

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ В СЕЛЕКЦИИ ОЗИМОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ

С.Д. ВИЛЮНОВ, научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0002-7373-5951
В.И. ЗОТИКОВ, член-корреспондент РАН, ORCID ID: 0000-0001-5713-7444
В.С. СИДОРЕНКО, кандидат с.-х. наук. ORCID ID: 0000-0002-9921-6105
Ж.В. СТАРИКОВА, научный сотрудник,
А.А. МАЛЬЦЕВ, аспирант

ФГБНУ ФНЦ ЗЕРНОБОБОВЫХ И КРУПЯНЫХ КУЛЬТУР

E-mail: office@vniizbk.ru

В статье изложена часть опыта по селекции озимой мягкой пшеницы в лаборатории селекции зерновых крупяных культур Федерального научного центра зернобобовых и крупяных культур. Результаты приведенного анализа селекционного материала охватывают образцы общего гибридного происхождения и описывают возможности использования различных вегетационных индексов для моделирования высокоурожайных сортов и выявления неперспективных линий в различные фазы вегетации растений. В анализе участвовали селекционные линии, отобранные из гибридной популяции ♀Аист (Lutescens) × ♂Ф17 (Ferrugineum). В течение двух лет отбор в лаборатории научного центра по селекционному и конкурсному питомнику осуществляется не только методами классической селекции, но и используя мультиспектральную съемку с дрона для создания карт вегетационных индексов высокого разрешения (1 см на пиксель) в разные фазы развития озимой мягкой пшеницы. Это позволило выявить применимые для построения динамики изменения индексов в селекционном процессе на продуктивность: индекс зеленых листьев GLI, как оптимальный; возможный к использованию нормализованный разностный индекс растительности с красным краем NDRE, зеленый нормализованный разностный вегетационный индекс GNDVI, индекс хлорофилла CIGreen; и нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI, как универсальный. Сделано заключение, что усовершенствованный вегетационный индекс EVI может применяться только на ранних этапах роста растений до фазы начала колошения, а хлорофилловый вегетационный индекс CVI проявляет себя с фазы начала колошения до фазы начала созревания. Не обнаружена связь продуктивности и исследуемых вегетационных индексов с разновидностью, высотой растений и другими морфологическими признаками пшеницы. Отмечается, что высокоурожайные линии разновидности Milturum из гибридной популяции (♀Аист × ♂Ф17) имеют одинаковую динамику развития вегетационных индексов с наиболее урожайным сортом Синева (Lutescens). Сформулирована модель динамики поведения вегетационных индексов для перспективного селекционного отбора. На основании показаний индексов из 20 образцов – выявлено 4 неперспективные линии, 3 высокопродуктивных образца будут использоваться в дальнейшей селекционной работе, один вариант пройдет испытание как сортобразец, остальные образцы одного фенотипа и идентичные по динамике вегетационных индексов – объединены в линии для дальнейшего испытания.

Ключевые слова: вегетационные индексы, озимая мягкая пшеница, селекционный процесс, моделирование, динамика вегетации, гибридная популяция, *Milturum*.

Для цитирования: Вилюнов С.Д., Зотиков 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):73-83. DOI: 10.24412/2309-348X-2022-3-73-83

APPLICATION OF VEGETATION INDICES IN WINTER SOFT WHEAT BREEDING

S.D. Vilyunov, V.I. Zotikov, V.S. Sidorenko, Zh.V. Starikova, A.A. Mal'tsev

FSBSI «FEDERAL SCIENTIFIC CENTER OF LEGUMES AND GROAT CROPS»

E-mail: office@vniizbk.ru

Abstract: *The article describes part of the experiment in breeding winter soft wheat in the laboratory of breeding cereal crops of the Federal Scientific Center of Legumes and Groat Crops. The results of the above analysis of breeding material cover samples of common hybrid origin and describe the possibilities of using various vegetation indices for modeling high-yielding varieties and identifying unpromising lines in various phases of plant vegetation. The analysis involved breeding lines selected from the hybrid population ♀Aist (Lutescens) × ♂F17 (Ferrugineum). For two years, selection in the laboratory of the scientific center for breeding and competitive nursery has been carried out not only by classical breeding methods, but also using multispectral drone photography to create high-resolution maps of vegetation indices (1 cm per pixel) in different phases of development of winter soft wheat. This made it possible to identify changes in the indices in the breeding process for productivity applicable for constructing the dynamics: green leaf index GLI, as the optimal; possible to use normalized difference vegetation index with red edge NDRE, green normalized difference vegetation index GNDVI, chlorophyll index ClGreen; and the normalized difference vegetation index NDVI as universal. It was concluded that the improved vegetation index EVI can only be used in the early stages of plant growth before the heading start phase, while the chlorophyll vegetation index CVI manifests itself from the heading start phase to the maturation start phase. No relationship was found between productivity and the studied vegetation indices with the variety, plant height and other morphological features of wheat. It is noted that the high-yielding lines of the Milturum variety from the hybrid population (♀Aist × ♂F17) have the same dynamics of development of vegetation indices with the most productive variety Sineva (Lutescens). A model of dynamics of behavior of vegetation indices for perspective breeding selection is formulated. Based on the index readings, out of 20 samples, 4 unpromising lines were identified, 3 highly productive samples will be used in further breeding work, one variant will be tested as a variety sample, the remaining samples of the same phenotype and identical in terms of the dynamics of vegetation indices are combined into lines for further testing.*

Keywords: vegetation indices, winter soft wheat, breeding process, modeling, vegetation dynamics, hybrid population, *Milturum*.

