Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

УДК 631.6

Анализ спектральных характеристик листовых пластин древесных пород лесных полос полигона Качалино Волгоградской области

Веденеева В.А., Поташкина Ю.Н.

ФНЦ агроэкологии РАН

Аннотация

В условиях засушливого климата Волгоградской области мониторинг физиологического состояния древесных растений является важной задачей для оценки устойчивости насаждений и подбора перспективных видов для агролесомелиоративного обустройства территорий. Целью исследования является комплексная оценка физиологического состояния, водного обеспечения и фотосинтетической активности шести видов древесных пород. Полевые исследования проводились на тестовом полигоне «Качалино» Иловлинского района Волгоградской области. Спектрофотометрическая съемка листовой поверхности осуществлялась с помощью портативного спектрометра CI-710s (CID Bio-Science, США). На основе полученных спектральных кривых отражения были рассчитаны три вегетационных индекса WBI (Water Band Index) PRI (Photochemical Reflectance Index) и NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Проведенный анализ позволил дифференцированно оценить адаптационные способности видов к условиям среды произрастания. Наземная спектрометрия показала высокую эффективность неразрушающей экспресс-диагностики состояния древесных растений. Расчет индексов WBI, PRI и NDVI позволяет получать данные о водном и фотосинтетическом потенциале насаждений. Результаты исследований могут быть использованы для подбора ассортимента древесных пород при создании защитных лесных насаждений в условиях сухой степи Волгоградской области.

Ключевые слова: СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ, CI-710S, WBI, PRI, NDVI, ВОДНЫЙ СТРЕСС, ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Введение

Полезащитные лесные насаждения являются важным элементом агроландшафтов, обеспечивающим экологическую стабильность, защиту почв от эрозии и микроклиматическую регуляцию на сельскохозяйственных полях. В условиях нарастающих климатических изменений и учащения экстремальных засух, оценка физиологического состояния древесных пород в лесополосах является неоспоримо важной. Таксационные оценки часто субъективны и фиксируют угнетение деревьев, когда морфологические изменения уже необратимы. Вместе с тем методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при работе с узкими линейными объектами, такими как лесополосы, не всегда обладают достаточной спектральной разрешающей способностью для диагностики физиологического состояния [1, 2]. В связи с этим, наземная портативная спектрометрия становится незаменимым инструментом для получения высокоточных данных о состоянии фотосинтетического аппарата растений непосредственно в условиях произрастания. Спектрометры позволяют в полевых условиях оперативно фиксировать спектры отражения, поглощения и пропускания листовой пластинки и рассчитывать спектральные вегетационные индексы, коррелирующие с содержанием хлорофилла, эффективностью фотосинтеза и водным статусом растения [3, 4, 5].

Спектральные характеристики листа меняются при любом благоприятном или неблагоприятном воздействии и спектрометр позволяет выявить признаки водного, теплового или питательного стресса. Прибор используют для быстрой и неразрушающей диагностики концентрации фотосинтетических пигментов (хлорофиллов, каротиноидов, антоцианов) в листьях. Это позволяет понять, как растение улавливает свет и осуществляет фотосинтез [3].

В сельском хозяйстве спектрометр применяют для высокопроизводительного скрининга растений. Это позволяет быстро отбирать перспективные, урожайные или устойчивые к стрессам растения. Спектрометр используют для изучения реакции растений на изменение условий окружающей среды, изменение климата и другие глобальные или локальные экологические факторы. Прибор не повреждает листовую пластину тем самым дает возможность отслеживать развитие растения в динамике. На основе полученных спектров поглощения, отражения и пропускания вычисляются десятки различных вегетационных индексов, которые позволяют оценить фотосинтетическую активность, общую жизнеспособность растительного покрова. Выбор рассчитываемых вегетационных

индексов зависит от цели и задачи исследований. Так, например, в результате исследований, проведенных Омским аграрным научным центром были определены вегетационные индексы, по которым можно определить адаптивные свойства генотипов твердой яровой пшеницы [7].

