

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ
В СЕЛЕКЦИИ ПШЕНИЦЫ И ПРОСА

С.Д. ВИЛЮНОВ, В.С. СИДОРЕНКО, Н.А. СТЕПАНОВА, М.А. ШАПОРОВА

(ФГБНУ «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур»)

В статье изложен подход к обработке данных, расширяющий критические показатели структурного анализа растений новыми характеристиками вегетационных индексов. Подтверждена возможность выявления различий в генотипе растений показателями вегетационных индексов на примере проса посевного. Показано использование кластерного анализа в целях группировки испытываемых селекционных линий в кластеры с оптимальными характеристиками сортообразцов для дальнейшей селекционной работы. В 2021...2023 гг. получены практические результаты в виде переданных новых сортов озимой мягкой пшеницы, выделяющихся или имеющих большую продуктивность в кластерах с оптимальными показателями: Аист орловский, Зуша, Памяти Каткова и Аквамарин. Сделан вывод о перспективном использовании в селекционном процессе групп с редуцированным кущением на основе сортообразца Тимирязевская одностебельная. Выявлены перспективные селекционные линии с высокопродуктивным колосом на базе разновидности ферругинеум и новые формы ферругинеум и мильтурум с высокими значениями вегетационных индексов в сочетании с комплексом показателей, характеризующих урожайность и качество зерна.

Ключевые слова: селекционные индексы, вегетационные индексы, кластерный анализ, корреляционный анализ, структурный анализ, пшеница, просо, селекционный процесс.

Введение

Селекционный процесс в растениеводстве без детального описания включает в себя 3 этапа: получение исходного материала для отбора, собственно отбор и испытание. Но изначально селекция начинается с постановки задач выделения сорта, предназначенного для выращивания в определенных почвенно-климатических условиях и на современном уровне технологии возделывания. При формировании дальнейшего процесса селекции учитывается множество контролируемых параметров. Выбор анализируемых характеристик и различных методов селекции влияет на время и стоимость реализации задуманного проекта. Но в любом случае важнейшим методом селекции при отборе является оценка исходного материала по фенотипическим абсолютным показателям (структурный анализ), и чем больше характеристик в анализе, тем более точным ожидается результат.

В идеале создаваемый сорт должен отвечать не отдельным требованиям абсолютных показателей, а их взаимосвязанному комплексу. Поэтому характеристики, позволяющие одновременно контролировать уровень проявления нескольких количественных признаков, на промежуточных этапах селекции являются более значимыми, чем окончательные абсолютные величины. Это заметно при проведении

физиологических исследований, когда уровень транспирации или интенсивность фотосинтеза в абсолютном значении не имеют смысла (в отличие от «массы зерна с колоса» или «числа зерен в колосе», напрямую влияющих на продуктивность). Физиологи рассчитывают эти проявления признаков в виде отношений показателя интенсивности на единицу площади листа, на число хлоропластов в клетке, на единицу массы листа или урожая (сырой или сухой) и т.п. [1]. Такая процедура перехода к относительным величинам есть не что иное, как индексная оценка.

На растении можно найти и измерить в общем десятки и сотни тысяч характеристик, и совершенно очевидно, что их число не ограничивается числом генов в геноме. Таким образом, при изучении генетики признаков можно получить объемный массив экспериментальной информации. Естественно, что такой объем вряд ли будет осмыслен селекционером. В то же время комплексный индекс дает возможность одновременно контролировать и улучшать несколько признаков, сопряженных его формулой, а также производить отбор по интегрированной оценке или по связанным значениям. Эффективность использования индексов возрастает в сравнении с другими показателями, особенно при увеличении числа совмещенных признаков.

В селекции растений различные индексы, связывающие несколько количественных признаков, применяются с начала XX в., и анализ индексов имеет преимущества перед использованием абсолютных величин только в тех случаях, когда они выявляют известную закономерность, незаметную на абсолютных значениях, или когда оказываются менее изменчивыми, чем абсолютные величины [2]. Отмечается, как пример, что селекция на повышение продуктивности растений привела к изменению их анатомического строения: на протяжении всей длины стебля сортов пшеницы разных экотипов произошло увеличение диаметра междоузлий и толщины стенок соломины, и это способствует повышенной устойчивости растений к полеганию [3].

В настоящее время десятки различных селекционных индексов периодически используются в генетико-селекционной практике и в литературе, но наиболее широко применяемыми являются «Канадский, или удельный урожай колоса» (**Ки**, Число зерен в колосе, шт/длину колоса, см), и «Мексиканский индекс» (**Мх**, Масса зерна с колоса, г/высота растения, см) [4]. В настоящее время широко находят применение вегетационные индексы отражения, выражающие многие физиологические индексы и характеризующие общее состояние посевов растений. Значения этих индексов определяются содержанием хлорофилла и уровнем влагообеспеченности.

Определение абсолютных значений какого-либо признака по данным дистанционного зондирования пока невозможно, так как требует дополнительного изучения и сопряжения наземных наблюдений, но все же вегетационные индексы фиксируют связь с физиологическими процессами в косвенном проявлении многих признаков достаточно точно. Такие индексы подбираются экспериментально исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. Соответственно целесообразным является использование относительных показателей состояния растительности, получаемых на основе спектральных индексов и тесно коррелирующих с уровнем обеспеченности растений хлорофиллом и влагой [5]. Существует более 150 вегетационных индексов вместе с дополнительными индексами, разрабатываемыми по мере развития датчиков и появления новой информации. Аэрофотосъемка с помощью беспилотных летательных аппаратов и мультиспектральной камеры позволяет получать значения индексов с малых площадей с разрешением до 1 см на пиксель. Такие объективные характеристики

вегетационных индексов в комплексе с уже применяемыми параметрами, используемыми в селекционном анализе, способны более точно и на ранних этапах выявить различия в исследуемых образцах. Известно, что такой подход хорошо фиксирует оценку перезимовки озимых культур в селекционных посевах [6].

В селекции намного важнее создание экспрессных методов точной идентификации 7 главных физиолого-генетических систем, повышающих урожай в данной конкретной среде (аттракции, микрораспределений, адаптивности, горизонтального иммунитета, толерантности к загущению, генетической вариабельности длин фаз онтогенеза), а не генетическая характеристика количественного признака, которая обязательно изменится в другой среде [1]. Поэтому для селекционера встает вопрос об оперативном получении и аналитическом подходе при сопряжении этой информации по качественным и количественным характеристикам, в рамках бесспорной традиции селекции «Изучение генетики признаков».

Цель исследований: Обоснование функциональности и эффективности использования в селекционном процессе простых в получении вегетационных индексов на примере озимой мягкой пшеницы и проса посевного.

Материал и методы исследований

Посевы размещались на полях селекционного севооборота ФГБНУ ФНЦ ЗБК в блоке конкурсного испытания лаборатории селекции зерновых крупяных культур. Предшественник – пар. Почвы темно-серые лесные, среднесуглинистые, среднекультуренные. Общая площадь каждой делянки – 10,5 кв. м (ширина – 1,5 м, длина – 7 м), учетная площадь делянки – 10 кв. м.