Введение

Анализ, оценка и браковка разнообразного исходного материала в селекции растений – является исключительно правом и обязанностью ученого-селекционера. Соответственно, анализ объективных цифровых данных позволяет снизить влияние субъективности при отборе, расширить объем исследуемых вариантов в опыте, и более детально характеризовать селекционные линии для дальнейшей работы, подкрепляя собственную интуицию цифровыми характеристиками признаков. Одними из таких числовых показателей, редко применяемым на практике в селекции, являются вегетационные индексы (ВИ или VI). Индексы основаны на известных особенностях спектральной отражающей способности растительности и почвы, которая характеризуется большими различиями в поглощении излучения разных длин волн. 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 и решать широкий диапазон задач, связанных с характеристиками растительного покрова.

Главным преимуществом ВИ является легкость их получения дистанционным зондированием со спутников и дронов. Для вычисления индексов используют 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 мкм.

Индексы усиливают контраст между почвой и растительностью, но сводят к минимуму влияние условий освещения. Красный или относительный коэффициент индекса растительности $RVI = RED / NIR$ (ratio vegetation index) [1] и самый известный нормализованный разностный вегетационный индекс (обычно называемый вегетативным индексом) $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ (normalized difference vegetation index) наиболее популярны и часто используются. NDVI впервые описан В.Ж.Розе в 1973 году [2] и является простым количественным показателем объема фотосинтетически активной биомассы. Для растительности NDVI принимает положительные значения, и чем больше вегетирующая фитомасса, 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. Интересны и другие вегетационные индексы этой группы, которые отражают общее количество растительности и используются для оценки ее состояния при решении широкого круга задач:

– *Индекс зеленых листьев* $GLI = (2 * Green - Red - Blue) / (2 * Green + Red + Blue)$, Green leaf index – помогает оценить состояние растений при обследовании посевов с использованием данных RGB;

– *нормализованный разностный индекс растительности с красным краем* $RENDVI$, или $NDRE = (NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge)$, Normalized Difference Red Edge Index – подходит для оценки фотосинтетической активности растительного покрова и насыщенности листьев азотом;

– *индекс хлорофилла* $CIGreen$, или $GCI = NIR / Green - 1$, Green chlorophyll index – служит для выявления сезонных изменений фотосинтетического потенциала растений, т.к. интенсивность отражения зеленого и ближнего инфракрасного линейно коррелирует с общим содержанием хлорофилла;

– *зеленый нормализованный разностный вегетационный индекс* $GNDVI = (NIR - Green) / (NIR + Green)$, Green Normalized Difference Vegetation index – применяется при оценке угнетенной и стареющей растительности;

– *хлорофилловый вегетационный индекс* $CVI = (NIR / Green) * (Red / Green)$, Chlorophyll Vegetation Index – имеет повышенную чувствительность к содержанию хлорофилла в листовом покрове;

– *усовершенствованный вегетационный индекс* $EVI = 2,5 * (NIR - Red) / (NIR + 6 * Red - 7,5 * Blue + 1)$, Enhanced Vegetation Index – используется для оценки изменчивости развития культур, как в условиях густого растительного покрова, так и в условиях разреженной растительности (2,5 – коэффициент усиления; 6 и 7,5 – коэффициенты члена аэрозольного сопротивления; 1 – коэффициент корректировки фона. Эти значения установлены эмпирически [3]).

Многие исследователи считают, что при комплексной оценке посевов в течение вегетационного периода наиболее эффективно использовать несколько вегетационных индексов, в зависимости от вегетационного периода, целей исследования и возможностей камеры. А при исследовании посевов с использованием данных RGB – индекс GLI является информативным для общей оценки состояния посевов [4].

Большое разнообразие вегетационных индексов (насчитывается более 150) связано с тем, что каждый вегетативный индекс имеет свою специфическую область применения, формировался эмпирическим путем для конкретных целей и описания общей картины растительного покрова. Непосредственно индексы слабо применяются для анализа и сравнения селекционных линий озимой пшеницы, тем более их сложно применять, когда образцы характеризуются близкими показателями и признаками (от разновидности до

урожайности и зимостойкости). Это связано с тем, что спутниковые съемки посевов имеют низкое разрешение (более метра на пиксель) и может быть ограничено облачным слоем, а в распоряжении селекционера ограниченное количество оригинального посевного материала и требуются более точные данные и детальное разрешение. 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 [5].

