

УДК 004.89

DOI 10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no2-p48

EDN [ХТКJHQ](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no2-p48)

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Г. А. САИТОВА • Э. Р. ГАБДУЛЛИНА

Аннотация. В статье решается задача разработки экспресс-методики определения проективного покрытия сельскохозяйственных культур с помощью технологий дистанционного мониторинга, основанной на измерении спектральных характеристик растений средствами бесконтактной съемки со спутников и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Для решения задачи выполняется построение цифровых карт полей по спутниковым снимкам для выявления зон неоднородностей. Проводится мониторинг проблемных участков полей с помощью БПЛА. Проводится предварительная оценка всхожести посевов для принятия дальнейших решений агрономами. Приведены примеры применения методики для оценки состояния озимых зерновых культур в весеннее и осеннее время: представлены эксперименты, связанные с определением количества растений на учетных площадях; построения цифровых карт с расчетом вегетационного индекса NDVI. На основе статистического анализа данных по цифровым картам определяются закономерности для поддержки принятия решений по управлению продуктивностью посевов с использованием технологий дистанционного мониторинга.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг; БПЛА; NDVI; цифровые карты; проективное покрытие; всхожесть; принятие решений.

ВВЕДЕНИЕ

В отрасли сельского хозяйства существует проблемы получения сельхозпроизводителями оперативной и достоверной информации о состоянии посевов (в особенности на больших земельных площадях) и своевременного и рационального принятия решений по управлению продуктивностью посевов.

Решение этих проблем требует внедрения цифровых технологий, которые включают применение технологий точного земледелия, таких как: дистанционный мониторинг различных сельскохозяйственных объектов, точный посев, «умные» системы орошения и внесения удобрений, роботизированные и интеллектуальные транспортные средства. Технологии точного земледелия основываются на применении математических моделей, интеллектуальных методов и алгоритмов, прикладных методик, предназначенных для анализа мультиспектральных изображений, расчета вегетационных индексов, идентификации проблемных зон посевов, а также для неинвазивной дифференциации сорняков на фоне сельхозкультур, что дает возможность сформировать основу принятия решений при управлении продуктивностью посевов.

Своевременное принятие решений по агротехническим мероприятиям (пересев культуры, дифференцированное внесение удобрений, прополка сорняков, внесение гербицидов и средств защиты растений) позволяет повысить урожайность сельскохозяйственных культур, избежать перерасхода ресурсов (сэкономить на количестве вносимых удобрений, гербицидов), повысить качество сельхозпродукции и снизить нагрузку на окружающую среду.

В настоящее время российскими и зарубежными учеными [1–5] разрабатываются информационно-аналитические и интеллектуальные системы, предназначенные для эффективной работы агропредприятий. Согласно аналитическим данным, мировой рынок точного земледелия достигнет к 2026 г. 14.1 млрд долларов при среднегодовом темпе роста 12.7 %. Этот высокий рост в основном связан с растущим использованием цифровых технологий, систем дистанционного зондирования и использования геоинформационных систем для мониторинга

посевов, которые собирают данные в режиме реального времени и анализируют огромные наборы геопространственных данных.

Технологии точного земледелия особенно активно развиваются в таких странах, как Германия, Египет, Китай. В Российской Федерации эти технологии внедряются в Белгородской области, Краснодарском крае, Московской области и Республиках Татарстан и Башкортостан. По прогнозам аналитиков, рынок точного земледелия / сельского хозяйства будет продвигаться как один из самых быстрорастущих, прибыльных и перспективных, который позволяет агропредприятиям увеличить доход до 20–30 %.

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПОСЕВОВ

Технологии дистанционного мониторинга основаны на регистрации, измерении, обработке, анализе и представлении цифровых данных о почве, растительности и внешней среде, полученных средствами бесконтактной съемки со спутников, авиационной техники, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и с наземных сенсорных датчиков.

По полученным аэрофотоснимкам создаются цифровые карты полей в виде ортофотопланов, которые представляют собой план-карты местности на точной геодезической основе и одновременно карты состояния посевов, позволяющие оценивать степень однородности полей, а также сформировать рекомендации для принятия решений по управлению продуктивностью посевов [6–8].