В 2021 г. анализировалось 180 делянок (29 сортообразцов) озимой мягкой пшеницы, размещенных в блоке 10×18 делянок. В 2022 г. исследовалось 120 делянок (43 сортообразца) озимой мягкой пшеницы, расположенных в блоке 24×5, и 72 делянки (27 сортообразцов) проса посевного, расположенных в блоке 24×3. В 2023 г. анализировали 130 делянок (39 сортообразцов) озимой мягкой пшеницы, размещенных в двух блоках 13 × 5 делянок. Зачетная урожайность соответствует 14%-ной влажности зерна, пересчитанной по формуле Дюваля.

Вегетационные индексы получены с использованием квадрокоптера DJI Matrice 200 v2 с установленной ГНСС L1/L2 антенной, оснащенного модифицированной камерой DJI X4S20Mp (5472×3648) с трехосевым стабилизатором. Полеты осуществлялись с помощью мобильного приложения DJI Pilot, в рамках научного сотрудничества привлеченные сотрудниками ФГБНУ Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. Съемки были произведены 21.04.2021 г., 03.06.2021 г., 23.06.2021 г., 26.10.2021 г., 05.05.2022 г., 25.05.2022 г., 16.06.2022 г., 28.06.2022 г., 12.07.2022 г., 26.07.2022 г., 12.07.2022 г., 11.08.2022 г., 24.08.2022 г., 08.11.2022 г., 18.04.2023 г.

Корреляционный анализ данных осуществлялся встроенными средствами MS Excel, кластерный анализ нормированных параметров проводился собственными средствами по правилам объединения или связи UPGMC (невзвешенный центроидный метод) с вычислением меры дистанции, как Евклидово расстояние.

Результаты и их обсуждение

Для проверки стабильности проявления исследуемых признаков был проведен корреляционный анализ показателей ядра из испытываемых ежегодно сортов озимой мягкой пшеницы между годами (табл. 1).

Таблица 1

Стабильность проявления корреляционной связи признака в 12 сортах озимой мягкой пшеницы между годами, конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

Показатели	2021/2022 гг.	2021/2023 гг.	2022/2023 гг.
Урожайность, т/га	-0,112	-0,179	0,378
Высота растения, см	0,647	0,702	0,856
Длина колоса, см	0,853	0,717	0,670
Число зерен в колосе, шт.	0,758	0,218	0,221
Масса 1000 семян, г	0,853	0,645	0,743
Кустистость	0,538	0,254	-0,132
Выход зерна	0,736	0,366	0,096
Белок, %	0,256	0,428	0,486
Крахмал, %	0,100	0,475	0,706
Канадский индекс, Ки	0,643	0,399	0,722
Мексиканский индекс, Мх	0,709	-0,337	-0,295
Индекс линейной плотности, ИПК	0,825	0,833	0,656
NDVI	0,116	0,404	-0,247
CIGreen	-0,192	0,510	-0,112
NDRE	-0,080	0,424	-0,167

Анализируя данные таблицы 1, можно сделать вывод о том, что независимо от погодных условий наблюдаются сортовые особенности образцов в ядре, явно выражающиеся через 3 признака (высота растения, длина колоса и масса 1000 семян) и 2 селекционных индекса (Канадский индекс и индекс линейной плотности, или индекс потенциала колоса ИПК). Это подтверждают и многолетние работы других исследователей на яровой пшенице, доказавших, что метеорологические условия меньше всего влияют на натуру, массу 1000 зерен и выход муки [7]. Селекционные индексы связаны с этими тремя показателями в формуле и имеют значение зачастую выше, чем у самих показателей. Имеются и признаки, проявляющие высокие и средние показатели корреляции по сортам в связях отдельных лет. Остальные показатели между годами проявляют слабые корреляционные связи или не проявляют их совсем.

Селекционный процесс подразумевает испытание, браковку и отбор селекционных линий в сравнении со стандартом на продуктивность, но урожайность имеет слабую корреляционную связь между годами. Следовательно, наращивать продуктивность необходимо, отталкиваясь от комплекса присущих лучшим сортообразцам признаков. А поскольку в исследованиях ежегодно испытывается разнообразный набор образцов и сделать сравнительный корреляционный анализ по годам

не представляется возможным, то необходимо анализировать разницу в связях между стабильно сцепленными признаками всего массива и многолетнего однородного ядра испытуемых контрольных сортов образцов (рис. 1).

Анализ ежегодных колебаний отклонений в показателях корреляции исследуемых признаков с канадским селекционным индексом на всем испытуемом массиве и ядра из 12 базовых сортов дает картину о возможном присутствии в испытуемых селекционных линиях образцов, вносящих такие отклонения. Эти отклонения вызваны наличием образцов вне ядра с меньшим сцеплением по второму признаку с первым. Все это дает представление о проявлении признаков как о некой динамической системе, принимающей различное состояние в зависимости от проявления генотипа сортаобразца в различных почвенно-климатических условиях.

Определение взаимосвязей между переменными (показатели признаков) до уровня многомерных линейных и нелинейных отображений является сложной и, возможно, неразрешимой задачей. Соответственно для отбора испытуемых селекционных образцов необходимо упорядочить все исследуемые образцы в сравнительно однородные группы с уже проверенными временем базовыми сортаобразцами и признаками через многомерные наблюдения их различных показателей. Поэтому для группировки селекционных образцов был применен метод кластерного анализа, при котором объекты подразделяют на группы по важным показателям структурного анализа и различным индексам, объединяющим несколько критериев.

Уникальными показателями, характеризующими генотип сортаобразца, являются различные вегетационные индексы. Индексы усиливают контраст между почвой и растительностью, но сводят к минимуму влияние условий освещения. Нормализованный разностный вегетационный индекс $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ (*Normalized Difference Vegetation Index*) и индекс хлорофилла (*Green Chlorophyll Index*) – $GCI (CI_{Green}) = NIR / Green - 1$ наиболее популярны и часто используются. Для растительности NDVI принимает положительные значения, и чем больше вегетирующая фитомасса, тем он выше. Этот индекс характеризует плотность растительности, что позволяет оценить всхожесть, рост, развитие и т.п. CI_{Green} служит для выявления сезонных изменений фотосинтетического потенциала растений, так как интенсивность отражения зеленого и ближнего инфракрасного линейно коррелирует с общим содержанием хлорофилла.

Ранее нами [8] был рассмотрен вопрос о применении различных вегетационных индексов для картирования поведения генотипа озимой мягкой пшеницы на всем периоде вегетации с целью применения в селекционном процессе на продуктивность. Следовательно, показатели вегетационных индексов можно использовать в группировке однородных групп в селекционном испытании наравне с другими признаками, полученными в результате структурного анализа.

Погодные условия вегетационного периода 2021 г. были засушливыми ($ГТК = 0,83$), повышенные температуры в июне-июле существенно повлияли на формирование урожая отдельных сортаобразцов. В анализ были включены вегетационные индексы, имеющие максимальное значение в период начала колошения (03.06.2021 г.). В результате проведенного кластерного анализа по данным 2021 г. были получены группы сортов (табл. 2, 3) (рис. 2).