Селекция озимой пшеницы ведется на основе современных методов классической, гаплоидной и маркерной селекций. На протяжении всех этапов селекционного процесса проводится индивидуальный, непрерывный, целенаправленный отбор генотипов по разработанной модели. Структурные элементы урожайности зерна находятся в сложной зависимости между собой и являются результатом взаимодействия многих физиологических процессов [6]. Современные технологии дистанционного зондирования посевов позволяют дать объективные цифровые характеристики селекционному материалу и определить ценность исследуемых вариантов – не дожидаясь полного созревания и трудоемкого анализа на структурные показатели. При увеличении объемов исследуемого материала в селекционном процессе встает жесткий вопрос выявления и выбраковки неперспективных линий, отбора только статистически значимых вариантов, удовлетворяющих поставленным перед ученым задачам. Выделение в опыте на ранних этапах и с малых площадей вариантов, несоответствующих поставленным целям и задачам, значительно сокращает сроки создания нового сорта и уменьшает физическую и интеллектуальную нагрузку на селекционера.

Цель исследования – оценка применения значений различных вегетационных индексов в отборе перспективных для селекции линий и производственных сортов озимой мягкой пшеницы.

Методика и погодные условия

В 2021 году каждый образец размещался в селекционном питомнике на широкорядном посеве, в одном рядке делянки (ширина 1,65 м, длина 2 м, 4 рядка, ширина междурядий 0,45 м), площадь под образцом составляла 0,9 кв.м. В 2022 году образцы высевались в конкурсном питомнике рядовым посевом на делянке (ширина 1,65 м, длина 4,5 м, ширина междурядий 0,16 м) площадью 7,5 м².

Почва темно-серая лесная, среднесуглинистая, средне окультуренная, микрорельеф участка выровненный. По основным физико-химическим показателям данная почва является типичной для природно-экономической зоны. Пахотный и метровый слой почвы характеризуется высокой удерживающей способностью (118...345 мм). Возможные запасы доступной растениям влаги в слое почвы 0...35 см соответствуют 88 мм, а в метровом слое 262 мм. Максимальная гигроскопическая влажность – 6,8...7,5% от массы почвы. Содержание гумуса до 4%, P₂O до 13 мг/100 г и K₂O до 10 мг/100 г почвы.

Погода 2022 года в сравнении с 2021 г. была менее теплой и более влажной как весной, так и в период колошения и налива озимых культур (табл. 1). Погодные данные получены из открытых источников [7]. Расчет гидротермического коэффициента увлажнения Селянинова (ГТК) произведен по формуле $ГТК = R \times 10 / \sum t$; где R представляет собой сумму осадков в миллиметрах за период с температурами выше +10°C, $\sum t$ определяет сумму температур в градусах Цельсия (°C) за то же время.