В зарубежных исследованиях портативные спектрометры также активно используются для оценки физиологического состояния деревьев в условиях стресса. Так, в исследовании, посвящённом реакции ели европейской (*Picea abies*) и бука лесного (*Fagus* sylvatica) на потепление климата в Западных Карпатах, отражение света листьями измерялось в диапазоне 450–1000 нм. Измерения проводились *in situ* с помощью спектрометра CID Bio-Science CI-710s и программного обеспечения SpectraSnap на верхней стороне листовой пластинки, а на основе полученных спектров рассчитывались антоциановый (ARI2) и каротиноидный (CRI2) индексы отражения [8]. Методически близкий пример применения того же прибора представлен в исследовании кукурузы (*Zea mays*), где портативный спектрометр CI-710 с оптоволоконным зондом использовался для сбора спектров отражения листьев в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах при изучении реакции растений на дефицит воды [9].

Целью настоящего исследования провести сравнительный анализ видового состава лесных полос по показателям водного, фотохимического и вегетационного индексов, полученным методом портативной спектрометрии, и выявить признаки засухоустойчивости у различных древесных пород.

Материалы и методы

Исследования проводились на тестовом полигоне «Качалино» в 2024 году, расположенном в Иловлинском районе Волгоградской области, в пределах сухостепной зоны на светло-каштановых почвах. Климатические условия района характеризуются как резко континентальные и засушливые. Изучаемые полезащитные лесные полосы были заложены в 1985–1992 годах. Объектом исследования являлись древесные и кустарниковые породы, входящие в состав насаждений: вяз приземистый (*Ulmus pumila* L.), робиния ложноакациевая (*Robinia pseudoacacia* L.), гледичия трёхколючковая (*Gleditsia triacanthos* L.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), скумпия кожевенная (*Cotinus coggygria* Scop.) и дуб черешчатый (*Quercus robur* L.).

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Для каждой из пяти пород было отобрано по 5 модельных деревьев. Для выбора модельного дерева было проведено таксационное исследования полезащитных лесных полос. Год посадки лесных полос полигона «Качалино» 1985-1992 гг. В каждой лесной полосе были заложены пробные площади размером 25 м на ширину лесной полосы для сплошного перечета древостоя с последующим определением его среднего диаметра и высоты. Четырехрядная вязовая лесная полоса ажурной конструкции имеет среднюю высоту древесного яруса 10,4 м, средний диаметр 18,5 см. Кустарниковый ярус представлен шиповником собачим (*Rosa canina*) и смородиной золотистой (*Ribes aureum*). Робиниевая лесная полоса шестирядная, продуваемой конструкцией, средняя высота древесного яруса составила 8,2 м, средний диаметр, 9,4 см. Также в состав древесного яруса входит ясень обыкновенны (*Fraxinus excelsior* L.), единично встречается клён остролистный (*Acer platanoides*). Средняя высота ясеня составила 7,6 м, средний диаметр 9,1 см. Кустарниковый ярус представлен смородиной золотистой (*Ribes aureum*). Структура лесной полосы с гледичией трехколючковой включает ярус древостоя и кустарниковый ярус из смородины золотистой (*Ribes aureum*). Шестирядная лесная полоса имеет ажурную конструкцию, средняя высота древостоя 8,6 м, средний диаметр 10,2 см. Лесная полоса, с доминированием дуба черешчатого (*Quercus robur*) двухрядная плотной конструкции, средняя высота составила 7,0 м, средний диаметр 12,1 см, сопутствующие породы ясень обыкновенный с кустарниковым ярусом из скумпии кожевенной (Cotinus coggygria Scop.).

Перед началом измерений проводили калибровку оборудования с использованием белой и черной калибровочных пластин. На каждом дереве спектральные характеристики листовой пластинки измерялись трижды. Измерения проводили в дневное время суток с разных сторон света. Наблюдения охватывали период вегетационного сезона от фенологической фазы полного развертывания листьев до фазы начала осеннего расцвечивания листьев, что позволило отследить динамику физиологического состояния растений на разных этапах сезонного развития (рис. 1).