Заслуживает внимания кластер № 1, который состоит из одной короткостебельной селекционной линии лютеценс № 16 с высокими значениями вегетационных индексов и содержанием белка. Резко отличается от изучаемых сортаобразцов одностебельная форма Тимирязевская одностебельная, которая образует отдельный кластер № 2 с высокой массой зерна колоса и редуцированной кустистостью (1,5). В кластере № 3 сгруппированы сортаобразцы с повышенной ранневесенней кустистостью. Кластер 4 включает в себя новые линии озимой мягкой пшеницы с высоким содержанием

белка в зерне, существенно не уступающие стандарту Скипетр по урожайности (кластер № 5). В кластер № 6 вошли сорта и селекционные линии с наиболее высокими вегетационными и селекционными индексами, адаптированные к погодным условиям 2022 г. Кластер № 7 включает в себя крупнозерную форму лютеценс № 158.

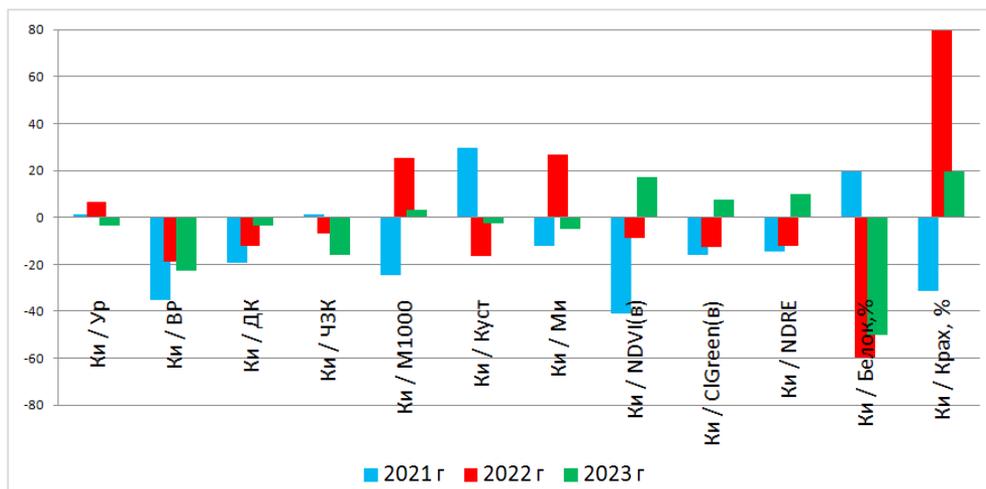


Рис. 1. Отклонение по годам корреляции исследуемых признаков с канадским селекционным индексом в массиве всех образцов и ядра 12 сортов озимой мягкой пшеницы, конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

Таблица 2

Селекционные образцы озимой мягкой пшеницы, вошедшие в кластеры по 2021 г., конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

№ п.п.	Варианты, вошедшие в кластер	Объем группы	Дистанция			SS
			Min	среднее	Max	
1	3. Лютеценс № 16 (Памяти Каткова)	1				
2	10. Одностебельная	1				
3	12. Аист х Ф-17; 16. М-39 х Синева; 24. Почаевка х Леонида	3	0,3680	0,4664	0,5663	0,0066
4	2. Лютеценс № 13 (Зуша); 4. Лютеценс № 17; 5. Лютеценс № 21; 6. Лютеценс № 22; 8. Лютеценс 982; 11. Леон. х АВС; 13. Аист х Ф-17; 14. Синева; 15. Валторна; 17. Леонида; 18. Междуреченка; 19. Эритро К-8 х Ф-17; 20. Эритро к-с 27; 21. Немчиновская 85; 22. Эритро 185; 25. М-39 х Синева	16	0,1402	0,5022	0,9163	0,0263
5	1. Скипетр, ст.; 26. Александра	2	0,4097	0,4097	0,4097	0,0000
6	7. Орловская 32; 9. А-71 (Аист орловский); 23. Тим. Юбил.; 27. № 132; 28. № 134	5	0,2712	0,4201	0,6788	0,0142
7	29. № 158	1				

Средние показатели анализируемых параметров структурного анализа, селекционных и вегетационных индексов в кластерах 2021 г.

№ кластера	Урожайность, т/га	Высота растения, см	Кусти-стость, шт.	Дли-на колоса, см	Число зерен в колосе, шт.	Масса зерна с колоса, г	Масса 1000 семян, г	Содержание белка, %	Содержание крахмала, %	Канадский индекс	NDVI	CIGreen
1	5,74	82,6	4,3	10,60	38,1	1,16	30,30	15,7	63,1	3,594	0,915	9,293
2	4,97	92,8	1,4	11,60	55,2	2,11	38,20	14,2	65,7	4,759	0,875	6,862
3	5,95	106,0	4,9	10,68	48,1	1,88	39,43	14,8	65,7	4,504	0,903	7,599
4	6,12	103,2	3,2	9,83	38,6	1,52	39,03	14,8	65,0	3,931	0,903	7,632
5	6,47	103,8	3,4	10,00	53,4	2,20	41,20	14,0	65,1	5,378	0,889	7,102
6	6,09	91,8	2,9	8,67	42,1	1,40	33,44	15,3	63,6	4,859	0,918	9,531
7	6,07	107,5	2,3	11,20	30,4	1,58	51,60	14,9	66,5	2,714	0,904	7,498

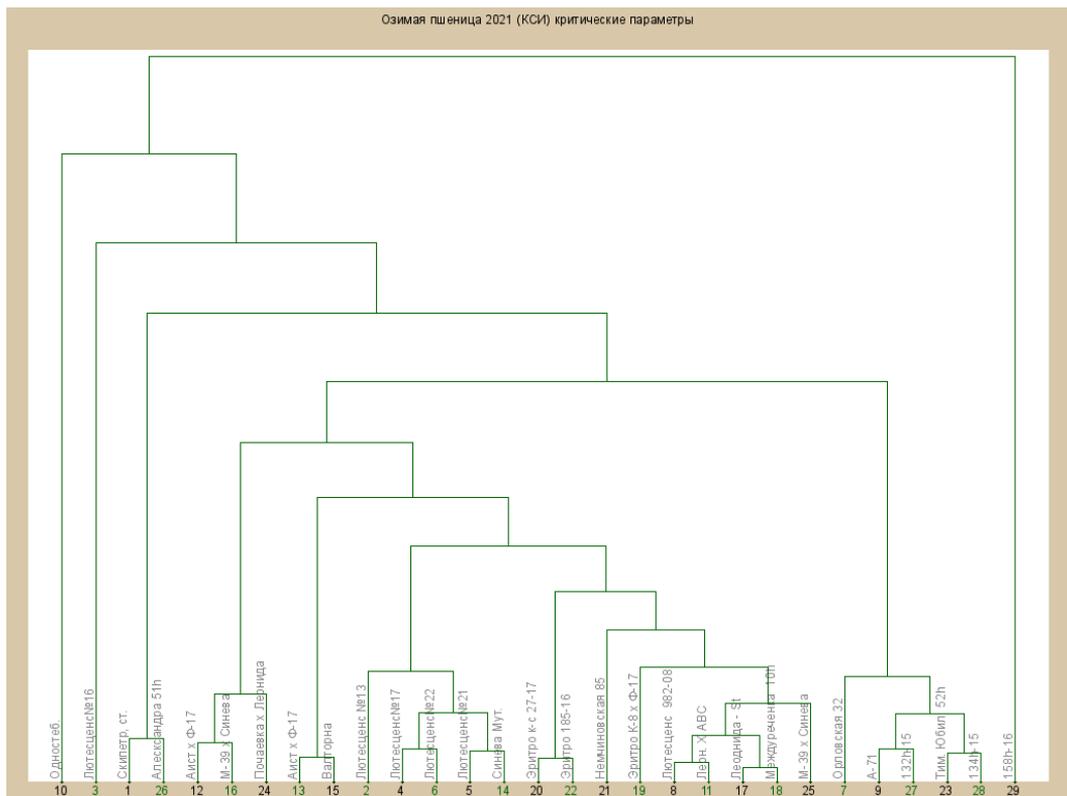


Рис. 2. Дендрограмма кластеризации селекционных образцов озимой мягкой пшеницы за 2021 г., конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