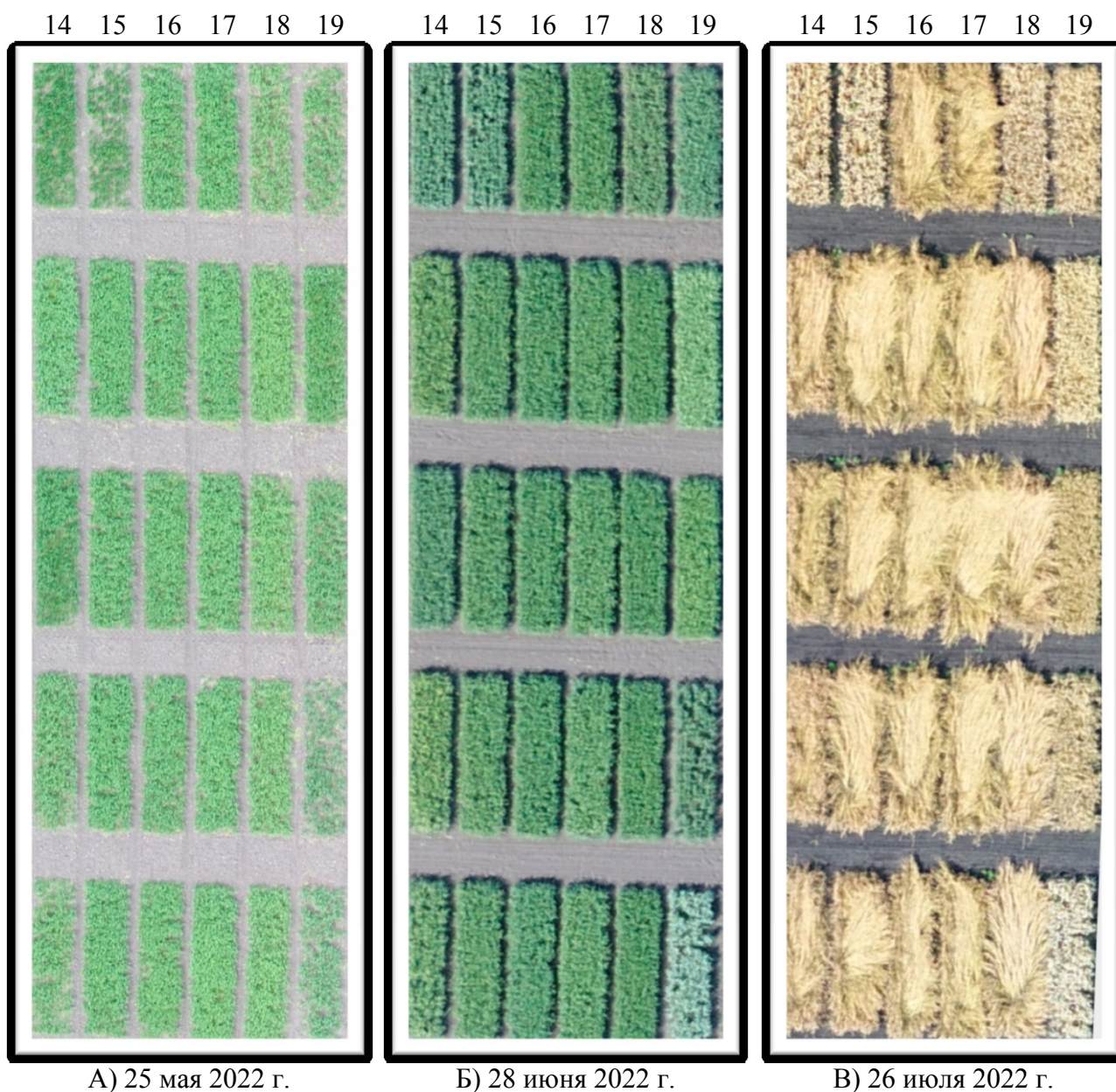
Таблица 1

Погодные условия 2021 и 2022 годов в период весенней и летней вегетации озимой пшеницы, Орёл

Год	май		июнь		июль	
	ГТК	Средняя температура, °С± к норме	ГТК	Средняя температура, °С± к норме	ГТК	Средняя температура, °С± к норме
2021	1,28	-0,40	0,70	+1,88	0,74	+2,49
2022	1,56	-2,80	0,90	+1,10	1,08	-0,70

Для получения высокоточных данных вегетационных индексов в рамках научного сотрудничества привлекались сотрудники ФГБНУ Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. Ими использовался квадрокоптер DJI Matrice 200 v2 с установленной ГНСС L1/L2 антенной, оснащенный модифицированной камерой DJI X4S 20Mp (5472 x 3648) с трехосевым стабилизатором. Полеты осуществлялись с помощью мобильного приложения DJI Pilot. При помощи специального подвеса устанавливалась мультиспектральная камера MicaSense Altum с сенсором освещенности, имеющий встроенный GPS приемник. Использовался мультиспектральный GNSS приемник EMLID Reach RS2. Подключение происходило к базовой станции «OREL» в Орловской области, расположенной на расстоянии менее 20 км.

В данном исследовании участвовали лучшие сортообразцы и стабильные линии, выделившейся по NDVI из одной гибридной популяции в предыдущие годы. Отборы из гибридной популяции велись с 2017 года ♀Аист (Лютесценс/*Lutescens*) × ♂Ф17 (Ферругинеум/*Ferrugineum*). В 2021 году на селекционном питомнике (720 образцов) из 100 выделившихся ранее линий происхождения ♀Аист × ♂Ф17 были отобраны 20 линий для испытания в конкурсном питомнике с показателями NDVI более 0,8 (данные мониторинга за 03 и 23 июня 2021 г.). Основной аналитический эксперимент был осуществлен в 2022 году: посев - 16.09.2021 г.; Дата схода снега - 31.03.2022 г.; Дата времени возобновления весенней вегетации (ВВВВ) – 14.04.2022 г.; Образование узловых корешков – 18.04.2022 г.; обследование на зимостойкость – 06.05.2022 г.; колошение – 14-18.06.2022 г.; уборка – 05.08.2022 г. (рис. 1.). В исследовании приняло участие 23 варианта (табл. 2). Для сравнения в анализ включена родительская материнская форма сорта Аист (делянка 14/1), известный высокоурожайный сорт Синева (делянка 15/1) и сорт Скипетр (делянка 19/1), принятый как стандарт для региона. Мониторинг осуществлялся в дневной период с 12 до 14 часов, с периодичностью через две недели после ВВВВ: 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. Зачетная урожайность соответствует 14% влажности зерна, пересчитанной по формуле Дюваля.



А) 25 мая 2022 г.

Б) 28 июня 2022 г.

В) 26 июля 2022 г.

Рис. 1. Динамика развития селекционных образцов (♀ Аист x ♂ Ф17) во времени от перезимовки до уборки, контрольный питомник ФГБНУ ФНЦ ЗБК, 2022 г.

