

DOI: 10.18522/2308-9709-2024-49-11

Определение оптимальных периодов в фенологическом развитии видов клена для их идентификации по спектральным характеристикам листьев

Дмитриев Павел Александрович¹, Дмитриева Анастасия Анатольевна¹, Федоринова Ольга Ивановна¹, Козловский Борис Леонидович¹

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия;
pdmitriev@sfedu.ru

Аннотация:

Идентификация древесных видов растений является приоритетной задачей при проведении дистанционного мониторинга древесных насаждений в независимости от его целей. В последнее время растет число исследований по идентификации древесных растений методами спектрального фенотипирования. Вместе с тем идентификация древесных растений по их спектральным характеристикам остается сложной задачей. Одним из подходов к увеличению точности дистанционной идентификации растений является учет их фенологических различий. Целью исследования было проведение идентификации *Acer platanoides*, *A. campestre*, *A. negundo*, *A. saccharinum* и *A. ibericum* по спектральным характеристикам их листьев, представляющих подробный временной ряд за период вегетации и определение оптимального для идентификации периода в их фенологическом цикле. Исследование проводилось в лабораторных условиях, с использованием гиперспектральной камеры Cubert UHD-185. Идентификация видов кленов проводилась с помощью алгоритма случайного леса (RF) по пикселям. В качестве независимых переменных в RF модели использовались вегетационные индексы (ВИ). Было установлено, что наличие различий в фенологии видов является важной предпосылкой для их успешной идентификации. Наибольшая точность идентификации видов была достигнута в периоды весеннего развития и осеннего старения листьев. Ошибка OOB (Out-of-bag error) RF модели составила по этим периодам 2.1–6.1% и 4.3–6.7% соответственно. Определена группа неколлинеарных ВИ для классификации видов клена методом машинного обучения. Это ARI, Boochs, CCI, CI, CRI1, D1, D2, Datt3, Datt4, DDn, DPI, DWSI4, EVI, Gitelson, Gitelson2, LSINorm, LSIRed, MCARI, MCARI2, modPRI, MPRI, NDVI, PARS, PRI, PRI_CI2, PRI_norm, PSND, PSSR, SR4, SR5, TCARI2, TCARI2_OSAVI2 и TGI. Наиболее информативными для RF классификации кленов по вкладу в изменение значения OOB error и индекса Джини оказались следующие ВИ: CCI, MPRI, DWSI4, Datt4, CRI1, DDn.

Ключевые слова: Вегетационный индекс, гиперспектральная съемка, клен, случайный лес классификация, фенология, фотосинтетические пигменты.

DOI: 10.18522/2308-9709-2024-49-11

Determination of optimal periods in phenological development of maple species for their identification by spectral characteristics of leaves

Dmitriev Pavel Alexandrovich¹, Dmitrieva Anastasiya Anatolievna¹, Fedorinova Olga Ivanovna¹, Kozlovsky Boris Leonidovich¹

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract:

Identification of woody plant species is a priority for remote monitoring of tree plantations, regardless of their objectives. Recently, there has been an increasing number of studies on the identification of woody plants using spectral phenotyping methods. However, the identification of woody plants based on their spectral characteristics remains a challenge. One approach to increase the accuracy of remote identification of plants is to take into account their phenological differences. The aim of this study was to identify *Acer platanoides*, *A. campestre*, *A. negundo*, *A. saccharinum* and *A. ibericum* using spectral characteristics of their leaves, representing a detailed time series during the vegetation period, and to determine the optimal period in their phenological cycle for identification. The study was conducted under laboratory conditions using a Cubert UHD-185 hyperspectral camera. Maple species identification was performed using a pixel-based random forest (RF) algorithm. Vegetation indices (VIs) were used as independent variables in the RF model. The presence of differences in species phenology was found to be an important requirement for successful species identification. The highest accuracy of species identification was achieved during the periods of spring development and autumn leaf senescence. The out-of-bag (OOB) error of the RF model for these periods was 2.1-6.1% and 4.3-6.7%, respectively. A group of non-collinear VIs were identified for machine learning maple species classification. They are ARI, Boochs, CCI, CI, CRI1, D1, D2, Datt3, Datt4, DDn, DPI, DWSI4, EVI, Gitelson, Gitelson2, LSINorm, LSIRed, MCARI, MCARI2, modPRI, MPRI, NDVI, PARS, PRI, PRI_CI2, PRI_norm, PSND, PSSR, SR4, SR5, TCARI2, TCARI2_OSAVI2 and TGI. The following VIs were the most informative for the RF classification of maples according to their contribution to the change in OOB error value and Gini index: CCI, MPRI, DWSI4, Datt4, CRI1, DDn.

Введение

Дистанционный мониторинг состояния растительности в сельском и лесном хозяйствах с использованием спектральных сенсоров, фиксирующих пассивное отражение от растительности, вошел в широкую практику и интенсивно развивается. В независимости от целей мониторинга первым этапом этого процесса является идентификация объектов мониторинга. В настоящее время одним из перспективных подходов к идентификации древесных растений является спектральное фенотипирование (Nucza et al., 2018; Yel and Tunc, 2023; Zhong et al., 2024).

С помощью гиперспектральных и мультиспектральных изображений можно проводить индивидуальную идентификацию деревьев, а также картографирование видов (Ferreira et al., 2020; Grabska et al., 2020).

Для идентификации растений используются различия в их спектральном отражении в (1) конкретном временном срезе и (2) во временном ряде, охватывающем онтогенез или фенологический цикл развития растения. Второй подход объединяет спектральные различия с фенологическими (или онтогенетическими) различиями классифицируемых растений. Фенологические признаки весьма полезны для идентификации видов растений. Фенологические фазы хорошо распознаются, например, такие как, цветение, изменение окраски листьев в процессе их старения или листопад в смешанных (хвойных и лиственных) лесах. Временной ряд спектральных характеристик за период вегетации вида формирует специфическую кривую, которую называют спектральной подписью. Такой подход к идентификации культур давно и успешно используется в сельском хозяйстве, что связано со значительными различиями в фенологии и технологии возделывания большинства сельскохозяйственных растений (преимущественно травянистые жизненные формы) (Vidican et al., 2023). Различия в спектральных характеристиках между культурами в каждом конкретном временном срезе здесь играют второстепенную роль. Идентифицировать древесные растения на основании их спектральной подписи значительно сложнее. Их фенологическое развитие и технология возделывания не так разнообразны, как для травянистых сельхоз культур, хотя современные исследования показывают, что временные ряды спектральных характеристик могут соответствовать фенологическим и сезонным характеристикам видов деревьев, и характеристики изменяются по-разному для разных видов деревьев в течение года (Sheeren et al., 2016; Zeng et al., 2020; Berra and Gaulton, 2021; Dronova and Taddeo, 2022).

Есть ряд работ, в которых для идентификации древесных видов используются спектральные подписи, отражающие изменения спектральных характеристик в процессе фенологического развития (Wang et al., 2022; Blickensdörfer et al., 2024). Однако в большинстве исследований

фенологическая информация используется в урезанном виде – для идентификации растений используются данные нескольких временных срезов (от двух до пяти) разных сезонов фенологического цикла (Grabska et al., 2019; Xi et al., 2021; Yel and Tunc, 2023; Zhong et al., 2024).

Актуальными являются исследования по поиску фенологических фаз или межфазных периодов в годовом цикле развития классифицируемых древесных растений, в которых разница между ними по спектральным характеристикам наиболее существенна (Sheeren et al., 2016; Ferreira et al., 2020; Pu and Landry, 2020).

При выделении периодов в фенологическом цикле развития растений, в котором их классификация по спектральным характеристикам наиболее эффективна, следует учитывать механистическую сущность ВИ. Практически все ВИ отражают содержание фотосинтетических пигментов или других веществ (азот, углерод, вода...), состояния растений (стресс, стадию развития, накопление биомассы) опосредованно через содержание фотосинтетических пигментов (Xue et al., 2017; Vidican et al., 2023).

