

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ И НАУКЕ: ОБЗОР

Б. Ж. ЖАНЗАКОВ, Ф. К. КУЛЫНТАЙ, В. Ф. СКОБЛИКОВ, А. И. ЛИСЕНОВИЧ, Е. А. ТЕН

*ТОО «Научно-производственный центр зернового хозяйства им. А. И. Бараева»
п. Научный, Шортандинский район, Республика Казахстан, 021601*

(Поступила в редакцию 15.05.2024)

Сельское хозяйство жизненно необходимая отрасль производства, от которой зависит продовольственная безопасность страны. Поэтому усовершенствование и оптимизация возделывания сельскохозяйственных культур для получения высокого и качественного урожая является первоочередной задачей науки и отрасли. В этой связи использование современных методов мониторинга и оценки посевов является актуальным инструментом оптимизации ресурсов.

В статье рассмотрены возможности использования методов дистанционного зондирования и некоторых вегетационных индексов при возделывании сельскохозяйственных культур и в селекционном процессе. Приведены результаты зарубежных и отечественных исследований с использованием наиболее популярных вегетационных индексов. Отмечена высокая взаимосвязь между урожайностью и показателями индексов вегетации, в частности с NDVI. Отмечена эффективность доступных космических снимков по информативности, оперативности и охвату территории, но имеющих низкое разрешение (10–30 м). Несмотря на относительно низкое разрешение данных космических снимков, для выполнения производственных задач и крупномасштабных исследований они пригодны. Но, в то же время, это не позволяет использовать их для анализа селекционных посевов, имеющих обычно небольшие площади. Определен перспективный и оптимальный на данный момент метод съемки – с использованием беспилотных летательных систем/аппаратов с мультиспектральной или гиперспектральной камерой.

Ключевые слова: *дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты, индексы вегетации, коэффициент корреляции, урожайность.*

Agriculture is a vital industry, on which the country's food security depends. Therefore, improving and optimizing the cultivation of agricultural crops to obtain a high-quality harvest is a priority for science and industry. In this regard, the use of modern methods of monitoring and assessing crops is a relevant tool for optimizing resources. The article discusses the possibilities of using remote sensing methods and some vegetation indices in the cultivation of agricultural crops and in the selection process. The results of foreign and domestic studies using the most popular vegetation indices are presented. A high relationship between crop yield and vegetation index indicators, in particular with NDVI, is noted. The effectiveness of available space images in terms of information content, efficiency and coverage of the territory, but having a low resolution (10-30 m), is noted. Despite the relatively low resolution of these space images, they are suitable for performing production tasks and large-scale studies. But, at the same time, this does not allow using them for analyzing breeding crops, which usually have small areas. A promising and currently optimal method of surveying has been identified – using unmanned aerial systems/devices with a multispectral or hyperspectral camera.

Key words: *remote sensing, unmanned aerial vehicles, vegetation indices, correlation coefficient, crop yield.*

Введение

Методы дистанционного зондирования активно применяются в сельском хозяйстве. С использованием спутниковой и беспилотной фотосъемки производят построение цифровых моделей рельефа, анализ неоднородности плодородия земель по спектральным характеристикам растительности, контроль выполнения работ на полях, оценку вариабельности посевов по различным вегетационным индексам, выявление повреждений растительности от внешних воздействий [1, 2], оценивают состояние больших массивов землепользования и посевов [3, 4], получают информацию о водопотреблении сельскохозяйственных культур [5].

С использованием индексов вегетации определяется величина и динамика изменения растительного покрова в пространстве и времени [6].

Установлено, что определить степень развитости и состояния растений можно, используя вегетационный индекс NDVI [7, 8, 9, 10]. Ряд простых операций с цветовыми гаммами может предоставить множество параметров, которые могут быть потенциально использованы в качестве индикаторов характеристики растительности [11].

Также, используя соответствующее программное обеспечение для анализа RGB изображений с цифровой камеры, можно определить зеленую биомассу и другие характеристики, представляющие интерес [12]. Например, обследование посевов с использованием данных RGB изображений и индекса зеленых листьев $GLI = (2 \times \text{Green} - \text{Red} - \text{Blue}) / (2 \times \text{Green} + \text{Red} + \text{Blue})$ является информативным инструментом для общей оценки состояния посевов [13].