Основой технологии дистанционного зондирования является метод, основанный на интерпретации измерения электромагнитного излучения в широком диапазоне электромагнитного спектра, которое отражается либо излучается объектом. Характерным признаком растительности и её состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями при разных длинах волн. На основе этих данных можно рассчитывать различные вегетационные и почвенные индексы, которые обеспечивают широкие возможности для определения качественных и количественных показателей, характеризующих агроэкосистемы. Наиболее известным из них является нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), характеризующий состояние посевов [9–15].

При анализе развития растительности посевных площадей остро необходимы сведения об их биофизических параметрах, в том числе о проективном покрытии зелёной фитомассой, которое определяется как отношение проекции вегетирующих побегов и листьев к общей площади участка земной поверхности и выражается в долях или процентах.

Необходимо определение взаимосвязи между проективным покрытием посевов сельскохозяйственных культур и вегетационным индексом NDVI [16, 17]. Для решения этой задачи разрабатывается методика анализа проективного покрытия посевов и оценки состояния развития сельскохозяйственных культур, позволяющая сформировать рекомендации для поддержки принятия решений по выстраиванию тактики агротехнологических мероприятий в ключевые фазы развития сельхозкультур.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПРОЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ ПОСЕВОВ

Предлагается следующая экспресс-методика определения проективного покрытия сельскохозяйственной культуры, основанной на измерении спектральных характеристик растений с помощью технологий дистанционного мониторинга.

Этап 1 – построение цифровых карт полей по спутниковым снимкам. Проведение анализа построенных цифровых карт полей с целью выявления зон неоднородностей, которые могут быть связаны с отсутствием всходов, затоплениями, появлением сорняков, вредителей и болезней растений. Зоны неоднородностей (проблемных участков) проявляются на цифровых картах в виде изменений цветовой гаммы, отображающей уровни вегетационного индекса NDVI. Эти зоны требуют дополнительного мониторинга, исследования и принятия решений по управлению посевами.

Этап 2 – мониторинг проблемных участков полей с помощью БПЛА. Анализ выделенных участков с использованием разрабатываемого подхода к оценке всхожести посевов.

Этап 3 – предварительная оценка всхожести посевов для принятия дальнейших решений агрономами.

Важным этапом данной методики является разработка подхода к анализу общего размера проективного покрытия посевов сельскохозяйственной культуры (на примере зерновых). Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- провести полевые эксперименты, связанные с определением количества растений на учетных площадях;
- провести настройку параметров аэрофотосъемки посевов для установления базового режима;
- рассчитать площади проективного покрытия растений методами математического моделирования.

Разработка методики определения проективного покрытия сельскохозяйственной культуры проводится в полях сельхозпредприятий Аургазинского и Чишминского районов Республики Башкортостан на примере озимых и яровых зерновых культур. Полевые эксперименты осуществляются с учетом стадий вегетации растений, сортов растений, степени кустистости, высоты растений на стадии развития, нормы высева, критического нормативного значения всхожести, погодных условий. Проводится определение количества растений по учетным площадям в полевых условиях, измерение значений индексов NDVI на различных высотах аэрофотосъемки (например, 20, 50, 150 м) и в разные фенологические фазы развития зерновых культур (всходы, кущение, выход в трубку, колошение, цветение и созревание).

По агротехнологии выращивания зерновых культур в данных сельхозпредприятиях норма высева – 4 млн семян на 1 га, или 400 шт./м². Выживаемость растений по учетным площадям на 1 кв. м к началу вегетации должна быть не менее 150 шт., то есть всхожесть посевов зерновых должна составить не менее 37.5 %. В поле выбираются участки учетных площадей 1 кв. м со средним, высоким и низким уровнями всхожести посевов.

Согласно предложенной методике определения проективного покрытия посевов, на первом этапе по спутниковым снимкам строятся цифровые карты полей озимых посевов. Спутниковые снимки сделаны весной в конце апреля или начале мая: по ним проводится анализ состояния озимых культур после схода снега (рис. 1).