Содержание фотосинтетических пигментов в растениях варьирует не только в зависимости от видовой принадлежности, но и существенно от фенологической стадии (Morais et al., 2022). В этом отношении интерес представляет период старения листьев от фазы начало появления осенней окраски листьев до массового листопада. В ходе старения листьев происходит значительные изменения в соотношении фотосинтетических пигментов, в том числе пигментов ксантофиллового цикла, происходит накопление антоцианов (Ji et al., 1992; Yoo et al., 2003). На скорость старения листьев и сроки наступления завершающих фаз фенологического развития листьев влияет большее число экзогенных факторов (динамика температур, заморозки, осадки, ветер, стресс от засухи осенью и тепловой стресс летом и др.), чем на начальные фазы развития листьев, где решающую роль играют температуры (Panchen et al., 2015; Xie et al., 2018).

На таком фоне различия в спектральных характеристиках листьев разных видов может усиливаться, большее значение для дифференциации видов наряду с хлорофилл-чувствительными ВИ приобретают каротиноид- и антоциан-чувствительные ВИ. Значимость этапа осеннего старения листьев для идентификации видов по их спектральным характеристикам показана в ряде работ (Grigorieva et al., 2020; Fang et al., 2020).

В ходе проведенного исследования путем, проксимальной гиперспектральной съемки в лабораторных условиях получен подробный временной ряд спектральных характеристик пяти видов кленов, охватывающий период в их вегетации от начала разворачивания листьев до массового листопада. Рассчитаны концентрации фотосинтетических пигментов листьев трех видов кленов в дни соответствующие

гиперспектральной съемке. Проведены фенологические наблюдения. Рабочей гипотезой исследования послужило предположение о том, что период старения листьев является оптимальным для идентификации видов древесных растений по их спектральным характеристикам. Целью исследования было проведение идентификации пяти видов кленов методом машинного обучения по спектральным характеристикам их листьев, представляющим подробный временной ряд за период вегетации и определение оптимального для идентификации периода в их фенологическом цикле.

1. Условия, объекты и методы

1.1. Объекты исследования

Объектами исследования послужили пять видов рода *Acer* L. – *A. campestre* L., *A. platanoides* L., *A. negundo* L., *A. saccharinum* L. и *A. ibericum* Vieb. *Acer campestre* – вид флоры Нижнего Дона широко распространенный в пойменных и байрачных лесах. *Acer platanoides* и *A. saccharinum*, виды устойчиво и преемственно используемые в озеленении населенных пунктов юго-запада Ростовской области. Из них *A. platanoides* натурализовавшийся здесь вид, *A. saccharinum* вид, не имеющий потенциала к натурализации. *Acer ibericum* перспективный для культуры в южных районах Ростовской области вид, один из самых засухоустойчивых в роду.

Acer negundo в настоящее время не используется в озеленении населенных пунктов области, является опасным инвазионным видом для Евразии. Такой набор видов клена представляет широкий спектр экологических групп от гигромезофита (*A. negundo*) до ксеромизифита (*A. ibericum*) (Куропятников и др., 2017).

Образцы всех пяти видов кленов произрастали в одинаковых условиях в коллекции покрытосеменных растений ботанического сада ЮФУ. Они имели приблизительно одинаковый возраст (от 20 до 30 лет – стадия молодые генеративные растения). Каждый вид был представлен тремя образцами, с каждого образца по периметру кроны с основания однолетнего побега (таким образом, обеспечивался одинаковый возраст листьев не зависимо от даты взятия проб) отбирали по 15 листьев для гиперспектральной съемки. Для определения содержания фотосинтетических пигментов с каждого образца отбирали 15 листьев по тому же принципу. Отобранные листья в течение часа доставлялись в лабораторию для гиперспектральной съемки и анализа.

1.2. Определение содержания фотосинтетических пигментов

При сопоставлении содержания фотосинтетических пигментов со значениями ВИ рекомендуется определять содержание пигментов не на массу, а на площадь листа (Féret et al., 2011). Поэтому содержание хлорофилла *a* (хл. *a*), хлорофилла *b* (хл. *b*) и суммы каротиноидов (сумма кар.) в листьях клена

выражали в мг/дм². С каждого листа отбиралась круглая высечка диаметром 10 мм (на каждый образец 15 высечек с 15 листьев). Пигменты экстрагировали с использованием 96% этанола, по методике Lichtenthaler and Welburn (1983). Экстинкцию экстракта определяли с помощью спектрофотометра Beckman Coulter Du 730 Life Science.

Отбор проб листьев клена для определения содержания фотосинтетических пигментов (и проведения гиперспектральной съемки) проводили в следующие календарные даты 2024 г.: 17 апр., 4 апр., 3 мая, 8 мая, 14 мая, 22 мая, 29 мая, 5 июн., 17 июн., 26 июн., 3 июл., 12 июл., 17 июл., 26 июл., 2 авг., 7 авг., 16 авг., 23 авг., 30 авг., 5 сент., 13 сент., 17 сент., 24 сент., 1 окт., 9 окт., 22 окт. и 1 нояб.

1.3. Методика получения гиперспектральных снимков

Гиперспектральная съемка листьев кленов проводилась в лабораторных условиях при искусственном освещении с помощью камеры Cubert UHD-185. Камера имеет спектральный диапазон от 450 до 950 нм и спектральное разрешение 4 нм. Перед каждой съемкой проводилась калибровка камеры по белому эталону. Лист клена располагался на черном фоне, на расстоянии 40 см от объектива камеры. Размер пикселя на этом расстоянии составляет 0.25 см². Спектральные данные прошли предварительную обработку, которая включала применение фильтра Савицкого-Голея. Для выбора области интереса (ROI – Region Of Interest) на гиперспектральном изображении использовалась двухэтапная сегментация. На первом этапе ROI выбиралось путем установки порога для отбора пикселей на длине волны 790 нм при значении коэффициента отражения (R) > 25. На втором этапе применялась морфологическая эрозия с использованием структурирующего элемента 3 × 3, как показано на рисунке 1.

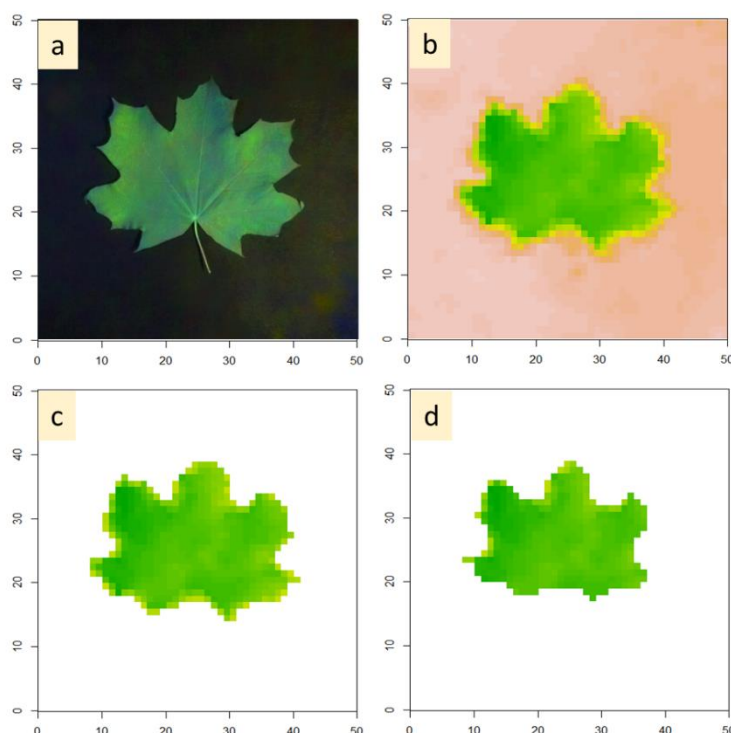


Рисунок 1 – Результаты двухэтапной сегментации гиперспектрального изображения на примере *A. campestre*: а – RGB изображение; б – визуализированные значения на длине волны 790 нм по пикселям на гиперспектральном изображении; в – результат пороговой фильтрации на длине волны 790 нм при $R > 25$; д – результат применения операции морфологической эрозии.

Вегетационные индексы были рассчитаны с использованием пакета *hsdar* (Lehnert et al., 2019) в среде R (R Core Team). Всего было рассчитано 84 ВИ, их полные названия и формулы представлены в статье Dmitriev et al. (2024).