Погодные условия вегетационного периода 2022 г. были слабозасушливыми (ГТК = 1,01). В результате проведенного кластерного анализа по показателям, полученным в 2022 г., было получено 8 групп сортообразцов озимой мягкой пшеницы (табл. 4, 5) (рис. 3). В анализ были включены вегетационные индексы, имеющие максимальное значение в период начала колошения (25.05.2022 г).

Кластер № 1 представлен раннеспелыми сортами Гром, Ермак, широко распространенными в Орловской области. Резко отличается от изучаемых сортообразцов Тимирязевская одностебельная № 2 с высокой массой зерна колоса (3,29 г) и редуцированной кустистостью (1,2). Новые сорта и селекционные линии из кластера № 3 по большинству показателей превосходят сорта (кластер № 1). Заслуживает внимания кластер № 4, в котором сгруппированы самые высокоурожайные новые селекционные линии: лютесценс № 13 (сорт Зуша) и лютесценс № 132, которые имеют высокое значение канадского индекса.

В кластере № 5 сгруппированы высокоурожайные сортообразцы с высокими показателями вегетационных индексов. В кластер № 6 выделена высокорослая линия Мильтурум 7 с высоким содержанием протеина и сырой клейковины в зерне. Кластер 7 представлен остистыми и безостыми формами и включает в себя новый сорт Скипетр 2. В наиболее многочисленный кластер № 8 вошли высокоурожайные новые сорта и селекционные линии, в том числе линии с окрашенным колосом (разновидностей ферругинеум и мильтурум), хорошо адаптированные к погодным условиям 2022 г.

Таблица 4

Селекционные образцы озимой мягкой пшеницы, вошедшие в кластеры по 2022 г., конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

№ п.п.	Варианты, вошедшие в кластер	Объем группы	Дистанция			SS
			Min	среднее	Max	
1	11. Ермак; 19. Гром	2	0,5108	0,5108	0,5108	0,0000
2	26. Тим. Одностеб.	1				
3	1. Леонида; 10. Междуреченка; 16. № 16; 17. Московская 982; 20. Орловская 32; 21. Безостая100; 27. Александра	7	0,3259	0,6087	0,9082	0,0276
4	15. № 13 Зуша; 28. № 132/16	2	0,5846	0,5846	0,5846	0,0000
5	14. Скипетр; 24. А-71; 32. Аист × Ф17 (мил2); 33. Синева; 34. Аист × Ф17(мил3)	5	0,4053	0,5868	0,9357	0,0287
6	39. Ф17 Фав(мил7)	1				
7	2. Бирюза × Леонида; 3. (Л × Ф17) × Ф17(ферр1); 4. Московская 27; 5. Отб. 4 × Ф17(ферр2); 12. Московская 39; 29. Валторна; 35. Аист × Ф17(мил4); 37. Аист × Ф17(мил6); 40. Скипетр2	9	0,2323	0,6402	1,0407	0,0329
8	6. Отб. 4 × Ф17 (ферр3); 7. Отб. 4 × Ф17 (ферр4); 8. Отб. 4 × Ф17 (ферр5); 9. Немчиновская 85; 13. Дентро; 18. Б-20; 22. Юлия; 23. № 22; 25. Ф17 А71(мил1); 30. Л × АВС д80; 31. Аист; 36. Аист × Ф17(мил5); 38. Фаворитка; 41. Аист × Ф17 × А(блонд); 42. Аист × Ф17 × А(шат); 43. Киев 8Фрид	16	0,2718	0,6906	1,2491	0,0401

Средние показатели анализируемых параметров структурного анализа, селекционных и вегетационных индексов в кластерах 2022 г.

№ кластера	Урожайность, т/га	Высота растения, см	Кусти-стость, шт.	Длина колоса, см	Число зерен вколосе, шт.	Масса зерна с колоса, г	Масса 1000 семян, г	Со-дер-жание белка, %	Содер-жание крах-мала, %	Канад-ский индекс	NDVI	CIGreen
1	3,33	70,5	4,2	8,30	49,4	2,13	42,74	14,4	66,0	5,979	0,666	3,624
2	4,44	72,5	1,2	13,25	73,3	3,29	44,64	15,4	65,5	5,532	0,422	2,418
3	6,81	76,9	3,0	9,64	53,0	2,39	45,29	14,6	65,4	5,515	0,503	2,446
4	9,03	80,0	2,6	8,80	51,9	2,09	40,34	14,4	65,8	5,988	0,608	3,816
5	7,61	99,4	3,1	10,49	50,5	2,22	43,96	15,3	64,6	4,897	0,859	8,039
6	6,94	113,0	4,0	8,60	29,5	1,38	46,55	17,5	64,0	3,430	0,795	6,285
7	6,91	99,6	4,1	10,95	51,5	2,35	45,94	16,3	64,3	4,706	0,575	2,842
8	8,03	94,3	3,5	10,18	49,4	2,23	45,57	15,3	65,1	4,837	0,742	5,128