Спутниковые снимки становятся более доступными для использования [14, 15] в производственных условиях, но применение их в научных целях и, в частности, в селекционном процессе ограничи-

вается их низким пространственным разрешением (10–30 м), так как посевы культур в селекционных программах [16] имеют небольшую площадь.

В связи с этим спутниковые снимки практически не используются для анализа и сравнения селекционных линий, тем более их сложно применять, когда образцы характеризуются близкими показателями и признаками (от разновидности до урожайности и зимостойкости) [17].

Тем не менее обширный информационный материал в виде численных показателей дистанционного зондирования позволяет перевести зачастую качественные характеристики в численные, снизить влияние субъективности в селекции, расширить объем исследуемых вариантов в опыте, и более детально характеризовать селекционные линии для дальнейшей работы, подкрепляя собственную интуицию цифровыми характеристиками признаков [17, 18, 19].

В данном случае, применительно к селекционным программам, аэрофотосъемка с помощью беспилотных летательных аппаратов и мультиспектральных и гиперспектральных камер более оптимальна, так как позволяет получать значения растительных индексов с малых площадей с разрешением до 1 см на пиксель. Такой подход, например, позволяет оценить перезимовку озимых культур в селекционных посевах [20].

Однако использование средств и материалов дистанционного зондирования в республике является достаточно новым направлением и не имеет значительной базы опытных данных, в связи с чем имеется необходимость как обобщения имеющегося опыта использования ДЗЗ и известных индексов вегетации в сельском хозяйстве Северного Казахстана, так и определения возможности их использования в селекционном процессе.

Основная часть

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) – процесс получения информации о поверхности и недрах Земли путем наблюдения и измерения из космического пространства собственного и отраженного излучения элементов суши, океана и атмосферы [21].

Космические аппараты дистанционного зондирования используются для мониторинга природных ресурсов Земли, решения задач метеорологии, а также применяются в сельском хозяйстве, геодезии, картографии, мониторинге поверхности земли и океана [21].

Спутниковое дистанционное зондирование в сельском хозяйстве началось с того, что большинство исследователей использовали данные для классификации растительного покрова, а фермеры сосредоточили внимание на типах сельскохозяйственных культур в качестве основного показателя. В последние годы биофизические свойства растений стали играть более важную роль в дистанционном зондировании в сельском хозяйстве. Классификация растительных покровов на основе обработки изображений является одним из крупнейших достижений в этой области. В точном земледелии преимущество дистанционного зондирования заключается в предоставлении повторяющейся информации без деструктивного отбора проб сельскохозяйственных культур, что позволяет получить полезную информацию удаленно. В больших географических районах дистанционное зондирование представляет собой недорогую альтернативу традиционным методам сбора данных [22].

Для нужд сельского хозяйства интерес вызывают снимки, сделанные и в «естественной комбинации», и в комбинации разных спектральных каналов.

Отмечено, что вегетирующие растения за счет хлорофилла максимально усваивают красную зону спектра (0,62...0,75 мкм) солнечной радиации и отражают ближнюю инфракрасную зону (0,75...1,30 мкм). Это позволяет четко отделять живую растительность от прочих природных объектов [17]. Дальнейшая их комбинация между собой, с другими спектрами и поправочными коэффициентами позволяет создавать индексы вегетации.

Для вычисления индексов используют следующие спектральные каналы мультиспектральных камер: синий (Blue) – 0,450...0,495 мкм; зеленый (Green) – 0,540...0,580 мкм; красный (Red) – 0,620...0,680 мкм; пограничный красный (RedEdge) – 0,707...0,727 мкм; ближний инфракрасный диапазон (NIR) – 0,800...0,880 [17].

Комбинация красного или относительного коэффициента индекса растительности: $RVI = RED / NIR$ (ratio vegetation index). Эта комбинация очень популярна и используется, главным образом, для изучения состояния растительного покрова, мониторинга дренажа и почвенной мозаики, а также для изучения агрокультуры [23].

Наиболее популярен и часто используется индекс вегетации, который состоит из следующей комбинации: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ (normalized difference vegetation index) [24].

Для растительности NDVI принимает положительные значения, и чем больше вегетирующая биомасса, тем он выше и характеризует плотность растительности, что позволяет оценить всхожесть,

рост, развитие и т.п. Индекс малочувствителен к атмосферным и почвенным фонам, кроме случаев со слабой растительностью [1, 2, 17].