*Примечание: Слева на право – 14,15,16,17,18 и 19 проход, сверху в вниз – 1, 2, 3, 4 и 5 ряд.
Проход 18 не вошел в анализ, т.к. имел другое происхождение при схожих фенотипических и производственных характеристиках.*

Таблица 2

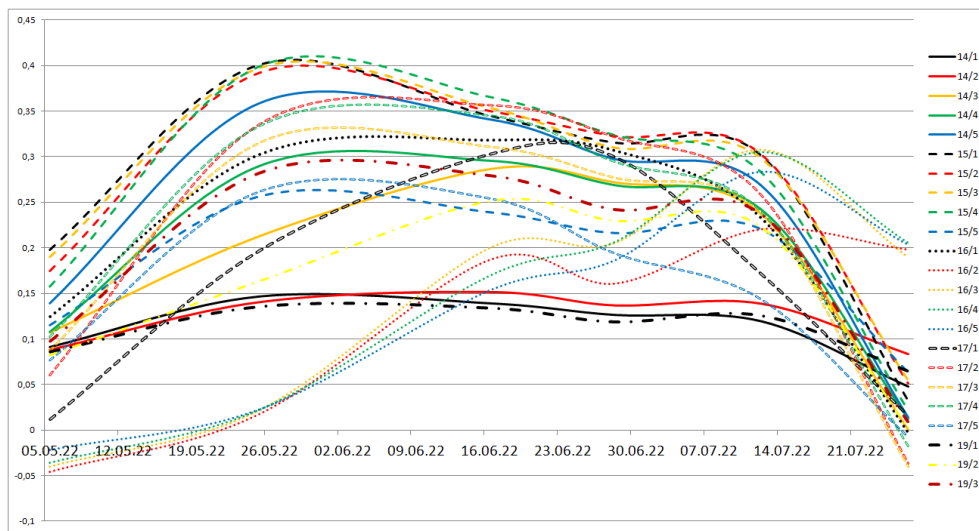
Общая характеристика показателей исследуемых селекционных линий (♀Аист × ♂Ф17) и сортообразцов, контрольный питомник ФГБНУ ФНЦ ЗБК, 2021-2022 гг.

№ п.п.	Делянка/ ряд	Образец	Разновидность	Перезимовка, балл	Дата колошения	Урожайность, т/га	Содержание белка в зерне, %	Содержание клейковины в зерне, %
1	14/1	♀Аист	<i>Lutescens</i>	5-	17.06.	7,69	14,6	26,3
2	14/2	567(4)	<i>Milturum</i>	5-	14.06.	7,54	16,8	32,9
3	14/3	571(1)	<i>Milturum</i>	5-	17.06.	8,51	17,2	30,5
4	14/4	573(1)	<i>Milturum</i>	5	14.06.	8,83	15,8	30,7
5	14/5	575(4)	<i>Milturum</i>	5-	14.06.	7,67	17,2	30,5
6	15/1	Синева	<i>Lutescens</i>	4	17.06.	8,70	14,6	27,9
7	15/2	596(1)	<i>Milturum</i>	5	17.06.	7,57	17,1	33,2
8	15/3	596(2)	<i>Milturum</i>	5-	17.06.	8,12	17,1	33,2
9	15/4	597(1)	<i>Milturum</i>	5-	17.06.	7,99	17,1	33,2
10	15/5	597(2)	<i>Milturum</i>	5-	17.06.	7,02	17,1	33,2
11	16/1	598(1)	<i>Milturum</i>	5-	17.06.	7,21	17,4	33,7
12	16/2	598(2)	<i>Milturum</i>	5	18.06.	7,48	17,4	33,7
13	16/3	600(1)	<i>Milturum</i>	5-	18.06.	6,39	17,4	33,7
14	16/4	600(2)	<i>Milturum</i>	5-	18.06.	6,12	17,4	33,7
15	16/5	607	<i>Milturum</i>	5-	18.06.	6,93	17,4	33,7
16	17/1	603(1)	<i>Milturum</i>	5-	17.06.	6,89	18,4	35,2
17	17/2	603(2)	<i>Milturum</i>	5	17.06.	7,72	18,4	35,2
18	17/3	606(1)	<i>Milturum</i>	5-	17.06.	6,75	18,4	35,2
19	17/4	606(2)	<i>Milturum</i>	5-	17.06.	7,89	16,9	32,1
20	17/5	610	<i>Milturum</i>	5	17.06.	7,85	17,5	33,6
21	19/1	Скипетр	<i>Lutescens</i>	4	13.06.	7,60	14,8	27,4
22	19/2	564(3)	<i>Erytrospermum</i>	5	14.06.	7,95	14,7	27,9
23	19/3	645(3)	<i>Ferrugineum</i>	5-	14.06.	7,95	15,8	29,9

