



ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО/GENERAL AGRICULTURE AND CROP PRODUCTION

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.10> EDN: SBNPUQ

СОРТОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ С БПЛА

Научная статья

Якубайлик О.Э.^{1,*}, Трубников Ю.Н.²¹ORCID : 0000-0002-2668-4776;¹ Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Российская Федерация² Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (oleg[at]icm.krasn.ru)

Предложена: 24.08.2026; Принята: 24.09.2026; Опубликовано: 19.10.2026

Аннотация

Предметом исследований является возможность применения мультиспектральной съемки с БПЛА для сортовой диагностики яровой пшеницы. Объектами исследований служили сорта яровой пшеницы, возделываемые на сортоиспытательных участках, расположенных в различных агроэкологических условиях: раннеспелый сорт Арабелла, среднеспелые сорта Акцент и Алтайская 75. Посредством мультиспектральной камеры MicaSense RedEdge-MX, установленной на БПЛА DJI Matrice 350 RTK, получены данные вегетационных индексов NDVI, NDRE, GCI и VARI. Установлено, что наиболее контрастные различия между сортами проявляются в фазу «начало созревания», что объясняется различной спектральной отражательной способностью посевов в зависимости от группы спелости культуры. Выявлена высокая корреляция между вегетационными индексами и показателями N-тестера ($r = 0,61-0,71$), что указывает на сопряженность результатов дистанционного и наземного мониторинга агроценозов. Обосновывается положение о том, что дистанционное зондирование может заменить или дополнить полевую апробацию посевов.

Ключевые слова: сортовая диагностика, яровая пшеница, вегетационные индексы, мультиспектральная съемка, сортоиспытательные участки.

VARIETY DIAGNOSIS OF SPRING WHEAT BASED ON MULTISPECTRAL IMAGING USING UAVS

Research article

Yakubailik O.E.^{1,*}, Trubnikov Y.N.²¹ORCID : 0000-0002-2668-4776;¹ Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation² Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (oleg[at]icm.krasn.ru)

Suggested: 24.08.2026; Accepted: 24.09.2026; Published: 19.10.2026

Abstract

The subject of the research is the possibility of using multispectral imaging with UAVs for variety diagnosis of spring wheat. The study focused on spring wheat varieties grown on variety testing plots located in various agro-ecological conditions: the early-maturing variety Arabella, and the medium-maturing varieties Accent and Altai 75. Data on the vegetation indices NDVI, NDRE, GCI and VARI were obtained using a MicaSense RedEdge-MX multispectral camera mounted on a DJI Matrice 350 RTK UAV. It was found that the most significant differences between the varieties were evident during the 'early ripening' phase, which is explained by the varying spectral reflectance of the crops depending on their maturity group. A high correlation was found between the vegetation indices and the N-tester readings ($r = 0.61-0.71$), indicating a correlation between the results of remote and ground-based monitoring of agroecosystems. The statement that remote sensing can replace or supplement field assessment of crops is substantiated.

Keywords: variety diagnosis, spring wheat, vegetation indices, multispectral imaging, variety testing plots.

Введение

Яровая пшеница является одной из ведущих зерновых культур в структуре посевных площадей Приенисейской Сибири. Увеличение производства зерна высокого качества невозможно без совершенствования системы сортового контроля и семеноводства [1]. Традиционные методы сортовой идентификации, основанные на морфологическом анализе растений в полевых условиях, трудоемки, субъективны и не позволяют оперативно оценивать сортовую структуру посевов на больших площадях. Развитие технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием мультиспектральной съемки, открывает новые возможности для решения этой задачи [2]. Вегетационные индексы (ВИ), рассчитываемые на основе уникальной спектральной отражательной способности посевов, позволяют объективно оценивать фотосинтетический потенциал растений, их физиологическое состояние и, как следствие, идентифицировать состав растительного покрова [3], [4], распознавать сельскохозяйственные культуры

[5], [6], [7], давать общую оценку качеству семян, что в итоге, формирует информационную основу для адаптивно-ландшафтного [8] и цифрового земледелия [9].

