

- использование беспилотных летательных аппаратов для внесения удобрений и обработки посевов, экономически оправданы, результатом является значительное повышение экономической эффективности. Применение четырех агродронов DJI Agras T40 производительностью 20 га/час, выполняющих внесение удобрений или фунгицида со скоростью 80 га/час, позволит снизить затраты на 4560 руб./га и увеличить урожайность на 3-4 ц/га, что приведет к росту рентабельности 8,5 пп.

Литература:

1. **Огорева, Ю.А.** Экономическая оценка развития рисопродуктового подкомплекса Краснодарского края / Ю.А.Огорева // Устойчивое развитие АПК и сельских территорий России в современных геоэкономических условиях : Сборник науч. Ст. XVIII Междунар. науч.-практ. конф., Краснодар, 12 ноября 2024 года. – Краснодар: ООО «Эпомен», 2024. – С. 438–442.
2. Система рисоводства Российской Федерации / под общ. ред. С.В.Гаркуши.–Краснодар: ФГБНУ «ФНЦриса»; Просвещение-Юг, 2022. – 368с.
3. **Ефремов, А.Н.** Лазерная планировка орошаемых земель/А.Н. Ефремов.–М.: ООО«Литера Принт», 2016.–52с.
4. **Труфляк, Е.В.** Беспилотные технические средства в сельском и лесном хозяйстве/ Е.В.Труфляк. –Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 84с.
5. **Логинов, Н.А.** Преимущество применения беспилотных авиационных систем при обработке полей пестицидами / Н.А.Логинов, Н.В.Трофимов// Агробιοтехнологии и цифровое земледелие. 2024.–№.4.–С.68–74.
6. Расчет параметров полета DJI Agras. Сравнение и расчет параметров полета дронов DJI Agras, дозировки, времени полета, площади обработки// Калькуляторы Андрея Лагонского. [Электронный ресурс]– URL: <https://lagonski.ru/calculators/>
7. **Сергеева, Н.В.** Цифровые технологии в АПК / Н.В.Сергеева, В.Н.Борзенкова // В сборнике: Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК. Сборник статей по материалам II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием. Курган, 2021. С. 897-901.
8. **Водяников, В.Т.** Цифровизация АПК: оценка и перспективы внедрения в аграрном секторе экономики страны/ В.Т.Водяников, А.В.Эдер//Агроинженерия. –2024. –№2. – С.52-56.

МРНТИ 20.51.01

УДК 004 : 63

СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЁМКИЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Худякова Е.В., д.э.н., профессор, evhudyakova@rgau-msha.ru
Степанцевич М.Н., к.э.н., доцент, stepantsevich@rgau-msha.ru
Ермолаева О.С., ст. преподаватель, ol_ermolaeva@rgau-msha.ru

ФГБУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются современные цифровые технологии, применяемые в сельском хозяйстве. Обосновывается целесообразность использования технологии дистанционного зондирования для определения содержания азота/протеина и клетчатки в посевах кормовых трав. Применение ДЗЗ (дистанционного зондирования Земли) позволяет проводить исследование качества выращиваемых кормовых культур в короткие сроки на значительных площадях. Это, в свою очередь, способствует определению оптимальных сроков заготовки кормов для скота, что обеспечивает получение корма более высокого качества.

Ключевые слова. Научоемкие цифровые технологии, дистанционное зондирование посевов, цифровая трансформация орошаемого земледелия, точное земледелие

Введение. Применение цифровых технологий в агропромышленном комплексе

основывается на широких научных исследованиях. После принятия Госпрограммы «Цифровая экономика Российской Федерации» в 2017 г. [1] в российском сельском хозяйстве активно развиваются такие цифровые технологии как интернет вещей, искусственный интеллект, интернет вещей, технологии цифровых двойников, технологии дополненной реальности и другие. Важную роль в организации системы точного земледелия играют технологии спутникового и БПЛА-мониторинга посевов. Информационные системы с использованием данного вида мониторинга широко используются для поддержки принятия решений по управлению бизнес-процессами в сельском хозяйстве.

Одной из проблем обеспечения высокой продуктивности скота является заготовка качественных кормов. Основу кормового рациона составляют корма из трав, которые занимают 60-80% от общего объема. Площади, отведенные под кормовые травы, составляют около 13% посевных площадей всех сельскохозяйственных культур в Российской Федерации. Важной характеристикой кормов из трав является соотношение переваримого протеина и клетчатки. Это соотношение оптимально лишь в течение нескольких дней, что определяет необходимость своевременной уборки сельскохозяйственных культур.