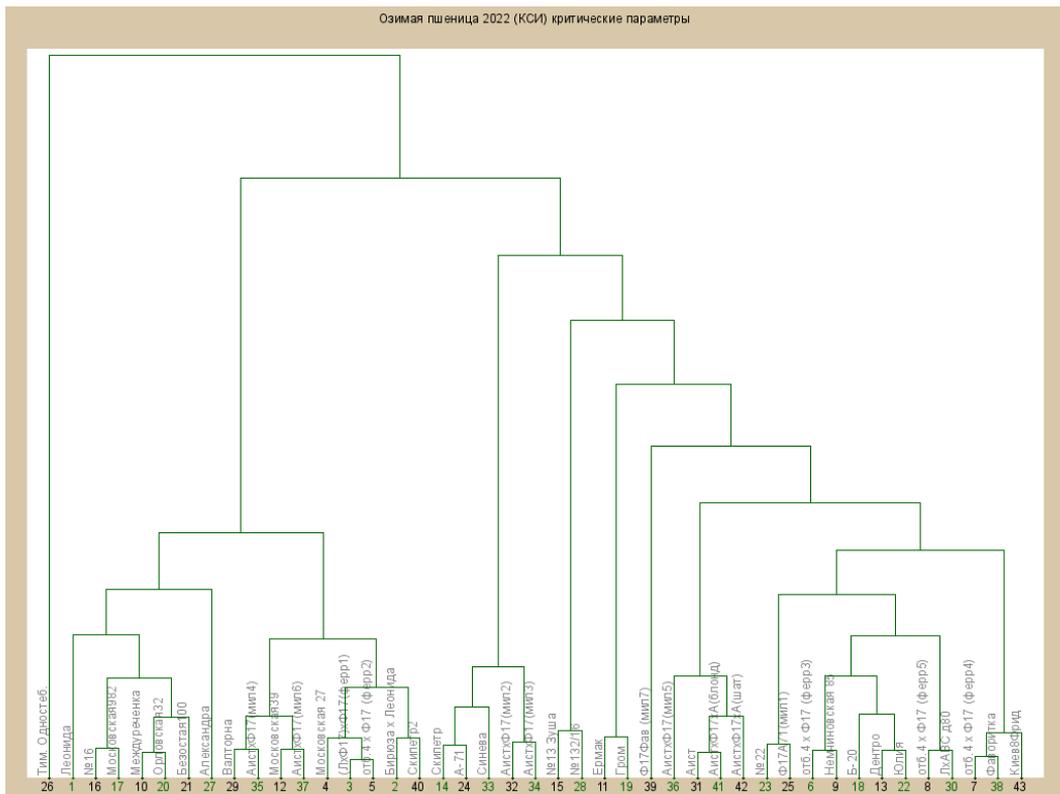


Рис. 3. Дендрограмма кластеризации селекционных образцов озимой мягкой пшеницы за 2022 г., конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

Погодные условия вегетационного периода 2023 г. были засушливыми (ГТК = 0,74), однако раннее возобновление весенней вегетации способствовало формированию высокой урожайности. В результате проведенного кластерного анализа по показателям, полученным в 2023 г., выявлено 8 групп сортов озимой мягкой пшеницы (табл. 6, 7) (рис. 4). В анализ были включены вегетационные индексы, полученные после перезимовки (18.04.2023 г).

Впервые в отдельные кластеры № 1 и № 2 вошли линии разновидности ферругинеум. Линия Ферр Б11 (кластер № 2) имеет рыхлый, хорошо озерненный колос и высокие значения вегетационных индексов. Кластер № 3 представлен формами эритроспермум, которые не превысили стандарт по урожайности. Наиболее низкорослая селекционная линия Лютесценс Е5 образует отдельный кластер № 4. Самые высокие значения канадского индекса имеют сортообразцы, представленные в кластерах № 5 и № 6. Для многочисленного кластера № 7, а также кластера № 8 характерны высокие значения вегетационных индексов в начале весенней вегетации, что обеспечило высокий уровень урожайности в 2023 г.

Таблица 6

Селекционные образцы озимой мягкой пшеницы, вошедшие в кластеры по 2023 г., конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

№ п/п	Варианты, вошедшие в кластер	Объем группы	Дистанция			SS
			Min	среднее	Max	
1	9. Отб № 4 x Ф17 д. 3–5	1				
2	11. Ферр Б11	1				
3	3. Немчиновская 85; 15. Блондинка	2	0,2695	0,2695	0,2695	0,0000
4	30. Лютесценс Е5	1				
5	22. Юлия; 24. № 22; 31. Аист д14	3	0,2655	0,3509	0,4221	0,0042
6	2. Эритро К8 × Фрид; 8. Междуреченка; 19. Зуша; 20. Орловская 32; 21. Семён; 25. Александра; 26. № 132–15; 35. Аист орловский	8	0,1910	0,4265	0,6297	0,0126
7	1. Тим. Юбилей; 4. Леонида × Ф20; 6. Леонида; 10. Лебедина 17; 12. Ферр Г6; 13. Ферр Ж1; 14. Шатенка; 16. Тим юбил. 2; 17. Скипетр; 18. № ; 23. Безостая 100; 27. № 141; 28. Тим. одност.; 29. Синева; 32. Акварин; 34. Мильтурум Ф17 × А71; 37. Скипетр 2; 38. Мильтурум АФ17 Е1 д. 601	18	0,1881	0,4914	0,8890	0,0190
8	4. Моск 39; 7. Л×Ф17×Ф17; 33. Лютесценс 158–16; 36. Мильтурум АФ17 д. 14–4роза; 39. Мильтурум; АФ17 д. 17–1	5	0,2290	0,3514	0,5436	0,0058

Средние показатели анализируемых параметров структурного анализа, селекционных и вегетационных индексов в кластерах, 2023 г.

№ кластера	Урожайность, т/га	Высота растения, см	Кустистость, шт.	Длина колоса, см	Число зерен в колосе, шт.	Масса зерна с колоса, г	Масса 1000 семян, г	Содержание белка, %	Содержание крахмала, %	Кандидский индекс	NDVI	CIGreen
1	6,29	79,2	2,8	7,85	31,7	1,65	52,02	16,0	65,1	4,038	0,297	1,139
2	7,14	81,3	1,1	12,05	57,3	2,51	43,79	14,8	65,8	4,755	0,380	1,448
3	7,02	78,9	1,6	6,83	30,9	1,44	46,55	15,1	66,0	4,522	0,416	1,539
4	7,97	70,5	1,1	8,70	34,7	1,23	35,36	15,2	66,2	3,989	0,368	1,409
5	7,68	86,2	1,8	9,18	46,7	2,36	50,47	14,2	66,8	5,080	0,313	1,228
6	7,57	73,7	2,0	7,61	40,1	1,75	43,88	13,6	66,4	5,290	0,327	1,255
7	7,94	81,1	1,6	8,86	42,9	1,87	43,84	13,9	67,0	4,856	0,378	1,452
8	7,60	99,5	1,9	9,35	38,5	1,86	48,46	14,6	67,4	4,123	0,367	1,421

