

Научная статья

Original article

УДК 528.854

DOI 10.55186/25880209_2025_9_2_4

**МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ И ОЦЕНКА ИНДЕКСА
NDVI С ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА**

**THE USE OF GIS TECHNOLOGIES IN MANAGEMENT LAND
RESOURCES OF THE FARM**



Лавренникова Ольга Алексеевна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры Землеустройство и лесное дело, ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет» (446442, Россия, п. Усть-Кинельский, ул. Торговая, д. 5), тел. 8(937)1848575, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8603-4671>, olalav21@mail.ru

Иралиева Юлия Сергеевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры Землеустройство и лесное дело, ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет» (446442, Россия, пгт. Усть-Кинельский, ул. Торговая, д. 5), тел. 8(927)7590018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7869-786X>, iralieva@rambler.ru

Крылова Анна Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры Землеустройство и лесное дело, ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет» (446442, Россия, п. Усть-Кинельский, ул. Торговая, д. 5), тел. 8(917) 9528603, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2757-8385>, anna_0106@mail.ru

Лариса Александровна Косых, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая лабораторией селекции и семеноводства зернофуражных культур, Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства имени П.Н. Константинова, (446442, Россия, п. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, д. 76), тел. 7-905-303-76-53, gnu_pniiss@mail.ru

Елена Владимировна Самохвалова, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры Землеустройство и лесное дело, ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет» (446442, Россия, п. Усть-Кинельский, ул. Торговая, д. 5), тел. 8(908)3682580, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1169-519X>, kinel_evs@mail.ru

Olga A. Lavrennikova, candidate of biological sciences, associate professor, associate professor of the department of land management and forestry, Samara state agrarian university (5 Torgovaya st., Ust-Kinelsky, Samara region, 446442 Russia), tel. 8(937)1848575, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8603-4671>, olalav21@mail.ru

Yulia S. Iralieva, candidate of agricultural sciences, associate professor, associate professor of the department of land management and forestry, Samara state agrarian university (5 Torgovaya st., Ust-Kinelsky, Samara region, 446442 Russia), tel. 8(927)7590018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7869-786X>, iralieva@rambler.ru

Anna A. Krylova, candidate of agricultural sciences, associate professor, associate professor of the department of land management and forestry, Samara state agrarian university (5 Torgovaya st., Ust-Kinelsky, Samara region, 446442 Russia), tel. 8(917)9528603, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2757-8385>, anna_0106@mail.ru

Larisa A. Kosykh, candidate of agricultural sciences, head of the laboratory of Breeding and Seed Production of Grain Forage Crops, Volga Region Research Institute of Breeding and Seed Production named after P.N. Konstantinov (76 Shosseynaya st., Ust-Kinelsky, Samara region, 446442 Russia), тел. 7-905-303-76-53, gnu_pniiss@mail.ru

Elena V. Samohvalova, candidate of geographical sciences, associate professor, associate professor of the department of land management and forestry, Samara state agrar-

ian university (5 Torgovaya st., Ust-Kinelsky, Samara region, 446442 Russia), tel. 8(908)3682580, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1169-519X>, kinel_evs@mail.ru

Аннотация. Земли сельскохозяйственного назначения являются стратегическим ресурсом, обеспечивающим продовольственную безопасность населения. Они выступают как основное средство производства в сельском хозяйстве, имеют особый правовой режим и подлежат особой охране, направленной на сохранение их площади, предотвращение развития негативных почвенных процессов и повышение плодородия почв. Нерациональное и нецелевое использование сельскохозяйственных земель ведет к их деградации, которая заключается в утрате плодородия, зарастании, засорении и появлении иных негативных последствий, отрицательно влияющих на возможность получения сельскохозяйственной продукции. От рационального использования земельных ресурсов зависит функционирование всех отраслей сельского хозяйства и экономики в целом, поэтому важнейшей задачей государственного управления земельными ресурсами является организация мониторинга земель [9].

Данная работа направлена на исследование взаимосвязи между состоянием посевов, оцененным с помощью индекса NDVI, и уровнем засоренности, а также на применение полученных данных для разработки рекомендаций по оптимизации использования БПЛА в сельском хозяйстве.

Abstract. Agricultural lands are a strategic resource that ensures the food security of the population. They act as the main means of production in agriculture, have a special legal regime and are subject to special protection aimed at preserving their area, preventing the development of negative soil processes and increasing soil fertility. Irrational and inappropriate use of agricultural lands leads to their degradation, which consists in loss of fertility, overgrowth, clogging and other negative consequences that negatively affect the possibility of obtaining agricultural products. The functioning of all branches of agriculture and the economy as a whole depends on the rational use of land resources, therefore the most important task of state land management is the organization of land monitoring. This work is aimed at investigating the relation-

ship between the state of crops, estimated using the NDVI index, and the level of weed contamination, as well as applying the data obtained to develop recommendations for optimizing the use of UAVs in agriculture.

Ключевые слова: сельское хозяйство, растительность, засоренность, вегетационные индексы, мониторинг, беспилотные технологии.

Keywords: agriculture, vegetation, contamination, vegetation indexes, monitoring, unmanned technologies.

Введение. Актуальность исследования заключается в важности применения новых технологий для повышения эффективности сельского хозяйства, особенно в условиях современного агропроизводства, когда необходимо оптимизировать использование ресурсов и контролировать состояние посевов в реальном времени. Одним из эффективных инструментов для мониторинга посевов является использование БПЛА с мультиспектральными камерами для получения изображений и анализа их с помощью индекса NDVI. Этот метод позволяет точно оценить состояние растительности, выявить засоренность сорняками и обнаружить участки, требующие дополнительного внимания. В условиях глобальных изменений климата и изменения структуры сельскохозяйственного производства использование высокотехнологичных методов мониторинга становится необходимостью.

Практическая часть работы направлена на применение полученных данных для решения задач мониторинга состояния посевов с использованием БПЛА и вычисления индекса NDVI. Привлечение беспилотных технологий в точном земледелии значительно его оптимизирует, снижает риски частичной или полной потери урожая, а соответственно, увеличивает прибыль аграрного предприятия.

Мониторинг состояния посевов является неотъемлемой частью современных методов агрономического управления. В условиях интенсивного сельского хозяйства важно обеспечить высокую точность и оперативность в оценке состояния растительности, что стало возможным благодаря применению новей-

ших технологий, таких как дистанционное зондирование, спутниковые системы и беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Эти методы позволяют значительно повысить эффективность мониторинга, сократить затраты на ресурсы и улучшить управление агроэкосистемами.