Расширенный индекс растительности EVI (Enhanced Vegetation Index) $= 2,5 \times ((\text{NIR} - \text{Red}) / ((\text{NIR}) + (C1 \times \text{Red}) - (C2 \times \text{Blue}) + L))$, где поправочные коэффициенты $C1 = 6$, $C2 = 7,5$, $L = 1$. Это улучшенный вегетационный индекс имеет усиленный сигнал от растительности в регионах с высокой биомассой, а также разделение сигнала от растительности и почвы и минимизации остаточного влияния аэрозолей в атмосфере [25, 26]. С целью использования данных более высокого временного разрешения путём оптимизации (минимизация разницы EVI и EVI2) были вычислены значения параметров для EVI2 (двухдиапазонный EVI) $= G \times (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + C \times \text{RED} + L)$, где поправочные коэффициенты $G = 2,5$, $C = 2,4$, $L = 1$ [27]. Эта версия EVI2 применима для данных с датчиков MODIS на спутниках TERRA и AQUA [28]. Существуют и другие индексы EVI2, например для датчиков ASTER. У них с MODIS разные диапазоны. Поэтому у EVI2 Miura T. (2008) комбинация спектров: $2,4 \times (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + 1)$ [29]. EVI2 может быть использован в качестве замены EVI для извлечения значений пикселей QA (Quality Assessment или качественной оценки), которые не содержат облаков или снега и небольшого количества аэрозоля [30].

В работе Huete A. R. (1988), было показано, что значение $L = 0,5$ является оптимальным для минимизации влияния почвы. В дальнейшем разработанный индекс стал основой для целого семейства параметрических индексов вида SAVI (индекс растительности с коррекцией по яркости почвы. Он часто используется в пустынных областях, где растительное покрытие незначительно). В развитии идеи устранения влияния почвы на основе SAVI было предложено эмпирически найденное решение для неизвестного параметра L [31], которое было модифицировано в виде итеративного способа расчёта коэффициента L , дающего наиболее оптимальное решение задачи минимизации эффекта почвы: $L = 1 - 2N + 1 - \sqrt{(2N + 1)^2 - 8(N - R)} / 2$. Данный индекс также используется для уточнения границ в случае преобладания травянистой растительности [32].

Перечисленные индексы являются самыми популярными.

Проводились исследования и по сравнению эффективности разных индексов вегетации. Комаровым А. А., Мунтяным А. Н., Сухановым П. А. (2018) при сравнительном анализе ряда вегетационных индексов по спутниковым данным Difference Vegetation Index (DVI), Green Difference Vegetation Index (GDVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Leaf Area Index (LAI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) с пространственным разрешением 30 м установлено наличие статистически значимой связи урожайности зерновых культур и многолетних трав по всем индексам вегетации, что наблюдалось с середины мая. При этом наибольший коэффициент корреляции был выявлен для индексов DVI и SAVI – $r=0,895$ и $0,877$ соответственно, $p=0,01$ [33]. Однако более поздние исследования Комарова А. А., Кирсанова А. Д., Малашина С. Н. (2021) по сравнению различных вегетационных индексов показали, что NDVI наиболее информативен (в таежной зоне Ленинградской области, РФ) и больше других подходит для целей и задач оценки состояния растений, особенно в кормопроизводстве. Вместе с тем авторы советуют не отказываться от применения других индексов вегетации. Особенно необходимо учитывать не только достоинства, но и некоторые недостатки использования индекса NDVI. Поэтому другие индексы вегетации будут хорошо дополнять NDVI [34].

Обширные исследования проведены и по определению связи показателей индексов вегетации с урожайностью сельскохозяйственных культур и различными фенологическими показателями.

Так, Гениным В. А., Клебановичем Н. В. (2018), установлено, что урожайность кукурузы имеет высокую степень связи с индексом вегетации в определённую фенологическую стадию развития растений, для которой уровень связи максимальный в фазе 15-ого листа. Также было обнаружено, что для сои уровень связи значительно ниже, чем для кукурузы [35].

Урожайность сои в меньшей степени связана со значением ее вегетационной массы, что в первую очередь может быть объяснено тем, что соя является бобовой культурой, у которых обычно урожайность семян слабо связана с величиной общей биомассы. Однако, предполагается, что участки со средними и высокими показателями индекса вегетации сои на момент наступления фенологической стадии плодообразования могут в итоге дать более высокие значения убираемой массы зерна [35].