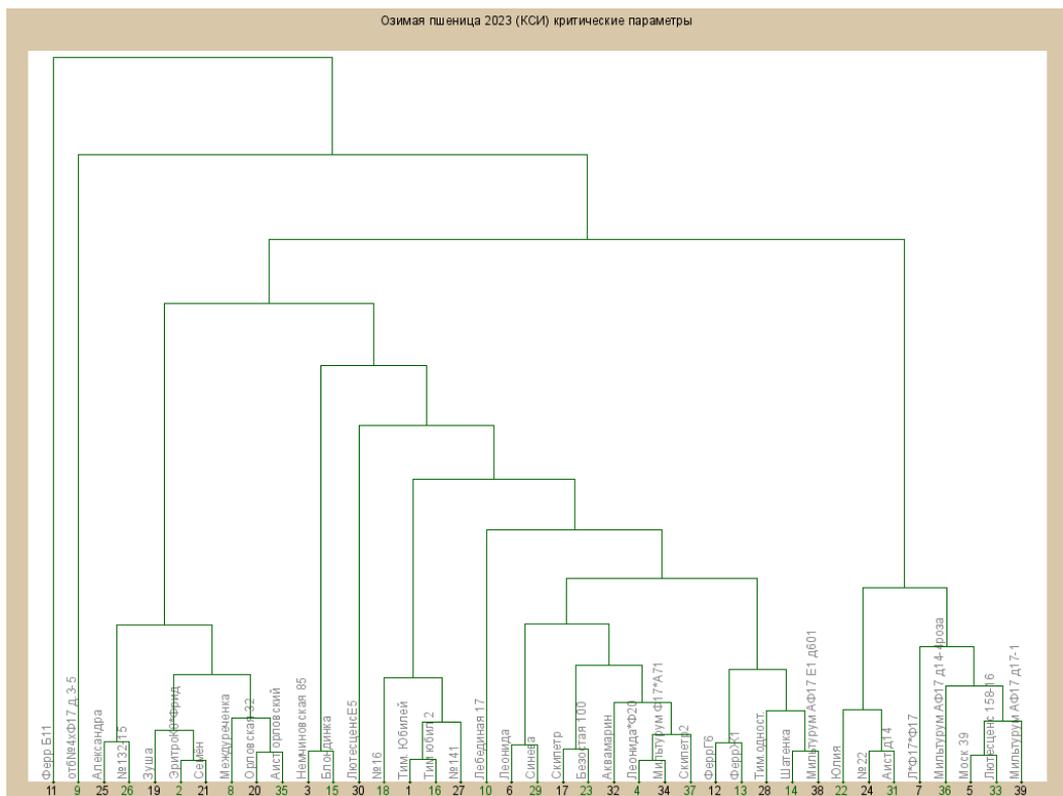


Рис. 4. Дендрограмма кластеризации селекционных образцов озимой мягкой пшеницы за 2023 г., конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

В результате проведенной работы получены новые знания об урожайности, продуктивности колоса, биохимических показателей зерна озимой мягкой пшеницы, определены селекционные и вегетационные индексы исходного и селекционного материала. Ежегодно на основе кластерного анализа растений сортообразцы были сгруппированы по урожайности и 11 независимым показателям и индексам. Выделены отдельные кластеры, отличающиеся от изучаемого набора сортов и селекционных линий и превышающие стандарты по урожайности и комплексу показателей включая вегетационные индексы. Выявлены перспективные селекционные линии и переданы на Государственное испытание: Лютесценс А71 (новый сорт Аист орловский); Лютесценс № 13 (новый сорт Зуша); Лютесценс № 16 (новый сорт Памяти Каткова); Лютесценс А158 (новый сорт Аквамарин); Лютесценс № 132. Перспективным является использование в селекционном процессе кластеров с редуцированным кущением на основе сортообразца Тимирязевская одностебельная, с высокопродуктивным колосом на базе разновидности ферругинеум (Ферр Б11) и новых форм ферругинеум и милтурум с высокими значениями вегетационных индексов в сочетании с комплексом показателей, характеризующих урожайность и качество зерна.

Просо. Для визуализации значимости применения вегетационных индексов в селекционном процессе рассмотрим группировку селекционных сортообразцов по другой культуре с другим типом фотосинтеза (тип С4) – на просе посевном и в процессе вегетационного периода (рис. 5).

Для упрощения визуализации динамики вегетационного индекса произведем группировку кластерным анализом. Получили 5 групп кластеров сортообразцов и селекционных линий с одинаковой динамикой по признаку изменения фотосинтетического потенциала растений (рис. 6) (табл. 8).

Сформированные таким образом группы проявляют уникальность поведения в динамике. Можно отметить, что самые низкоурожайные образцы (№ 5) имеют самые низкие показатели вегетационного индекса, но в то же время высокоурожайный кластер (№ 3) расположен посередине графика на рисунке 5. Можно еще отметить, что максимальные показатели вегетационных индексов приходятся на конец июля-начало августа (момент цветения и начало созревания). Расширяя максимальные вегетационные показатели (26.07.2022 г.) ценными селекционными признаками структурного анализа, получаем похожие характеристики групп (рис. 7) (табл. 9, 10).

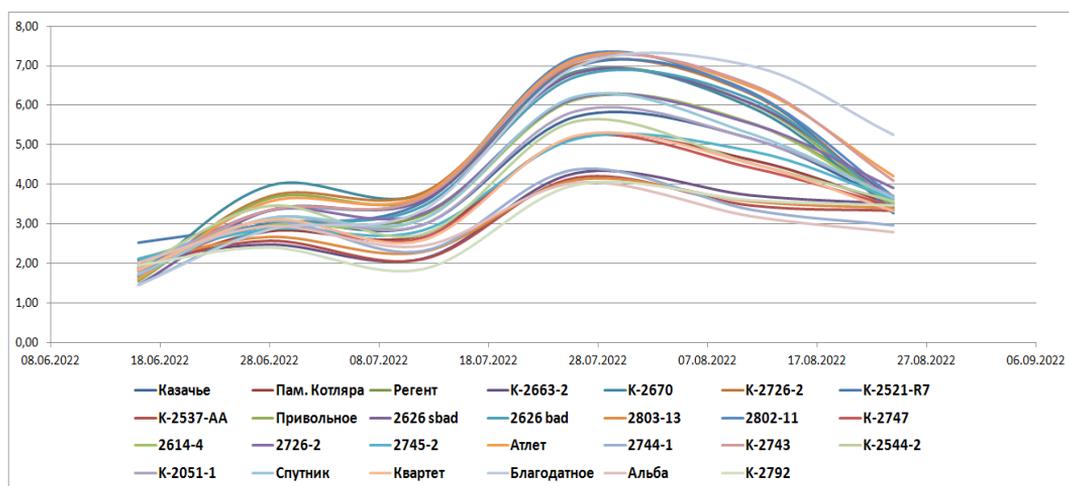


Рис. 5. Динамика вегетационного индекса CIGreen в процессе вегетации проса посевного, конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

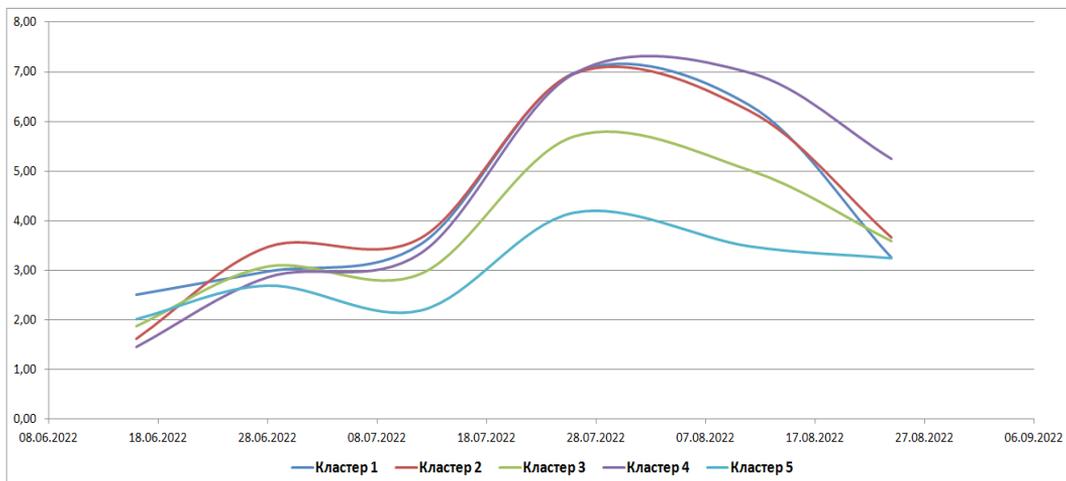


Рис. 6. Динамика вегетационного индекса CIGreen в процессе вегетации проса посевного, сгруппированного в кластеры, конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, г. Орёл