Рис. 1. Спутниковый снимок поля озимой пшеницы со средним индексом NDVI = 0.39

Проводится анализ построенной цифровой карты поля. Согласно стадиям развития зерновых культур время весеннего возобновления вегетации соответствует стадии кущения (код ВВСН соответствует 20–29) – это уровень слабой вегетации. На картах, где палитра индекса

NDVI (0–1) меняется от светло-желтого до темно-зеленого, показано, что поле находится в начальной стадии вегетации, индекс *NDVI* в среднем по полю составляет 0.39. Кроме того, поле имеет некоторые неоднородности со сниженным индексом вегетации (бежевый цвет на карте).

На втором этапе выполняется мониторинг зон неоднородностей полей с помощью БПЛА. Для аэрофотосъемки используется беспилотный летательный аппарат DJI Phantom 4 Multi-spectral; снимки анализируются с помощью пакета Agisoft Metashape – создаются облака точек, цифровые модели местности и ортофотопланы, а также трехмерные модели.

На рис. 2 представлен фрагмент цифровой карты озимых в зонах неоднородностей, построенной по результатам аэрофотосъемки с БПЛА с высоты 100 м. Предварительно на поле были выделены три участка учетных площадей 1 кв. м со средним, высоким и низким уровнями всхожести посевов, ограниченные кольшками. Эти участки на карте указаны метками point1, point2 и point3; они различаются по уровням вегетации NDVI.

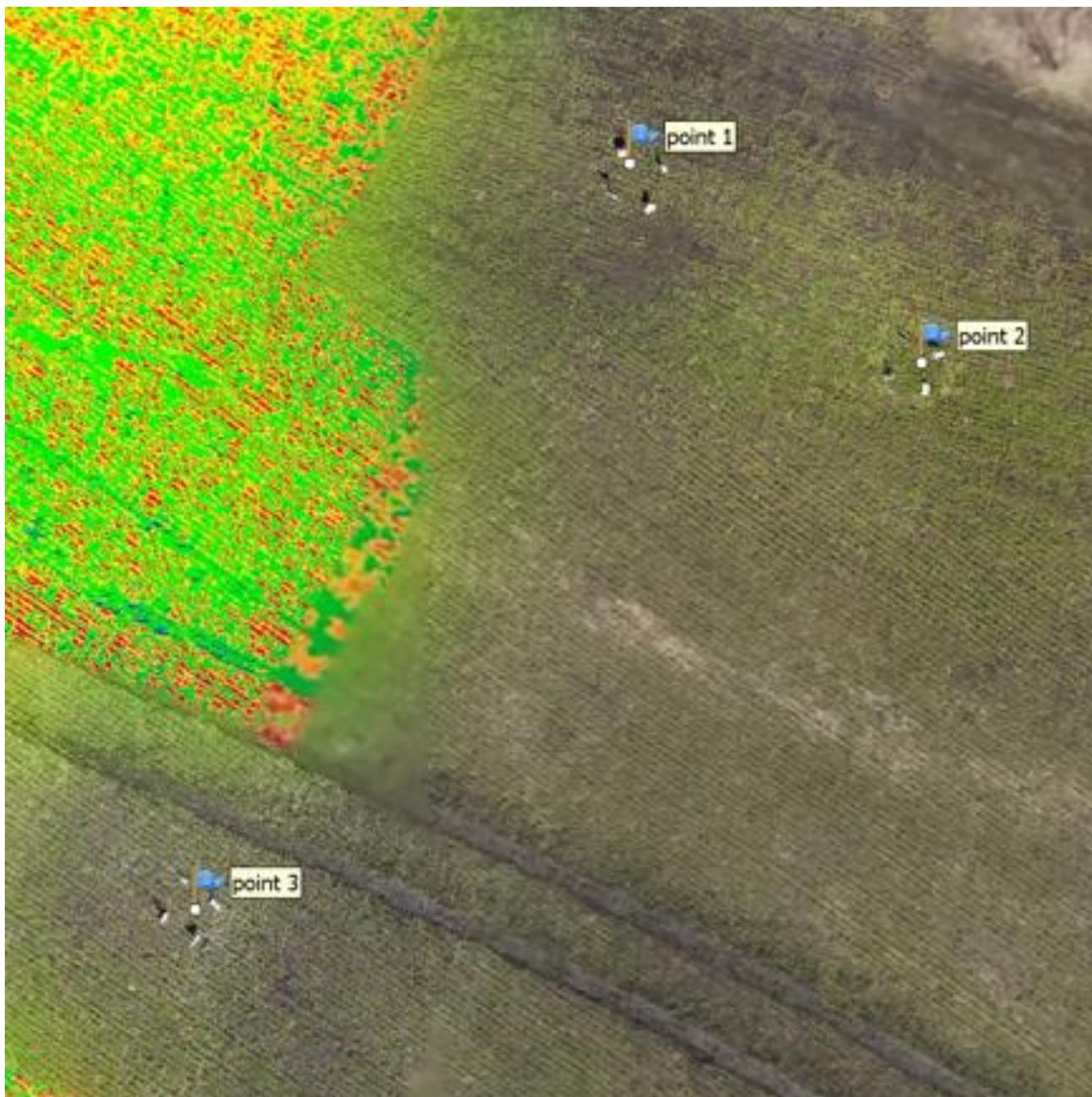
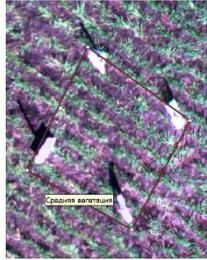
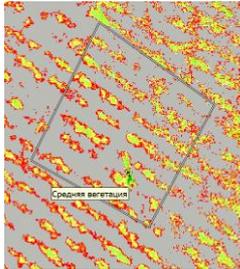
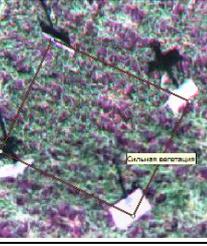
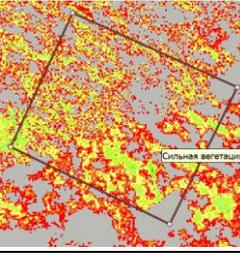
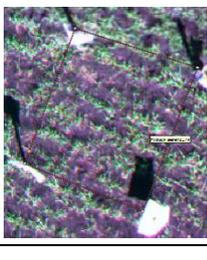
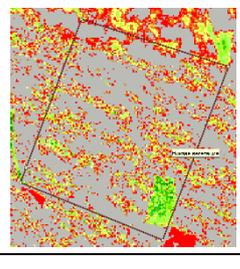