Аналогичные исследования, проведённые Zhang, M., O'Neill, M., Hendley, P., Drost, D., Ustin, S. (1998) [36] показывают, что между показателями индексов вегетации и данными урожайности существует тесная связь при условии правильно подобранного интервала съёмки. В ходе исследования с использованием статистических моделей им удалось объяснить 70 % урожайности культур. Успешная оценка вариативности урожайности сои была произведена в США с использованием данных

съемки беспилотного летательного аппарата [37]. Еще одно исследование было проведено в Латинской Америке [38], в ходе которого авторы использовали данные в фенологическую фазу цветения кукурузы и данные урожайности на тестовых площадках, где также были получены высокие коэффициенты статистической связи.

В исследованиях Оленина О. А., Зудилина С. Н., Осоргина Ю. В. (2019), подсчет коэффициентов корреляции между индексами NDVI и физическими показателями биомассы озимой пшеницы – всего и массы зерна показали, что наибольшая корреляция отмечается в фазе молочной спелости у озимой пшеницы (с массой зерна, $r = 0,82$); в фазе начала колошения ячменя (с массой зерна, $r = 0,97$). Отмечается, что могут быть также получены отрицательные коэффициенты корреляции, на участках, где имеется значительное преобладание биомассы сорняков над биомассой растений культур. Данный фактор необходимо учитывать при дальнейших исследованиях [39].

В работе Генином В. А., Клебановичем Н. В. (2018) рассмотрена связь индекса вегетации и урожайности озимой пшеницы, было показано, что индекс вегетации имеет значительную связь с массой убираемого зерна [40].

Исследования были проведены не только по определению связи индексов вегетации с урожайностью, но и с другими показателями растений.

Так, Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г., Шестакова Е. О. (2018) установили, что коэффициент корреляции между индексами вегетации и относительным содержанием хлорофилла в мг/г составляет $r = 0,79$. Это говорит о достаточно высокой степени сопряжения NDVI с количеством фотосинтетических пигментов в органах растений озимой пшеницы [41].

Также авторами, установлено, что корреляционная связь урожайности с NDVI повышается с улучшением условий выращивания. Они предполагают, что это может быть связано с действием факторов окружающей среды, не позволяющих реализовать посевам в достаточной степени потенциал продуктивности, связанный с технологическими и генотипическими особенностями в сложившихся условиях [42].

Высокая степень взаимосвязи между содержанием хлорофилла в единице биомассы растений озимой пшеницы и индексом NDVI получена в исследованиях Панеш А. Х и Цалова Г. В. (2017). Отрицательные значения полученных коэффициентов корреляции R_{corr} объясняются тем, что максимальная концентрация хлорофилла у озимой пшеницы имеет место в начальные периоды роста и развития. Ими же выявлено наличие невысокой корреляционной взаимосвязи между площадью ассимиляционной поверхности посевов озимой пшеницы и их индексом NDVI. Коэффициент корреляции в среднем за период исследований составил 0,65 [43].

Отмечено, что показатели разных индексов имеют разную корреляцию с урожайностью и выходом белка с единицы площади в разные периоды, но визуально дублируют графики NDVI. В разный период у разных индексов вегетации – корреляция колеблется от отрицательной до положительной [17].

Также, данные вегетационных индексов могут быть использованы как индикатор для определения обеспеченности растений влагой. Исследования Das D.K., Singh G. (1989) показали, что в видимом спектре культуры, подверженные стрессу от нехватки влаги, демонстрировали более высокую спектральную отражательную способность, чем культуры, не подвергавшиеся стрессу. Определена разница между стрессовыми и нестрессовыми культурами по значениям вегетационных индексов – NDVI, RVI, PVI и GI [5].

Методы дистанционного зондирования и индексы вегетации обширно применяются в оценке здоровья и темпов роста растений сельскохозяйственных культур.

В ТОО «Научно-производственный центр зернового хозяйства им. А. И. Бараева» активно применяются методы дистанционного зондирования и индексы вегетации для мониторинга за посевами в период вегетации (рис. 1).

Также, ведутся постоянные наблюдения и исследования по разработке методов дистанционной оценки проявления водной эрозии (рис. 2).