В последние годы популярность среди агрономов набирают беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые обеспечивают сбор данных с высокой точностью и на больших площадях. Преимущество использования БПЛА заключается в возможности оперативного мониторинга посевов, создании карт растительности с высоким пространственным разрешением и быстрой выявлении проблемных участков. Это значительно повышает точность агрономических исследований и позволяет агрономам оперативно реагировать на изменения состояния культур [10]. БПЛА способны выполнять съемку в различных спектральных диапазонах, таких как видимый, инфракрасный и ультрафиолетовый, что дает возможность получения детализированных данных о состоянии растений, их водном статусе и наличии болезней [16].

Сбор информации о состоянии агроценозов, сельскохозяйственных угодий с использованием БПЛА более доступно для товаропроизводителей АПК по сравнению с проведением дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) космическими спутниками и воздушными пилотируемыми аппаратами. Беспилотники дают возможность съемки с небольших высот, вблизи объектов, в зоне чрезвычайных ситуаций без риска для жизни и здоровья пилотов. БПЛА позволяют получить оперативно снимки высокого разрешения и экономически более выгодны [6].

Особое внимание стоит уделить использованию мультиспектральных и гиперспектральных датчиков на БПЛА. Мультиспектральные камеры позволяют измерять параметры, такие как температура поверхности и содержание влаги в растениях, что напрямую связано с их состоянием. Гиперспектральные камеры предоставляют еще более детализированную информацию о состоянии посевов, благодаря чему можно точно определить минерализацию почвы и даже выявить начальные признаки заболеваний растений [15, 16].

Для обработки данных, полученных с БПЛА, применяются специализированные программные комплексы, такие как Agisoft Metashape, которые позволяют создавать точные трехмерные модели местности и анализировать изменения в состоянии растительности. Эти программы используют алгоритмы для интеграции данных и создания карт, которые помогают агрономам принимать обоснованные решения по управлению сельскохозяйственными угодьями [3, 11]. Программные средства также позволяют обрабатывать большие объемы данных и анализировать их для выявления закономерностей и тенденций, что открывает новые горизонты для точного земледелия.

Дистанционное зондирование с использованием БПЛА предоставляет уникальную возможность оперативно получать высококачественные данные о состоянии посевов в реальном времени, что позволяет принимать более обоснованные решения по управлению аграрными угодьями. Индекс NDVI, вычисляемый на основе спектральных характеристик поверхности растительности, является одним из наиболее эффективных индексов для оценки состояния посевов и выявления проблемных участков на поле, таких как засоренность сорняками.

Вегетативные индексы для оценки состояния растительности. Вегетационный индекс – показатель, рассчитываемый на основе операций с разными спектральными диапазонами данных дистанционного зондирования, и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе снимка. Эффективность вегетационных индексов определяется особенностями отражения [14].

В настоящее время существует более 500 вариантов вегетационных индексов. Они подбираются экспериментально, исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв.

При использовании ВИ для исследования растительного покрова ключевым является то, что физиологические и анатомические характеристики растительности приводят к появлению отличительных спектральных особенностей, которые позволяют обнаружить присутствие растительности в любой среде и при определенных условиях позволяют сделать вывод о состоянии раститель-

ного покрова по отраженному спектру. Получаемый в результате спектр отражения является очень характерным и распознается как спектральный признак растительности.

Вегетативные индексы (ВИ) являются важным инструментом для оценки состояния растительности, так как они позволяют быстро и эффективно анализировать параметры, связанные с фотосинтетической активностью, водным состоянием и здоровьем растений.

Одним из наиболее широко применяемых методов мониторинга состояния посевов является использование вегетативных индексов, таких как NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который оценивает состояние растительности на основе различия в отражении света в видимом и инфракрасном спектрах. Этот индекс позволяет выявлять зоны с недостаточным уровнем фотосинтетической активности, а также различать участки, подвергнутые болезням или засоренности сорняками. Использование NDVI с помощью спутников и БПЛА позволяет получать точную информацию о состоянии посевов на больших территориях, что особенно важно в условиях больших сельскохозяйственных угодий [12].

Индекс NDVI вычисляется по формуле (1):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (1)$$

где NIR — отражение света в ближнем инфракрасном спектре, а Red — отражение в красном спектре. Значения NDVI варьируются от -1 до +1, где отрицательные значения указывают на отсутствие растительности, а значения близкие к 1 говорят о высокой плотности и здоровье растительности [1].

Использование NDVI позволяет агрономам получать информацию о таких аспектах, как уровень фотосинтетической активности, стресс растений, засушливые условия и возможные заболевания. Высокие значения индекса свидетельствуют о хорошем состоянии растений, тогда как низкие — о возможных проблемах, таких как дефицит воды, болезни или вредители [12].

Однако важно отметить, что конкретные цвета и градиенты могут варьироваться в зависимости от программного обеспечения или инструментов, используемых для визуализации NDVI.

В начале сезона вегетации, когда растения только начинают развиваться, отражение в красном канале обычно выше, а в ближнем инфракрасном канале ниже. Это связано с тем, что растения содержат еще мало зеленой фитомассы, и большая часть поглощенной энергии из видимого спектра используется для фотосинтеза.

По мере развития растений и увеличения зеленой фитомассы, отражение в красном канале уменьшается, тогда как отражение в ближнем инфракрасном канале увеличивается. Это связано с тем, что здоровая зеленая растительность хорошо поглощает энергию в красном спектре для фотосинтеза и отражает большую часть ближнего инфракрасного излучения.

На пике сезона вегетации, когда растительность наиболее густая и здоровая, отражение в красном канале достигает минимума, а отражение в ближнем инфракрасном канале достигает максимума.

Изменение отражающей способности растительности в этих каналах позволяет использовать индексы, такие как NDVI, для оценки здоровья и фенологического состояния растительности в течение сезона вегетации [8].

Помимо NDVI, для мониторинга состояния растений могут использоваться и другие вегетативные индексы, такие как EVI (Enhanced Vegetation Index) и SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index). Индекс EVI позволяет учитывать влияние атмосферы и почвы, что особенно важно при анализе изображений, полученных с низким разрешением. Он вычисляется по более сложной формуле (2), которая включает корректировки на атмосферное влияние и плотность растительности:

$$EVI = G \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + C_1 \times Red - C_2 \times Blue + L)}, \quad (2)$$

где G – коэффициент усиления, $C1$ и $C2$ – коэффициенты для учета влияния атмосферных частиц, L – коэффициент для корректировки на поверхность [28].

В то время как индекс NDVI полезен для общего мониторинга растительности, индекс SAVI может использоваться в условиях, когда растительность скудная и сильно подвержена влиянию почвы. Он включает дополнительную корректировку для уменьшения воздействия почвы на результаты анализа, что особенно важно для оценки растительности в засушливых и полупустынных районах [6].