Агроэкологические условия земледельческой зоны Приенисейской Сибири — от подтаежных районов на севере до степных на юге, характеризуются значительным разнообразием, что обуславливает необходимость подбора адаптивных сортов. Ежегодная сортовая оценка (апробация) посевов, в соответствии с требованиями законодательства [10], проводится специалистами «Россельхозцентра». Только по Красноярскому краю в 2025 г было апробировано более 260 тыс. га посевов в 339 хозяйствах. Большие площади апробации предопределяют необходимость разработки и внедрения более производительных и объективных методов сортовой диагностики, что и определяет актуальность проводимых исследований. Востребованность результатов работы обосновывается также необходимостью получения статистических данных о площади культур и сортов, мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур. Если распознавание посевов на уровне культуры освоено достаточно полно [1], [7], [11], то сортовая дифференциация остается малоизученной темой.

Цель настоящего исследования — оценка возможности применения мультиспектральной съемки с БПЛА для дистанционной диагностики сортовых различий яровой пшеницы.

Методы и принципы исследования

Исследования проведены на государственных сортоиспытательных участках, расположенных в трех природно-климатических зонах Приенисейской Сибири: Казачинский ГСУ (подтаежная зона), Уярский ГСУ (лесостепная зона) и Бейский ГСУ (степная зона). Объектами исследований служили три сорта яровой мягкой пшеницы различных групп спелости: Арабелла (раннеспелый, вегетационный период 77–86 дней), Акцент (среднеспелый, 85–100 дней) и Алтайская 75 (среднеспелый, 79–95 дней).

Мультиспектральная съемка проведена с использованием камеры MicaSense RedEdge-MX, оснащенной пятью независимыми спектральными каналами: синим (475 нм), зеленым (560 нм), красным (668 нм), красным краем (717 нм) и ближним инфракрасным (842 нм). Камера с датчиком освещенности DLS2 устанавливалась на платформы БПЛА DJI Matrice 210 V2 и DJI Matrice 350 RTK. Съемка велась с высоты 120 м, что обеспечивало пространственное разрешение ~8 см/пикс. по фазам вегетации: кущение, выход в трубку, колошение, начало созревания, полное созревание. Для каждого сорта рассчитаны четыре вегетационных индекса (ВИ): NDVI, NDRE, GCI, VARI. Синхронно с мультиспектральной съемкой проводились наземные измерения относительного содержания хлорофилла в растениях с использованием N-тестера SPAD-502. Измерения выполнялись на 20 растениях с каждой делянки.

Основные результаты

На рисунке 1 отображена визуализация вегетационных индексов NDVI, NDRE, GCI и VARI для отличающихся по скороспелости сортов яровой пшеницы в фазу «начало созревания» при различных агроэкологических условиях.