Рис. 2. Аэрофотоснимок учетных площадей поля озимой пшеницы

Статистический анализ данных ортофотопланов в Agisoft Metashape позволяет определить площади проективного покрытия зон выделенных участков с разной всхожестью посевов. Относительная площадь проективного покрытия на цифровой карте определяется как отношение количества пикселей с индексом $NDVI > 0$ к общему количеству пикселей. В табл. 1 показаны результаты проведенных экспериментов по анализу проективного покрытия зон неоднородностей полей.

Таблица 1

Результат анализа проективного покрытия участков с разной всхожестью посевов

Аэрофотоснимок с БПЛА в формате RGB	Аэрофотоснимок с БПЛА с мультиспектральной камеры	Фрагмент цифровой карты	Описание
			Point1 – средний уровень всхожести, 330 шт./м ² NDVI _{ср} = 0.06 Процент проективного покрытия – 67.7 % площади
			Point2 – высокий уровень всхожести, 400 шт./м ² NDVI _{ср} = 0.075 Процент проективного покрытия – 70 %
			Point3 – низкий уровень всхожести, 280 шт./м ² NDVI _{ср} = 0.08 Процент проективного покрытия – 25 % площади

На третьем этапе проводится предварительная оценка всхожести посевов по площади проективного покрытия.