Точность расчета вегетационных индексов может быть изменена различными факторами. Например, точность может быть снижена из-за атмосферных эффектов, таких как аэрозоли, облака, туманы и дымка. Также точность может быть снижена из-за наличия различных искусственных объектов на изображении, таких как дороги, здания, либо естественных, таких как водоемы и другие, которые могут искажать данные. Кроме того, точность может быть снижена из-за неравномерности освещения, изменения угла съемки и других факторов. Также на результат влияет рельеф местности [5].

Современные технологии, такие как БПЛА и спутниковые системы, позволяют получать данные для расчета этих индексов с высокой точностью. Спутниковые снимки с высокого разрешения обеспечивают регулярное наблюдение за растительностью на больших территориях, а данные, полученные с БПЛА, могут предоставлять информацию с еще более высоким пространственным разрешением, что позволяет детально оценивать состояние отдельных участков поля. С помощью БПЛА и мультиспектральных камер можно наблюдать за состоянием растений в реальном времени и на уровне отдельных растений, что значительно улучшает возможность принятия решений на уровне агрономического управления [16].

Современные исследования показывают, что использование вегетативных индексов в агрономии и точном земледелии способствует более точному прогнозированию урожайности, выявлению проблемных участков на ранних ста-

дях и оптимизации использования ресурсов, таких как вода и удобрения. Использование этих индексов с БПЛА и спутниковыми данными позволяет сельскохозяйственным производителям своевременно реагировать на изменения в состоянии посевов, повышая эффективность и устойчивость сельскохозяйственного производства [15].

Таким образом, современные методы мониторинга состояния посевов с использованием вегетативных индексов и БПЛА представляют собой эффективный инструмент для агрономов, обеспечивая точность и оперативность в оценке состояния растений, что в свою очередь способствует повышению урожайности и устойчивости сельскохозяйственного производства.

Характеристика участка и объекта исследований. Объектом исследования являются три сельскохозяйственных участка, расположенных в Кинельском районе Самарской области, которые входят в состав учебно-опытных полей Самарского государственного аграрного университета (СамГАУ). Данные участки используются для проведения полевых опытов и испытаний современных агротехнологий.

Поля СамГАУ представляют собой учебно-опытные участки, используемые для аграрных исследований (рис. 1, 2). На этих территориях проводится мониторинг состояния посевов, анализ изменений вегетационных индексов и оценка влияния различных факторов на урожайность. Площадь участков варьируется, что позволяет проводить наблюдения как на малых, так и на средних по размеру полях, характерных для региона.

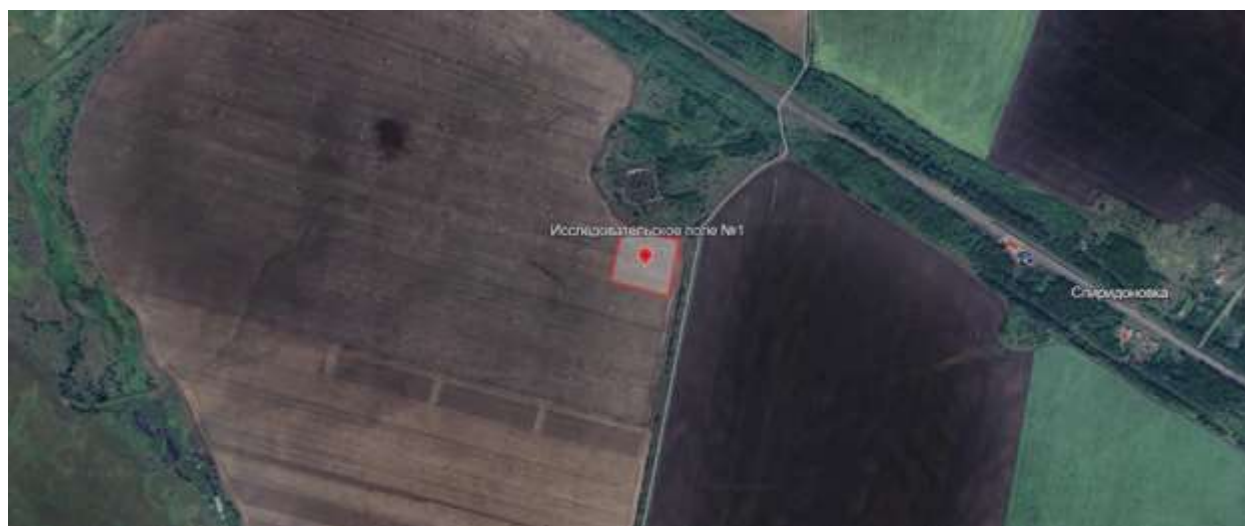


Рисунок 1. Исследовательское поле № 1

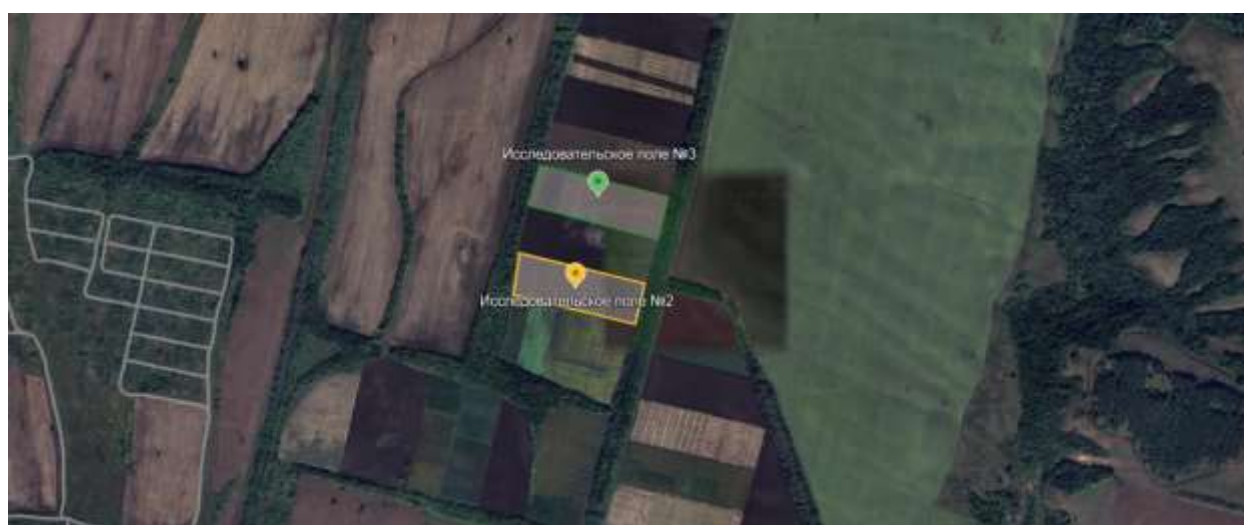


Рисунок 2. Исследовательские поля № 2 и № 3

На участке работ почвенный покров представлен чернозёмом обыкновенным среднегумусным среднемощным среднесуглинистым слабосмытым. На формирование почвенного покрова большое влияние, кроме климатических условий, оказали рельеф местности и почвообразующие породы. Материнскими породами для черноземов обыкновенных послужили делювиальные отложения. Черноземы обыкновенные характеризуются темно-серой окраской гумусового горизонта с зернисто-комковатой структурой, постепенным переходом одного горизонта в другой, вскипанием от соляной кислоты в нижней части гумусового горизонта или в переходном горизонте, выделением карбонатов в горизонте ВС.