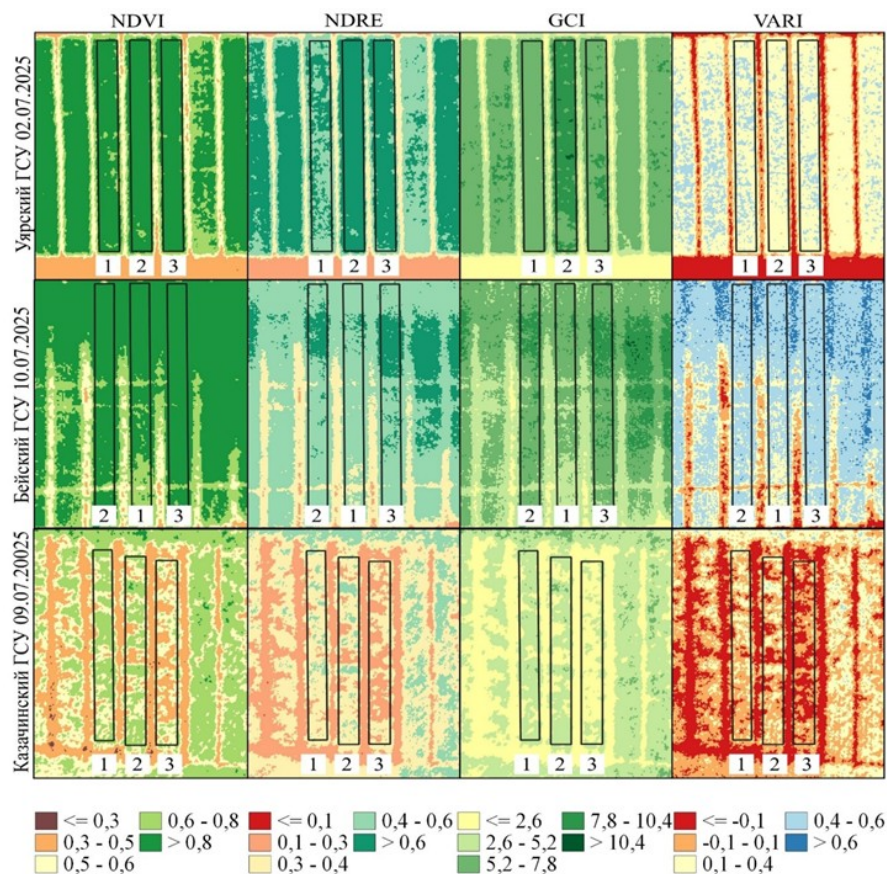


Рисунок 1 - Визуализация вегетационных индексов NDVI, NDRE, GCI и VARI для различных по скороспелости сортов яровой пшеницы на Казачинском (А), Уярском (Б) и Бейском (В) ГСУ:

1 – Арабелла; 2 – Акцент; 3 – Алтайская 75

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.10.1>

Установлены межсортные различия как в пределах одного ГСУ, так и при их сравнении с другими ГСУ. Самый северный объект исследования (Казачинский ГСУ) имеет самые низкие значения всех четырех ВИ. Напротив, самый южный объект (Бейский ГСУ) имеет самые высокие значения ВИ для всех сортов пшеницы, что объясняется более благоприятной тепло- и влагообеспеченностью в степной зоне по сравнению с подтаежной.

Дана оценка информативности вегетационных индексов для сортовой дифференциации посевов яровой пшеницы в зависимости от зональных агроэкологических условий (рисунок 2).

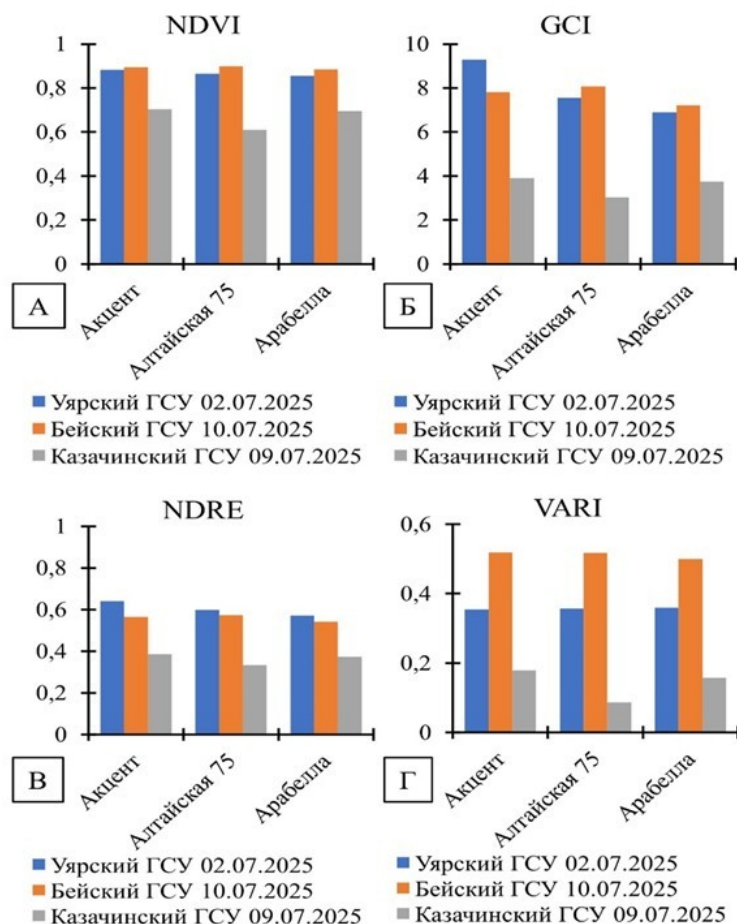


Рисунок 2 - Информативность вегетационных индексов сортовых посевов яровой пшеницы в зависимости от зональных агроэкологических условий:

A – NDVI; Б – NDRE; В – GCI; Г – VARI

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.10.2>

Обсуждение

Установлено, что различия показателей ВИ обуславливались, в первую очередь, сортовыми морфофизиологическими особенностями пшеницы, определяющими группу скороспелости культуры. Сорт Акцент Уярского ГСУ имеет практически одинаковые значения NDVI с Бейским ГСУ и лидирует по всем остальным представленным значениям ВИ, кроме индекса VARI, по которому самые высокие значения этот сорт показывает на Бейском ГСУ. Сорта Алтайская 75 и Арабелла Бейского ГСУ имеют самые высокие значения вегетационных индексов, кроме NDRE. Все три сорта, произрастающих на Казачинском ГСУ, показали самые низкие значения рассматриваемых ВИ. Показанные особенности объясняются фактором географического расположения объектов исследования с сопутствующими агроэкологическими условиями.

Анализ сезонной динамики вегетационных индексов показал, что максимальные показатели ВИ по всем сортам пшеницы отмечаются в ранние сроки вегетации (фазы кущения — выхода в трубку). В дальнейшем, по мере созревания растений, происходит снижение фотосинтетического потенциала и, как следствие, уменьшение значений ВИ. Наиболее отчетливая сортовая дифференциация пшеницы проявлялась в фазу «начало созревания» (таблица 1). В эту фазу различия в скорости старения листьев, а, следовательно, изменения их цветовой гаммы, у сортов разных групп спелости достигают максимума, что отражается на спектральной отражательной способности посевов.

Таблица 1 - Значения вегетационных индексов для сортов яровой пшеницы на разных ГСУ в фазу «начало созревания»

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.10.3>

Сорт	ГСУ	NDVI	NDRE	GCI	VARI
Арабелла	Казачинский	0,52	0,35	0,84	0,28
Арабелла	Уярский	0,68	0,48	1,21	0,38
Арабелла	Бейский	0,74	0,52	1,38	0,44
Акцент	Казачинский	0,58	0,39	0,96	0,31
Акцент	Уярский	0,75	0,54	1,42	0,42



Сорт	ГСУ	NDVI	NDRE	GCI	VARI
Акцент	Бейский	0,76	0,55	1,45	0,48
Алтайская 75	Казачинский	0,55	0,37	0,89	0,29
Алтайская 75	Уярский	0,71	0,50	1,28	0,40
Алтайская 75	Бейский	0,75	0,51	1,36	0,45

На полях ГСУ синхронно с мультиспектральной съемкой проводилась наземная диагностика концентрации хлорофилла с помощью N-тестера SPAD-502. Установлена высокая степень зависимости показателей всех фиксируемых ВИ между собой (таблица 2).

Таблица 2 - Корреляционная матрица вегетационных индексов и N-тестера

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.10.4>

Индексы	NDVI	NDRE	GCI	VARI	N-тестер
NDVI	1,00	0,94	0,91	0,82	0,68
NDRE	0,94	1,00	0,92	0,78	0,71
GCI	0,91	0,92	1,00	0,74	0,65
VARI	0,82	0,78	0,74	1,00	0,59
N-тестер	0,68	0,71	0,65	0,59	1,00

Выявленные зональные различия абсолютных значений ВИ обусловлены комплексом агроэкологических факторов: температурным режимом, влагообеспеченностью, продолжительностью вегетационного периода.

Сравнительный анализ информативности различных ВИ показал, что NDVI и NDRE являются наиболее универсальными для задач сортовой дифференциации.