Проблема определения оптимальных сроков заготовки кормов заключается в том, что в молодом растении удельное содержание переваримого протеина, то есть белка, высокое. Однако скашивание на этой фазе роста неэффективно, так как недостаточно клетчатки, которая отвечает за переваримость корма в организме животного. В поздних фазах развития культуры, наоборот, удельное содержание белка снижается, а удельное содержание клетчатки увеличивается. Кормоотдача от корма с высоким содержанием клетчатки также невелика из-за его низкой питательности. Поэтому необходимо выбрать такую фазу роста и развития растений, когда соотношение белка и клетчатки будет оптимальным.

Для злаковых кормовых трав (таких как овсяница, ежа сборная, тимофеевка и др.) оптимальным моментом для скашивания является фаза до начала колошения. Для бобовых кормовых трав (например, клевер луговой, люцерна и др.) – фаза бутонизации. В разных культурах оптимальное соотношение клетчатки и протеина может различаться. Например, в силосе и сенаже 1-го класса содержание сырой и нейтрально-детергентной клетчатки не должно превышать 26-28% и 50% в сухом веществе соответственно, при уровне сырого протеина не менее 14-16%.

Содержание азота на точечном масштабе традиционно определяется лабораторным методом или с использованием ручных датчиков, таких как N-тестер. Однако развивающиеся технологии дистанционного зондирования, включая наблюдения со спутников и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), все чаще находят применение для мониторинга посевов в растениеводстве. Благодаря быстрому развитию сенсорных технологий БПЛА могут одновременно нести на своем борту различные датчики, что делает их полезным инструментом для оценки состояния посевов, в том числе определения содержания азота в сельскохозяйственных культурах.

Так, например, в работе [2] при проведении экспериментов по дистанционному определению азота в листьях озимой пшеницы использовали пятидиапазонную мультиспектральную камеру, установленную на БПЛА. Результаты показали, что наиболее эффективным растительным индексом (VI) для мониторинга сельскохозяйственных посевов является вегетационный индекс RDVI (аналог NDVI, нормализованный для уменьшения влияния яркости почвы). Авторы [3] для оценки содержания азота в посевах озимой пшеницы использовали множество вегетационных индексов, среди которых выделили NDVI, NDRE, GNDVI. В то же время при аналогичных исследованиях в [4] предлагается использовать информацию, объединенную с двух различных датчиков. Эффективность определения концентрации азота (N) в картофеле оценивалась с использованием узких гиперспектральных полос в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах по сравнению с более широкими мультиспектральными полосами. Анализ данных по 160 образцам показал, что концентрация азота снижалась по мере созревания растений, в то время как внесение удобрений значительно повышало его уровень. Наилучшие результаты для определения общего содержания азота в

листьях были получены при использовании узкого спектрального коэффициента отражения (2,2 нм) со значением R^2 , равным 0,78, и среднеквадратичной ошибкой (RMSE), равной 0,41. Для определения концентрации нитрата азота в стеблях оптимальная точность была получена при использовании полос длиной волны 10 нм ($R^2 = 0,87$, $RMSE = 0,13$). Это исследование подтвердило, что узкие спектральные диапазоны обеспечивают более высокую точность оценок по сравнению с широкими диапазонами, что является преимуществом для будущих исследований в области агромониторинга.

В свою очередь дистанционное зондирование посевов с помощью спутникового мониторинга обладает рядом преимуществ перед применением БПЛА: регулярность съемки больших территорий, наличие исторических снимков, сравнительно низкие затраты на получение снимков на 1 гектар и возможность использования архивов открытых данных. Недостатками может являться более низкое пространственное разрешение, зависимость доступности получения от погодных условий (невозможность получить полезные данные в день пролета спутника из-за облачности) [5]. В данной статье рассматриваются возможности применения данных дистанционного спутникового мониторинга в оптическом диапазоне для оценки содержания протеина в посевах кормовых трав.

Материалы и методы исследования. Данное исследование проводилось в Конаковском районе Тверской области на полях кормового севооборота. В 2022-2024 годах на территории проводился отбор проб для последующего лабораторного анализа с целью определения времени укуса на производственных посевах (рисунок 1). Эти данные были использованы для исследования возможностей дистанционного спутникового мониторинга содержания протеина в посевах кормовых трав.