Содержание гумуса в верхнем горизонте составляет от 4,8 % до 6,0%, мощность гумусового горизонта – 37-46 см. Реакция среды почвенного раство-

ра нейтральная. Обеспеченность элементами питания: подвижным фосфором – от низкой до повышенной, подвижным калием – от средней до высокой.

Второе и третье поле опытного участка представлено почвами: чернозем типичный малогумусный среднесиловой легкоголистый. Агрохимические характеристики почвы в пахотном слое 0-15 см: содержание гумуса 5-6% (по Тюрину, ГОСТ 26213-91), легкогидролизуемого азота 28-49 мг/кг (по Корнфилду), подвижного фосфора 61-77 мг/кг (по Чирикову, ГОСТ 26204-91), обменного калия 374-423 мг/кг (по Масловой, ГОСТ 26210-91). По степени кислотности почва опытного участка слабокислая, pH солевой вытяжки почвы 5,4 ед. (по методу ЦИНАО, ГОСТ 26483-85).

На исследуемых полях, расположенных в Кинельском районе Самарской области, основным объектом изучения стал яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.).

Съемка проводилась в фазу кущения (ВВСН 21-29), исследуемое поле № 1 и в фазу выхода в трубку (ВВСН 30-39), испытательные поля № 2, 3.

На данных полях были высеяны питомники: контрольный питомник 1 и 2 года, селекционный питомник 3 года и экологическое испытание сортов ярового ячменя Поволжского НИИСС и Самарского НИИССХ.

Предшествующей культурой выступала яровая пшеница.

В Самарской области, в том числе в Кинельском районе, на сельскохозяйственных полях с ячменём распространены следующие виды сорных растений:

1. Злаковые сорняки.

- Пырей ползучий (*Elytrigia repens*). Распространенный сорняк. Особенно часто встречается в лесной, лесостепной и степной зонах.
- Ежовник обыкновенный (*Echinochloa crusgalli*). Быстро растёт и развивается, подавляя культурные растения. Особенно активен на влажных почвах.

2. Двудольные сорняки.

- Осот полевой (*Cirsium arvense*). Многолетний сорняк с мощной корневой системой. Активно подавляет рост ячменя, снижая урожайность.

- Ромашка непахучая (*Tripleurospermum inodorum*). Обильно разрастается на полях, особенно на лёгких и рыхлых почвах. Конкурирует с ячменём за свет и влагу.

- Щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus*). Очень агрессивный сорняк. Быстро растёт, образуя плотный покров, который угнетает посевы.

3. Крестоцветные сорняки.

- Пастушья сумка (*Capsella bursapastoris*). Растёт преимущественно на лёгких и средних почвах. Часто появляется на необработанных участках.

- Сурепка обыкновенная (*Barbarea vulgaris*). Распространённый сорняк, особенно на влажных почвах. Затрудняет механизированную обработку.

4. Вьющиеся и ползучие сорняки.

- Повилика (*Cuscuta spp.*). Паразитическое растение. Опутывает культурные растения, снижая их урожайность.

- Галега восточная (*Galega orientalis*). Быстро растёт на засоренных участках и вытесняет ячмень из конкурентной среды.

Рельеф местности преимущественно равнинный с небольшими возвышенностями. На территории объекта исследований встречаются поля с уклонами до 2-3 градусов, что может приводить к разной степени увлажненности почвы в зависимости от расположения. Эти факторы напрямую влияют на значения вегетационных индексов, таких как NDVI, и требуют учета при проведении мониторинга.

На рисунке 3 представлена карта высот участка 1. Он располагается в равнинной местности, высоты исследуемого поля изменяются с 36,7 до 42,4 метров. В центральной части имеется небольшое снижение высоты, сформированное сточными водами.

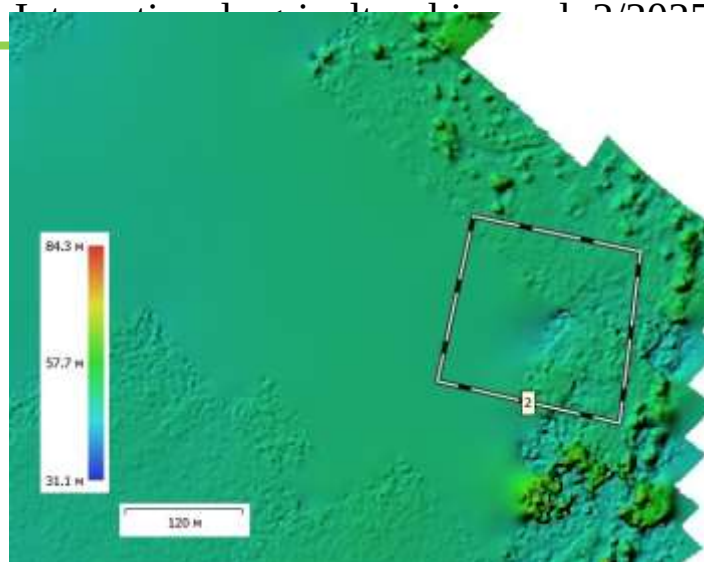


Рисунок 3. Карта высот участка № 1

На рисунке 4 представлена карта высот участков 2 и 3. Исследуемые поля располагаются на уклонной местности, высоты варьируются от 64,6 до 84,9 метров. Внутри участков имеются неровности, сформированные стоками. Композиция участков – юго-западная.