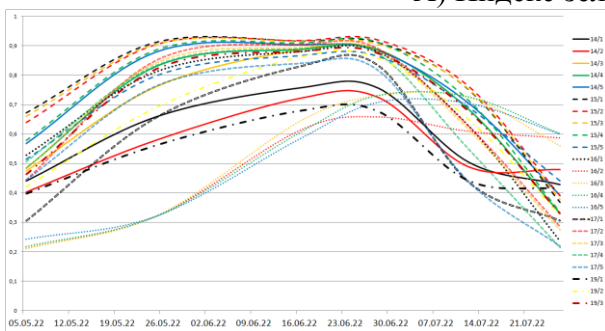
Результаты и обсуждение

Фенотипически все варианты разновидности *Milturum* из отборов гибридной популяции (♀Аист × ♂Ф17) ничем друг от друга не отличались (рис. 1, табл. 2). Образцы характеризовались мощной вегетативной массой с хорошей кустистостью и высотой растения 1,0...1,3 м, отличной перезимовкой (5 баллов), высокой урожайностью (7...8 т/га), содержанием клейковины (30...35%) и белка в зерне (17...18%). Все различия между ними были несущественны и соответствовали ошибке опыта. Максимальную урожайность (более 8 т/га) дали линии на делянках 14/3, 14/4 и 15/3 и сорт Синева (делянка 15/1).

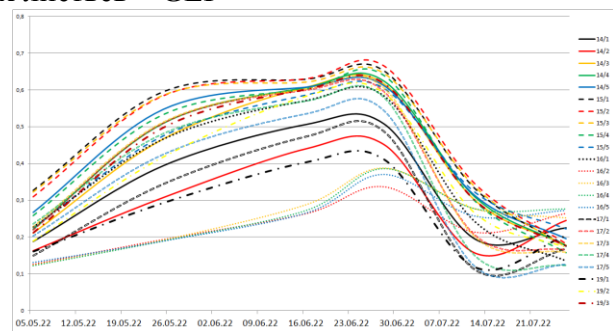
Совершенно другую картину дает анализ вегетативных индексов этих вариантов (рис. 2), где часть линий (делянки 16/2, 16/3, 16/4, 16/5) имели показатели ниже родителя (делянка 14/1)



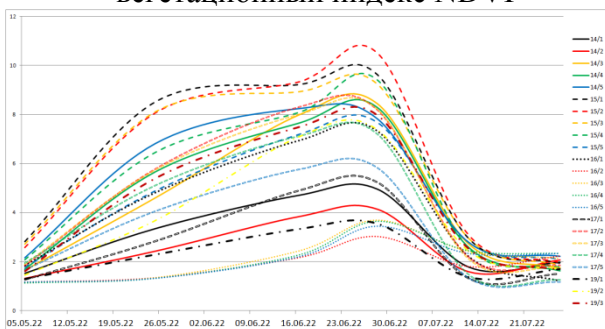
А) Индекс зеленых листьев – GLI



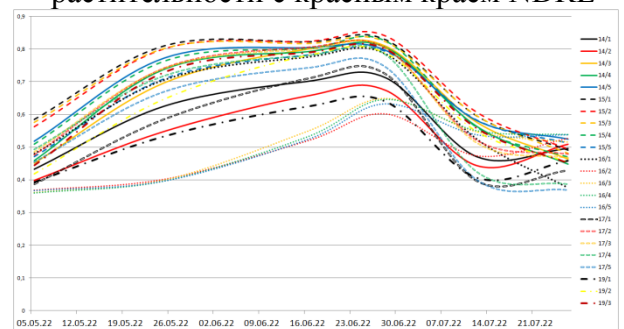
Б) Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI



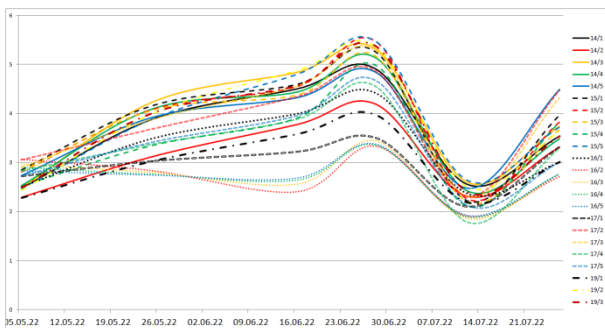
В) Нормализованный разностный индекс растительности с красным краем NDRE



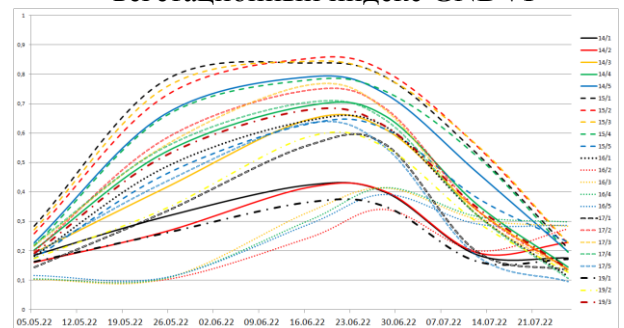
Г) Индекс хлорофилла CIGreen



Д) Зеленый нормализованный разностный вегетационный индекс GNDVI



Е) Хлорофилловый вегетационный индекс CVI



Ж) Усовершенствованный вегетационный индекс EVI.

Рис. 2. Динамика вегетационных индексов на озимой мягкой пшенице от перезимовки до уборки, контрольный питомник ФНЦ ЗБК, 2022 г.