Заключение

Исследования, проведенные на Казачинском, Уярском и Бейском ГСУ, находящихся в разных агроэкологических условиях Приенисейской Сибири, показали возможность применения мультиспектральной съемки с БПЛА в сочетании с наземным мониторингом для сортового дифференцирования яровой пшеницы. Полученные результаты могут служить основой для разработки методических рекомендаций по дистанционному сортовому контролю в условиях Приенисейской Сибири.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Асадуллаев Р.Г. Технология интеллектуального распознавания сельскохозяйственных культур нейронной сетью по мультиспектральным многовременным данным дистанционного Земли / Р.Г. Асадуллаев, Н.И. Кузьменко // Экономика. Информатика. — 2022. — № 49 (1). — С. 159–168. — DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-1-159-168
2. Якушев В.П. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева / В.П. Якушев, Е.В. Канаш, Д.В. Рушаков и др. // Сельскохозяйственная биология. — 2022. — № 57 (1). — С. 98–112. — DOI: 10.15389/agrobiology.2022.1.98rus
3. Гопп Н.В. Оценка влияния мезорельефа склона на пространственную изменчивость свойств почвы и характеристики растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли / Н.В. Гопп, Т.В. Нечаева, О.А. Савенков и др. // Исследование Земли из космоса. — 2016. — № 3. — С. 66–74. — DOI: 10.7868/S0205961416030052
4. Комарова А.Ф. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова / А.Ф. Комарова, И.В. Журавлева, В.М. Яблоков // Принципы экологии. — 2016. — № 1 (17). — С. 42–80.
5. Кузьменко Н.И. Нейронная сеть для классификации сельскохозяйственных культур по многоспектральным данным дистанционного зондирования Земли / Н.И. Кузьменко, Р.Г. Асадуллаев // Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП-2020) сборник материалов VIII Международной научно-технической конференции; под ред. Болгова Е.В. — Белгород: Издательский дом БелГУ, 2019. — С. 352–357.



6. Вилунов С.Д. Проверка алгоритма дистанционной идентификации сельскохозяйственных культур по спутниковым цифровым данным вегетационного индекса NDVI / С.Д. Вилунов, М.М. Чернышов, С.В. Потаракин и др. // Зернобобовые и крупяные культуры. — 2023. — № 4 (48). — С. 140–150. — DOI: 10.24412/2309-348X-2023-4-140-150
7. Чурсин И.Н. Распознавание сельскохозяйственных культур по мультиспектральным космическим снимкам высокого разрешения / И.Н. Чурсин, Д.В. Филиппов, И.Н. Горохова // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2018. — № 11 (173). — С. 22–27. — DOI: 10.14489/vkit.2018.11.pp.022-027
8. Кирюшин В.И. Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов / В.И. Кирюшин. — Москва: КолосС, 2011. — 443 с.
9. Якушев В.П. Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии / В.П. Якушев, В.В. Якушев, Д.А. Матвеев // Земледелие. — 2020. — № 1. — С. 33–37. — DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10109
10. Российская Федерация. Законы. О семеноводстве: Федер. закон: [от 30.12.2021 № 454-ФЗ] // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=602709845> (дата обращения: 24.08.2026)
11. Кононов В.М. Алгоритм подготовки мультиспектральных спутниковых данных для задачи классификации сельскохозяйственных культур / В.М. Кононов, Р.Г. Асадуллаев, Н.И. Кузьменко // Научный результат. Информационные технологии. — 2020. — № 5 (2). — С. 18–24. — DOI: 10.18413/2518-1092-2020-5-2-0-3