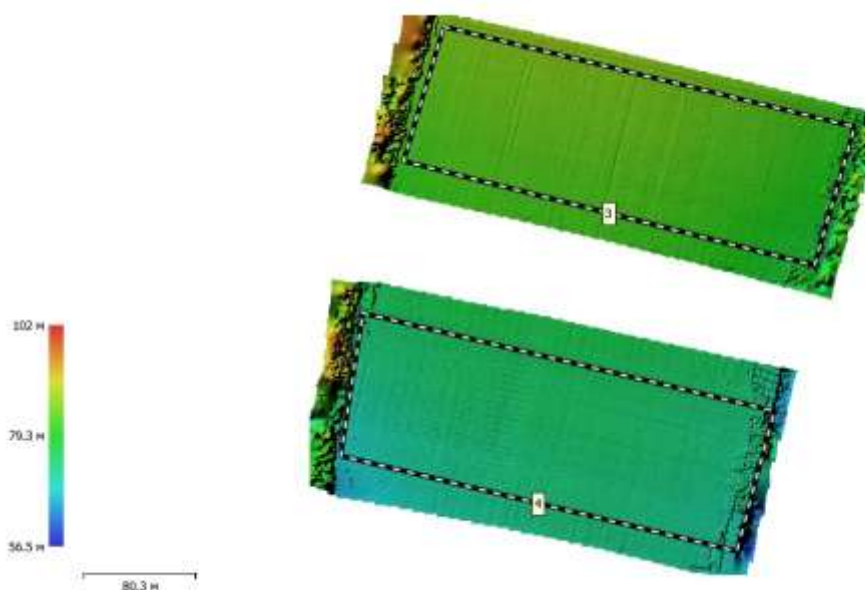


Рисунок 4. Карта высот участков № 2 и № 3

Гидрографическая сеть представлена небольшими реками и ручьями, которые оказывают влияние на уровень грунтовых вод. Участки, расположенные ближе к водоемам, как правило, обладают лучшими условиями для развития растительности, но подвержены затоплению при обильных осадках.

Таким образом, климатические и природные особенности Кинельского района создают как благоприятные, так и осложняющие условия для развития сельского хозяйства. Это подчеркивает необходимость регулярного использования современных технологий мониторинга, таких как беспилотные летательные аппараты, для своевременной оценки состояния посевов и корректировки агротехнологий.

Методика и технология проведения исследований. Подготовительный этап. На данном этапе проводятся подготовительные мероприятия для правильной настройки оборудования и оптимизации процесса сбора данных:

1. Выбор участка мониторинга: выбираются участки с различной степенью засоренности сорняками для дальнейшего анализа.

2. Планирование полетов: для сбора данных используется программа DJI GS Pro, которая позволяет оптимизировать полеты с БПЛА, регулируя параметры такие как скорость, высота и перекрытие кадров.

3. Определение периода съемки: съемка осуществляется в период максимального роста растений (май), когда вегетативный индекс NDVI достигает своего пика.

Полеты и сбор данных с БПЛА. Сбор данных осуществляется при помощи БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral, оснащенного шестиканальной мультиспектральной камерой. Для каждого участка планируется полет с высотой около 80 метров, что позволяет получить снимки с разрешением около 5 см/пиксель. Для каждого полета устанавливается перекрытие кадров на уровне 80% вдоль траектории и 70% между соседними траекториями, что обеспечивает качественную съемку и возможность создания ортофотопланов.

В процессе полета фиксируются изображения в разных спектральных диапазонах (красный, ближний инфракрасный и зеленый), что позволяет получить точные данные для вычисления индекса NDVI, который используется для оценки состояния растительности и засоренности поля сорняками.

Наземный обход. Параллельно с полетами с БПЛА проводится наземный обход для точного визуального контроля состояния растений и засоренности

сорняками. Наземный обход проводится на тех же участках, что и съемка с БПЛА, и предполагает использование GPS-оборудования для привязки координат каждого измерения. Результаты наземного обхода служат эталонными данными для сравнения с результатами, полученными с БПЛА, что позволяет оценить точность данных дистанционного зондирования.

Обработка данных. После сбора данных с БПЛА и наземного обхода, данные проходят обработку в специализированном ПО:

1. Agisoft Metashape — используется для создания ортофотопланов и 3D-моделей. Это ПО позволяет сшивать изображения и проводить геопривязку на основе контрольных точек.

2. DJI Terra — программное обеспечение для первичной обработки данных, позволяющее рассчитать индекс NDVI для каждого пикселя изображения. NDVI рассчитывается как разница между инфракрасным и красным каналами, деленная на их сумму.

Сравнительный анализ данных. На основе полученных ортофотопланов и расчетов NDVI проводится сравнительный анализ для участков с низкой и высокой степенью засоренности сорняками:

1. Сравнение индекса NDVI для разных участков: используется для выявления взаимосвязи между индексом NDVI и уровнем засоренности.

2. Сравнение данных с наземными измерениями: данные с БПЛА сравниваются с результатами, полученными в ходе наземного обхода, для проверки точности измерений. Это позволяет оценить надежность дистанционных данных и выявить возможные погрешности.

Оборудование, использованное для исследования:

1. БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral. Камера БПЛА оснащена шестью спектральными каналами, что позволяет захватывать информацию о растительности в различных спектральных диапазонах. Камера имеет высокое разрешение, что позволяет получать точные данные для расчета NDVI.

2. GPS-приемники. Используются для установки контрольных точек и геопривязки снимков. Оборудование обеспечивает точность до 1-3 см, что критически важно для корректной обработки данных.

Методика обработки и интерпретации данных. После того как все данные собраны и обработаны, проводятся следующие этапы анализа:

1. Расчет NDVI. Используется стандартная формула NDVI (1):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (1)$$

где NIR — значение в ближнем инфракрасном диапазоне, а RED — значение в красном диапазоне. NDVI позволяет выделить зоны с разной степенью растительности и засоренности.

2. Анализ результатов. Результаты расчета NDVI для каждого участка анализируются с целью выявления взаимосвязи между уровнем засоренности сорняками и значениями индекса. Особое внимание уделяется различиям в данных для участков с высокой и низкой степенью засоренности.

3. Сравнительный анализ с наземным обходом. Сравняются данные, полученные с БПЛА, с результатами, полученными при наземном обходе. Этот анализ позволяет оценить точность расчетов и выявить возможные отклонения, вызванные различиями в методах сбора данных.

Применение БПЛА для сбора данных о состоянии посевов и индекса NDVI позволяет значительно ускорить процесс мониторинга и повысить точность оценки состояния сельскохозяйственных угодий. Наземный обход и его использование в качестве эталонных данных позволяет проверить достоверность полученных результатов и уменьшить возможные погрешности, связанные с технологическими ограничениями БПЛА.

Результаты исследований. Все этапы обработки и анализа данных фиксировались для последующей интерпретации. Полученные результаты включали:

- Карты NDVI с распределением значений;
- Карты зон с неудовлетворительным качеством посевов (рис. 5-9).