На основе проведенных исследований определяется всхожесть посевов ρ в зависимости от высоты стеблей растений h , площади проективного покрытия S , вида, сорта и фазы развития растений:

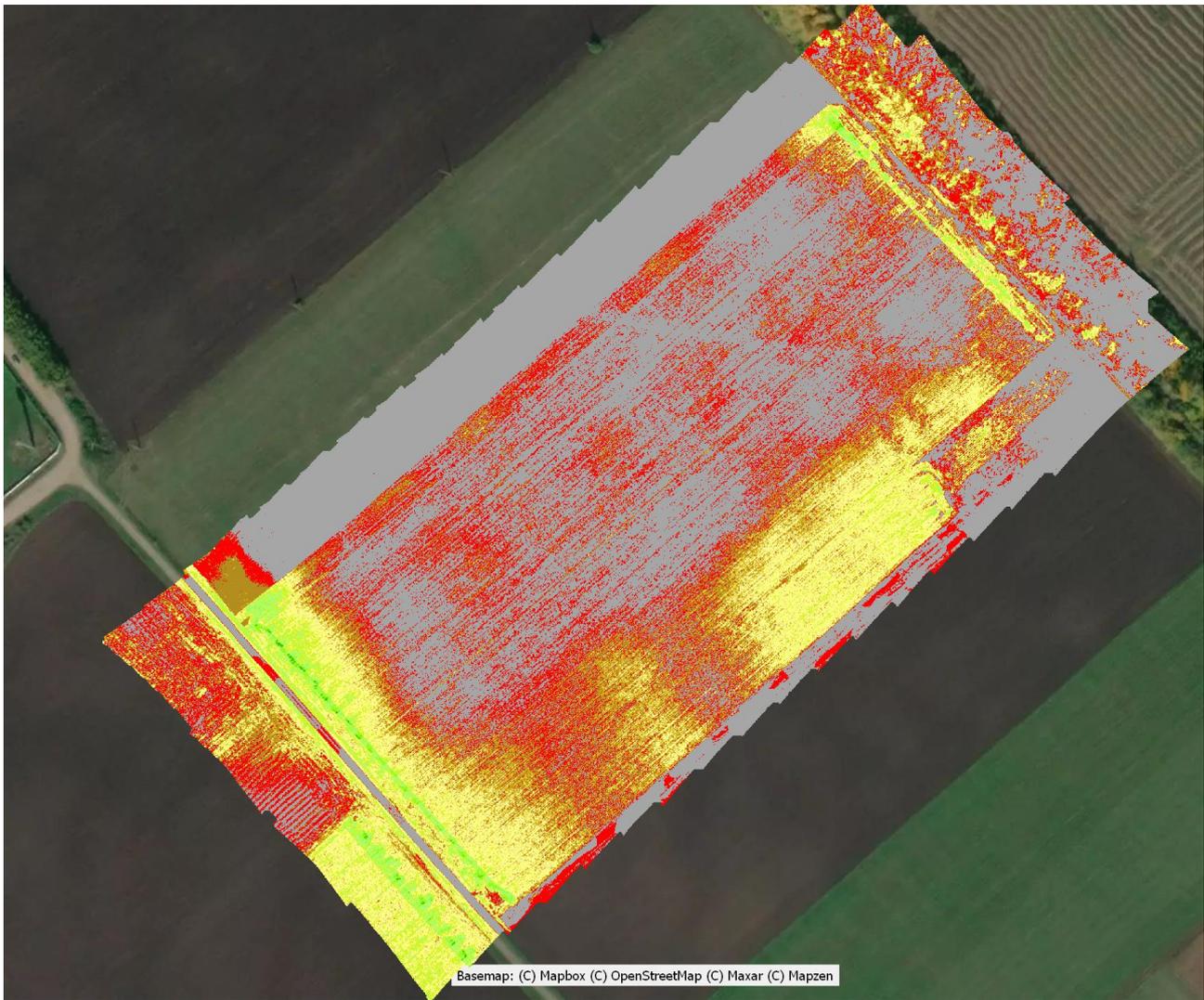
$$\rho = f(h, S, \varphi).$$

Определяются размеры площадей проективного покрытия поля в целом с различными вегетационными индексами, средний индекс NDVI по полю в целом, а также предварительно оценивается всхожесть посевов. Эта важная оперативная информация о состоянии полей предназначена для своевременного принятия решений сельхозпроизводителями.