Таблица 8

**Селекционные образцы проса посевного,
сгруппированные по индексу хлорофилла CIGreen,
конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК 2022 г.**

№ кластера	Варианты, вошедшие в кластер	Средняя урожайность кластера, т/га
1	7. К-2521-R7	3,30
2	5. К-2670; 6. К-2726–2; 9. Привольное; 10. 2626 sbad; 11. 2626 bad; 13. 2802–11; 18. Атлет; 20. К-2743	3,64
3	1. Казачье; 2. Пам. Котляра; 3. Регент; 14. К-2747; 15. 2614–4; 16. 2726–2; 17. 2745–2; 21. К-2544–2; 22. К-2051–1; 23. Спутник; 24. Квартет	3,72
4	25. Благодатное	3,53
5	3. К-2663–2; 8. К-2537-AA; 12. 2803–13; 19. 2744–1; 26. Альба; 27. К-2792	3,21

В случае общей группировки можно наблюдать, что также группы с низкой продуктивностью (№ 1 и № 4) имеют и низкие показатели вегетационных индексов, а кластер (№ 5) с высокой продуктивностью характеризуется средними показателями индексов. Зато в группах № 2 и № 3 отмечаются высота растения, количество междоузлий, длина последнего междоузлия и длина главной метелки. Также можно отметить, что в эту группу попали современные сорта и большая часть селекционных линий, отобранных ранее.

Селекционные образцы проса посевного, сгруппированные в кластеры по данным структурного анализа и вегетационным индексам, конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, 2022 г.

№ п/п	Варианты, вошедшие в кластер	Объем группы	Дистанция			SS
			Min	среднее	Max	
1	8. К-2537-AA	1				
2	2. Пам. Котляра; 5. К-2670; 7. К-2521-R7; 9. Привольное; 10. 2626 sbad; 12. 2803-13; 13. 2802-11; 14. К-2747; 19. 2744-1; 20. К-2743	10	0,2368	0,5053	0,8185	0,0226
3	1. Казачье; 3. Регент; 6. К-2726-2; 11. 2626 bad; 15. 2614-4; 16. 2726-2; 17. 2745-2; 18. Атлет; 21. К-2544-2; 22. К-2051-1; 23. Спутник; 24. Квартет; 25. Благодатное	13	0,2384	0,5808	1,1040	0,0414
4	4. К-2663-2; 26. Альба	2	0,5756	0,5756	0,5756	0,0000
5	27. К-2792	1				

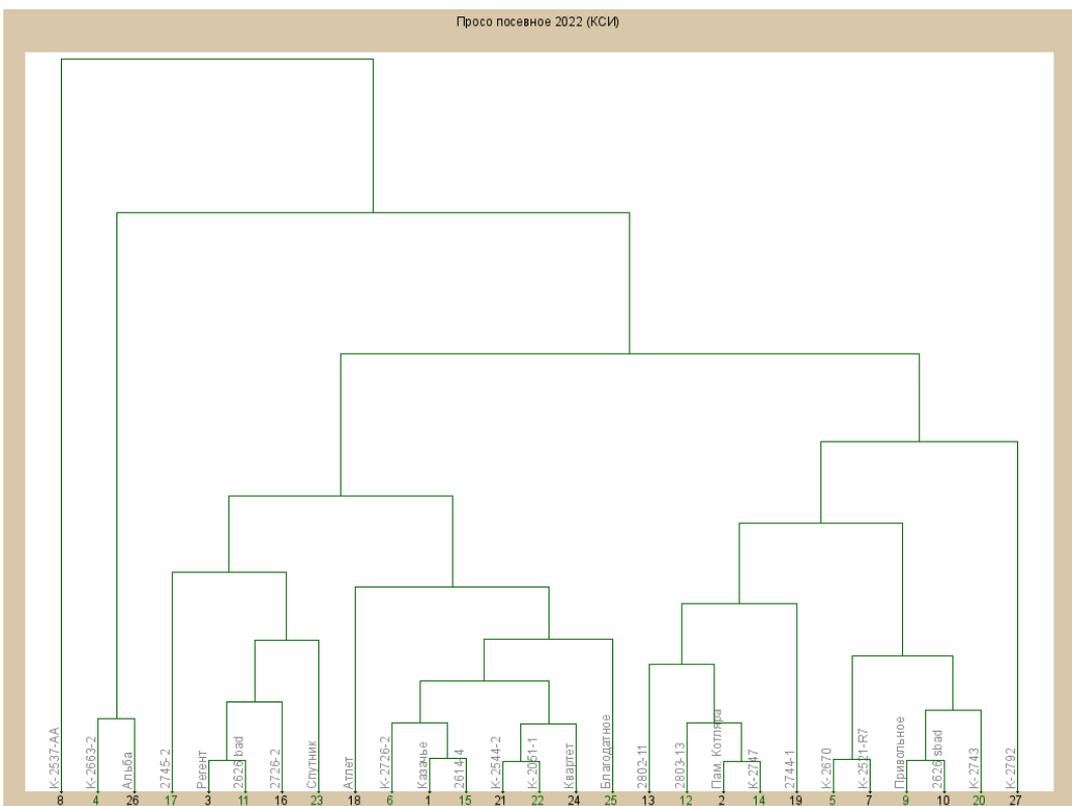


Рис. 7. Дендрограмма кластеризации сортообразцов проса посевного через показатели структурного анализа и вегетационные индексы

Средние показатели по кластерам образцов проса посевного, сформированных по данным структурного анализа и вегетационным индексам, конкурсное испытание ФГБНУ ФНЦ ЗБК, 2022 г.

№ п/п,	Урожайность, т/га	Высота, см	Кол-во междоузлий	Длина посл., м/уз., см	Длина главной метелки, см	Вес зерна с гл. метелки	Вес зерна с 1 раст.	CIGreen	NDVI
1	2,50	47,40	3,90	23,90	12,00	0,64	0,64	4,1716	0,7726
2	3,55	82,23	5,29	39,09	18,15	1,69	2,22	6,0663	0,8411
3	3,72	99,23	5,59	44,65	22,28	3,46	3,92	6,1634	0,8402
4	2,94	80,95	5,50	29,55	15,25	4,26	4,31	4,1615	0,7829
5	3,90	88,90	6,10	30,30	17,70	2,49	2,49	3,9852	0,7533

Выводы

– Использование в селекционном процессе вегетационных индексов позволяет расширить эффективность и результативность обработки числового материала данных структурного анализа снопового материала и показателей селекционных индексов.

– Подтверждена возможность выявления различий в генотипе растений показателями вегетационных индексов на примере проса посевного.

– Использование кластерного анализа в целях группировки испытуемых селекционных линий в кластеры с оптимальными характеристиками для дальнейшей селекционной работы позволяет выделять образцы, имеющие большую продуктивность внутри однородной группы.