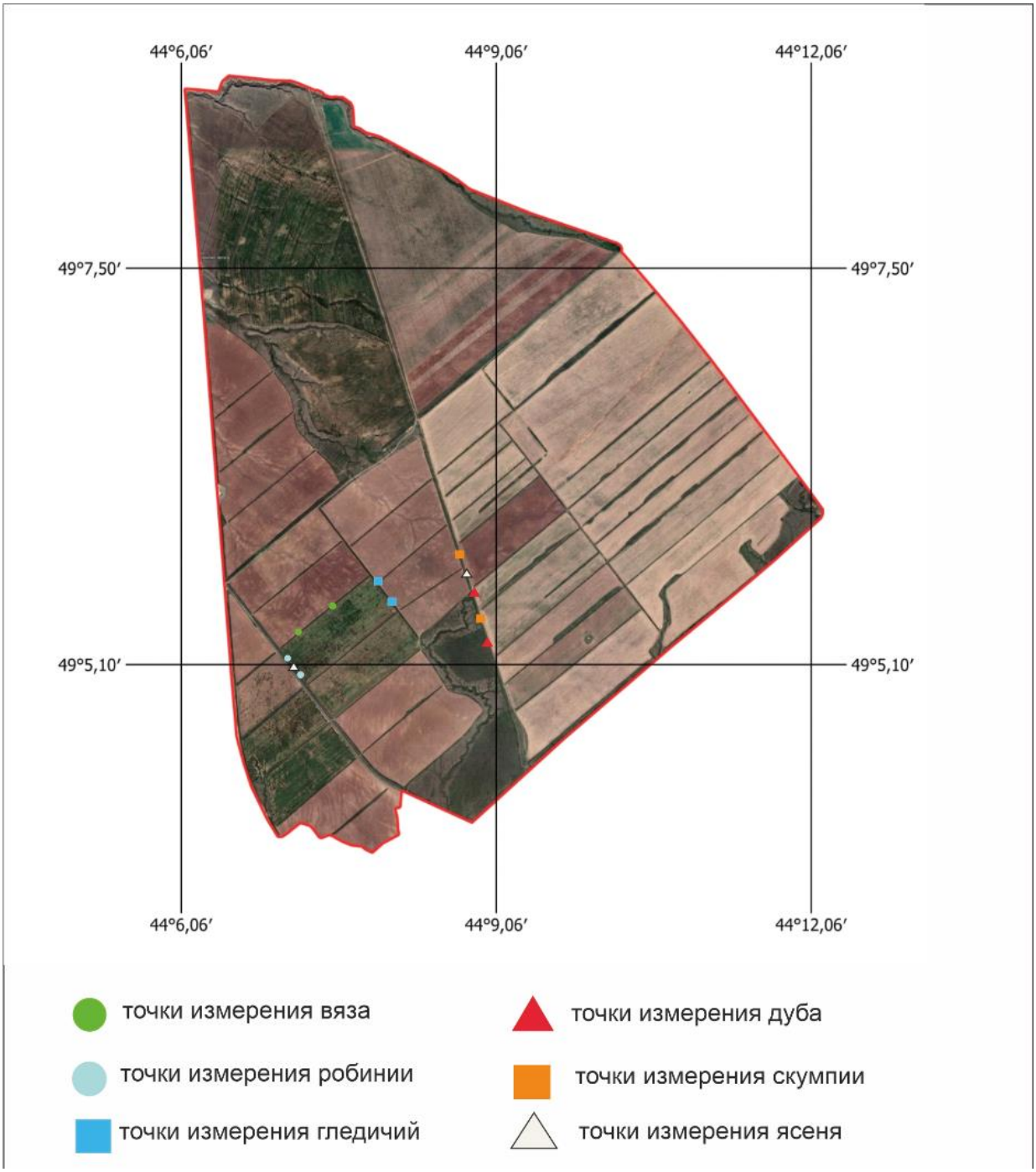

Рис. 1. Схема расположения точек спектрометрических измерений

Спектральные измерения проводились с помощью портативного спектрометра CI-710s SpectraVue (CID Bio-Science Inc., США) (рис. 2), который позволяет регистрировать спектры отражения, поглощения и пропускания света листовой пластинкой в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Перед началом каждой серии измерений проводилась калибровка прибора с использованием белой и черной калибровочных пластин.