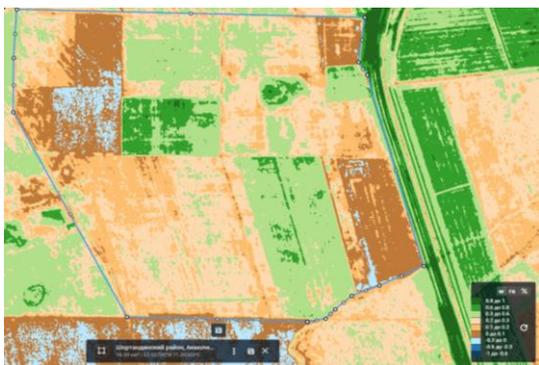


Рис. 1. Индекс ARVI (05.08.2022г.).
Поля ТОО «НПЦЗХ им. А. И. Бараева»



Рис. 2. Аэрофотоснимок весенних водотоков
(10.04.2023 г.)

Установлено, что дистанционный мониторинг полей позволяет получать оперативную информацию о проявлениях водной эрозии для принятия последующих решений, к тому же существенно снижает временные и трудовые затраты на проведение обследований на больших площадях сельскохозяйственных угодий [44].

Как показывают результаты краткого обзора, различные индексы вегетации достаточно полно характеризуют состояние и развитие посевов, позволяют корректировать и прогнозировать уровень урожайности культур. Поэтому имеется возможность применения материалов дистанционного зондирования для сравнительного анализа выделяемых линий и сортов культур.

Исследования по использованию индексов вегетации в области селекции локальны, но имеют место быть.

Зарубежные ученые, Yang G., Liu J., Zhao C., Li Z., Huang Y., Yu H., Yang, H. (2017), занимающиеся дистанционным зондированием, 5–7 лет назад уже начали оценивать признаки растений и анализировать данные селекционных экспериментов [45]. Однако Machwitz M., Pieruschka R., Berger K., Schlerf M., Aasen H., Fahrner S., Rascher U. (2021) отмечают, что их результаты в то время часто не интерпретировались в свете физиологических процессов, которые определяют отношение урожая к окружающей среде [46].

Вилюнов С. Д., Зотиков В. И., Сидоренко В. С., Старикова Ж. В., Мальцев А. А. (2022), установили, что у селекционных вариантов озимой пшеницы визуально было заметно отсутствие стабилизации индексов и слабое, затяжное увядание в период оттока ассимилянтов в зерновку. По их мнению, такие линии должны исключаться из дальнейшей селекции. Предпосылки для их исключения можно предполагать еще при весеннем анализе индексов вегетации [17].

Ыдырыс А. А., Сарбаев А. Т., Есимбекова М. А., Дубекова С. Б. (2022), в условиях юго-востока Казахстана, изучали возможность оценки линий яровой пшеницы по RGB и мультиспектральным снимкам. Ими были выявлены высокие положительные коэффициенты корреляции между NDVI и зеленой зоной (GA), относительно зеленой зоной (GGA), зеленой зоной на м² (GAm²) и относительно зеленой зоной на м² (GGAm²) на аэрофотоснимках с естественной комбинацией цветов и урожайностью на них [47].

Lammerts van Bueren E. T., Struik P. C. (2017) отмечают, что в целом функциональные признаки и косвенная оценки сельскохозяйственных культур определенная на основе разнообразных спектральных данных в гибридном рабочем процессе может стать краеугольным камнем точного земледелия и важным элементом для разработки новых селекционных стратегий [48].

Однако, фундаментальных исследований по использованию дистанционного зондирования и индексов вегетации в селекционном процессе должным образом не проводилось.

Заключение

Вышеизложенный обзор работ по ДЗЗ дают основание полагать, что методы дистанционного зондирования с использованием индексов вегетации являются хорошим инструментом контроля за ростом и развитием растений.

Более детальные исследования были проведены в определении связи индексов с накоплением биомассы, содержанием хлорофилла в растениях и формированием урожайности. Однако, исследований по использованию дистанционного зондирования с индексами вегетации в области селекции мало.

Учитывая то, что с помощью дистанционного зондирования и индексов вегетации снизится субъективность и качественные показатели будут подкрепляться цифровыми данными в определении лучших селекционных линий, уже сейчас можно судить о перспективности использования ДЗЗ и ин-

дексов вегетации (NDVI, SAVI, EVI, ARVI, GNDVI и т.д.) в селекционном процессе. Это и требует дальнейшего изучения.

