

Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.  
Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью  
вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**  
=====

УДК 57.087:582.772.2

**Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях  
кленов с помощью вегетационных индексов, рассчитанных по данным  
гиперспектральной съемки**

*Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.*

*Южный федеральный университет*

**Аннотация**

*В статье приведены результаты исследований по изучению сезонных изменений содержания фотосинтетических пигментов в листьях кленов. В итоге были получены временные ряды концентраций пигментов и значений 80 вегетационных индексов (ВИ) за три вегетационных сезона (2021-23 гг.). Установлено, что временные ряды большой группы ВИ (CARI, Carter4, Datt3, DD, Maccioni, MTCI, mSR2, NDVI2, OSAVI2, REP\_Li, SR6, TCARI\_OSAVI, Vogelmann2, Vogelmann и др. - всего более 25 ВИ) имеют хорошо выраженную сезонную динамику, когерентную с сезонной динамикой концентраций хлорофиллов. По результатам тестирования лучшими для аппроксимации значений суммы хлорофиллов являются модели с TCARI/OSAVI в качестве независимой переменной. Индекс NDVI оказался неэффективным в качестве прокси-метрики концентрации хлорофиллов. Сезонная динамика содержания хлорофиллов и значений ВИ является видоспецифичной.*

**Ключевые слова:** ACER, ХЛОРОФИЛЛ, КАРОТИНОИДЫ, ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ, СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА

---

**Введение**

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений является важными биохимическими индикаторами фотосинтеза и фотозащиты растений, может служить для диагностики стресса растений [1] под действием абиотических и биотических факторов.

Основными способами определения содержания фотосинтетических пигментов являются спектрофотометрический и хроматографический (в т.ч. высокоэффективная

жидкостная хроматография) методы [2–3].

Эти разрушающие объект методы являются весьма точными, но в то же время высоко трудозатратными и мало оперативными [4].

К неразрушающим опосредованным методам определения содержания фотосинтетических пигментов относится визуализирующая спектроскопия. Большим преимуществом ее является возможность применения в дистанционном зондировании [5].

Спектральные измерения в чувствительном к фотосинтетическим пигментам диапазоне спектра электромагнитного излучения стали возможными, благодаря использованию мультиспектральных и гиперспектральных камер, способных сканировать интересующие диапазоны волн в высоком разрешении. Было показано, что длины волн примыкающие к полосам 700 нм и 550 нм наиболее чувствительны к содержанию хлорофиллов. Поэтому большинство чувствительных к хлорофиллу вегетационных индексов представляют собой математические функции отражения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, которые может эффективно выявить фотосинтезирующую способность полога растительности [6].

Путем различных комбинаций диапазонов электромагнитных волн были рассчитаны ВИ для крупномасштабного определения содержания фотосинтетических пигментов, индекса листовой поверхности, биомассы, содержания азота и других характеристик растений. В настоящее время насчитывается более 100 ВИ [7].

Вегетационные индексы, использующиеся при дистанционной спектроскопии растительности, реагируют в основном на такие характеристики, как индекс листовой поверхности (leaf-area index - LAI) и содержание хлорофилла в листьях [6].

Поэтому ведется поиск и расчет ВИ чувствительных к изменению содержания хлорофиллов, но при этом не чувствительных к изменению значения LAI.

Обзор только части работ, посвященных этой тематике [6, 8, 9] позволил выявить более 60 ВИ, которые используются для дистанционной спектроскопии хлорофиллов. Это: ARVI, CARI, CI, CI(705), CIGreen, Cirededge, CVI, D1, D2, D3, Datt1, Datt2, DD, DVI, EVI (узкополосный), EVI (широкополосный), EVI2, GCI, GDVI, GNDVI, GOSAVI, GRVI, LCI, MASVI, MCARI, MCARI/OSAVI, mDatt, mNDVI, MSAVI, mSR, mSR2, MTCI, MTCIxNDVI, MTCIxRDVI, MTVI1, MTVI2, ND, NDI, NDRE, NDRE2, NDVI (узкополосный), NDVI (широкополосный), NGRDI, OSAVI (705, 750), OSAVI, PSND,

RDVI, RECAI, REP, RGI, RII, RSI, RVI, SAVI, SIPI, SR, SRI, TCARI(705, 750), TCARI, TCARI/OSAVI, TCARI/OSAVI\_RE, TCARI2, TCI, TGI, TVI, Vogelmann2. Признанной классификацией ВИ является деление их на две группы: угловые (slope-based vegetation indices) и дистантные (distance-based vegetation indices) [10].