Рис. 2. Работа Спектрофотометра SpectraVue Leaf Spectrometer CI-710s (CID-BioScience)

На основе встроенных в программное обеспечение прибора формул автоматически рассчитывались три спектральных индекса NDVI, PRI и WBI, отражающие различные аспекты физиологического состояния растений.

WBI (Water Band Index) – индекс водной полосы поглощения, используемый для оценки содержания воды в листовой ткани:

$$WBI = R_{900} / R_{970}, \quad (3)$$

где R_{900} и R_{970} – спектральная отражательная способность листа вблизи 900 и 970 нм соответственно.

Более высокие значения WBI указывают на большую оптическую влажность листовой ткани, в то время как снижение показателя характеризует уменьшение содержания влаги и, как следствие, развитие водного стресса. Диапазон значений WBI для зелёной растительности составляет от 0,8 до 1,2.

PRI (Photochemical Reflectance Index), – фотохимический индекс отражения, чувствительный к физиологическому состоянию фотосинтетического аппарата. При избытке световой энергии растения запускают защитные механизмы и чем быстрее происходят изменения фотохимической эффективности, тем менее повреждается фотосинтетический аппарат.

$$PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570}), (2)$$

где R_{531} – спектральная отражательная способность листа вблизи 531 и 570 нм соответственно. Отражение на длине волны около 531 нм, чувствительно к состоянию ксантофиллов, 570 нм – отражение, слабо зависящее от ксантофиллов.

Положительное значение PRI характерно для высокой фотохимической эффективности, в это время растение активно поглощает световую энергию для фотосинтеза. Отрицательное же значение индекса избыточная световая энергия не поглощается, а рассеивается в виде тепла. Диапазон значений PRI для зелёной растительности изменяется от - 0,05 до + 0,05.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный разностный вегетационный индекс, являющийся интегральным показателем состояния растительности [10, 11, 12, 13]. Рассчитывается на основе разницы между отражением света в ближнем инфракрасном диапазоне и видимой красной области спектра:

$$NDVI = (R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680}), (1)$$

где R_{800} и R_{680} – отражательная способность листа на длинах волн 800 и 680 нм соответственно.

Диапазон значений NDVI для здоровых лиственных насаждений составляет от 0,4 до 0,8.

Статистическая обработка полученных данных включала методы описательной статистики (расчёт средних значений, стандартных отклонений, минимальных и максимальных значений индексов по каждому виду).

Результаты и обсуждения

Статистический анализ полученных показателей позволил оценить водный статус листовой пластины древесных растений, эффективность фотохимической активности и общее физиологическое состояние растений в течение вегетационного периода (табл. 1).

Таблица 1. Статистические показатели индексов

Индекс	Древесная порода	n	min	Q1	med	Q3	мах	M	s	V, %	x±m
WBI	дуб	30	0,978	0,990	0,998	1,007	1,044	1,001	0,017	1,710	0,003
WBI	ясень	38	0,943	0,983	0,992	1,001	1,064	0,991	0,020	1,984	0,003
WBI	скумпия	33	0,943	0,982	0,990	0,998	1,025	0,989	0,016	1,587	0,003
WBI	гледичия	37	0,969	0,984	0,991	0,999	1,024	0,992	0,014	1,371	0,002
WBI	робиния	41	0,923	0,978	0,990	1,002	1,064	0,992	0,027	2,681	0,004

