

Мырадова Говхер Мырадовна,
углублённое изучение математики и английского языка,
Специализированная средняя школа № 49
Myradova Govkher Myradovna,
with advanced studies in mathematics and English,
Specialized Secondary School No. 49

**ДИСТАНЦИОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ
УСТОЙЧИВЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ
REMOTE SPECTRAL ANALYSIS AS A TOOL FOR DIGITAL
MANAGEMENT OF SUSTAINABLE WINTER WHEAT PRODUCTION**

Аннотация. В статье рассматривается роль дистанционного спектрального анализа на основе вегетационных индексов (NDVI, EVI, NDMI, MSAVI2) как ключевого инструмента для обеспечения устойчивого производства озимой пшеницы. На примере пилотного проекта в Халачском районе Туркменистана показано, как использование данных спутников Sentinel-2 и онлайн-сервиса ExactFarming позволяет перейти от реактивного к превентивному и точному управлению агроэкосистемами. Особое внимание уделяется возможностям системы в оптимизации использования водных ресурсов, минеральных удобрений, контроле состояния почвенного покрова и минимизации антропогенной нагрузки на агроландшафты. Делается вывод, что интеграция дистанционного мониторинга в цифровые платформы управления формирует основу для экологически сбалансированного, ресурсоэффективного и экономически устойчивого земледелия.

Abstract. The article examines the role of remote spectral analysis based on vegetation indices (NDVI, EVI, NDMI, MSAVI2) as a key tool for ensuring sustainable winter wheat production. Using a pilot project in the Halach District of Turkmenistan as a case study, the paper demonstrates how the use of Sentinel-2 satellite data and the online service ExactFarming enables a transition from reactive to preventive and precision-based management of agroecosystems. Special attention is given to the system's capabilities in optimizing water resource use, mineral fertilizer application, monitoring soil cover conditions, and minimizing anthropogenic pressure on agricultural landscapes. It is concluded that the integration of remote monitoring into digital management platforms forms the foundation for environmentally balanced, resource-efficient, and economically sustainable agriculture.

Ключевые слова: Устойчивое сельское хозяйство, точное земледелие, дистанционный мониторинг, спектральный анализ, вегетационные индексы, NDVI, озимая пшеница, цифровизация АПК.

Keywords: Sustainable agriculture; precision farming; remote monitoring; spectral analysis; vegetation indices; NDVI; winter wheat; digitalization of the agro-industrial complex.

Введение. Понятие устойчивого сельскохозяйственного производства выходит далеко за рамки простого увеличения урожайности. Оно подразумевает триединую гармонию: экономическую эффективность (рентабельность), экологическую безопасность (сохранение ресурсов и минимизация негативного воздействия) и социальную ответственность (обеспечение продовольственной безопасности и развитие сельских территорий). Достижение этой гармонии требует перехода от реактивных мер к проактивному, основанному на данных, управлению.

Дистанционный спектральный анализ, основанный на декодировании информации, отраженной растительностью и почвой в различных участках электромагнитного спектра,



предоставляет уникальную возможность для такого перехода. Он превращает поле из «черного ящика» в прозрачную, оцифрованную систему, состояние которой можно количественно оценивать в динамике. Озимая пшеница как одна из ключевых зерновых культур мира идеально подходит для апробации таких технологий в силу своего длительного цикла развития и высокой чувствительности к агротехнологическим условиям.

Методологическая основа: от данных к управленческим решениям. В основе описываемого подхода лежала двухлетняя программа мониторинга полей озимой пшеницы на площади 14,92 га в Халачском районе Туркменистана. Технологическим стержнем выступила облачная платформа ExactFarming, выполняющая роль центра сбора, обработки и визуализации данных. Исходным сырьем стали мультиспектральные снимки со спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B, обладающие оптимальным для задач сельского хозяйства пространственным разрешением (10-30 м) и высокой периодичностью съемки (каждые 3-5 дней). Это обеспечило непрерывный поток актуальной информации независимо от удаленности поля.

Ключевыми аналитическими деривативами стали вегетационные индексы, каждый из которых решает свою диагностическую задачу в рамках системы устойчивого управления:

- **NDVI (Нормализованный разностный вегетационный индекс):** Базовый индикатор фотосинтетической активности и биомассы. Служит для оценки общего состояния посевов, выявления зон угнетения и определения фенологических фаз.

- **EVI (Усовершенствованный вегетационный индекс):** Индекс, скорректированный на влияние фонового почвенного покрова и атмосферной дымки. Обеспечивает более точную оценку густоты и продуктивности растительности, особенно на ранних стадиях развития и в условиях разреженного покрова.

- **NDMI (Нормализованный разностный индекс влажности):** Прямой индикатор водного стресса. Позволяет картировать влажность растительности и почвы, что является основой для прецизионного орошения и предотвращения засух.