Угловые индексы это – NDVI, SAVI, TVI, RVI, EVI и др. Дистантные это – DVI, TSAVI, MSAVI и др.

Представленные ВИ также можно условно разделить на следующие группы [9]:

- 1) индексы соотношений (SR, PSSR и др.);
- 2) нормированные индексы (NDVI, EVI, mDatt, PSND и др.);
- 3) интегрированные индексы (MCARI/OSAVI, TCARI/OSAVI, MTCIxRDVI и др.);
- 4) индексы с использованием производных отражательной способности (D1, D2, D3, RII и др.).

Отмечают [6], что интегрированные ВИ являются весьма перспективными для дистанционного определения хлорофиллов. Кроме того, в зависимости от ширины спектральной полос, используемых для расчета ВИ, их делят на узкополосные и широкополосные. Некоторые авторы отмечают отсутствие различий в использовании этих двух групп ВИ для оценки содержания хлорофиллов [11]. Однако большинство исследователей предпочитают работать с узкополосными ВИ [12, 13].

Наиболее широко используемым для оценки хлорофиллов является нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), разработанный еще в 1973 года. Однако, широкополосный NDVI имеет существенный недостаток – тенденцию терять чувствительность к фотосинтетически активной радиации, когда она выше 0,7 [14]. NDVI приближается к насыщению в случаях плотного и многоярусного растительного полога и показывает нелинейную связь с биофизическими параметрами, такими как биомасса, LAI и содержание хлорофилла [15]. Вместе с этим, большим преимуществом этого ВИ являются доступные и самые продолжительные (с 1981 года) глобальные непрерывные временные ряды его значений [16]. При определенных условиях широкополосный NDVI может дать хорошую оценку содержания хлорофиллов.

Узкополосный NDVI, построенный с использованием спектральных каналов 532 и 405 нм, тесно коррелирует как с содержанием хлорофиллов, так и с содержанием каротиноидов, тогда как узкополосный NDVI, построенный с использованием

Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.  
Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью  
вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки

.....  
*Электронный научно-производственный журнал*  
**«АгроЭкоИнфо»**  
=====

спектральных каналов 548 и 498 нм, коррелирует преимущественно с содержанием каротиноидов [17].

Каротиноиды (Кар.) объединяют каротины и ксантофиллы и являются второй основной группой фотосинтетических пигментов растений. Поэтому неразрушающая, оперативная и глобальная оценка содержания каротиноидов необходима для оценки фотозащиты и светоадаптации, а также ранней диагностики стрессов разной природы у растительности. Диапазоны спектрального поглощения каротиноидов и хлорофилла перекрываются в диапазоне RGB, при этом концентрация каротиноидов в листьях обычно ниже, чем концентрация хлорофиллов. По этой причине разработка ВИ для определения каротиноидов сложная задача [17].

Для спектроскопического определения концентрации каротиноидов разработан ряд ВИ: индекс отношения  $RARSc$  ( $R760/R500$ ) [18]; индекс соотношения полос отражательной способности  $R BRI$  или  $Datt 4$  [19]; индексы для оценки концентрации каротиноидов в масштабе листа,  $PSSRc$  и  $PSNDc$  с диапазонами волн 470 нм и 800 нм [20];  $CRI550$  ( $CRI1$ ) и  $CRI700$  ( $CRI2$ ) с обратным коэффициентом отражения при 550 и 700 нм [21]; трехполосные индексы каротиноидов  $CARrededge$  и  $CARgreen$  510–520 нм, 690–710 (560–570) нм и  $NIR$  [22]; угловой индекса вегетации  $AVI$  [23]; индекс отношения  $SRcar$  ( $R515/R570$ ) [24]; индекс для оценки содержания каротиноидов на уровне листьев, нивелирующий влияние хлорофиллов –  $RVIDNDVI$  [17]; индекс фотохимического отражения  $PRI$  и индекс отношения хлорофилл/каротиноиды  $CCI$  [25].