Индекс	Древесная порода	n	min	Q1	med	Q3	max	M	s	V, %	x±m
WBI	вяз	51	0,962	0,993	1,009	1,033	1,136	1,027	0,047	4,575	0,007
PRI	дуб	30	-0,099	-0,018	0,008	0,016	0,033	-0,007	0,034	-4,527	0,006
PRI	ясень	38	-0,108	-0,012	0,005	0,021	0,048	-0,002	0,037	-20,298	0,006
PRI	скумпия	33	-0,094	-0,047	-0,019	0,008	0,037	-0,022	0,035	-1,600	0,006
PRI	гледичия	37	-0,042	-0,009	0,002	0,023	0,049	0,006	0,023	4,027	0,004
PRI	робиния	41	-0,121	-0,023	0,012	0,026	0,039	-0,004	0,042	-9,515	0,007
PRI	вяз	51	-0,079	0,003	0,012	0,023	0,033	0,007	0,024	3,286	0,003
NDVI	дуб	30	0,111	0,516	0,582	0,618	0,727	0,547	0,141	25,870	0,026
NDVI	ясень	38	0,032	0,509	0,586	0,671	0,746	0,543	0,186	34,222	0,030
NDVI	скумпия	33	0,067	0,438	0,537	0,593	0,745	0,475	0,171	35,978	0,030
NDVI	гледичия	37	0,437	0,553	0,602	0,627	0,719	0,596	0,067	11,200	0,011
NDVI	робиния	41	0,034	0,516	0,596	0,655	0,733	0,544	0,187	34,270	0,029
NDVI	вяз	51	0,081	0,565	0,610	0,655	0,888	0,605	0,121	20,017	0,017

*n – количество измерений, min - минимальное значение, Q1 - первый квартиль, med - медиана, Q3 - третий квартиль, max - максимальное значение, M - среднее арифметическое, s - стандартное отклонение, V, % - коэффициент вариации, x±m - стандартная ошибка.

Индекс WBI, отражающий относительное содержание воды в листовой ткани, варьировал в диапазоне от 0,989 до 1,027. Ранжирование видов по среднему значению коэффициента за весь период вегетации имеет следующий вид: вяз-дуб-гледичия-робиния-ясень-скумпия [14]. Наиболее высокие значения отмечены у вяза (*Ulmus pumila)* (1,027), что указывает на высокую степень гидратации листьев и может свидетельствовать о высокой адаптивности вида к колебаниям влагообеспеченности окружающей среды. Несколько ниже, но также близкие к оптимальным значения выявлены у дуба (*Q. robur*, 1,001), ясеня (*F. excelsior*, 0,991), гледичии (*G. triacanthos*, 0,992) и робинии (*R. pseudoacacia,* 0,992). Минимальный WBI зарегистрирован у скумпии (*C. coggygria*, 0,989), что согласуется с её ксерофитной (растения сухих местообитаний) природой и склонностью к более низкой водонасыщенности тканей по сравнению с мезофитными (с достаточным увлажнением почвы) породами. Все шесть пород имели удовлетворительное водонасыщенное состояние на протяжении всего периода вегетации. Небольшой разброс значений (0,038) указывает на относительно однородные условия влагообеспеченности на исследуемом объекте, без выраженного стресса у какого-либо вида.

Индекс PRI, отражающий эффективность работы защитного механизма фотосинтетического аппарата и фотохимическое использование энергии, варьировал от отрицательных до слабоположительных значений. Ранжирование видов по среднему значению коэффициента за весь период вегетации имеет следующий вид: вяз-гледичия-

ясень-робиния-дуб-скумпия. Положительные значения у вяза (*U. pumila*, +0,007) и гледичии (*G. triacanthos*, +0,006) свидетельствуют о высокой фотохимической эффективности и низком уровне стресса у этих видов. Высокий коэффициент является свидетельством того, что данные виды древесных растений активно реализуют свой фотосинтетический потенциал и наращивают свою биомассу. У ясеня и робинии значения PRI были отрицательными, но близкими к нулю, что указывает на умеренную активность фотосинтеза при отсутствии выраженных стрессовых реакций. Ясень (-0.002) и робиния (-0,004) обладают высоким фотосинтетическим потенциалом, значения их коэффициентов близки к нулю, и при стрессовых ситуациях, вызванных высокой солнечной инсоляцией включают защитные функции для рассеивания тепла. Коэффициент PRI у дуба составил -0.007, что говорит о высокой фотозащите фотосинтетического аппарата. Наиболее низкий показатель выявлен у скумпии (-0,022), обусловленный более низкой эффективностью использования энергии света. Скумпия обладает мощным механизмом защиты от избыточной солнечной инсоляции.