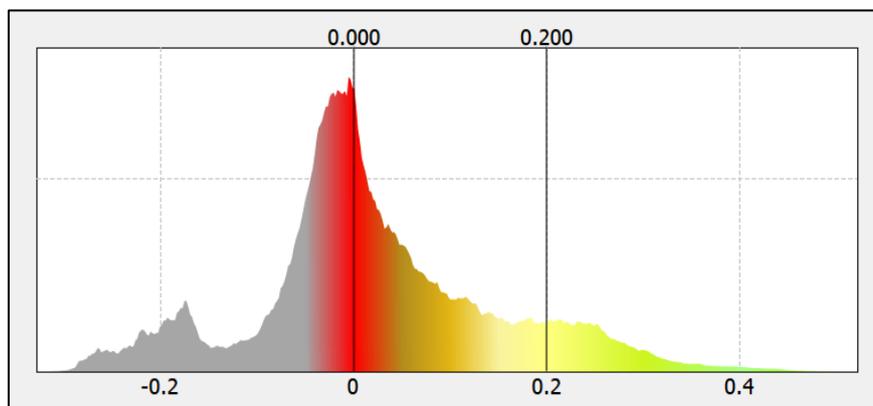
При принятии решения по возделыванию озимых зерновых культур в весеннее время возникает необходимость оценки потерь за зимний период. Для этого необходимо сравнить осенние и весенние индексы проективного покрытия посевов.

Например, на рис. 3 представлены ортофотоплан поля озимой пшеницы площадью 7,6 га, построенный по мультиспектральным аэрофотоснимкам с БПЛА в осеннее время с высоты

100 м, и гистограмма распределения индекса NDVI по цифровой карте. Анализ гистограммы, построенной по спектральным характеристикам растений, показывает, что процент проективного покрытия составляет 51.25 %.



a



б

Рис. 3. Ортофотоплан поля озимой пшеницы с индексом NDVI (*a*) и его гистограмма (*б*)

Данная информация наряду с данными о погодных условиях позволяет сельхозпроизводителям принять решение об агротехнических мероприятиях для дальнейшего полноценного развития растений с целью повышения урожая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе разработанной методики определения проективного покрытия сельскохозяйственной культуры с помощью технологий дистанционного мониторинга, основанных на измерении спектральных характеристик растений, решаются задачи, связанные с определением средней всхожести растений по полю в целом. Использование методики позволит скорректировать агротехнологию (время внесения, дозировку удобрений и средств защиты растений и т. д.) и прогнозировать урожайность полей.

