в ранневесенний период (март – начало мая), когда засеянные озимыми культурами и многолетними травами поля характеризуются более высокими значениями индекса NDVI.

У второй группы посевов, кроме общего для всех групп периода (вторая половина июля), была отмечена лишь одна репрезентативная дата для распознавания – 14.06.2015, так как в период с середины до конца июня посевы яровых зерновых культур достигают значительного объема фитомассы и имеют более высокие, чем у других культур, значения вегетационного индекса. Отделение третьей группы от остальных возможно по снимкам, полученным не ранее конца июля – начала августа.

Достоверное разделение отдельных видов посевов внутри групп, несмотря на некоторые различия средних значений индекса NDVI, было возможно лишь в редких случаях.

Наибольшие различия отмечены между культурами третьей группы, тогда как для достоверного разделения зерновых культур не удалось выявить ни одной даты в течение вегетационного сезона. Посевы зерновых культур часто трудно различимы даже в полевых условиях, что на дистанционных материалах проявляется в виде крайне большой схожести значений индекса NDVI и их высокой вариабельности.

По значениям индекса NDVI посевы рапса детектируются хуже, чем по ранее выявленным дешифровочным признакам. Для отделения рапса от других озимых культур может быть использовано только характерное уменьшение значений индекса NDVI во второй половине мая.

Распознавание многолетних трав по единичному индексному изображению затруднено как их большим видовым разнообразием (люцерна, клевер, злаково-бобовые смеси и пр.), так и различием в количестве и времени укосов. По этой же причине у многолетних трав наблюдается уникальный сезонный ход значений индекса NDVI, при этом точность определения их посевов на основе временных рядов значений индекса NDVI может достигать 99 % и более.

3. На основе вышеуказанных результатов предложены пороговые значения вегетационного индекса, позволяющие проводить разделение общего массива значений индекса NDVI посевов на определенные группы.

Полученные данные свидетельствуют о том, что дешифрирование видового состава сельскохозяйственных культур осуществимо для посевов многолетних трав, озимого рапса и пропашных культур (сахарная свекла, кукуруза, картофель), тогда как выделение конкретных видов зерновых культур по временным рядам значений индекса NDVI не представляется возможным.

Важно отметить, что обнаружение достоверного влияния вида посевов на значения индекса NDVI еще не гарантирует разделения сельскохозяйственных культур между собой по значениям вегетационного индекса. Об этом можно судить по результатам дискриминантного анализа, реализованного путем классификации с обучением в программном комплексе *ENVI*.

Заключение

Из вышеизложенной информации следует, что комплексное использование методов цифровой обработки материалов ДЗЗ, геоинформационного анализа и математико-статистической обработки данных является крайне эффективным для изучения сельскохозяйственной растительности по материалам ДЗЗ, а также для верификации спутниковых снимков с соответствующими полевыми измерениями.

На основе вышеперечисленных методов были проанализированы спектрально-отражательные свойства наиболее типичных для Беларуси культур. Показана возможность изучения видовой структуры посевов озимой и яровой пшеницы, озимой тритикале, озимого рапса, ярового ячменя, кукурузы, сахарной свеклы, картофеля и многолетних трав по спектральным характеристикам спутниковых изображений Landsat-8. Выявлены закономерности сезонного развития сельскохозяйственной растительности и особенности ее спектрального отклика. Для каждого вида культур определены наиболее оптимальные сроки дешифрирования и сформирована электронная библиотека спектральных данных.

Полученные результаты легли в основу оригинальной авторской регионально адаптированной методики геоинформационного картографирования пространственной структуры агроэкосистем Беларуси, позволяющей на основе мультиспектральных спутниковых снимков повысить эффективность автоматизированного распознавания видовой структуры сельскохозяйственных культур с общей точностью выше 85 % (при использовании алгоритма классификации с обучением по методу максимального правдоподобия).

Библиографические ссылки

1. Кравцов СЛ, Голубцов ДВ, Лисова ЕН. Анализ спектральных каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности (по зарубежным публикациям). *Исследование Земли из космоса*. 2013;1:79–91. DOI: 10.7868/S020596141301003X.
2. Терехин ЭА. Оценка пространственно-временных изменений в зеленой фитомассе аграрной растительности с использованием спектрально-отражательных признаков. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021;18(1):138–148. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-138-148.