Сравнивая значения индексов WBI и PRI у изучаемых древесных видов наиболее продуктивными в наращивании фитомассы являются вяз и гледичия, а более устойчивыми к условиям окружающей среды являются дуб и скумпия.

Анализ значений NDVI показал различия в общем вегетационном состоянии изучаемых пород. Ранжирование видов по среднему значению коэффициента за весь период вегетации имеет следующий вид: вяз-гледичия- дуб- робиния- ясень-скумпия. Наиболее высокие значения NDVI характерны для вяза (0,605) и гледичии (0,596), что свидетельствует о высокой плотности листовой поверхности, хорошем накоплении хлорофилла и стабильных физиологических процессах. Промежуточные значения отмечены у мезофитных пород: дуба (0,547), ясеня (0,543) и робинии (0,544). Минимальный NDVI зарегистрирован у скумпии (0,475), что согласуется с её ксероморфными особенностями. Однако листовая пластина у скумпии из-за высокого содержания антоцианов имеет красноватый оттенок, который при спектрометрии поглощает и отражает свет в других диапазонах и как результат может снижать классический отклик NDVI.

Сопоставление всех трёх индексов позволяет выделить виды с наиболее устойчивым физиологическим состоянием (рис. 3).

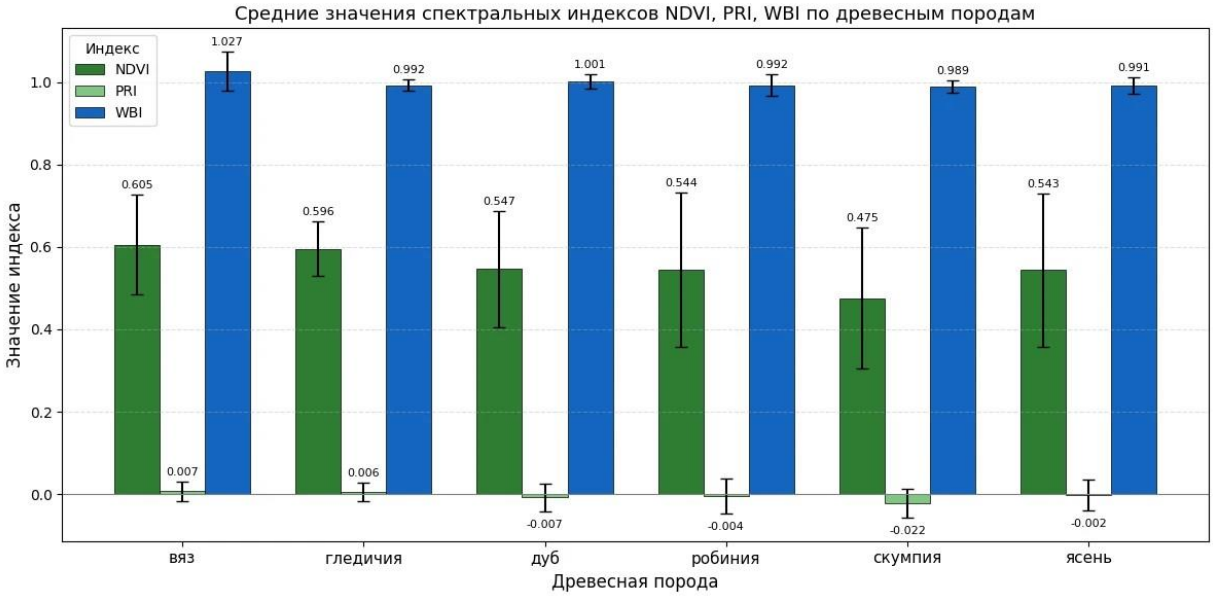

Рис. 3. Диаграмма спектральных индексов

Вяз приземистый *(Ulmus pumila)* показывает стабильные значения по всем исследованным параметрам. Высокий WBI, положительный PRI и максимальный NDVI за весть период вегетации указывают на высокую адаптивность вида к условиям окружающей среды и благоприятное функциональное состояние листьев. Аналогичную тенденцию, хотя и менее выраженную, показывает гледичия трёхколючковая (*Gleditsia triacanthos)*. В складывающихся природно-климатических условиях она также формирует мощный габитус, но требует больше влаги на формирование фитомассы. По всем трем индексам робиния (*Robinia pseudoacacia* L.) имеет умеренную крону и умеренно требовательна к водопотреблению, но имеет среднюю защиту в стрессовых условиях. Например, при возвратных заморозках, которые не редки в этой зоне, часто теряет листья, но быстро возобновляет вегетацию. Полученные значения индексов для дуба (*Quercus robur* L.) указывают на то, что он генетически защищает фотосинтезирующую поверхность от перегрева, жертвуя скорость роста ради долголетия. Ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.) оказался менее приспособленным к складывающимся условиям произрастания, что подтверждается его неудовлетворительным состоянием в лесных полосах. В противоположность этому скумпия кожевенная *(Cotinus coggygria)* характеризуется минимальными значениями всех трёх индексов, что отражает её ксерофитные особенности и указывает на относительно низкий уровень фотосинтетической активности и водного обеспечения.