1.4. Проведение фенологических наблюдений

Наблюдения за фенологией пяти видов кленов проводилась по стандартной методике (Александрова и др., 1975). Фенологические наблюдения проводились с интервалом в 2–3 дня.

1.5. Обработка данных

Обработка данных проводилась стандартными статистическими методами. Определение коллинеарных ВИ проводили путем построения для них матрицы парных коэффициентов детерминации. Далее из нее исключались ВИ по порогу коэффициента корреляции более 0.7 (или коэффициента детерминации более 0.5). Идентификация видов клена

проводилась с помощью алгоритма случайного леса (RF – Random Forest) по пикселям. В качестве независимых переменных использовались ВИ. При RF классификации объемы выборок данных по классам выравнивались по минимальной выборке. Число деревьев в RF модели составляло 100, число признаков, по которым производилось разбиение в узлах – пять. Количество итераций RF модели 100.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Особенности фенологии листьев кленов

Фенология развития листьев *A. campestre*, *A. negundo*, *A. platanoidesa*, *A. saccharinum* и *A. ibericum* за 2024 год и по многолетним наблюдениям представлена в таблице 1. *Acer campestre*, *A. negundo*, *A. platanoidesa* и *A. saccharinum* мало различаются по срокам распускания почек и листьев. При этом *A. ibericum* значительно отличается от других видов, срокам наступления этих фаз, они наступают позже в среднем на 8–12 дней. *Acer negundo* существенно отличается от других видов по завершающим фазам развития листьев – начало старения листьев, внешне проявляющееся в фенологической фазе «осеннее окрашивание листьев – начало», наступает у этого вида раньше в среднем на один месяц, чем у других четырех видов. Завершение листопада – на 14–23 дня раньше. У других видов по многолетним наблюдениям наступление завершающих фенологических фаз развития листьев различается мало. Однако в 2024 г. процессы старения листьев начали внешне (изменение окраски) проявляться у *A. saccharinum* и *A. ibericum* существенно позже, чем у других видов. В этой связи следует отметить погодные условия 2024 г. – минимальные суточные температуры не опускались ниже 0°C вплоть до 16 октября. Это позволило в полной мере проявиться различиям в процессе старения листьев исследуемых видов. По многолетним наблюдениям первые осенние заморозки происходят в Ростове-на-Дону 15 октября. Они «выравнивают» сроки наступления завершающих фаз развития листьев по видам (Козловский и др., 2020).

Таблица 1 – Фенология листьев *A. campestre*, *A. negundo*, *A. platanoidesa*, *A. saccharinum* и *A. ibericum* в Ботаническом саду ЮФУ

Период наблюдения	Фенологические фазы	<i>A. campestre</i>	<i>A. negundo</i>	<i>A. platanoidesa</i>	<i>A. saccharinum</i>	<i>A. ibericum</i>
2024 г.	Распускание почек	2.04*	25.03	30.03	5.04	10.04
	Распускание листьев	6.04	1.04	4.04	8.04	17.04
	Полное разворачивание листьев	15.04	10.04	15.04	16.04	30.04
	Осеннее окрашивание листьев – начало	7.10	28.09	14.10	19.10	30.10
	Осеннее окрашивание листьев – массовое	22.10	22.10	19.10	5.11	4.11
	Листопад – начало	19.10	14.10	17.10	25.10	6.11

Дмитриев П. А., Дмитриева А. А., Федоринова О. И., Козловский Б. Л., Определение оптимальных периодов в фенологическом развитии видов клена для их идентификации по спектральным характеристикам листьев // «Живые и биокосные системы». – 2024. – № 49; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-49/article-11>; DOI: 10.18522/2308-9709-2024-49-11

	Листопад – массовый	30.10	25.10	27.10	11.11	16.11
	Листопад – завершение	4.11	28.10	2.11	18.11	19.11
	Продолжительность вегетации (дни)	211	217	211	220	225
Многолетние наблюдения	Распускание почек	14.04 ± 2,0**	07.04 ± 2,6	11.04 ± 1,6	12.04 ± 2,1	22.04 ± 1,6
	Распускание листьев	18.04 ± 1,9	14.04 ± 2,3	16.04 ± 1,6	18.04 ± 2,0	26.04 ± 1,7
	Полное разворачивание листьев	25.04 ± 2,1	22.04 ± 2,6	23.04 ± 1,7	27.04 ± 2,1	03.05 ± 1,8
	Осеннее окрашивание листьев – начало	26.09 ± 4,1	24.08 ± 6,2	24.09 ± 2,6	23.09 ± 3,1	27.09 ± 14,3
	Осеннее окрашивание листьев – массовое	06.10 ± 4,3	10.09 ± 5,1	03.10 ± 2,5	08.10 ± 2,8	10.10 ± 5,5
	Листопад – начало	01.10 ± 2,5	31.08 ± 5,3	29.09 ± 1,8	02.10 ± 2,6	13.10 ± 6,5
	Листопад – массовый	15.10 ± 2,0	23.09 ± 4,6	13.10 ± 1,4	19.10 ± 2,1	27.10 ± 0,9
	Листопад – завершение	26.10 ± 2,1	10.10 ± 2,6	24.10 ± 1,6	31.10 ± 2,5	02.11 ± 1,4
	Продолжительность вегетации	184 ± 2,8	179 ± 6,3	185 ± 2,2	192 ± 3,0	188 ± 1,9

Примечание: * первое число – порядковый номер дня месяца, второе число – порядковый номер месяца в году; ** статистическая ошибка средней даты наступления фенологической фазы в днях.

Таким образом, по результатам анализа фенологического развития листьев привлеченных в исследование видов клена, можно предварительно прогнозировать, что идентификация видов по временным рядам спектральных характеристик их листьев будет наиболее точной для *A. negundo* и *A. ibericum*. Соответственно, затруднение вызовет разделение трех видов – *A. platanoidesa*, *A. campestre* и *A. saccharinum*.

2.2. Динамика содержания фотосинтетических пигментов кленов в процессе их фенологического развития

Динамика суммы хлорофиллов *a* и *b* (сумма хл.), суммы кар. и значение их отношения (хл./кар.) представлена на рисунке 2.

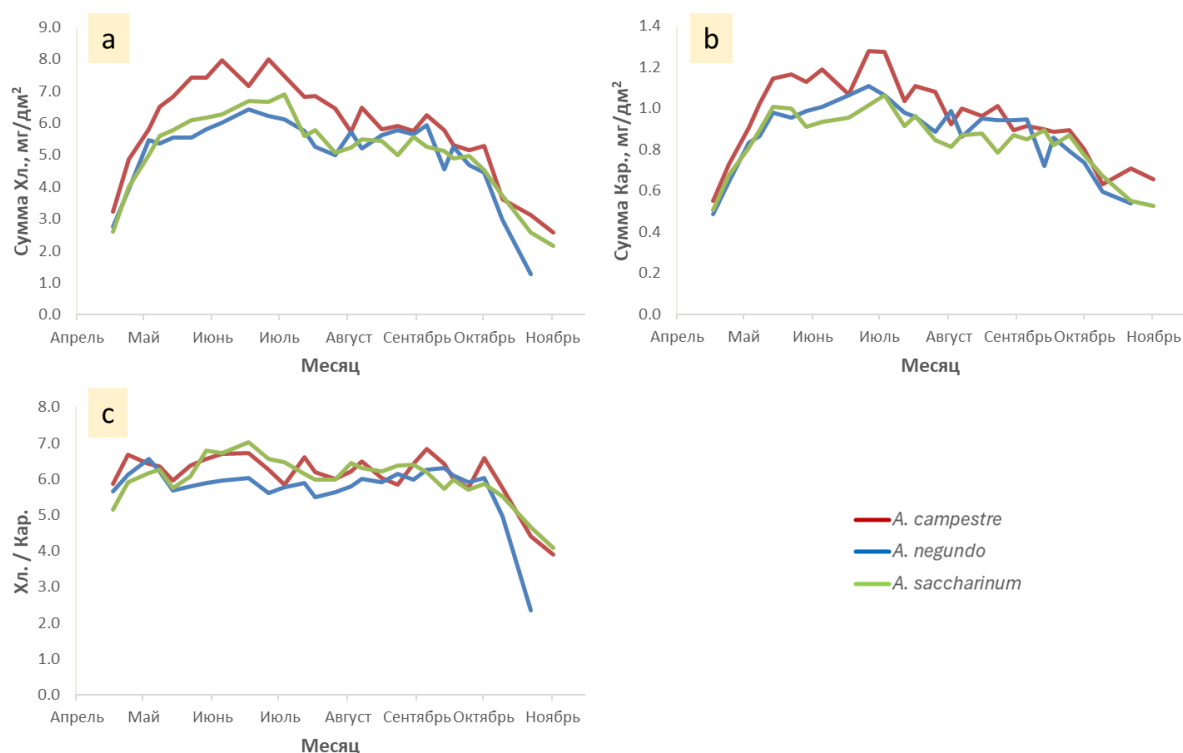


Рисунок 2 – Динамика содержания фотосинтетических пигментов в листьях *A. campestre*, *A. negundo* и *A. saccharinum* в процессе их фенологического развития в 2024 г.