Спектрометрическая визуализация содержания фотосинтетических пигментов производится как с помощью мультиспектральных камер [26], данные которых позволяют рассчитать широкополосные индексы, так и посредством гиперспектральных камер, данные которых позволяют рассчитать узкополосные индексы [27].

Одной из важных проблем спектроскопии содержания фотосинтетических пигментов опосредованно через ВИ следует считать отсутствие универсальных индексов. Вегетационные индексы, чувствительные к фотосинтетическим пигментам, разрабатывались для разных видов растений, на листьях или кронах, в лабораторных и полевых условиях, для различных диапазонов концентраций пигментов. Поэтому их эффективность зависит от объекта и условий. Одним из путей решения этой проблемы является тестирование уже разработанных ВИ на как можно большем числе видов

растений. Это позволит уточнить и расширить видовой диапазон использования этих ВИ.

Мы располагаем частыми (с временным шагом 7–10 дней) временными рядами значений 80 узкополосных ВИ за вегетационные периоды 2021, 2022 и 2023 гг. для трех видов кленов, полученных в лабораторных условиях с помощью гиперспектральной камеры. Кроме того, получены временные ряды концентраций фотосинтетических пигментов за вегетационные периоды 2021–23 гг. Это позволяет оценить связь значений ВИ с содержанием хлорофиллов и каротиноидов по данным 2021 г. и протестировать полученные результаты по данным последующих двух лет.

**Целью исследования** было: оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов кленов с помощью временных рядов ВИ, определение ее видовой и сезонной специфики.

**Задачи исследования:**

- определить чувствительные к концентрациям хлорофиллов и каротиноидов ВИ;
- построить однофакторные регрессионные модели содержания пигментов от значения ВИ, оценить их точность;
- охарактеризовать видовую специфичность временных рядов ВИ.

**1. Объекты, условия и методы**

1.1. Пункт исследования

Исследования проводились в Ботаническом саду Южного федерального университета (ЮФУ) в 2021–2023 гг.

1.2. Климат пункта исследования

Климат Ростова-на-Дону умеренно континентальный, засушливый (гидротермический коэффициент Селянинова составляет 0,7). Зима умеренно мягкая, лето жаркое. Январь является самым холодным месяцем, средняя температура  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (абсолютный минимум  $-31,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Июль самый жаркий месяц, средняя температура  $+23,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (абсолютный максимум  $+42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Годовая сумма осадков колеблется от 288 до 932 мм. За безморозный период в среднем выпадает 323 мм осадков. Фенологическая весна в Ростове-на-Дону наступает 5 марта, ее продолжительность 55 дней. Фенологическое лето наступает 4 мая и продолжается до 26 сентября. Фенологическая осень 14 декабря.

Средняя продолжительность вегетационного периода в пункте исследования – 216 дней (с 1 апреля по 4 ноября).

### 1.3. Объекты исследования

Объектами исследования были выбраны три вида рода *Acer* L. – *A. campestre* L., *A. negundo* L., *A. saccharinum* L.

*A. campestre* – аборигенный вид, дерево лесостепного типа, произрастает в пойменных и байрачных лесах [28]. Используется в озеленении населенных пунктов Ростовской области.

*A. negundo* – вид североамериканской флоры, дерево лесостепного типа, является инвазионным видом для региона. Инвазия этого вида отмечена для Европы (кроме крайнего севера), Северной и Южной Африки, Малой Азии, Центральной и Средней Азии, Дальнего Востока, Китая, Кореи, Японии, юго-востока Австралии, Новой Зеландии, юго-востока Южной Америки. ([https://www.gbif.org/occurrence/map?taxon\\_key=3189866](https://www.gbif.org/occurrence/map?taxon_key=3189866)). В озеленении населенных пунктов Ростовской области в настоящее время не используется. Натурализуется во влажных местообитаниях, распространяется по поймам [29].