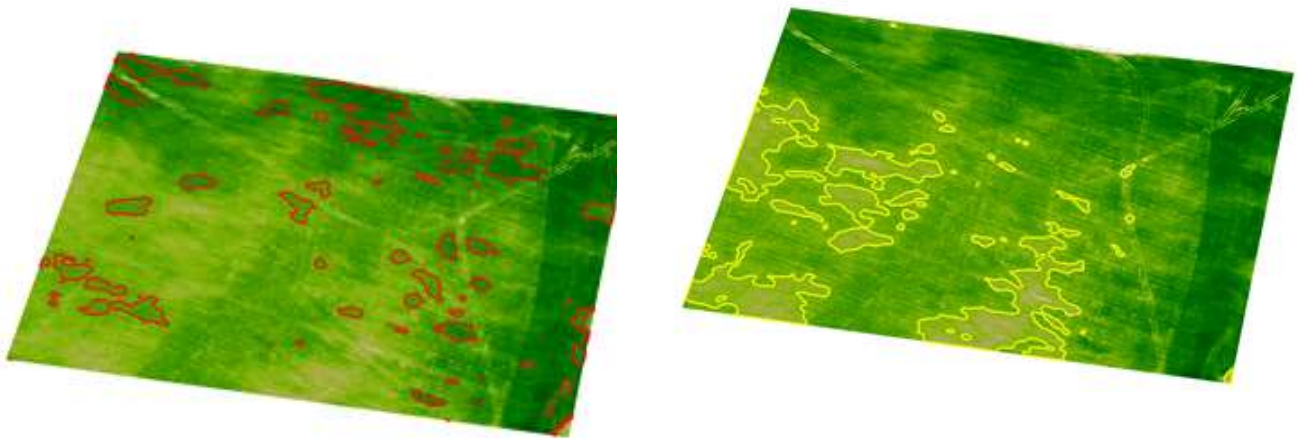


Рисунок 5. Участки поля № 1 с повышенными и низкими значениями индекса NDVI

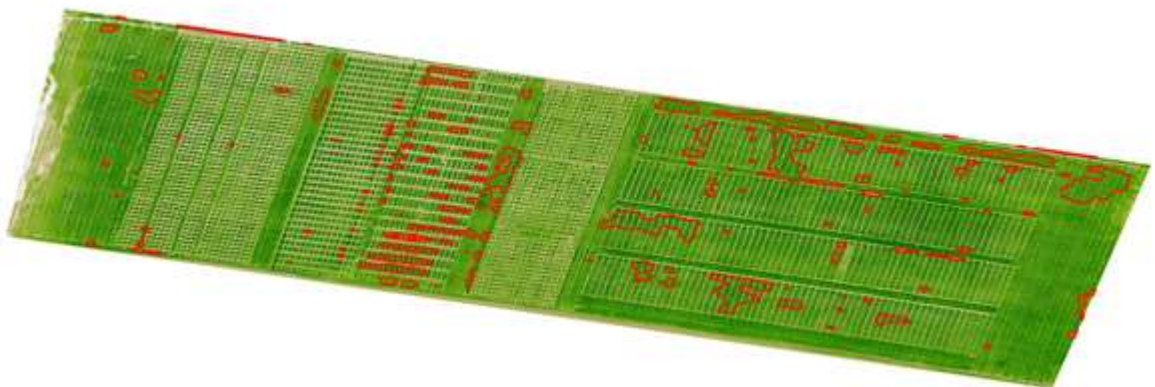


Рисунок 6. Участки поля № 2 с повышенными значениями индекса NDVI

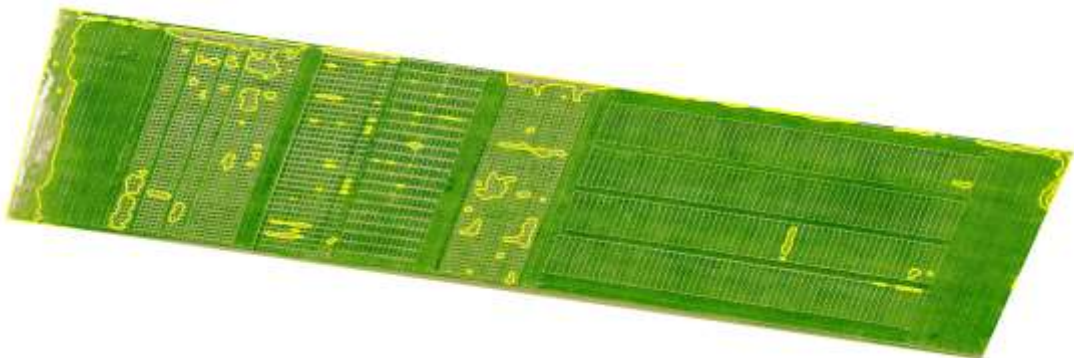


Рисунок 7. Участки поля № 2 с низкими значениями индекса NDVI

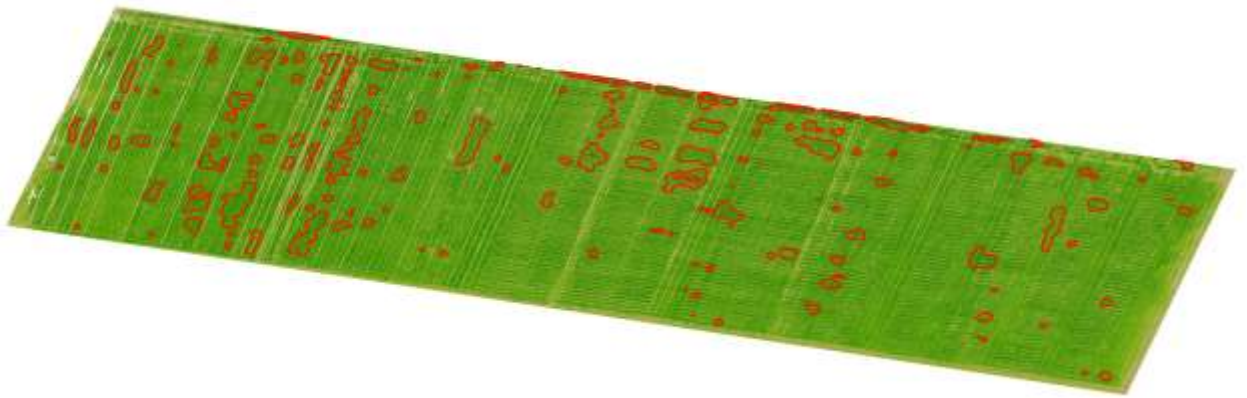


Рисунок 8. Участки поля № 3 с повышенными значениями индекса NDVI



Рисунок 9. Участки поля № 3 с низкими значениями индекса NDVI

График для представления зависимости NDVI от уровня засоренности представлен на рисунке 10.

Данные о количестве и видах сорной растительности на исследуемых полях показывают:

1. Поле 1 (низкая засоренность). Засорённость минимальна, преобладают единичные экземпляры пырея ползучего, осота полевого и ромашки непахучей. Основное скопление сорняков наблюдается вдоль границ поля и на рыхлых почвах.

2. Поле 2 (средняя засоренность). Засорённость более выражена: преобладают щирица запрокинутая и ежовник обыкновенный, а также встречается осот

полевой. На этом поле сорняки равномерно распределены и образуют плотные скопления, особенно в центральной части.

3. Поле 3 (средняя засоренность). Характерно наличие сурепки обыкновенной, ежовника обыкновенного и повилики. Наибольшая засоренность отмечается вдоль дорог, границ полей и на влажных участках, где преобладает ежовник обыкновенный.