– Использование вегетационных индексов в комплексе с другими показателями сортообразцов позволило получить за 2021...2023 гг. практические результаты в виде переданных четырех новых сортов озимой мягкой пшеницы (Аист орловский, Зуша, Памяти Каткова и Аквамарин). Кроме того, данный подход позволил продолжить селекцию перспективной линии с редуцированным кущением на основе сортообразца Тимирязевская одностебельная, выявить перспективные селекционные линии с высокопродуктивным колосом на базе разновидности ферругинеум и новые формы ферругинеум и мильтурум с высокими значениями вегетационных индексов в сочетании с комплексом показателей, характеризующих урожайность и качество зерна.

Библиографический список

1. Кочерина Н.В., Драгавцев В.А. Введение в теорию эколого-генетической организации количественных признаков растений и теорию селекционных индексов. – СПб.: НОУ НПО Салезианский Центр «Дон Боско», 2008. – 87 с.
2. Филипченко Ю.А., Лепин Т.К. Генетика мягких пшениц. – М.: Сельхозгиз, 1934. – 262 с.
3. Пыльнев В.В. Закономерности эволюции озимой пшеницы в результате селекции: Дис. ... д-ра биол. наук. – М.: МСХА, 1998. – 364 с.
4. Степанова Н.А., Сидоренко В.С., Старикова Ж.В., Костромичева В.А. Определение продуктивности яровой мягкой пшеницы на основе селекционных

индексов // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2021. – № 3 (39). – С. 91–96. – DOI: 10.24412/2309-348X-2021-3-91-96.

5. Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Обоснование параметров полетного задания беспилотного воздушного судна для мультиспектральной аэрофотосъемки // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2022. – Т. 16, № 3. – С. 33–39. – DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-33-39.

6. 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 // In: Hu Z., Wang B., Petoukhov S., He M. (eds). Advances in Artificial Systems for Power Engineering II. AIP2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. – 2022. – Vol. 119. Springer, Cham. – DOI: 10.1007/978-3-030-97064-2_6.

7. Рубец В.С., Ворончихина И.Н., Пыльнев В.В., Ворончихин В.В., Маренкова А.Г. Влияние метеорологических условий на качество зерна яровой пшеницы (*Triticum L.*) // Известия ТСХА. – 2021. – № 5. – С. 89–108. – DOI: 10.26897/0021-342X-2021-5-89-108.

8. Вилунов С.Д., Зотилов В.И., Сидоренко В.С., Старикова Ж.В., Мальцев А.А. Применение вегетационных индексов в селекции озимой мягкой пшеницы // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2022. – № 3 (43). – С. 73–83. – DOI: 10.24412/2309-348X-2022-3-73-83.

USE OF VEGETATION INDICES IN WHEAT AND MILLET BREEDING

S.D. VILYUNOV, V.S. SIDORENKO, N.A. STEPANOVA, M.A. SHAPOROVA

(Federal Scientific Center of Legumes and Groat Crops)

*The article presents an approach to data processing that extends critical indices of plant structural analysis by new characteristics of vegetation indices. The ability to detect differences in plant genotype using vegetation indices was confirmed using common millet (*Panicum miliaceum*) as an example. The use of cluster analysis to group the tested breeding lines into clusters with optimal variety characteristics for further breeding work was demonstrated. In 2021...2023, practical results were obtained in the form of transferred new varieties of winter soft wheat (*Triticum aestivum L.*), standing out or having greater productivity in clusters with optimal parameters: Aist Orlovskiy, Zusha, Pamyati Katkova and Akvamarin. The conclusion is drawn on the promising use in the breeding process of groups with reduced tillering based on the variety sample Timiryazevskaya Odnostebel'naya. Promising breeding lines with highly productive ear based on the variety Ferruginum and new forms of Ferruginum and Milturum with high values of vegetative indices in combination with a complex of indicators characterizing yield and grain quality were revealed.*

Keywords: selection indices, vegetation indices, cluster analysis, correlation analysis, structural analysis, wheat, millet, breeding process

References

1. Kocherina N.V., Dragavtsev V.A. Introduction to the theory of ecological and genetic organization of quantitative traits of plants and the theory of selection indices. Russian Academy of Agricultural Sciences, Agrophysical Research Institute. St. Petersburg: Salezianskiy Tsentr "Don Bosko", 2008:87. (In Russ.)

2. Filipchenko Yu.A., Lepin T.K. Genetics of soft wheat. Moscow: Sel'khozgiz, 1934:262. (In Russ.)

3. Pyl'nev V.V. Laws of evolution of winter wheat as a result of selection. DSc (Bio) thesis: 06.01.05. Moscow, 1998:364. (In Russ.)
4. Stepanova N.A., Sidorenko V.S., Starikova Zh.V., Kostromicheva V.A. Determination of the productivity of spring soft wheat based on breeding indices. *Legumes and Groat Crops*. 2021;3(39):91–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2021-3-91-96>
5. Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Justifying the Parameters for an Unmanned Aircraft Flight Missions of Multispectral Aerial Photography. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(3):33–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-33-39>
6. 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. In: Hu, Z., Wang B., Petoukhov S., He, M. (eds) *Advances in Artificial Systems for Power Engineering II. AIPE2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Springer, Cham. 2022;119. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97064-2_6
7. Rubets V.S., Voronchikhina I.N., Pyl'nev V.V., Voronchikhin V.V., Marenkova A.G. Effect of Weather Conditions on the Quality of Spring Wheat Grain (*Triticum L.*). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy (TAA)*. 2021;5:89–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2021-5-89-108>
8. Vilyunov S.D., Zotikov V.I., Sidorenko V.S., Starikova J.V., Mal'tsev A.A. Application of vegetation indices in winter soft wheat breeding. *Legumes and Groat Crops*. 2022;3(43):73–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-3-73-83>

Сергей Дмитриевич Вилунов, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией «Цифровой мониторинг в селекции и семеноводстве» ФГБНУ «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур»

Владимир Сергеевич Сидоренко, заместитель директора по селекционной работе, канд. с.-х. наук, заведующий лабораторией селекции зерновых крупяных культур ФГБНУ «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур»

Наталья Александровна Степанова, старший научный сотрудник лаборатории селекции зерновых крупяных культур ФГБНУ «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур»

Марина Александровна Шапорова, аспирант, старший лаборант лаборатории селекции зерновых крупяных культур ФГБНУ «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур»

Sergey D. Vilyunov, Senior Research Associate, Head of the Laboratory “Digital Monitoring in Breeding and Seed Production”, Federal Scientific Center of Legumes and Groat Crops

Vladimir S. Sidorenko, CSc (Ag), Deputy Director for Breeding Work, Head of the Laboratory of Cereal Crops Breeding, Federal Scientific Center of Legumes and Groat Crops (10, b.1, Molodezhnaya Str., twp. Streletskiy, Oryol Region, 302502, Russian Federation)

Natal'ya A. Stepanova, Senior Research Associate, Laboratory of Cereal Crops Breeding, Federal Scientific Center of Legumes and Groat Crops (10, b.1, Molodezhnaya Str., twp. Streletskiy, Oryol Region, 302502, Russian Federation)

Matina A. Shapорова, post-graduate student, Senior Assistant, Laboratory of Cereal Crops Breeding, Federal Scientific Center of Legumes and Groat Crops (10, b.1, Molodezhnaya Str., twp. Streletskiy, Oryol Region, 302502, Russian Federation)