По индексу зеленых листьев GLI просматривается разделение на 5 групп:

I группа из 4 делянок (16/2, 16/3, 16/4 и 16/5), – вялое увеличение значений индекса, фактически до уборки;

II группа 3 делянки (14/1, 14/2 и 19/1), – имеют стабильный индекс на всем протяжении вегетации, включая материнскую форму сорта Аист(14/1) и сорт стандарт Скипетр (19/1);

III группа 5 высокоурожайных делянок (14/5, 15/1, 15/2, 15/3, 15/4), сюда входит и максимально урожайный (8,7 т/га) сорт Синева (15/1). Группа имеет максимальные индексы в опыте, бурно прибавляющие к моменту выхода в трубку и плавно снижающиеся ко времени налива зерна;

IV группа включает 3 линии с бурным повышением индекса к началу налива зерна, без явно выраженного стабильного периода показателей (14/3, 17/1, 19/2);

В V группу входят все остальные варианты, имеющие интенсивное увеличение индекса в начале вегетации до выхода в трубку, стабилизированный период и дружное снижение индекса в период налива зерна.

По NDVI просматривается уже разделение на 3 группы, аналогично индексу зеленых листьев GLI по составу:

I группа из 4 делянок (16/2, 16/3, 16/4 и 16/5) – имеет вялую прибавку индекса, фактически до уборки и минимальные показатели;

II группа включает 5 делянок (14/1, 14/2, 17/1, 19/1, 19/2), включая стандартный сорт Скипетр (19/1) просматривается умеренное нарастание индекса (к средним показателям) до фазы налива зерна, при отсутствии стабильного периода индекса;

III группа охватывает остальные варианты. В группе начинается весенний старт бурной прибавкой индекса к максимальным показателям, продолжительностью до фазы выхода в трубку, затем отмечается стабилизированный период до фазы начала налива зерна, в момент оттока ассимилятов в зерновку, – заметно интенсивное снижение показателя индекса.

Распределение на графиках вариантов NDRE, ClGreen, GNDVI и CVI визуально дублируют графики NDVI, при неявно выраженной стабилизации индекса в период от фазы выхода в трубку, до фазы начала налива зерна, дифференциация на группы отмечается слабо.

Можно было бы предположить, что на различные показатели индексов влияют фенотипические особенности вариантов, восковой налет на листьях, высота растений. Но подобной связи не просматривается: По высоте вариант *Milturum* 14/2 (без воскового налета) такой же, как и многие другие варианты, но по индексу GLI и другим – дублирует более низкорослые варианты *Lutescens* (14/1 и 19/1) с восковым налетом на листьях. Это подчеркивают варианты 19/2 (*Erytrospermum*) и 19/3 (*Ferrugineum*) без воскового налета, которые значительно ниже отобранных других линий общего происхождения, но их характеристики по индексам точно такие же, включая и высокоурожайный вариант 15/1 сорта Синева (*Lutescens*) с восковым налетом.

Отмечено, что образцы 16/2,16/3, 16/4 и 16/5 можно выделить не только как линии с низкой урожайностью в опыте, но и как имеющие низкие показатели по всем исследуемым ВИ. Также у этих вариантов визуально заметно отсутствие стабилизации индексов и слабое, затяжное увядание в период оттока ассимилятов в зерновку. Такие линии должны исключаться из дальнейшей селекции. Тенденцию для их исключения можно было предположить еще при весеннем анализе ВИ.

Сравнение распределения показателей ВИ известных высокоурожайных сортов (14/1, 15/1 и 19/1) с селекционными линиями дает картину, что имеет значение как дружное весеннее нарастание индексов, так и стабилизация этих показателей от колошения до периода оттока ассимилятов в зерновку. В отборе на продуктивность имеет значение и период интенсивного снижения значений по индексам ВИ в период окончания налива зерна.

Можно отметить, что показатели разных индексов имеют разную корреляцию с урожайностью и выходом белка с единицы площади в разные периоды (табл. 3). В разный период у разных ВИ – корреляция колеблется от отрицательной до положительной.

Таблица 3

Корреляция вегетативных индексов во времени с урожайностью и выходом белка на озимой мягкой пшенице от посева до уборки, контрольный питомник ФНЦ ЗБК

ВИ		26.10.2021	05.05.2022	25.05.2022	16.06.2022	28.06.2022	12.07.2022	26.07.2022
Корреляция ВИ с урожайностью	GLI	0,637	0,659	0,552	0,416	0,275	-0,071	-0,530
	NDVI	0,632	0,626	0,610	0,581	0,484	0,067	-0,473
	NDRE	0,640	0,585	0,626	0,636	0,604	0,227	-0,494
	CIGreen	0,617	0,520	0,586	0,605	0,568	0,214	-0,353
	GNDVI	0,608	0,548	0,628	0,610	0,558	0,181	-0,308
	CVI	0,102	-0,301	0,665	0,612	0,617	0,402	0,382
	EVI	0,637	0,659	0,552	0,416	0,275	-0,071	-0,530
Корреляция ВИ с выходом белка	GLI	0,234	0,437	0,609	0,674	0,572	0,121	-0,531
	NDVI	0,211	0,487	0,595	0,621	0,583	0,088	-0,537
	NDRE	0,213	0,510	0,587	0,570	0,563	0,123	-0,566
	CIGreen	0,157	0,474	0,558	0,609	0,581	0,152	-0,369
	GNDVI	0,155	0,519	0,590	0,584	0,574	0,125	-0,349
	CVI	-0,084	0,113	0,441	0,378	0,420	0,178	0,439
	EVI	0,234	0,437	0,609	0,674	0,572	0,121	-0,531