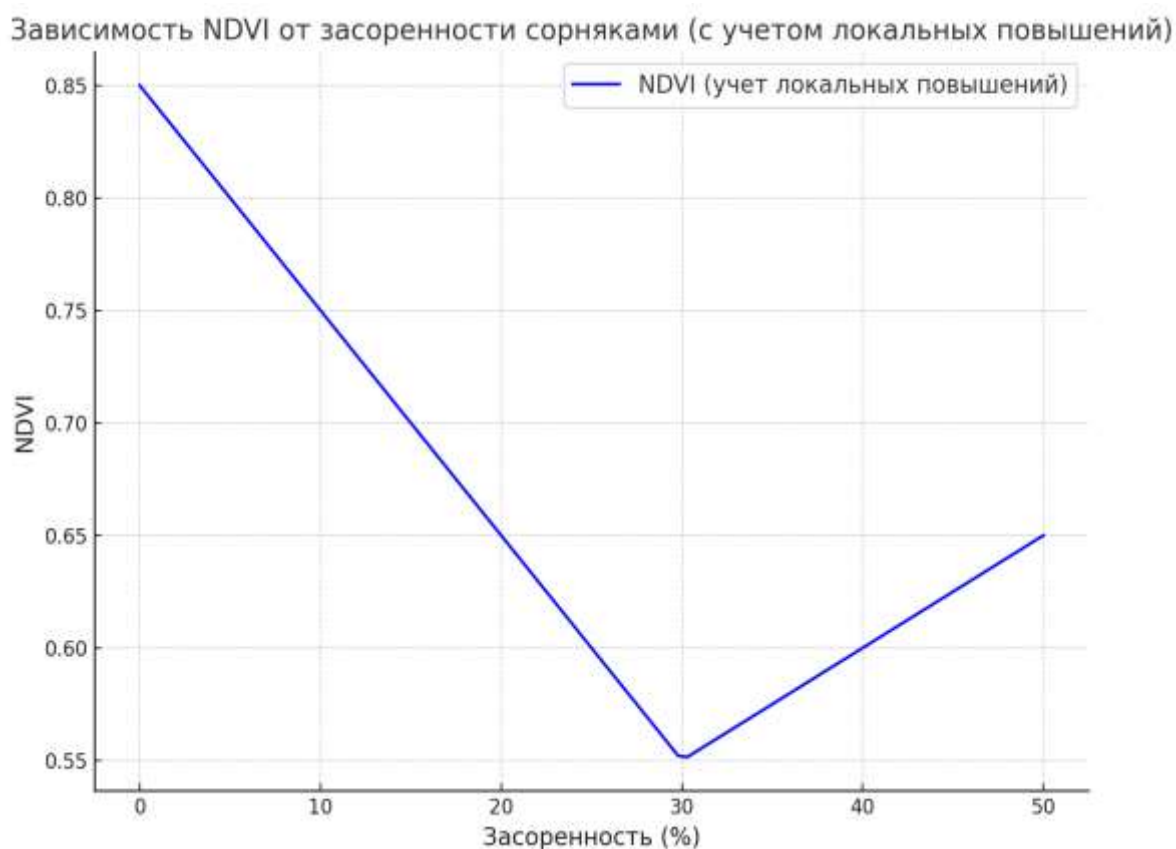


Рисунок 10. График зависимости индекса NDVI от засоренности

На графике показана зависимость NDVI от уровня засоренности с учетом возможного локального увеличения индекса NDVI на участках с высокой концентрацией сорняков.

При засоренности до 30% NDVI снижается, что соответствует ухудшению состояния культуры. Однако при засоренности выше 30% NDVI локально возрастает, что может быть связано с высокой фотосинтетической активностью сорняков.

Выводы. Сравнительный анализ с наземными измерениями показал высокую точность геопривязки и съемки, с минимальными отклонениями от кон-

трольных точек. Погрешности, связанные с геопривязкой, были минимальны и не превышали 2-3 см, что соответствует требованиям для сельскохозяйственного мониторинга.

Оценка точности расчета NDVI показала высокую степень корреляции между данными с БПЛА и наземными измерениями. Коэффициент детерминации (R^2) составил более 0,9, что указывает на высокую точность расчета и значимость NDVI для оценки состояния растительности.

Оценка погрешности измерений на основе статистических методов показала, что основными источниками ошибок являются погрешности геопривязки и съемки. Однако их влияние на результаты анализа NDVI было минимальным, что подтверждает высокую надежность полученных данных.

Мониторинг с использованием БПЛА более затратный для небольших площадей, но обеспечивает более точные данные и возможность детального анализа состояния посевов. Выбор метода мониторинга зависит от площади сельскохозяйственных угодий, требуемой точности и бюджета.

Рекомендуется внедрить технологию мониторинга с помощью БПЛА на более широких площадях для регулярной оценки состояния посевов, контроля засоренности и своевременного принятия агротехнических мер.

Для ускорения обработки данных следует использовать алгоритмы машинного обучения и специализированное программное обеспечение для автоматической классификации зон с проблемами на основе NDVI и RGB-ортофотопланов.

Рекомендуется интегрировать результаты мониторинга в системы управления сельским хозяйством, чтобы обеспечить оперативное принятие решений. Для малых и средних хозяйств целесообразно создание сервисных компаний, предоставляющих услуги мониторинга с использованием БПЛА, чтобы снизить затраты на покупку и обслуживание оборудования.

Для более точного определения взаимосвязи между NDVI и сорняками необходимо провести исследования с различными культурами, типами почв и

климатическими условиями, а также включить временной анализ изменений NDVI.

Для повышения безопасности и точности данных важно организовать обучение специалистов по управлению БПЛА и обработке полученной информации.

Литература

1. Брыкова О. И., Новикова Т.С. Оценка индексов NDVI и их применение в агромониторинге. Аграрные технологии, 2020. Т. 5, № 4. С. 92-101.
2. Гольцяпин В. Я., Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф. Цифровые технологии для обследования состояния земель сельскохозяйственного назначения беспилотными летательными аппаратами: аналит. обзор М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 88 с.
3. Гришин П. А. Использование геоинформационных систем для сельского хозяйства. Гео-ИКС, 2020. № 1. С. 10-16.
4. Катаев М. Ю., Пасько О.А., Карташов Е.Ю. Анализ практических возможностей применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. Вестник КрасГАУ. 2023. № 1(190). С. 54-62.
5. Керимов И. А., Батукаев А.А. Вегетационные индексы растительности: литературный обзор. Современные тенденции низкоуглеродного развития: глобальные и региональные аспекты : Материалы международной научной конференции. Грозный: ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, 2023. С. 36-49.
6. Коршунов Е. В., Павлов А.Д. Обработка данных, полученных с дронов в агромониторинге. Вестник цифровых технологий в АПК, 2022. № 7. С. 23-31.
7. Лебедева К. И., Смирнова Р.П. Мониторинг сорняков на сельскохозяйственных полях с использованием дронов. Вестник агротехнологий, 2021. № 8. С. 74-82.
8. Миков С. И., Старовойтов В.В., Бояршинова О.А. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование. Цифровые технологии и бизнес: материалы 79-ой студенческой научно-технической конференции. Минск : БНТУ, 2023. С. 34-42.