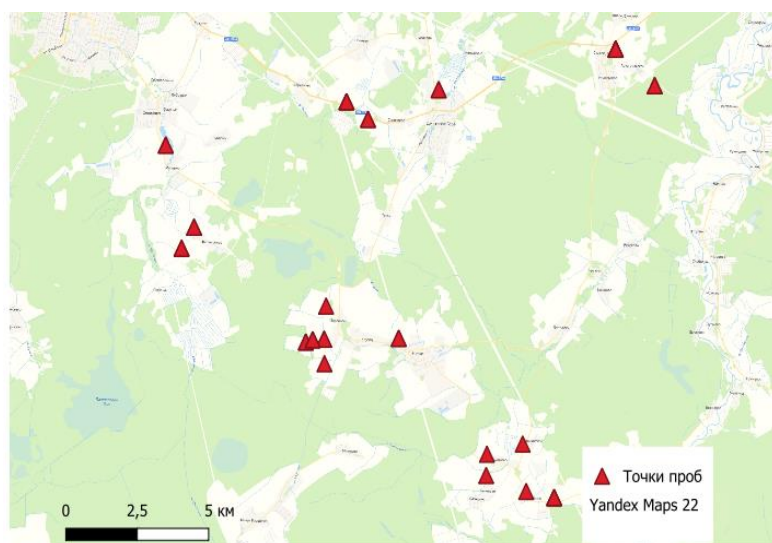


Рисунок 1 – Месторасположения отбора проб на территории исследования

Ранее была предложена методика дистанционного определения азота в посевах кормовых трав [6]. Зная содержание азота в растениях и умножив его на коэффициент 6,25 (так как среднее содержание азота в большинстве белков составляет 16 %), можно вычислить содержание переваримого протеина. Далее, используя ранее установленное корреляционное соотношение между клетчаткой и протеином для данной культуры и зоны, определяем содержание клетчатки.

В данном исследовании рассматривались возможности использования спутниковых данных Landsat 8, 9 (разрешение 30 м) и Sentinel-2 (разрешение 10-20 метров) для оценки содержания протеина в посевах кормовых трав с применением индексов NDVI, CCCI, MCARI, NDRE и REP. Спутники Sentinel-2 и Landsat 8-9 оснащены мультиспектральными камерами, которые создают оптические изображения в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. Эти изображения

используются для мониторинга растительного и почвенного покровов [7].

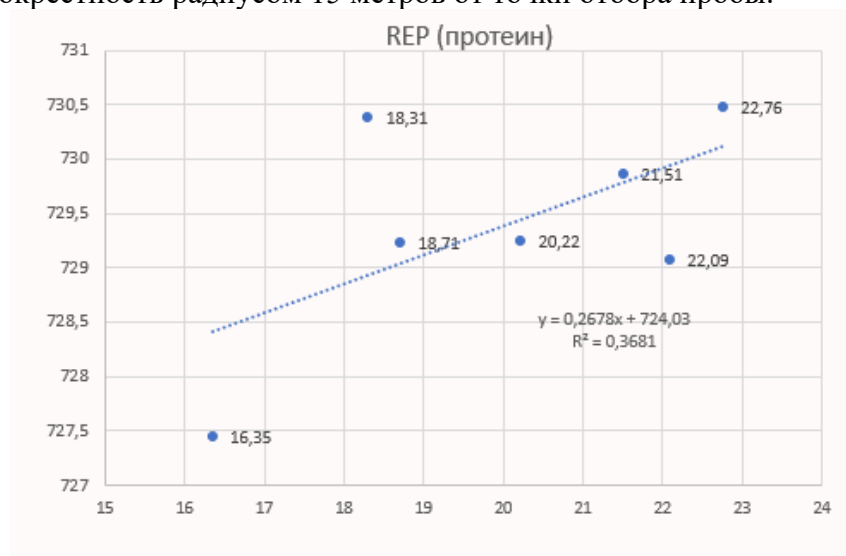
Для расчета вегетационных индексов были подобраны изображения со спутников, максимально приближенные по дате съемки к датам отбора проб. Поскольку сенсоры этих спутников являются оптическими, проводилось маскирование данных по облачности.

Значения вегетационных индексов NDVI, CCCI, MCARI, NDRE и REP для участков, в пределах которых отбирались точечные пробы, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения индексов NDVI, CCCI, MCARI, NDRE и REP

Номер поля	Сухое вещество, %	Протеин, %	Обменная энергия, МДж	NDVI_1805	NDRE2_1805	REP_1805	MCARI1805	CCCI_1805
Мр-5	20.9	20.22	12.88	0.773082	0.58788	729.0168	1.137107	0.75889
А-5	17.7	22.76	12.71	0.827258	0.633002	729.2255	1.420408	0.764389
Ма-12	22.5	22.4	12.4	0.712546	0.520646	726.867	0.975412	0.726626
Ма-2	18.9	16.35	12.52	0.830641	0.641763	729.365	1.436061	0.769467
Дг-7	18	22.09	13.22	0.801489	0.626635	730.4173	1.275305	0.778991
Ду-5	19.3	18.31	12.93	0.860819	0.689422	730.0312	1.805445	0.800601
В-1	19.2	21.51	12.32	0.73817	0.53989	727.0629	1.052362	0.729316
Ма-13	19.4	18.71	13.04	0.830676	0.650583	730.2579	1.457835	0.779758

Корреляционный анализ данных показал несколько низкие результаты (рисунок 2), что было связано авторами с неоднородностью посевов, а также с точностью определения координат локаций отбора с помощью мобильного приложения (заявленная точность определения местоположения составляет 1-10 м). Было принято решение использовать в корреляционном анализе медианные и средние значения вегетационных индексов, попадающих в окрестность радиусом 15 метров от точки отбора пробы.