Содержание суммы хл. в период весеннего развития листьев быстро нарастает и достигает своего максимума во второй декаде июня, затем медленно снижается, с первой декады октября происходит резкое падение их концентрации (Рис. 2а). Динамика содержания суммы кар. в листьях повторяет таковую для суммы хл., за исключением отсутствия резкого снижения на этапе осеннего старения (Рис. 2б). Показатель отношения хл./кар. для трех видов клена на протяжении большей части фенологического цикла развития их листьев остается неизменным, только с началом процессов старения происходит его резкое падение (Рис. 2с). У *A. campestre* содержание суммы хл. выше, чем *A. negundo* и *A. saccharinum*, что наблюдалось и в другие сезоны (Dmitriev et al., 2023; Игнатова и др., 2024). Эта разница наиболее заметна в период с первой декады мая по начало августа, а также начиная со второй декады октября. Такая же закономерность отмечается для суммы кар. Для *A. negundo* и *A. saccharinum* разница в содержании фотосинтетических пигментов не настолько большая, за исключением периода осеннего старения листьев (Рис 2а и 2с).

2.3. Динамика значений ВИ листьев кленов в процессе их фенологического развития

Дмитриев П. А., Дмитриева А. А., Федоринова О. И., Козловский Б. Л., Определение оптимальных периодов в фенологическом развитии видов клена для их идентификации по спектральным характеристикам листьев // «Живые и биокосные системы». – 2024. – № 49; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-49/article-11>; DOI: 10.18522/2308-9709-2024-49-11

Динамика спектральных характеристик листьев клена представлена на примере четырех ВИ: нормализованный индекс разницы растительности (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), индекс фотохимического отражения (Photochemical Reflectance Index – PRI), индекс хлорофиллы/каротиноиды (Chlorophyll/Carotenoid index – CCI) и антоциановый индекс (Anthocyanin Index – ARI) (Рис. 3).

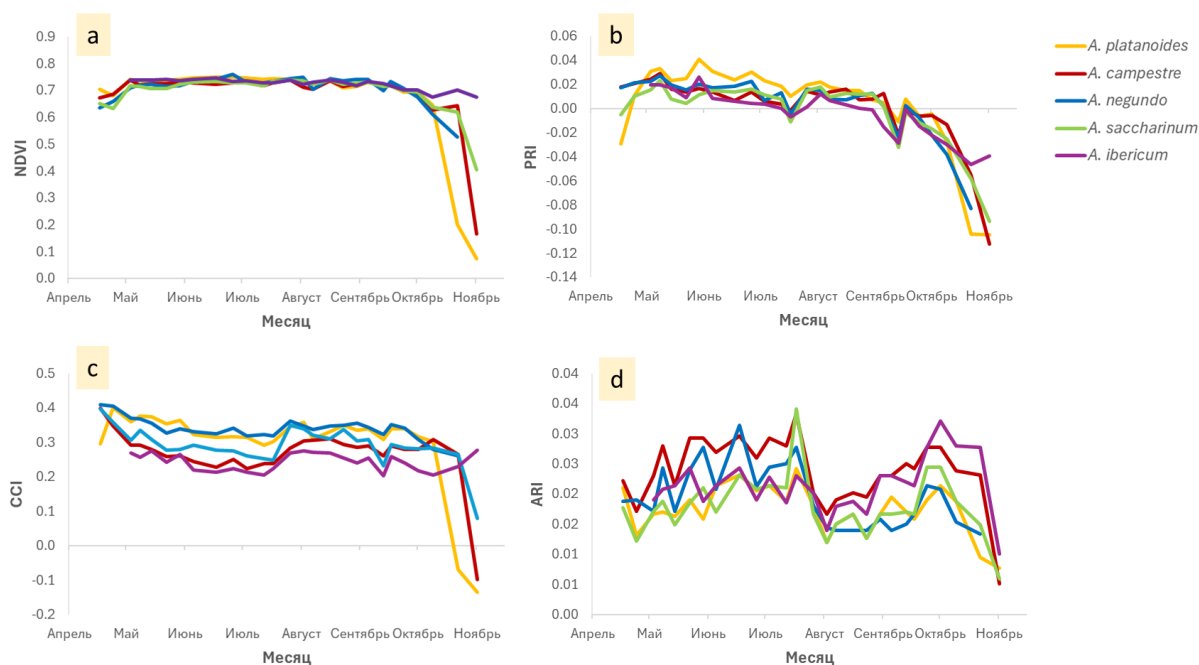


Рисунок 3 – Динамика значений ВИ листьев кленов в процессе их фенологического развития.

Динамика значений NDVI (Рис 3а) хорошо отражает различия между видами кленов по значению этого индекса в период весеннего развития и особенно осеннего старения листьев после наступления фенологической фазы «осеннее окрашивание листьев – начало». Однако на отрезке от конца весны до начала осени значение этого ВИ не варьирует по видам а также в зависимости от даты съемки. Это можно объяснить эффектом насыщения NDVI при высоком содержании хлорофиллов (Huang et al., 2021).

Динамика значений PRI в наибольшей степени соответствует динамике содержания суммы хл. и суммы кар. в листьях кленов, в сравнении с другими представленными на Рисунке 3 ВИ, и в наилучшей степени описывает фенологическое развитие их листьев (Рис 2а и 2b). Пик значений PRI приходится на конец мая, начало июня. Так же, как и для NDVI наибольшая разница между видами по значениям PRI отмечается у молодых и стареющих листьев.

Значение CCI начиная с момента разворачивания листьев до начала фазы осеннего старения листьев для всех пяти кленов остается стабильным, затем происходит его резкое падение. Конфигурация кривой динамики этого ВИ хорошо соответствует конфигурации кривой показателя отношения суммы хлорофиллов к сумме каротиноидов (Рис 2с и 3с). Наибольшие различия в значениях этого ВИ по видам наблюдаются у стареющих листьев.

Индекс ARI демонстрирует высокую флюктуацию своих значений, особенно во второй половине вегетации. В целом этот ВИ может быть не информативным для идентификации кленов, так как у клена красные пигменты накапливаются только во время позднего старения или в разворачивающихся молодых листьях (Mattila and Tuustjärvi, 2023). Действительно, при визуальных фенологических наблюдениях в осенней окраске листьев этих видов красный цвет не фиксируется. Вместе с тем для *A. saccharinum* характерно высокое содержание антоцианов в молодых листьях (Ji et al., 1992), что с помощью ARI не удалось зафиксировать.

Таким образом, анализ динамики значений выбранных ВИ по временным рядам показывает, что наиболее эффективными сроками для идентификации видов кленов могут быть начальные и завершающие стадии развития листьев. Из пяти рассмотренных видов только *A. ibericum* имеет уникальную форму спектральной подписи (PRI, CCI). Различия в спектральных подписях *A. platanoidesa*; *A. campestre*; *A. negundo* и *A. saccharinum* носят количественный характер.