9. Тарбаев В.А., Долгирев А.В., Минаева К.Д. Использование беспилотных систем для уточнения площади полей землепользователей. Сборник научных трудов конференции "Вавиловские чтения – 2015", Саратов: ООО "Амирит", 2015. С. 261-262.

10. Федоров Н. П. Применение БПЛА в сельском хозяйстве: проблемы и перспективы. Журнал аграрной экономики, 2019. Т. 12, № 3. С. 67-74.

11. Филатов В. А., Поляков И.С. Спутниковый мониторинг и его использование для оценки индекса NDVI. Земельные ресурсы, 2021. № 4. С. 56-63.

12. Чашкин М. В., Климов С.А. Использование мультиспектральных данных для оценки состояния сельскохозяйственных культур. Вестник аграрной науки, 2021. № 6. С. 45-52.

13. Чекмарев А. А., Морозова Е.С. Применение мультиспектральных индексов для анализа аграрного состояния посевов. Научный журнал сельского хозяйства, 2022. № 5. С. 18-25.

14. Campbell, J. B. Introduction to Remote Sensing. New York: The Guilford Press; 1987. 551 p.

15. Jones, H. G. Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications / H. G. Jones, R. A. Vaughan. Oxford University Press, 2010. 383 p.

16. Zhang, C. The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture / C. Zhang, J. M. Kovacs. Remote Sensing, 2012. Vol. 4, Issue 9. P. 2756-2769.

References

1. Brykova, O. I. & Novikova, T.S. (2020). Otsenka indeksov NDVI i ikh primeneniye v agromonitoringe. [Evaluation of NDVI indices and their application in agricultural monitoring. Agricultural Technologies. Vol. 5, No. 4. pp. 92-101].

2. Goltyapin, V. Ya. & Mishurov, N.P., Fedorenko, V.F. (2020). Tsifrovyye tekhnologii dlya obsledovaniya sostoyaniya zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya bespilotnymi letatel'nyimi apparatami. [Digital technologies for agricul-

tural land survey by unmanned aerial vehicles] analyt. review M.: FGBNU "Rosinformagrotech". 88 p.

3. Grishin, P. A. (2020). Ispol'zovanie geoinformatsionnykh sistem dlya sel'skogo khozyaistva [The use of geoinformation systems for agriculture]. Geo-X. No. 1. pp. 10-16.

4. Kataev, M. Yu., Pasko, O.A. & Kartashov, E.Yu. (2023). Analiz prakticheskikh voz-mozhnostei primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v sel'skom khozyaistve [Analysis of practical possibilities of using unmanned aerial vehicles in agriculture]. Bulletin of KrasGAU. No. 1(190). pp. 54-62.

5. Kerimov, I. A. & Batukaev, A.A. (2023). Vegetatsionnye indeksy rastitel'nosti. [Vegetation indices of vegetation: a literary review]. Current trends in low-carbon development: global and regional aspects : Proceedings of the International Scientific Conference. Grozny: GGNTU named after academician M.D. Millionshchikov. pp. 36-49.

6. Korshunov, E. V. & Pavlov, A.D. (2022). Obrabotka dannykh, poluchennykh s dronov v agromonitoringe. [Processing data obtained from drones in agricultural monitoring]. Bulletin of Digital Technologies in Agriculture. No. 7. pp. 23-31.

7. Lebedeva, K. I. & Smirnova, R.P. (2021). Monitoring sornyakov na sel'skokhozyai-stvennykh polyakh s ispol'zovaniem dronov. [Monitoring of weeds in agricultural fields using drones]. Bulletin of Agricultural Technologies. No. 8. pp. 74-82.

8. Mikov, S. I., Starovoitov, V.V. & Boyarshinova, O.A. (2023). Vegetatsionnye indeksy. Osnovy, formuly, prakticheskoe ispol'zovanie. [Vegetation indices. Basics, formulas, practical use]. Digital technologies and business: proceedings of the 79th Student Scientific and Technical Conference. Minsk : BNTU. pp. 34-42.

9. Tarbaev, V.A., Dolgirev, A.V. & Minaeva, K.D. (2015). Ispol'zovanie bespilotnykh sistem dlya utochneniya ploshchadi polei zemlepol'zovatelei. [The use of unmanned systems to specify the area of land users' fields]. Collection of scientific papers of the Vavilov Readings 2015 conference, Saratov: Amirit LLC. pp. 261-262.

10. Fedorov, N. P. (2019). Primenenie BPLA v sel'skom khozyaistve: problemy i per-spektivy. [The use of UAVs in agriculture: problems and prospects]. Journal of Agrarian Economics. Vol. 12, No. 3. pp. 67-74.
11. Filatov, V.A. & Polyakov, I.S. (2021). Sputnikovyi monitoring i ego ispol'zova-nie dlya otsenki indeksa NDVI. [Satellite monitoring and its use for estimating the NDVI index]. Land Resources. No. 4. pp. 56-63.
12. Chashkin, M.V. & Klimov, S.A. (2021). Ispol'zovanie mul'tispektral'nykh dannyykh dlya otsenki sostoyaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur. [The use of multi-spectral data to assess the state of agricultural crops]. Bulletin of Agrarian Science. No. 6. pp. 45-52.
13. Chekmarev, A. A. & Morozova, E.S. (2022). Primenenie mul'tispektral'nykh indeksov dlya analiza agrarnogo sostoyaniya posevov. [Application of multispectral indexes for the analysis of agricultural condition of crops]. Scientific Journal of Agriculture. No. 5. pp. 18-25.
14. Campbell, J. B. (1987). Introduction to Remote Sensing. New York: The Guilford Press. 551 p.
15. Jones, H. G. (2010). Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications / H. G. Jones, R. A. Vaughan. Oxford University Press. 383 p.
16. Zhang, C. (2012). The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture / C. Zhang, J. M. Kovacs. Remote Sensing. Vol. 4, Issue 9. P. 2756-2769.

© Лавренникова О.А., Иралиева Ю.С. Крылова А.А., Косых Л.А., Самохвалова Е.В., 2025. *International agricultural journal*, 2025, №2, 427-451

Для цитирования: Мониторинг состояния посевов и оценка индекса NDVI с применением БПЛА МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ И ОЦЕНКА ИНДЕКСА NDVI С ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА //International agricultural journal. 2025. № 2, 427-451