Данная методология применения зонального анализа позволила значительно улучшить результаты, особенно для таких индексов, как NDRE (Normalized Difference Red Edge) и REP (Red Edge Position). Значение R^2 составило 0,602 для линейной и 0,622 для экспоненциальной функции для NDRE, а также 0,761 для линейной и 0,791 для экспоненциальной функции для REP.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования показали, что одной из причин низкой корреляции между некоторыми индексами и содержанием протеина является неоднородность посевов и низкая точность зафиксированного местоположения отбора проб. Наиболее перспективными вегетационными индексами для оценки содержания азота

(протеина) являются индексы NDRE и REP.

Для дальнейшего повышения точности оценок и внедрения методов машинного обучения необходимо увеличить количество точек обследования, что позволит создать более обширную базу данных для анализа и повысит надежность выводов. Использование более точных методов определения координат, таких как ГНСС-приемники высокой точности, может существенно сократить погрешности в измерениях и положительно повлиять на результаты исследования. Также следует запланировать проведение отбора проб для лабораторных анализов на различных стадиях роста посевов, что позволит детализировать информацию о содержании протеина на разных фазах развития и расширить диапазон значений характеристик для последующего корреляционного анализа с данными ДЗЗ, обеспечивая более точную оценку содержания протеина.

Выводы. В настоящее время достаточно высокую точность при определении азота в сельскохозяйственных культурах на различных стадиях вегетации можно получить на основе использования спутниковых снимков. Применение методов дистанционной оценки содержания азота (переваримого протеина) в кормовых травах позволяет определять с достаточно высокой степенью точности оптимальные сроки заготовки кормов из трав, обеспечивая оптимальное соотношение протеина и клетчатки в корме, что способствует высокому качеству корма и высокой кормоотдаче.

Благодарности:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-26-00377, <http://rscf.ru/project/25-26-00377/>

Литература:

1. Национальный проект «Цифровая экономика Российской Федерации. – Электронный ресурс. – URL: <https://digital.gov.ru/target/nacziionalnaya-programma-czifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federaczii>
2. **Hengbiao, Zheng**, Wei Li, Jiale Jiang 4 , Yong Liu , Tao Cheng , Yongchao Tian, Yan Zhu , Weixing Cao, Yu Zhang and Xia Yao . A Comparative Assessment of Different Modeling Algorithms for Estimating Leaf Nitrogen Content in Winter Wheat Using Multispectral Images from an Unmanned Aerial Vehicle // 2018 Remote Sens., 10(12), 2026; URL: <https://doi.org/10.3390/rs10122026>
3. **Zhichao, Chen**, Yuxin Miao, Junjun Lu. In-Season Diagnosis of Winter Wheat Nitrogen Status in Smallholder Farmer Fields Across a Village Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Remote Sensing // Agronomy 2019, 9(10), 619; <https://doi.org/10.3390/agronomy9100619>
4. **Jing, Zhou** , Biwen Wang, Jiahao Fan, Yuchi Ma, Yi Wang and Zhou Zhang. A Systematic Study of Estimating Potato N Concentrations Using UAV-Based Hyper- and Multi-Spectral Imagery// Agronomy 2022, 12(10), 2533; <https://doi.org/10.3390/agronomy12102533>
5. **Зейлигер, А. М.** Методы, масштабы и данные дистанционного зондирования в моделях роста и развития агрофитоценозов / А. М. Зейлигер, О. С. Ермолаева // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве : Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2021 года. – Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН, 2021. – С. 20-23.
6. **Khudyakova, E.V.**, Khudyakova, H.K., Shitikova, A.V., Savoskina, O.A., Konstantinovich, A.V. Periodico Tche Quimica, 2020, 17(35), стр. 1044–1056. Information technologies for determination the optimal period of preparing fodder from perennial grasses | Tecnologias da informação para determinar o período ótimo de preparação de alimentos a partir de ervas de cereais perenes. (Scopus) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57205543795>
7. **Pasqualotto, N.**; Delegido, J.; Van Wittenberghe, S.; Rinaldi, M.; Moreno, J. Multi-Crop Green LAI Estimation with a New Simple Sentinel-2 LAI Index (SeLI). Sensors 2019, 19, 904. <https://doi.org/10.3390/s19040904>