Таким образом, анализ динамики изменения индексов NDVI, PRI и WBI за вегетационный период позволил выявить межвидовые различия физиологического состояния древесно-кустарниковых пород ЗЛН и подтвердил различную степень их адаптации к условиям произрастания. Эти результаты указывают на высокую устойчивость таких древесных пород как вяз и гледичия, стабильное физиологическое состояние таких мезофитных пород как дуб, ясень и робиния и выраженные ксероморфные признаки скумпии. Эти особенности важно учитывать при таксационных, эколого-экономических и других оценках мелиоративных защитных лесных полос, а также при лесомелиоративном обустройстве территорий.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить специфические особенности физиологической реакции древесных и кустарниковых растений полезащитных лесных насаждений сухостепной зоны в период их вегетации. Использование высокотехнологичного инновационного оборудования позволило получить ряд спектрометрических показателей для анализа трех взаимодополняющих индексов водного (WBI), фотохимического (PRI) и вегетационного (NDVI). В результате установлено что, наиболее адаптированными к местным условиям произрастания и продуктивными в накоплении фитомассы являются вяз приземистый и гледичия трехколючковая. Эти виды обладают высокой степенью гидратации тканей, а также положительную фотохимическую эффективность, максимальное накопление хлорофилла и плотность листовой поверхности Дуб черешчатый и кустарник скумпия кожевенная не так активно накапливают биомассу, но при этом обладают мощной защитой своего фотосинтетического аппарата от избыточной инсоляции и перегрева, что обеспечивает их долговечность в засушливых ксловиях. Робиния обладает умеренной требовательностью к влаге, резко реагирует на возвратные заморозки при этом быстро восстанавливает листовой аппарат после стабилизации погодных условий. Ясень же оказался наименее приспособленным к данным условиям произрастания в изучаемых лесополосах.

Следовательно, древесно-кустарниковые насаждения, включенные в видовой состав исследуемых полезащитных лесных полос полигона «Качалино» Волгоградской области сохраняют удовлетворительное состояние и выполняют свою мелиоративную функцию. Вместе с тем адаптационные свойства, направленные на активный рост, энергосбережение

и засухоустойчивость указывают на возможность дифференцированного подхода при подборе ассортимента для лесомелиоративного обустройства сельскохозяйственных территорий в условиях нарастающей аридизации климата. Полученные результаты подтвердили эффективность портативной спектрометрии как оперативного и неразрушающего метода диагностики физиологического состояния древесно-кустарниковой растительности в зоне сухой степи Приволжской возвышенности.