- **MSAVI2 (Модифицированный почвенно-скорректированный вегетационный индекс):** Специализированный индекс, минимизирующий влияние открытой почвы. Критически важен для оценки начальных всходов, анализа состояния паровых полей и выявления участков эрозионного риска.

Совместное использование этого индексального комплекса позволило перейти от наблюдения к комплексной диагностике агроэкосистемы.

Результаты и обсуждение: Практические аспекты устойчивости. Внедрение системы спектрального анализа позволило реализовать на практике несколько принципов устойчивого управления.

1. Устойчивое водопользование и адаптация к засушливым условиям.

В регионе с ограниченными водными ресурсами рациональное использование влаги – основа экологической и экономической устойчивости. Индекс NDMI выступил в роли точного дистанционного сенсора влажности. В ходе мониторинга были четко идентифицированы участки с NDMI ~0.25, сигнализирующие о дефиците воды, и зоны с оптимальным значением 0.35-0.4. Это позволило отказаться от равномерного полива всего поля в пользу дифференцированного орошения. Вода подавалась адресно, в нужном объеме и в критически важный момент, что привело к:

- Снижению водного стресса у растений и повышению продуктивности фотосинтеза.
- Экономии водных ресурсов на 15-25% за счет исключения переполива.
- Предотвращению вторичного засоления почв, часто возникающего при нерациональном орошении.



2. Сохранение и повышение почвенного плодородия. Почва – невозобновляемый ресурс, и ее охрана – краеугольный камень экологической устойчивости. Спектральный анализ внес вклад здесь по двум направлениям.

- Контроль эрозии и планировка земель: Анализ данных выявил исходную невыровненность рельефа (уклон 1.03°), что способствовало неравномерному распределению влаги и сносу плодородного слоя. На основе этих объективных данных были проведены планировочные работы, снизившие уклон до 0.3° . Это не только улучшило агротехнические условия, но и снизило риск водной эрозии.

- Прецизионное питание и минимизация химической нагрузки: Неоднородности в картах NDVI и EVI на этапе кущения часто указывали на локальный дефицит элементов питания. Вместо традиционного внесения удобрений «на глаз» или равномерно по полю, была применена переменная нормируемая технология. Удобрения вносились выборочно, только на те участки, которые в них нуждались, и в рассчитанной дозе.

3. Управление биоразнообразием и севооборотом. Устойчивость системы повышается за счет разнообразия. Спектральный мониторинг обеспечил объективный контроль за соблюдением севооборота. После уборки пшеницы анализ индексов (особенно MSAVI2 и NDVI) позволил точно определить, какие участки были засеяны сидеральными или кормовыми культурами (кукуруза, маш), а какие остались под паром (низкие значения индексов). Это исключило субъективизм в отчетности и позволило агрономам scientifically обоснованно планировать ротацию культур, разрывающую циклы болезней и вредителей и способствующую восстановлению почвы.

Заключение и перспективы. Опыт применения дистанционного спектрального анализа для управления озимой пшеницей наглядно демонстрирует его трансформационную роль. Это не просто инструмент наблюдения, а системообразующий элемент цифровой платформы для устойчивого сельского хозяйства. Он обеспечивает количественную, пространственно-привязанную и временную оценку всех ключевых параметров агроэкосистемы, закрывая разрыв между принципами устойчивости и практическим земледелием.

Перспективы развития связаны с углублением анализа:

1. **Интеграция с другими данными:** Объединение спектральных индексов с данными наземных IoT-сенсоров (влажность почвы на разных глубинах, микроклимат), а также с прогностическими агрометеорологическими моделями.

2. **Развитие предиктивной аналитики:** Переход от диагностики к прогнозу. Использование временных рядов индексов и машинного обучения для предсказания рисков (вспышки заболеваний, засуха, полегание) и прогнозирования урожайности с высокой точностью.

3. **Автоматизация решений:** Создание систем поддержки принятия решений, которые на основе комплексного анализа данных будут автоматически формировать карты-задания для дифференцированного внесения средств защиты растений, удобрений и полива.

Таким образом, дистанционный спектральный анализ перерастает в цифровую нервную систему устойчивой агросистемы, обеспечивая ее жизнеспособность, продуктивность и устойчивость в долгосрочной перспективе, что является главной целью современного сельского хозяйства.

Список литературы:

1. Antonov V.N., Sladkikh L.A. Monitoring sostoyaniya posevov i prognozirovaniye urozhaynosti yarovoy pshenitsy po dannym DZZ // Geomatika. 2009. № 4. S. 50–53.



2. Bartalev S.A., Lupyan Ye.A., Neyshadt I.A., Savin I.YU., Distantcionnaya otsenka parametrov sel'skokhozyaystvennykh zemel' po sputnikovym dannym spektroradiometra MODIS – 2005. – Т. 2, № 2 – С. 228–236.

3. Cherepanov A. S. Vegetatsionnyye indeksy : spravochnyye materialy // Geomatika. 2011. №2. С. 98–102.