2.4. Идентификация видов кленов по спектральным характеристикам их листьев в процессе их фенологического развития с помощью алгоритма RF

2.4.1. Определение коллинеарных ВИ

Наличие высокой силы связи между значениями большой группы используемых в исследованиях ВИ вытекает из их механистической сущности – отражать состояние растений через содержание фотосинтетических пигментов и плотность полога (Vidican et al., 2023). При использовании алгоритмов машинного обучения наличие мультиколлинеарности независимых переменных может стать причиной переобучения модели и, соответственно, получения неверного результата. Кроме того, избыточные малоинформативные признаки увеличивают сложность модели машинного обучения. На рисунке 4 представлена матрица парных коэффициентов детерминации (R^2) между ВИ в виде тепловой бинарной карты. Анализ показал, что среди рассчитанных для исследования ВИ большое количество коллинеарных индексов ($R^2 > 0.5$).

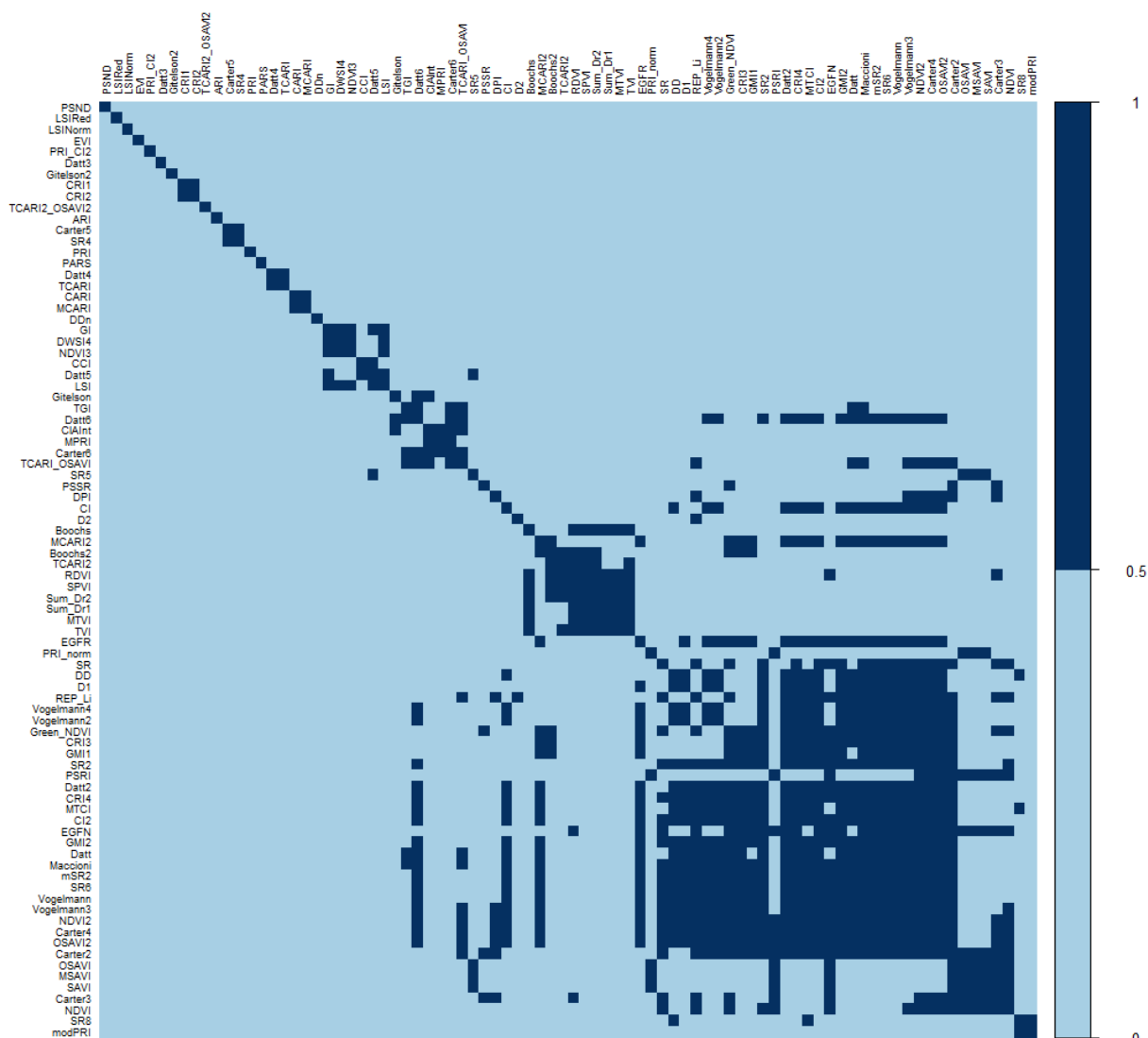


Рисунок 4 – Матрица парных коэффициентов детерминации для ВИ, рассчитанных по результатам гиперспектральной съемки.

Для преодоления мультиколлинеарности в группах тесно коррелирующих индексов произвольно оставляли один ВИ, а все остальные исключали. В результате такой операции была сформирована следующая совокупность из 33 ВИ: ARI, Boochs, CCI, CI, CRI1, D1, D2, Datt3, Datt4, DDn, DPI, DWSI4, EVI, Gitelson, Gitelson2, LSINorm, LSIRed, MCARI, MCARI2, modPRI, MPRI, NDVI, PARS, PRI, PRI_CI2, PRI_norm, PSND, PSSR, SR4, SR5, TCARI2, TCARI2_OSAVI2 и TGI. Большинство отобранных индексов являются чувствительными к содержанию хлорофилла в листьях, часть индексов чувствительными к содержанию каротиноидов (CCI, CRI1, MPRI, PARS, PRI, PRI_CI2, PRI_norm, PSND), один индекс ARI – к содержанию антоцианов. Такой качественный состав ВИ можно считать достаточным для идентификации видов кленов на этапах весеннего развития и осеннего

Дмитриев П. А., Дмитриева А. А., Федоринова О. И., Козловский Б. Л., Определение оптимальных периодов в фенологическом развитии видов клена для их идентификации по спектральным характеристикам листьев // «Живые и биокосные системы». – 2024. – № 49; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-49/article-11>; DOI: 10.18522/2308-9709-2024-49-11

старения листьев с помощью алгоритма RF. Результаты проверки, отобранной группы ВИ, на наличие мультиколлинеарности представлены на рисунке 5.

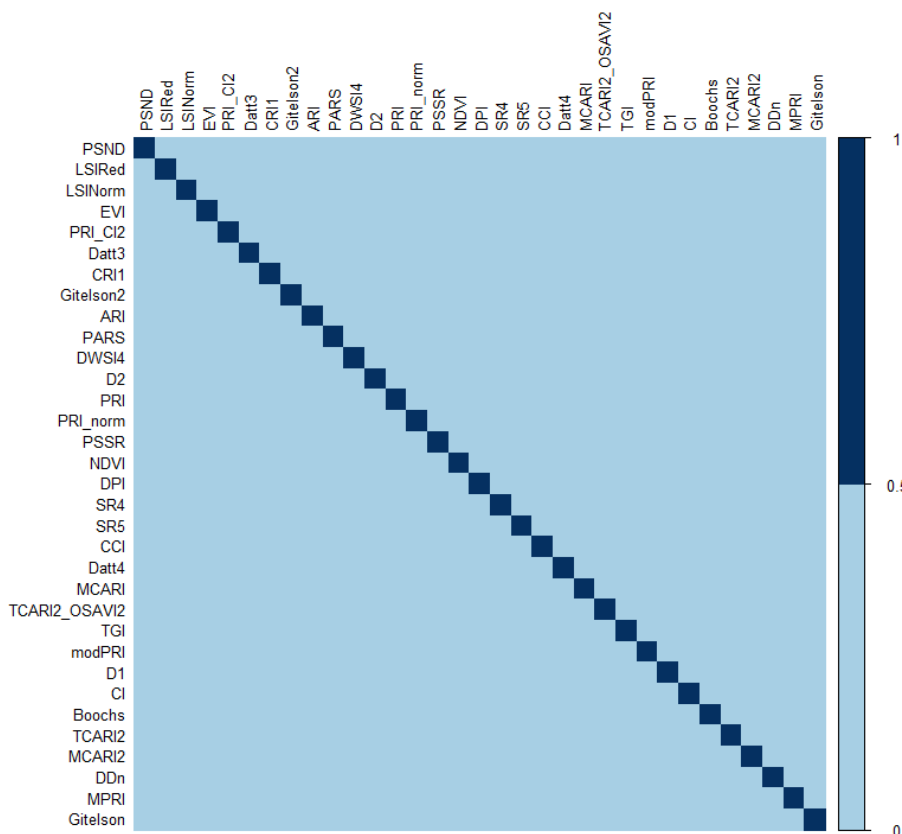


Рисунок 5 – Матрица парных коэффициентов детерминации для ВИ, рассчитанных по результатам гиперспектральной съемки, отобранных для RF классификации.