Данная статья опубликована в рамках ПЦФ МСХ РК: BR22885719 «Разработать и внедрить устойчивые системы земледелия для рентабельного производства сельскохозяйственной продукции в условиях изменяющегося климата для различных почвенно-климатических зон Казахстана» на 2024–2026 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фахрутдинов, Р. Р., Барышников, Н. А., Гусева, С. А. Беспилотные технологии в АПК – перспективы и востребованность на рынке. – Режим доступа: <http://docplayer.ru/64559340-Oblasti-primeneniya-bpla.html> – Дата обращения: 20.04.2023.
2. Фахрутдинов, Р. Р., Барышников, Н. А., Гусева, С. А. Опыт применения мультиспектральной съемки в области сельского хозяйства. – Режим доступа: <https://ssau.ru/pagefiles/final%20002%20web.pdf> – Дата обращения: 20.04.2023.
3. Захарян, Ю. Г. Перспективы использования геоэвистики для анализа состояния растений по данным дистанционного зондирования Земли / Ю. Г. Захарян, А. А. Комаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – №3. – Т.16. – С. 140–148. doi: 10/21046/2070-7401-2019-16-3-140-148.
4. Thorp, K. A review on remote sensing of weeds in agriculture / K. Thorp, L.F. Tian // Precision Agriculture. 2004. – № 5(5). – P. 477 – 508. doi: 10.1007/s11119-004-5321-1.
5. Das, D. K. Estimation of evapotranspiration and scheduling irrigation using remote sensing techniques / D. K. Das, G. Singh// In: Proc. Summer Inst. On Agricultural Remote Sensing in Monitoring Crop Growth and Productivity. New Delhi: IARI; 1989. p. 113–117.
6. Чашин А. Н., Гилёв В. Ю. Оценка мощности плодородного слоя техногенно-нарушенных почв с применением вегетационного индекса NDVI // Исследования антропогенно-измененных экосистем и урбоэкология. Социально-экологические технологии. – 2020. – № 3. – Т. 10. – С. 290–305.
7. Фомин Д. С., Чашин А. Н. Вегетационный индекс NDVI в оценке зерновых культур опытных полей Пермского НИИСХ // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4 (72). – С. 39 – 42.
8. Моделирование динамики вегетационного индекса NDVI озимой пшеницы в условиях ЦФО / А. Г. Буховец, Е. А. Семин, Е. И. Костенко и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – № 2 (57). – С. 186 – 199.
9. Связь нормализованного индекса вегетации (NDVI) с урожайностью посевов озимой пшеницы / Ю. П. Федулов, Ю. В. Подушин, А. Н. Мязина и др. // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам 71-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2015 год. – Краснодар, 2016. – С. 106–107.
10. Осоргин Ю. В. Осоргина О. Н. Изучение взаимосвязей урожайности яровой пшеницы и индекса вегетации NDVI в условиях северного района оренбургской области на основе данных дистанционного зондирования Земли // Вклад молодых ученых в аграрную науку: материалы международной научно-практической конференции. – Кинель, 2018. – С. 122 – 124.
11. Casadesus, J. Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding // J. Casadesus, D. Villegas// Journal of Integrative Plant Biol. – 2013. – Vol. 56 – P. 7 – 14. <https://doi.org/10.1111/jipb.12117>.