Список литературы на английском языке / References in English

1. Asadullaev R.G. Texnologiya intellektual'nogo raspoznavaniya sel'skoxozyajstvenny'x kul'tur nejronnoj set'yu po mul'tispektral'ny'm mnogovremenny'm dannym distancionnogo Zemli [Technology Of Intelligent Agricultural Crops Recognition By Neural Network Based On Multispectral Multitemporal Earth Remote Sensing Data] / R.G. Asadullaev, N.I. Kuz'menko // Economics. Information Technologies. — 2022. — № 49 (1). — P. 159–168. — DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-1-159-168 [in Russian]
2. Yakushev V.P. Korrelyacionny'e zavisimosti mezhdu vegetacionny'mi indeksami, urozhajem zerna i opticheskimi karakteristikami list'ev pshenicy' pri raznom soderzhanii v pochve azota i gustote poseva [Correlation Dependences Between Crop Reflection Indices, Grain Yield And Optical Characteristics Of Wheat Leaves At Different Nitrogen Level And Seeding Density] / V.P. Yakushev, E.V. Kanash, D.V. Rusakov et al. // Agricultural Biology. — 2022. — № 57 (1). — P. 98–112. — DOI: 10.15389/agrobiology.2022.1.98rus [in Russian]
3. Gopp N.V. Ocenka vliyaniya mezorel'efa sklona na prostranstvennyuyu izmenchivost' svoystv pochvy' i karakteristiki rastitel'nogo pokrova po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli [Effect of Mesorelief of the Slope on the Spatial Variability of Soil Properties and Vegetation Index According to Remote Sensing Data] / N.V. Gopp, T.V. Nechaeva, O.A. Savenkov et al. // Earth Observation From Space. — 2016. — № 3. — P. 66–74. — DOI: 10.7868/S0205961416030052 [in Russian]
4. Komarova A.F. Otkryty'e mul'tispektral'ny'e dannye i osnovny'e metody' distancionnogo zondirovaniya v izuchenii rastitel'nogo pokrova [Open-Source Multispectral Remote Sensing Data For The Investigation Of Plant Communities] / A.F. Komarova, I.V. Zhuravleva, V.M. Yablokov // Principles of the Ecology. — 2016. — № 1 (17). — P. 42–80. [in Russian]
5. Kuzmenko N.I. Neironnaya set dlya klassifikatsii selskoxozyajstvennykh kultur po mnogospektralnim dannim distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Neural Network For The Crop Classification On The Multispectral Earth Remote Sensing Data] / N.I. Kuzmenko, R.G. Asadullaev // Information Technologies In Science, Education And Production (ITSEP-2020) Collection of works of the VIII International Conference on Science and Technology; edited by Bolgova Ye.V. — Belgorod: BelSU Publishing House, 2019. — P. 352–357. [in Russian]
6. Vilyunov S.D. Proverka algoritma distancionnoj identifikatsii sel'skoxozyajstvenny'x kul'tur po sputnikovy'm cifrovym dannym vegetacionnogo indeksa NDVI [Validation Of The Algorithm For Remote Crop Identification Using Satellite Digital Data Of Vegetation Index NDVI] / S.D. Vilyunov, M.M. Cherny'shov, S.V. Potarakin et al. // Legumes And Groat Crops. — 2023. — № 4 (48). — P. 140–150. — DOI: 10.24412/2309-348X-2023-4-140-150 [in Russian]
7. Chursin I.N. Raspoznavanie sel'skoxozyajstvenny'x kul'tur po mul'tispektral'ny'm kosmicheskim snimkam vy'sokogo razresheniya [Practice In The Recognition Of Crops On Multispectral High-Resolution Satellite Imagery] / I.N. Chursin, D.V. Filippov, I.N. Goroxova // Bulletin Of Computer And Information Technologies. — 2018. — № 11 (173). — P. 22–27. — DOI: 10.14489/vkit.2018.11.pp.022-027 [in Russian]
8. Kiryushin V.I. Teoriya adaptivno-landshaftnogo zemledeliya i proektirovanie agrolandshaftov [Theory of Adaptive Landscape Farming and Design of Agricultural Landscapes] / V.I. Kiryushin. — Moscow: KolosS, 2011. — 443 p. [in Russian]
9. Yakushev V.P. Intellektual'ny'e sistemy' podderzhki tekhnologicheskix reshenij v tochnom zemledelii [Intelligent Systems For Technology Decision Support In Precision Agriculture] / V.P. Yakushev, V.V. Yakushev, D.A. Matveenko // Farming. — 2020. — № 1. — P. 33–37. — DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10109 [in Russian]
10. Rossiiskaya Federatsiya. Zakoni. O semenovodstve [Russian Federation. Laws. On Seed Production]: Federal Law: [No. 454-FZ of December 30, 2021] // Ofitsialnii internet-portal pravovoi informatsii [Official Internet Portal of Legal Information]. — URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=602709845> (accessed: 24.08.2026) [in Russian]
11. Kononov V.M. Algoritm podgotovki mul'tispektral'ny'x sputnikovy'x dannyx dlya zadachi klassifikatsii sel'skoxozyajstvenny'x kul'tur [Algorithm Of Multi-Spectral Satellite Data Preparation For Agricultural Crop Classification] /



V.M. Kononov, R.G. Asadullaev, N.I. Kuz'menko // Research result. Information technologies. — 2020. — № 5 (2). — P. 18–24. — DOI: 10.18413/2518-1092-2020-5-2-0-3 [in Russian]