На представленной матрице видно, что не один из ВИ не коррелирует с другими по величине с силой связи, соответствующей $R^2 > 0.5$.

2.4.2. Результаты идентификации видов клена по временным рядам спектральных характеристик их листьев с помощью алгоритма RF

Для RF использовалась группа из 33 ВИ, отобранных по порогу значения корреляционной связи (раздел 2.4.1). Результаты идентификации видов клена по временным рядам спектральных характеристик, отражающих фенологическое развитие их листьев, с помощью алгоритма RF представлены на рисунке 6. Анализ проводился по временным срезам. Следует отметить, что в первые две календарные даты производилась гиперспектральная съемка только четырех видов – листья у *A. ibericum* в эти сроки еще полностью не развернулись. В последнюю дату проводилась гиперспектральная съемка

также только четырех видов – листья *A. negundo* на этот момент уже полностью опали.

По каждому временному срезу проведено обучение модели RF и ее тестирование путем расчета OOB error (Out-of-bag error – ошибка вне выборки). Динамика значений OOB error имеет сезонный характер – в период весеннего развития листьев значение ошибки низкое, в начале лета происходит ее флюктуация от низких (5.2%) до средних (11.6%) значений, затем следуют резкий скачок вверх в начале второй декады июля и резкое падением вниз после первой декады октября, когда старение листьев внешне проявилось в изменении их окраски (Рис. 6).

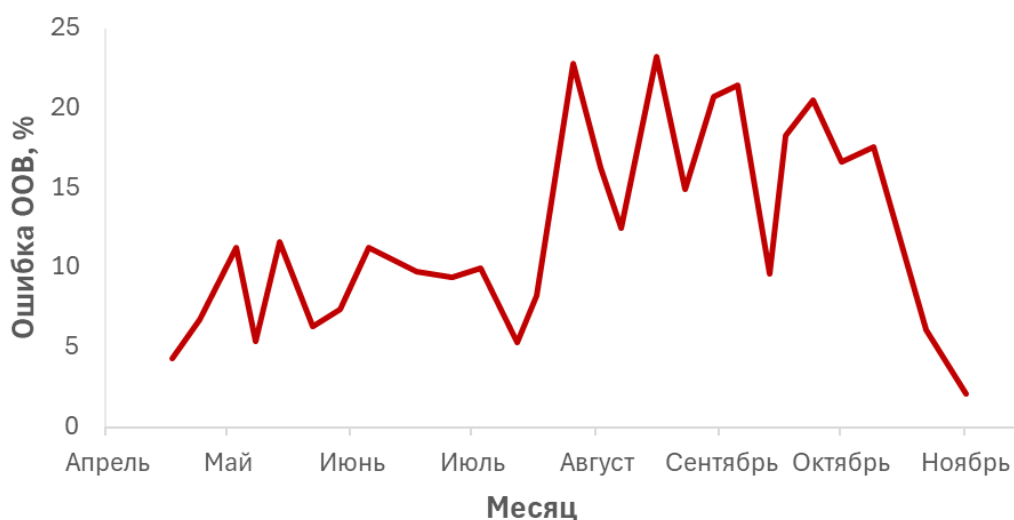


Рисунок 6 – Динамика ошибки OOB RF модели классификации пяти видов клена по временным рядам спектральных характеристик их листьев.

Таким образом, наиболее подходящими сроками для идентификации *A. platanoidesa*; *A. campestre*; *A. negundo*, *A. saccharinum* и *A. ibericum* с помощью алгоритма RF являются начальные и завершающие этапы фенологического цикла листьев.

Ошибки RF классификации конкретных видов клена по временным рядам ВИ представлена в таблице 2. На протяжении всего фенологического цикла кленов с достаточной точностью можно отличить друг от друга только два вида – *A. ibericum* и *A. negundo*. Характерно, что эти виды значительно различаются по фенологии (таблица 1) и экологии (*A. ibericum* – ксеромезофит, *A. negundo* – гигромезофит). Остальные три вида классифицируются с ошибкой в среднем более 10%, приемлемые значения ошибки (менее 5%) получены для них только в начале и конце фенологического цикла.

Таблица 2 – Подробные результаты RF классификации *A. platanoidesa* (1); *A. campestre*(2); *A. negundo* (3), *A. saccharinum* (4) и *A. ibericum* (5). Количество верно (отмечено цветом) и неверно классифицированных пикселей, относящихся к видам клена

Календарная дата	1					2					3					4					5					ООВ ошибка классификации видов					
	Результат классификации видов по пикселям																														
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
17.04.2024	4491	0	0	9	N/A	0	4307	158	35	N/A	2	1104	235	153	N/A	16	115	174	419	5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.000	0.040	0.060	0.07	N/A
24.04.2024	4248	162	27	63	N/A	1964	183	6	115	N/A	27	9	4363	101	N/A	15722	2114	4007	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.060	0.070	0.030	0.11	N/A	
03.05.2024	4199	85	17	138	61	93	3652	114	362	279	27	27	4325	121	0	149	70	261	3681	339	72	92	0	216	41200	0.070	0.190	0.040	0.180	0.08	
08.05.2024	4361	19	0	110	10	18	3949	154	295	84	2	111	4339	48	0	131	121	40	4202	6	12	57	0	4	44270	0.030	0.120	0.040	0.070	0.02	
14.05.2024	3957	40	182	280	41	1363	569	176	86	533	120	4	4249	68	59	130	23	123	4148	76	58	318	112	58	39540	0.120	0.210	0.060	0.080	0.12	
22.05.2024	4258	32	94	91	25	23	4086	257	17	117	134	223	4111	22	10	136	9	18	4311	26	22	119	13	24	43220	0.050	0.090	0.090	0.040	0.04	
29.05.2024	4355	0	0	18	127	2	4034	110	303	51	1	67	4363	69	0	6	524	198	3745	27	89	35	0	28	43480	0.030	0.100	0.030	0.170	0.03	
05.06.2024	3895	105	412	68	20	1573	924	17	145	257	212	36	4049	203	0	129	95	226	4024	26	7	246	0	143	41040	0.130	0.130	0.100	0.110	0.09	
17.06.2024	3941	42	3	392	122	7	4279	44	147	23	1	9	4460	30	0	465	196	67	3568	204	40	57	0	295	41080	0.120	0.050	0.010	0.210	0.09	
26.06.2024	4086	48	140	175	51	37	4096	105	190	72	154	21	4270	55	0	259	187	82	3671	301	12	98	1	155	42340	0.090	0.090	0.050	0.180	0.06	
03.07.2024	4157	13	57	251	22	37	3889	60	263	251	31	21	4432	16	0	415	298	65	3535	187	6	94	0	132	42680	0.080	0.140	0.020	0.210	0.05	
12.07.2024	4339	2	0	73	86	1	4187	37	268	7	0	35	4459	6	0	76	266	59	3951	148	53	4	0	73	43700	0.040	0.070	0.010	0.120	0.03	
17.07.2024	4256	104	18	1	121	1703	783	146	202	199	62	79	4207	152	0	3	260	164	4061	12	51	116	0	7	43260	0.050	0.160	0.070	0.100	0.04	
26.07.2024	2942	476	362	673	47	3443	585	61	191	319	490	107	3589	285	29	6175	772	34	2981	91	15	241	7	13	42240	0.350	0.200	0.200	0.340	0.06	
02.08.2024	3520	239	254	461	26	2713	799	131	165	134	219	199	3932	138	12	549	270	242	3297	142	9	175	0	19	42970	0.220	0.160	0.130	0.270	0.05	
07.08.2024	3639	140	95	607	19	90	3996	89	132	193	108	90	4198	104	0	684	105	134	3439	138	33	24	1	52	43900	0.190	0.110	0.070	0.240	0.02	
16.08.2024	3332	402	130	549	87	427	2889	143	796	245	74	91	4042	288	5	381	621	430	3045	23	139	236	5	124	39960	0.260	0.360	0.100	0.320	0.11	
23.08.2024	3600	196	259	407	38	242	3745	132	106	275	288	80	4009	122	1	401	282	176	3533	108	43	117	2	64	42740	0.200	0.170	0.110	0.210	0.05	
30.08.2024	3227	441	288	534	10	284	3313	76	548	279	241	31	4066	162	0	351	664	271	3183	31	7	328	0	34	41310	0.280	0.260	0.100	0.290	0.08	
05.09.2024	3534	107	446	389	24	546	3370	136	240	208	465	30	3804	187	14	538	404	309	3038	211	55	209	23	264	39490	0.210	0.250	0.150	0.320	0.12	
13.09.2024	3988	346	121	19	26	448	3614	201	160	77	92	97	4239	72	0	4	181	228	4082	5	21	37	1	1	44400	0.110	0.200	0.060	0.090	0.01	
17.09.2024	3563	275	308	268	86	186	3907	78	198	131	503	107	3663	224	3	351	436	455	3128	130	56	177	0	186	40810	0.210	0.130	0.190	0.300	0.09	
24.09.2024	3905	161	271	84	79	290	3328	139	468	275	510	110	3625	245	10	196	574	519	3052	159	99	210	34	188	39690	0.130	0.260	0.190	0.320	0.12	
01.10.2024	3841	284	154	185	36	541	3270	89	492	108	103	122	3866	400	9	263	467	328	3424	18	30	80	9	42	43390	0.150	0.270	0.140	0.240	0.04	
09.10.2024	3682	108	398	295	17	134	3981	168	206	11	627	187	3435	238	13	730	235	366	3035	134	18	6	4	77	43950	0.180	0.120	0.240	0.330	0.02	
22.10.2024	3728	67	78	321	6	36	4229	103	69	63	28	50	4406	16	0	87	209	21	4069	114	0	51	0	50	43990	0.110	0.060	0.020	0.100	0.02	
01.11.2024	2844	46	N/A	110	0	7	4404	N/A	89	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	10	19	N/A	4434	37	0	0	N/A	10	44900	0.050	0.02	N/A	0.010	0.00	