Финансирование:

Исследования проведены в рамках темы государственного задания научно-исследовательской работы ФНЦ агроэкологии РАН 125021302094-5 «Формирование и функционирование адаптивных агролесомелиоративных комплексов юга России в условиях климатических изменений с использованием цифровых технологий»

Список использованных источников:

1. Шестаков Н. А., Топаз А. А. Картографирование лесной растительности на основе автоматизированного дешифрирования по данным дистанционного зондирования Земли // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2024. – № 1. – С. 98-112.

2. Кувалдин Э. В. Дистанционный и контактный приборы диагностики состояния растений // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 11. – С. 68-77.

3. Баташова С. С., Золотухина А. А., Гурылева А. В. [и др.] Портативное устройство для определения физиологического состояния растений методами флуориметрии и спектрометрии // Научное приборостроение. – 2026. – Т. 36, № 1. – С. 71-86.

4. Вилюнов С. Д., Зотиков В. И., Сидоренко В. С. [и др.]. 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.

5. Сурин В. Г. Мониторинг состояния посевов и моделирование стрессовых реакций растений в процессе жизненного цикла // День Балтийского моря : Материалы докладов участников XVIII Международного экологического Форума, Санкт-Петербург, 22–23 марта 2017 года. – Санкт-Петербург: ООО "Свое издательство". 2017. – С. 49-63.

6. Железова С. В., Ананьев А. А., Вьюнов М. В., Березовский Е. В. Мониторинг посевов озимой пшеницы с применением беспилотной аэрофотосъёмки и оптического датчика GreenSeeker® rt200 // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2016. – № 6(194). – С. 56-61.

7. Юсов В. С., Юсова О. А., Глушаков Д. А. Спектрометрический анализ

адаптивности яровой твердой пшеницы // Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии XXIV: Материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием, Москва, 23–27 сентября 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии». - 2024. – С. 140-142. – DOI 10.48397/o5128-8608-8888-j.

8. Kupka D., Banach J., Oliwa J., Staszel-Szlachta K., Gruba P. Contrasting responses of Norway spruce (Picea abies (L.) H.Karst) and European beech (Fagus sylvatica L.) seedlings to warming in the Western Carpathians: growth, root and leaf traits, physiology // *Ecological Indicators. - 2025*, Volume 180, 114323, https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114323.

9. Su Q., Wang J., Ling H., Wang Z., Gai J. Estimation of Chlorophyll and Water Content in Maize Leaves Under Drought Stress Based on VIS/NIR Spectroscopy // Processes. - 2025, 13, 3087. https://doi.org/10.3390/pr13103087.

10. Hajek. P., Mörsdorf. M., Kovach. K.R. et al. Quantifying the influence of tree species richness on community drought resistance using drone-derived NDVI and ground-based measures of Plant Area Index and leaf chlorophyll in a young tree diversity experiment. // Eur J Forest Res 143, 141–155 (2024). https://doi.org/10.1007/s10342-023-01615-3.

11. Štěpánová. K., Lhoták̀ová. Z., Neuwirthová. E. et al. Scots pine seedlings of lowland and upland ecotypes respond differently to drought detected by needle functional traits and spectral reflectance // BMC Plant Biol 26, 261 (2026). https://doi.org/10.1186/s12870-025-08019-y.

12. Якушев В.П., Канаш Е.В., Русаков Д.В., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Петрушин А.Ф., Блохин Ю.И., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева // Сельскохозяйственная биология, 2022, том 57, № 1, с. 98-112.

13. Веденеева В. А. Оценка состояния агроценоза озимой пшеницы с помощью вегетационного индекса NDVI // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2025. – № 2(80). – С. 84-94. – DOI 10.32786/2071-9485-2025-02-10.

14. Свидетельство о государственной регистрации базы данных РФ № 2026621182. Вегетационные индексы лесных полос полигона Качалино за 2024 г. / В. А. Веденеева, А. В. Кошелев, Ю. Н. Поташкина. Опубл. 19.03.2026. Заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук».

Цитирование: Веденеева В.А., Поташкина Ю.Н. Анализ спектральных характеристик листовых пластин древесных пород лесных полос полигона Качалино Волгоградской области [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2026. – № 4. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2026/4/st_410.pdf DOI: https://doi.org/10.51419/202164410.