12. Casadesús, J. Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments / J. Casadesús, Y. Kaya, J. Bort, M.M. Nacht, J.L. Araus, S. Amor, G. Ferrazzano, F. Maalouf, M. Maccaferri, V. Martos, H. Ouabbou, D. Villegas // Annals of Applied Biology. – 2007. – Vol. 150. – P. 227 – 236. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00116.x>.
13. Kurbanov, R. K. Primenenie vegetatsionnykh indeksov dlya otsenki sostoyaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Application of vegetation indexes to assess the condition of crops] / R. K. Kurbanov, N. I. Zakharova // Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii. – 2020. – Vol. 14. – №2. – P. 4 – 11 (In English). doi 10.22314/2073-7599-2020-14-4-4-11.
14. Moran, M. S. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management / M. S. Moran, Y. Inoue, E. M. Barnes // Remote Sensing of Environment. – 1997. – Vol 16. – P. 319 – 346. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(97\)00045-x](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(97)00045-x).
15. Huete, A. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices / A. Huete, K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao, L. G. Ferreira // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 83. – P. 195 – 213.
16. Методы высокопроизводительного фенотипирования растений для массовых селекционно-генетических экспериментов / Д. А. Афонников, М. А. Генаев, А. В. Дорошков и др. // Генетика. – 2016. – № 7. – Т. 52. – С. 788 – 803.
17. Применение вегетационных индексов в селекции озимой мягкой пшеницы / Вилунов, С. Д., Зотиков, В. И., Сидоренко и др. // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2022. – 3(43). – С. 73 – 83. doi: 10.24412/2309-348X-2022-3-73-83.
18. Терехин, Э. А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 1. – С. 23.
19. Сторчак, И. Г. Прогноз урожайности озимой пшеницы с использованием вегетационного индекса NDVI для условий – Ставропольского края: автореферат дис. ... канд. с.-х. наук. – Ставрополь, 2016. – 22 с.
20. Kurbanov, R., Zakharova, N., Sidorenko, V., Vilyunov, S. The Use of Vegetation Indices in Comparison to Traditional Methods for Assessing Overwintering of Grain Crops in the Breeding Process /R. Kurbanov, N. Zakharova, V. Sidorenko, S. Vilyunov// In: Hu, Z., Wang, B., Petoukhov, S., He, M. (eds) Advances in Artificial Systems for Power Engineering II. AIPE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 119. Springer, Cham. doi 10.1007/978-3-030-97064-2(6).
21. Дистанционное зондирование Земли. – Режим доступа: <https://www.gov.kz/memleket/entities/mdai/activities/799?lang=ru> – Дата обращения: 25.04.2023.
22. de Beurs, K. M. Estimating the effect of gypsy moth defoliation using MODIS / K. M. de Beurs, P. A. Townsend, // Remote sensing of environment – 2008. – Vol.112. – No.10. – P. 3983 – 3990.
23. Jordan, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor / C. F. Jordan // Ecology. – 1963. – Vol. 50. – P. 663–666.
24. Rouse, J. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS / J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering // Third ERTS Symposium, NASA. – 1973. – SP-351. – Vol. 1. – P. 309 – 317.