Анализ таблицы 3 показывает, что только в период после перезимовки (05.05.2022) и до начала созревания (25.05.-28.06.2022) показатели ВИ имеют положительную корреляционную связь с продуктивностью, исключение хлорофилловый вегетационный индекс CVI. Так же важным является период переноса ассимилянтов в зерновку в момент налива зерна (12.07.-26.07.2022), когда корреляционная связь имеет отрицательную тенденцию.

Выводы

1. Все вегетационные индексы (NDRE, CIGreen, GNDVI и CVI) показали одинаковую динамику на графиках и визуально дублируют графики NDVI при неявно выраженной стабилизации индекса в период от фазы выхода в трубку до фазы начала налива зерна. В отличие от индекса зеленых листьев GLI на них дифференциация на группы слабо выражена.
2. Хлорофилловый вегетационный индекс CVI является мало эффективным на ранних этапах вегетации при отборе на продуктивность. В период начала оттока ассимилянтов в зерно все вегетационные индексы не показывают корреляционной связи с урожайностью.
3. Вегетационный индекс зеленых листьев GLI, нормализованный разностный индекс растительности с красным краем NDRE, зеленый нормализованный разностный вегетационный индекс GNDVI, индекс хлорофилла CIGreen и нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI подходят для картирования на всем периоде вегетации озимой мягкой пшеницы с целью применения в селекционном процессе на продуктивность. А усовершенствованный вегетационный индекс EVI для этой цели может применяться только на ранних этапах роста растений до фазы начала колошения, также хлорофилловый вегетационный индекс CVI может применяться только с фазы начала колошения до фазы начала созревания.
4. Не обнаружена связь продуктивности и исследуемых вегетационных индексов с разновидностью, высотой растений и другими морфологическими признаками озимой мягкой пшеницы.
5. Для отбора на продуктивность озимой мягкой пшеницы имеет значение период интенсивного нарастания индексов до начала колошения, стабилизация показаний индекса

до периода начала созревания и интенсивное снижение показателей ВИ в момент оттока ассимилятов в формирующийся урожай.

6. Высокоурожайные линии разновидности *Milturum* из гибридной популяции (♀Аист × ♂Ф17) имеют схожую динамику развития ВИ с наиболее урожайным сортом Синева.

Литература

1. Jordan C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 1963, vol.50, pp. 663-666.
2. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA, 1973, SP-351, vol.1, pp.309-317.
3. Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS// *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 59. Issue 3. p.440-451.
4. Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Primenenie vegetatsionnykh indeksov dlya otsenki sostoyaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Application of vegetation indexes to assess the condition of crops]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N2. 4-11 (In English). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-4-11.
5. Kurbanov, R., Zakharova, N., Sidorenko, V., Vilyunov, S. (2022). 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. AIPE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 119. Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-030-97064-2_6
6. Ковтун В.И., Ковтун Л.Н. Модель сорта пшеницы мягкой озимой интенсивного типа для условий Юга, Юго-Востока и Центрально-Черноземной зоны России // *Сельскохозяйственный журнал*. 2022. № 1 (15). С.13-22 DOI 10.25930/2687-1254/002.1.15.2022
7. <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=27906> (дата обращения 05.09.2022)

References

1. Jordan C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 1963, vol.50, pp. 663-666.
2. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., and Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA, 1973, SP-351, vol.1, pp.309-317.
3. Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS// *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 59. Issue 3. pp.440–451.
4. Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Primenenie vegetatsionnykh indeksov dlya otsenki sostoyaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Application of vegetation indexes to assess the condition of crops]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N2. 4-11 (In English). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-4-11.
5. Kurbanov R., Zakharova N., Sidorenko V., Vilyunov S. (2022). 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. AIPE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 119. Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-030-97064-2_6
6. Kovtun V.I., Kovtun L.N. Model' sorta pshenitsy myagkoi ozimoi intensivnogo tipa dlya uslovii Yuga, Yugo-Vostoka i Tsentral'no-Chernozemnoi zony Rossii [Model of winter soft wheat variety of intensive type for the conditions of the South, South-East and Central Black Earth zone of Russia] *Sel'skokhozyaystvennyi zhurnal*. 2022. No 1 (15), pp.13-22 (In Russian) DOI 10.25930/2687-1254/002.1.15.2022
7. <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=27906> (Accessed 05.09.2022)