Была проведена оценка значимости ВИ для RF классификации по вкладу в изменение значений ошибки ООВ и индекса Джини. На рисунке 7 представлены значения среднего уменьшения индекса Джини и ошибки для 33 ВИ, рассчитанные по всем датам их временного ряда (кроме первых двух и одной последней дат, где видов клена было четыре, а не пять).

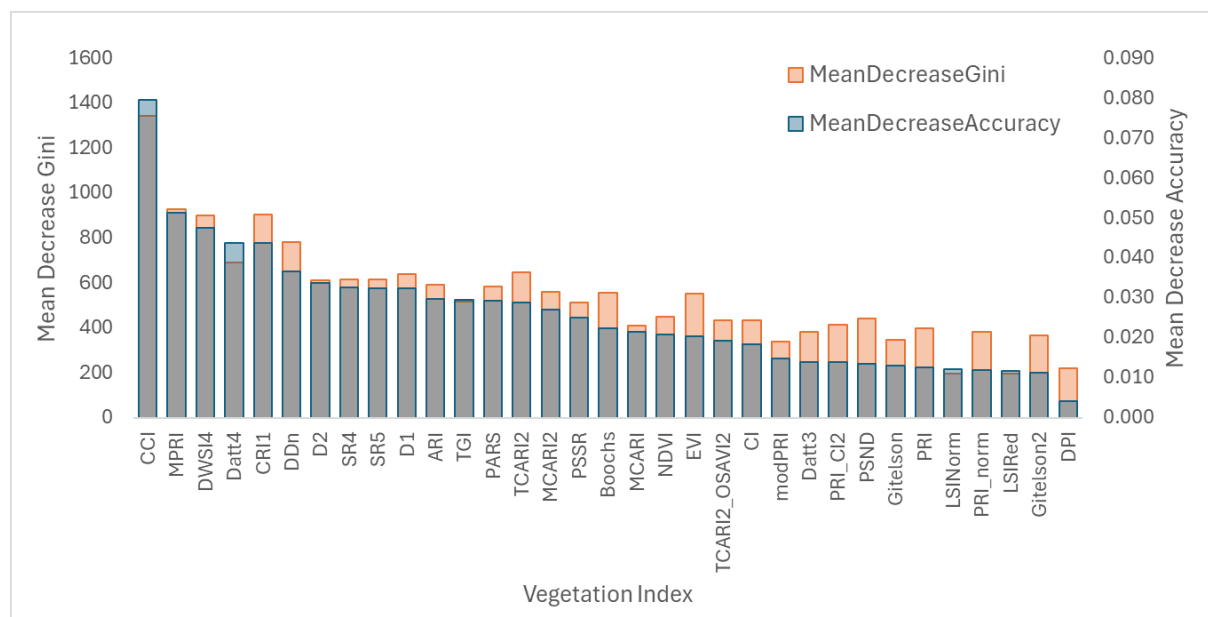


Рисунок 7 – Ранжирование ВИ в зависимости от их вклада в уменьшение ошибки ООБ и значения индекса Джини.

Из 33 ВИ, отобранных по результатам теста на коллинеарность, при проведении RF классификации, наибольший вклад в разделение пяти видов клена внесли CCI, MPRI, DWSI4, Datt4, CRI1, DDn. Это хлорофилл- и каротиноид-чувствительные индексы.

Таким образом, полученный результат показывает, что на определенных этапах фенологического развития виды древесных растений могут быть идентифицированы с высокой точностью. Необходимым условием для этого является наличие достаточно подробного временного ряда спектральных характеристик вида, охватывающий весь период их вегетации. Полученные результаты указывают на то, что точная идентификация видов на основе их спектральных характеристик в режиме реального времени не зависимо от фенологического состояния растений является сложно решаемой задачей.

3. Заключение

В ходе исследования подтвердилась гипотеза о том, что период старения листьев, начиная с видимых проявлений в изменении их окраски, является наиболее подходящим для идентификации *A. platanoidesa*; *A. campestre*; *A. negundo*, *A. saccharinum* и *A. ibericum* с помощью алгоритма RF по спектральным характеристикам листьев. Ошибка ООБ RF модели при классификации пяти видов клена составила 2.1–6.1%. Предпосылкой для этого являются различия в фенологии, а также динамике содержания фотосинтетических пигментов листьев этих видов. Вместе с тем установлено,

что начало весеннего развития листьев, так же является периодом, в котором эти пять видов клена могут быть успешно идентифицированы. Для этого периода ошибка ООВ составила 4.3–6.7%.

Основные результаты исследования:

Эффективность классификации кленов по спектральным характеристикам листьев зависит от их фенологического состояния. Наличие различий в фенологии видов является важной предпосылкой для их успешной идентификации.

Наибольшая точность идентификации видов достигается в периоды весеннего развития и осеннего старения листьев.

Определена группа неколлинеарных ВИ для классификации видов клена методом машинного обучения. Это ARI, Boochs, CCI, CI, CRI1, D1, D2, Datt3, Datt4, DDn, DPI, DWSI4, EVI, Gitelson, Gitelson2, LSINorm, LSIRed, MCARI, MCARI2, modPRI, MPRI, NDVI, PARS, PRI, PRI_CI2, PRI_norm, PSND, PSSR, SR4, SR5, TCARI2, TCARI2_OSAVI2 и TGI.

Наиболее информативными для RF классификации кленов по вкладу в изменение значения ООВ error и индекса Джини являются CCI, MPRI, DWSI4, Datt4, CRI1, DDn.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-24-00405, <https://rscf.ru/project/24-24-00405/>, в Южном федеральном университете.

Литература

Александрова, М.С., Булыгин, Н.Е., Ворошилов, В.Н. и др., 1975. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР.

Игнатова, М.А., Козловский Б.Л., Вардуни, Т.В., Дмитриева, А.А., Дмитриев, П.А., 2024. Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки. АгроЭкоИнфо. 2(62). <https://doi.org/10.51419/202142206>

Козловский, Б.Л., Куропятников, М.В., Федоринова, О.И., 2020. Фенология древесных интродуцентов Ботанического сада ЮФУ. МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ; ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Южный федеральный университет. 228, ISBN 978-5-9275-3553-8.