25. Junges, A. H. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity on natural grasslands in Pampa biome / A. H. Junges, C. Bremm, D. C. Fontana, C. O. de Oliveira, L. P. Schapardini, P. C. de Faccio Carvalho // *Sci. Agric.* – 2016. – Vol. 73. – № 4. – P. 332 – 337.
26. Ландшафтная интерпретация различий сезонной динамики вегетационного индекса EVI поверхности пахотных земель Брянской области / Г. В. Лобанов, А. Ю. Чарочкина, М. В. Авраменко и др. // *Вестн. северо-восточного федерального ун-та им. М. К. Амосова. Серия: Науки о Земле.* – 2020. – № 3 (19). – С. 25–35.
27. Fernandes, J. L. Sugarcane yield estimates using time series analysis of spot vegetation images / J. L. Fernandes, J. V. Rocha, R.A.C. Lamparelli // *Scientia Agricola.* – 2011. – № 68. – P. 139 – 146.
28. Jiang, Z. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band / Z. Jiang, A. Huete, K. Didan, T. Miura // *Remote Sensing of Environment.* – 2008. – № 112(10). – P. 3833 – 3845. doi:10.1016/j.rse.2008.06.006.
29. Miura, T. Inter-comparison of aster and modis surface reflectance and vegetation index products for synergistic applications to natural resource monitoring / T. Miura, H. Yoshioka, K. Fujiwara, H. Yamamoto // *Sensors (Basel, Switzerland).* – 8 (4). – P. 2480 – 2499. doi:10.3390/s8042480.
30. Зайтов Ш. Ш. Согласование 2- и 3-канальных вегетационных индексов для растительного покрова на естественных пастбищах // *Экономика и социум.* – 2022. – №3(94)-2. – С. 555–563.
31. Jiang, Zh. 2-band Enhanced Vegetation Index without a blue band and its application to AVHRR data / Zh. Jiang, A. R. Huete, Y. Kim, K. Didan // (Proceedings Volume 6679, Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability. – 2007. – IV. – 667905. <https://doi.org/10.1117/12.734933> Event: Optical Engineering + Applications, 2007, San Diego, California, United States).
32. Huete, A. R. A Soil - Adjusted Vegetation Index (SAVI) / A. R. Huete // *Remote Sensing of Environment.* – 1988. – Vol. 25. – № 3. – P. 295–309.
33. Комаров, А. А., Мунтян, А. Н., Суханов, П. А. Выбор информативных показателей дистанционного зондирования состояния растительного покрова // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.* – 2018. – №3 (52). – С. 64–70.
34. Комаров А. А., Кирсанов А. Д., Малашин С. Н. Сравнительная характеристика различных вегетационных индексов при оценке состояния растительного покрова кормовых трав // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.* – 2021. – №2 (63). – С. 18 – 29. doi: 10.24412/2078-1318-2021-2-18-29.
35. Генин В. А., Клебанович Н. В. Моделирование урожайности кукурузы и сои по данным дистанционного зондирования земли // *Вестник БГСХА.* – 2018. – №4. – С. 100–104.
36. Zhang, M. Corn and soybean yield indicators using remotely sensed vegetation index / M. Zhang, M. O'Neill, P. Hendley, D. Drost, S. Ustin // *Proceedings of the 3rd International Conference, Milan, 23–26 June. 1998* – P. 403–415.
37. Yang, C. Mapping Grain Sorghum Yield Variability Using Airborne Digital Videograph / C. Yang, G. L. Anderson // *Precision Agriculture.* – 2000. – Vol. 2. – № 1. – P. 7–23.
38. Fernandez, Y. Maize crop yield estimation with remote sensing and empirical models / Y. Fernandez, J. Soria –Ruiz // *Conference: IGARSS 2017, USA.* – 13 - 17 June. – P. 493–511.
39. Оленин О. А., Зудилин С. Н., Осоргин Ю. В. Цифровой мониторинг показателей агроэкосистем на основе космических и беспилотных технологий // *Пермский аграрный вестник.* – 2019. – №3 (27). – С. 53–61.
40. Генин В. А., Клебанович Н. В. Моделирование урожайности озимой пшеницы по данным дистанционного зондирования земли // *Земледелие и защита растений.* – 2018. – №4 (119). – С. 24–32.
41. Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г., Шестакова Е. О. Связь вегетационного индекса NDVI с содержанием хлорофилла в растениях озимой пшеницы // *Аграрный вестник Урала.* – 2018 – №4(171). – С. 10–16.
42. Сторчак И. Г., Ерошенко Ф. В., Шестакова Е. О. Особенности динамики вегетационного индекса NDVI в различных почвенно-климатических зонах Ставропольского края // *Аграрный вестник Урала.* – 2019. – №9 (188). – С. 12–18.
43. Панеш А. Х., Цалов Г. В. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы на основе сервисов геоинформационных систем // *Вестник АГУ.* – 2017. – №4(211). – С. 175–180.
44. Лисенович А. И. Применение дистанционного зондирования и геоинформационных систем при мониторинге динамики проявлений водной эрозии // *Вестник Кызылординского университета имени Коркыт Ата.* – 2022. – № 4(63). – С. 198–205.
45. Yang, G. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives / G. Yang, J. Liu, C. Zhao, Z. Li, Y. Huang, H. Yu, H. Yang // *Frontiers in plant science.* – 2017. – Vol. 8. – P. 1111.
46. Machwitz, M. Bridging the gap between remote sensing and plant phenotyping – Challenges and opportunities for the next generation of sustainable agriculture / M. Machwitz, R. Pieruschka, K. Berger, M. Schlerf, H. Aasen, S. Fahrner, U. Rascher // *Frontiers in plant science.* – 2021. – P. 2334.
47. Продуктивность сортообразцов яровой пшеницы, отобранных с использованием RGB изображений / А. А. Ыдырыс, А. Т. Сарбаев, М. А. Есимбекова и др. // *Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина (междисциплинарный).* – 2022. – №1(112). – С. 153–163.
48. Lammerts van Bueren, E. T., Struik, P. C. Diverse concepts of breeding for nitrogen use efficiency. A review / E. T. Lammerts van Bueren, P. C. Struik // *Agronomy for Sustainable Development.* – 2017. – Vol. 37. – P. 1 – 24.