БЛАГОДАРНОСТИ И ПОДДЕРЖКА

Авторы выражают глубокую благодарность директору научно-внедренческого предприятия «БашИнком» В. И. Кузнецову и сотрудникам предприятия за предоставленное оборудование и ценные консультации по технологии возделывания сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- [1] Саитова Г. А., Габдуллина Э. Р., Гайнетдинова Е. К. Информационные технологии при анализе и контроле состояния посевов в сельскохозяйственной отрасли // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022): Тр. Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 18–21 апреля 2022 г. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2022. С. 440–443. EDN KRJSSC. [[Saitova G. A., Gabdullina E. R., Gainetdinova E. K. "Information technologies in the analysis and control of the state of crops in the agricultural sector" // Advanced Information Technologies (PIT 2022): Int. scientific and technical conf., Samara, April 18–21, 2022. Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2022, pp. 440–443. EDN KRJSSC. (In Russian.)]]
- [2] Пугин А. М., Саитова Г. А., Габдуллина Э. Р. Система поддержки принятия решений по управлению процессами точного земледелия с использованием цифровых технологий // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 10-2. С. 226–230. DOI 10.17513/snt.39374. EDN MXPZHВ. [[Pugin A. M., Saitova G. A., Gabdullina E. R. "Decision support system for managing precision farming processes using digital technologies" // Modern Science-Intensive Technologies. 2022. No. 10-2, pp. 226–230. DOI 10.17513/snt.39374. EDN MXPZHВ. (In Russian.)]]
- [3] Даманский Р. В., Кем А. А., Михальцов Е. М., Шмидт А. Н. Процесс цифровизации в растениеводстве // Перспективные направления рационального землепользования и цифровизация земледелия: Сб. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 02–04 октября 2023 г. Курск: Курский федеральный аграрный научный центр, 2023. С. 75–80. EDN AFKURG. [[Damansky R. V., Kem A. A., Mikhaltsov E. M., Schmidt A. N. "The process of digitalization in crop production" // Promising directions of rational land use and digitalization of agriculture: VII Int. scientific-practical. conf., Kursk, October 02–04, 2023. Kursk Federal Agrarian Scientific Center, 2023, pp. 75–80. EDN AFKURG. (In Russian.)]]
- [4] Катаев М. Ю., Пасько О. А., Карташов Е. Ю. Анализ практических возможностей применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2023. № 1 (190). С. 54–62. [[Kataev M. Yu., Pas'ko O. A., Kartashov E. Yu. "Analysis of the practical possibilities of using unmanned aerial vehicles in agriculture" // Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2023. No. 1 (190), pp. 54–62. (In Russian.)]]
- [5] Макарова Е. А., Габдуллина Э. Р., Юсупов М. М., Вагапова Г. Р. Алгоритм интеллектуального анализа региональных данных об инвестиционном риске // СИИТ. 2024. Т. 6. № 1(16). С. 77–86. EDN EBASQU. [[Makarova E. A., Gabdullina E. R., Yusupov M. M., Vagarova G. R. "Algorithm for intelligent analysis of regional data on investment risk" // SIIT. 2024. Vol. 6, No. 1(16), pp. 77–86. EDN EBASQU. (In Russian.)]]
- [6] Вилунов С. Д. и др. Проверка алгоритма дистанционной идентификации сельскохозяйственных культур по спутниковым цифровым данным вегетационного индекса NDVI // Зернобобовые и крупяные культуры. 2023. № 4 (48). С. 140–150. [[Vilyunov S. D. et al. "Testing the algorithm for remote identification of agricultural crops using satellite digital data of the NDVI vegetation index" // Legumes and Cereal Crops. 2023. No. 4 (48), pp. 140–150. (In Russian.)]]
- [7] Елизарова А. В., Саитова Г. А., Момзиков Н. В. Выбор архитектуры нейронной сети для прогнозирования состояния заряда аккумулятора // СИИТ. 2023. Т. 5. № 4(13). С. 123–131. EDN RXSDIA. [[Elizarova A. V., Saitova G. A., Momzikov N. V. "Selecting a neural network architecture for predicting the battery charge state" // SIIT. 2023. Vol. 5, No. 4(13). P. 123–131. EDN RXSDIA. (In Russian.)]]
- [8] Павловская Н. Е. и др. Оценка состояния посевов озимой пшеницы и ярового ячменя по среднему значению NDVI на основе космоснимков // Вестник аграрной науки. 2020. № 6 (87). С. 25–32. [[Pavlovskaya N. E. et al. "Assessment of the condition of winter wheat and spring barley crops by the average NDVI value based on space images" // Bulletin of Agrarian Science. 2020. No. 6 (87), pp. 25–32. (In Russian.)]]
- [9] Кирюхин С. В. и др. Применение вегетационных индексов для сравнительной оценки полевой всхожести сои // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 2 (74).