3. Кринов ЕЛ. *Спектральная отражательная способность природных образований*. Москва: Издательство АН СССР; 1947. 272 с.
4. Кочубей СМ, редактор. *Применение методов дистанционной диагностики в сельском хозяйстве*. Киев: Наукова думка; 1989. 150 с.
5. Asrar G, Fuchs M, Haltfield JL. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*. 1984;76:300–306. DOI: 10.2134/agronj1984.00021962007600020029x.
6. Кондратьев КЯ, Козодеров ВВ, Федченко ПП. *Аэрокосмические исследования почв и растительности*. Ленинград: Гидрометеониздат; 1986. 232 с.
7. Станкевич СА, Пестова ИА. Картирование изменений растительного покрова Киевской агломерации на основе долговременных временных рядов многоспектральных космических снимков Landsat. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014;11(2):187–196.
8. Белорустцева ЕВ. Мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий Нечерноземной зоны Российской Федерации. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012;9(1):57–64.
9. Повх ВИ, Гарбузов ГП, Шляхова ЛА. Космический мониторинг сельскохозяйственных угодий Ростовской области. *Исследование Земли из космоса*. 2006;3:89–96.
10. Мышлякоў С. Картаграфаванне пасаваў сельскагаспадарчых культур па касмічных здымках для ўнутрыгаспадарчага землеўпарадкавання і аўтарскага нагляду. *Земля Беларусі*. 2012;1:52–56.
11. Гурова ТА, Клименко ДН, Луговская ОС, Елкин ОВ, Козик ВИ. Спектральные характеристики сортов пшеницы при биотическом стрессе. *Достижения науки и техники АПК*. 2019;33(10):71–75. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-11016.
12. Труфляк ЕВ, Скубиев СИ, Цыбулевский ВВ. Дистанционный мониторинг посевов риса и алгоритм выявления неоднородностей. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019;16(3):110–124. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-110-124.
13. Давидович ЮС. Изменение спектральной отражательной способности рапса в зависимости от степени увлажнения почв. В: *Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»; 16–20 ноября 2020 г.; Москва, Россия*. Москва: ИКИ РАН; 2020. с. 313. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
14. Захарян ЮГ, Янко ЮГ. Геоestatистика в сельскохозяйственной науке с учетом глобального изменения климата при стратегии планирования агротехнологических решений. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022;19(2):70–78. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-70-78.
15. Casa R, Castrignanò A. Analysis of spatial relationships between soil and crop variables in a durum wheat field using a multivariate geostatistical approach. *European Journal of Agronomy*. 2008;28(3):331–342. DOI: 10.1016/j.eja.2007.10.001.
16. Sidorova VA, Zhukovskii EE, Lekomtsev PV, Vakushev VV. Geostatistical analysis of the soil and crop parameters in a field experiment on precision agriculture. *Eurasian Soil Science*. 2012;45(8):783–792. DOI: 10.1134/S1064229312080066.
17. Yang Chenghai, Everitt JH. Using spectral distance, spectral angle and plant abundance derived from hyperspectral imagery to characterize crop yield variation. *Precision Agriculture*. 2012;13(1):62–75. DOI: 10.1007/s11119-011-9248-z.
18. Кочуб ЕВ, Топаз АА. Анализ методов обработки материалов дистанционного зондирования Земли. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F*. 2012;16:132–140.
19. Волкова ПА, Шипунов АБ. Статистическая обработка данных в учебно-исследовательских работах. Багринцева ЮА, Каплан БМ, Сиднева ЕН, редакторы. Москва: Экспресс; 2008. 60 с.
20. Чертко НК, Карпиченко АА. Математические методы в географии. Акулич НФ, редактор. Минск: БГУ; 2009. 199 с.
21. Захарян ЮГ, Комаров АА. Перспективы использования геоestatистики для анализа состояния растений по данным дистанционного зондирования Земли. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019;16(3):140–148. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-140-148.