Куропятников, М.В., Федоринова, О.И., Козловский, Б.Л., 2017. Итоги интродукционного испытания видов рода клен (*Acer L.*) в Ботаническом саду Южного федерального университета. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет. 172, ISBN 978-5-9275-2456-3.

Дмитриев П. А., Дмитриева А. А., Федоринова О. И., Козловский Б. Л., Определение оптимальных периодов в фенологическом развитии видов клена для их идентификации по спектральным характеристикам листьев // «Живые и биокосные системы». – 2024. – № 49; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-49/article-11>; DOI: 10.18522/2308-9709-2024-49-11

Berra, E.F., Gaulton, R., 2021. Remote sensing of temperate and boreal forest phenology: A review of progress, challenges and opportunities in the intercomparison of in-situ and satellite phenological metrics. *Forest Ecology and Management*. 480, 118663, ISSN 0378-1127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118663>

Blickensdörfer, L., Oehmichen, K., Pflugmacher, D. et al., 2024. National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data. *Remote Sensing of Environment*. 304, 114069. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114069>

Dmitriev, P.A., Kozlovsky, B.L., Dmitrieva, A.A. et al., 2024. Light Stress Detection in *Ficus elastica* with Hyperspectral Indices. *AgriEngineering*. 6, 3297-3311. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030188>

Dmitriev, P.A., Kozlovsky, B.L., Dmitrieva, A.A. et al., Maple species identification based on leaf hyperspectral imaging data, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Volume 30, 2023, 100964, ISSN 2352-9385, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100964>

Dronova, I. and Taddeo, S., 2022. Remote sensing of phenology: Towards the comprehensive indicators of plant community dynamics from species to regional scales. *Journal of Ecology*, 110, 1460–1484. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13897>

Fang, F., McNeil, B.E., Warner, T.A. et al., 2020. Discriminating tree species at different taxonomic levels using multitemporal WorldView-3 imagery in Washington D.C., USA. *Remote Sensing of Environment*. 246, 111811.

Féret, J.B., François, C., Gitelson, A. et al., 2011. Optimizing spectral indices and chemometric analysis of leaf chemical properties using radiative transfer modeling. *Remote Sensing of Environment*. 115(10), 2742-2750. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.016>

Ferreira, M.P., de Almeida, D.R.A., de Almeida Papa, D. et al., 2020. Individual tree detection and species classification of amazonian palms using uav images and deep learning. *For. Ecol. Manag.* 475, 118397. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118397>

Grabska, E., Frantz, D., Ostapowicz, K., 2020. Evaluation of machine learning algorithms for forest stand species mapping using sentinel-2 imagery and environmental data in the polish carpathians. *Remote Sens. Environ.* 251, 112103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112103>

Grabska, E., Hostert, P., Pflugmacher, D. et al., 2019. Forest stand species mapping using the sentinel-2 time series. *Remote Sens.* 11, 1197. <https://doi.org/10.3390/rs11101197>

Grigorieva, O., Brovkina, O., Saidov, A., 2020. An original method for tree species classification using multitemporal multispectral and hyperspectral satellite data. *Silva Fennica*. 54(2), 10143. <https://doi.org/10.14214/sf.10143>

Дмитриев П. А., Дмитриева А. А., Федоринова О. И., Козловский Б. Л., Определение оптимальных периодов в фенологическом развитии видов клена для их идентификации по спектральным характеристикам листьев // «Живые и биокосные системы». – 2024. – № 49; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-49/article-11>; DOI: 10.18522/2308-9709-2024-49-11

Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P. et al., 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.* 32, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>

Hycza, T., Stereńczak, K., Bałazy, R., 2018. Potential use of hyperspectral data to classify forest tree species. *N.Z. j. of For. Sci.* 48, 18. <https://doi.org/10.1186/s40490-018-0123-9>

Ji, S.B., Yokoi, M., Saito, N. et al., 1992. Distribution of anthocyanins in aceraceae leaves. *Biochemical Systematics and Ecology.* 20(8), 771-781. [https://doi.org/10.1016/0305-1978\(92\)90036-D](https://doi.org/10.1016/0305-1978(92)90036-D)

Lehnert, L.W.; Meyer, H.; Obermeier, W.A.; Silva, B.; Regeling, B.; Thies, B.; Bendix, J. Hyperspectral data analysis in R: The hsdar package. *J. Stat. Softw.* 2019, 89, 1–23

Lichtenthaler, K., Welburn, A.R., 1983. Determination of Total Carotenoids and Chlorophylls A and B of Leaf Extracts in Different Solvents. *Biochemical Society Transactions.* 11, 591-592. <http://dx.doi.org/10.1042/bst0110591>

Mattila, H., Tyystjärvi, E., 2023. Red pigments in autumn leaves of Norway maple do not offer significant photoprotection but coincide with stress symptoms. *Tree Physiology.* 43(5), 751–768. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad010>

Morais, M.C., Cabral, J.A., Gonçalves, B., 2022. Seasonal Variation in Selected Biochemical Traits in the Leaves of Co-Occurring Invasive and Native Plant Species under Mediterranean Conditions. *Plants (Basel).* 11(9), 1171. <https://doi.org/10.3390/plants11091171>.

Panchen, Z.A., Primack, R.B., Gallinat, A.S. et al., 2015. Substantial variation in leaf senescence times among 1360 temperate woody plant species: implications for phenology and ecosystem processes. *Ann Bot.* 116(6), 865-73. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv015>

Pu, R., Landry, S., 2020. Mapping Urban Tree Species by Integrating Multi-Seasonal High Resolution Pléiades Satellite Imagery with Airborne LiDAR Data. *Urban For. Urban Green.* 53, 126675.

R Core Team, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/> (date of circulation: July 13, 2024)

Sheeren, D., Fauvel, M., Josipović, V., et al., 2016. Tree Species Classification in Temperate Forests Using Formosat-2 Satellite Image Time Series. *Remote Sens.* 8, 2716.

Vidican, R., Malinas, A., Ranta, O. et al., 2023. Using Remote Sensing Vegetation Indices for the Discrimination and Monitoring of Agricultural Crops: A Critical Review. *Agronomy.* 13, 3040. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123040>

Wang, M., Zheng, Yi., Huang, C. et al., 2022. Assessing Landsat-8 and Sentinel-2 spectral-temporal features for mapping tree species of northern plantation

forests in Heilongjiang Province, China. *Forest Ecosystems*. 9, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100032>

Xi, Y., Ren, C., Tian, Q. et al., 2021. Exploitation of time series sentinel-2 data and different machine learning algorithms for detailed tree species classification. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sens.* 14, 7589–7603. <https://doi.org/10.1109/jstars.2021.3098817>

Xie, Y., Civco, D.L., Silander Jr., J.A., 2018. Species-specific spring and autumn leaf phenology captured by time-lapse digital cameras. *Ecosphere*. 9(1):e02089. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2089>

Xue, J., Su, B., 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*. 1353691, 17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

Yel, S.G., Tunc Gormus, E., 2023. Exploiting hyperspectral and multispectral images in the detection of tree species: A review. *Front. Remote Sens.* 4:1136289. <https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1136289>

Yoo, S.D., Greer, D.H., Laing, W.A. et al., 2003. Changes in photosynthetic efficiency and carotenoid composition in leaves of white clover at different developmental stages. *Plant Physiology and Biochemistry*. 41(10), 887-893. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(03\)00138-4](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(03)00138-4)

Zeng, L., Wardlow, B.D., Xiang, D. et al., 2020. A Review of Vegetation Phenological Metrics Extraction Using Time-Series, Multispectral Satellite Data. *Papers in Natural Resources*. 1662. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111511>

Zhong, L., Dai, Z., Fang, P. et al., 2024. A Review: Tree Species Classification Based on Remote Sensing Data and Classic Deep Learning-Based Methods. *Forests*. 15, 852. <https://doi.org/10.3390/f15050852>

Статья поступила в редакцию 23 августа 2024 г.

Поступила после доработки 20 сентября 2024 г.

Принята к печати 27 сентября 2024 г.

Received 23, August, 2024

Revised 20, September, 2024

Accepted 27, September, 2024