- C. 367–376. [[Kiryukhin S. V. et al. “Application of vegetation indices for comparative assessment of field germination of soybeans” // News of the Lower Volga Agro-University Complex. 2024. No. 2 (74), pp. 367–376. (In Russian.)]]
- [10] Мартынов М. А., Полухин А. А., Кирюхин С. В. Изучение показателей чистой продуктивности фотосинтеза, нитрогеназной активности и полевой всхожести для различных генотипов сои и их корреляционные связи с основными вегетационными индексами // Вестник НГАУ. 2024. №. 2. С. 120–131. [[Martynov M. A., Polukhin A. A., Kiryukhin S. V. “Study of indicators of net productivity of photosynthesis, nitrogenase activity and field germination for different soybean genotypes and their correlation links with the main vegetative indices” // Bulletin of NSAU. 2024. No. 2. P. 120–131. (In Russian.)]]
- [11] Wei Z., Fang W. “UV-NDVI for real-time crop health monitoring in vertical farms” // Smart Agricultural Technology. 2024. V. 8. Pp. 100462.
- [12] Gaikwad S. et al. “UAV-based crop health analysis using the normalized difference vegetation index (NDVI) method” // International Conference on Smart Computing and Communication. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. Pp. 165–173.
- [13] Indriasari N. et al. “Spatial-temporal dynamics of paddy productivity on the north coast of Java Island, Indonesia based on the principal component analysis of MODIS NDVI anomaly data” // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2024. V. 1291. No. 1. Pp. 012016.
- [14] Shammi S. A., Meng Q. “Use time series NDVI and EVI to develop dynamic crop growth metrics for yield modeling” // Ecological Indicators. 2021. V. 121. Pp. 107124.
- [15] Voitik A. et al. “Comparison of NDVI, NDRE, MSAVI and NDSI indices for early diagnosis of crop problems” // Agricultural Engineering. 2023 V. 27. No. 1. Pp. 47–57.
- [16] Абдушаяева Я. М. Оценка продукционного процесса растений озимой пшеницы по вегетационному индексу // АгроЭко-Инженерия. 2024. №. 2 (119). С. 18–29. [[Abdushaeva Ya. M. “Evaluation of the production process of winter wheat plants by the vegetation index” // Agro-Eco-Engineering. 2024. No. 2 (119), pp. 18–29. (In Russian.)]]
- [17] Shpanev A. M., Smuk V. V. “Effectiveness of differentiated application of herbicides in winter wheat crops” // Russian Agricultural Sciences. 2020. V. 46. Pp. 468–471.

Поступила в редакцию 3 декабря 2024 г.

МЕТАДААННЫЕ / METADATA

Title: Method for determining projective field coverage based on remote monitoring.

Abstract: The article addresses the development of a rapid methodology for determining the projective coverage of agricultural crops using remote monitoring technologies. This method is based on measuring the spectral characteristics of plants through contactless imaging from satellites and unmanned aerial vehicles (UAVs). To achieve this, digital field maps are constructed from satellite images to identify zones of heterogeneity. Problematic field areas are monitored using UAVs. A preliminary assessment of crop emergence is conducted to support further decision-making by agronomists. Examples of applying the methodology to evaluate the condition of winter cereal crops in spring and autumn are provided. These include experiments on determining the number of plants in sample plots and constructing digital maps with calculated NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) values. Based on statistical analysis of data from digital maps, patterns are identified to support decision-making for crop productivity management using remote monitoring technologies.

Key words: Remote monitoring; UAV, NDVI, digital maps, projective coverage; germination; decision making.

Язык статьи / Language: Русский / Russian.

Поддержка/Support: Государственное задание для высших учебных заведений № FEUE-2023-0007.

Об авторах / About the authors:

САИТОВА Гузель Асхатовна

Уфимский университет науки и технологий, Россия.
Доцент каф. технической кибернетики. Дипл. инж.-системотехник (Уфимск. авиац. ин-т, 1986). Канд. техн. наук по системн. анализу, управлению и обработке информации (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2003). Иссл. в обл. многосвязных систем управления сложн. техн. объектами.
E-mail: saitova@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0550-4676>

ГАБДУЛЛИНА Эльвира Риятовна

Уфимский университет науки и технологий, Россия.
Доцент каф. технической кибернетики. Дипл. инж.-системотехник (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1995). Канд. техн. наук по управлению в соц. и экон. системах (там же, 2008). Иссл. в обл. интелл. поддержки принятия управл. решений в многосекторных макроэкономических системах.
E-mail: gabdullina_er@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2421-1510>

SAITOVA Guzel Askhatovna

Ufa University of Science and Technology, Russia.
Assoc. Prof. of the Technical Cybernetics Dept. Dipl. Systems Engineer (Ufa Aviation Institute, 1986). Cand. Tech. Sciences in system analysis, management, and information processing. (Ufa State Aviation Techn. Univ., 2003). Research in the field of multi-connected control systems for complex technical objects.
E-mail: saitova@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0550-4676>

GABDULLINA Elvira Riyatovna

Ufa University of Science and Technology, Russia.
Assoc. Prof. of the Technical Cybernetics Dept. Dipl. Systems Engineer (Ufa State Aviation Technical University, 1995). Cand. Tech. Sciences in management in social and economic systems (ibid, 2008). Research in the field of intellectual support for management decisions in macro-economic systems.
E-mail: gabdullina_er@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2421-1510>