References

1. Kravtsov SL, Golubtsov DV, Lisova AM. Optimal spectral channels of aerospace equipment for vegetation remote sensing monitoring (foreign publications review by the problem). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2013;1:79–91. Russian. DOI: 10.7868/S020596141301003X.
2. Terekhin EA. Assessment the spatial-temporal changes in green phytomass of agricultural vegetation using spectral response. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2021;18(1):138–148. Russian. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-138-148.
3. Krinov EL. *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnykh obrazovaniy* [Spectral reflectivity of natural formations]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1947. 272 p. Russian.
4. Kochubey SM, editor. *Primenenie metodov distantsionnoi diagnostiki v sel'skom khozyaistve* [Application of remote diagnostics methods in agriculture]. Kyiv: Naukova dumka; 1989. 150 p. Russian.
5. Asrar G, Fuchs M, Haltfield JL. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*. 1984;76:300–306. DOI: 10.2134/agronj1984.00021962007600020029x.
6. Kondratyev KYa, Kozoderov VV, Fedchenko PP. *Aerokosmicheskie issledovaniya pochvy i rastitel'nosti* [Aerospace studies of soils and vegetation]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1986. 232 p. Russian.
7. Stankevich SA, Piestova IA. Vegetation cover changes mapping within Kiev metropolis agglomeration using long-term time series of Landsat multispectral satellite imagery. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2014;11(2):187–196. Russian.
8. Belorustseva EV. [Monitoring of economic use of the agricultural designation lands in the Non-Chernozem Soil Zone of the Russian Federation]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2012;9(1):57–64. Russian.
9. Povkh VI, Garbuzov GP, Shlyakhova LA. Agricultural lands monitoring for Rostov Region from space. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2006;3:89–96. Russian.
10. Myshliakov S. Mapping of crops using satellite images for land management and designer's supervision. *Zemlya Belarusi*. 2012;1:52–56. Belarusian.

11. Gurova TA, Klimenko DN, Lugovskaya OS, Elkin OV, Kozik VI. Spectral characteristics of wheat varieties under biotic stress. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2019;33(10):71–75. Russian. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-11016.
12. Truflyak EV, Skubiev SI, Tsybulevsky VV. Rice crops remote monitoring and heterogeneities detection algorithm. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2019;16(3):110–124. Russian. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-110-124.
13. Davidovich YS. [Change in the spectral reflectivity of rapeseed depending on the degree of soil moisture]. In: *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii «Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»; 16–20 noyabrya 2020 g.; Moskva, Rossiya* [Materials of the 18th All-Russian open conference «Modern problems of remote sensing of the Earth from space»; 2020 November 16–20; Moscow, Russia]. Moscow: Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences; 2020. p. 313. Russian. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
14. Zakharyan YG, Yanko YG. Geostatistics in agricultural science taking into account global climate change in the strategy of regulating agrotechnological solutions. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2022;19(2):70–78. Russian. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-70-78.
15. Casa R, Castrignanò A. Analysis of spatial relationships between soil and crop variables in a durum wheat field using a multivariate geostatistical approach. *European Journal of Agronomy*. 2008;28(3):331–342. DOI: 10.1016/j.eja.2007.10.001.
16. Sidorova VA, Zhukovskii EE, Lekomtsev PV, Vakushev VV. Geostatistical analysis of the soil and crop parameters in a field experiment on precision agriculture. *Eurasian Soil Science*. 2012;45(8):783–792. DOI: 10.1134/S1064229312080066.
17. Yang Chenghai, Everitt JH. Using spectral distance, spectral angle and plant abundance derived from hyperspectral imagery to characterize crop yield variation. *Precision Agriculture*. 2012;13(1):62–75. DOI: 10.1007/s11119-011-9248-z.
18. Kochub EV, Topaz AA. Analysis of the methods of processing of the materials from Earth remote sensing. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F*. 2012;16:132–140. Russian.
19. Volkova PA, Shipunov AB. *Statisticheskaya obrabotka dannykh v uchebno-issledovatel'skikh rabotakh* [Statistical processing of data in education and research]. Bagrintseva YuA, Kaplan BM, Sidneva EN, editors. Moscow: Ecopress; 2008. 60 p. Russian.
20. Chertko NK, Karpichenko AA. *Matematicheskie metody v geografii* [Mathematical methods in geography]. Akulich NF, editor. Minsk: Belarusian State University; 2009. 199 p. Russian.
21. Zakharyan YG, Komarov AA. Prospects for geostatistics application for analyzing plant state on the basis of remote sensing data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2019;16(3):140–148. Russian. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-140-148.

Получена 26.04.2022 / исправлена 27.06.2022 / принята 04.07.2022.
Received 26.04.2022 / revised 27.06.2022 / accepted 04.07.2022.