*A. saccharinum* – вид североамериканской флоры, дерево лесного типа, широко используется для озеленения населенных пунктов региона. В регионе не натурализуется.

Для исследования были отобрано 7 экземпляров каждого вида кленов, произрастающие в коллекции покрытосеменных растений Ботанического сада ЮФУ. Экземпляры всех видов находятся в одной стадии онтогенеза (молодые генеративные особи), произрастают на одном участке и в одинаковых условиях.

### 1.4. Методика определения фотосинтетических пигментов

Отбор проб для определения концентрации фотосинтетических пигментов в листьях кленов проводился между фенологическими фазами «полное разворачивание листьев» и «массовое осеннее окрашивание листьев». В 2021 году отбор проб осуществлялся с интервалом 7–10 дней (частые временные ряды концентраций фотосинтетических пигментов в дальнейшем были использованы для определения хлорофилл чувствительных ВИ). В 2022 и 2023 гг. пробы отбирались раз в месяц (данные были использованы для верификации сезонных временных рядов ВИ за 2022–23 гг.). В конкретную календарную дату с каждого экземпляра клена отбиралась проба листьев в

трехкратной повторности (в каждой повторности 7–9 листьев). Для каждой пробы листья отбирались из основания побегов, что позволило во все сроки иметь для анализа листья одного возраста.

Пигменты экстрагировали в 100% ацетоне [30]. Экстинкцию экстракта определяли на спектрофотометре Beckman Coulter Du 730 Life Science. Концентрацию Chl a, Chl b и Car. выражали на единицу площади [31] в мг/дм<sup>2</sup>.

#### 1.5. Методика гиперспектральной съемки листьев кленов

Отбор проб листьев осуществлялся так же, как и для определения концентрации фотосинтетических пигментов. В 2021 для гиперспектральной съемки использовались листья из тех же проб, что и для определения содержания пигментов. В 2022–23 гг. пробы для съемки отбирались отдельно с интервалом в 7–10 дней в течение периода вегетации. От момента отбора проб и до доставки их в лабораторию проходило не более одного часа.

Съемка листьев кленов проводилась в лабораторных условиях с помощью гиперспектральной камеры Cubert UHD-185 при искусственном освещении. Камера Cubert UHD-185 имеет спектральный диапазон от 450 до 950 нм, ее спектральное разрешение 4 нм. Объект съемки располагался от объектива камеры на расстоянии 40 см. При такой компоновки размер пикселя составлял 0.25 см<sup>2</sup>. Калибровка камеры осуществлялась по белому эталону.

На всем снимке спектральные профили были сглажены с помощью фильтра Савицкого–Голея (окно скользящего среднего в фильтре было установлено на 15 пунктов).

Выделение зоны интереса на гиперспектральном снимке проводилось путем одноэтапной сегментации с помощью постановки барьера по индексу Carter5 [32] со значением более 1,4 [33].

Выбор пикселей с зоны интереса проводили автоматически методом повторного случайного отбора. В результате были получены значения 125 спектральных каналов.

#### 1.6. Расчет ВИ

Расчет ВИ осуществлялся в пакете hsdar для среды R (R Core Team). Пакет hsdar позволяет рассчитать 80 ВИ по значениям спектральных каналов, полученных с помощью Cubert UHD-185. Аббревиатура и формулы расчета этих ВИ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Вегетационные индексы, использованные для оценки содержания фотосинтетических пигментов в листьях кленов

	ВИ	Формула
1	Boochs	$D_{703}$
2	Boochs2	$D_{720}$
3	CARI	$R_{700} \times \text{abs}(a \times 670 + R_{670} + b) / R_{670} \times (a2 + 1) \times 0.5$ $a = (R_{700} \times R_{550}) / 150, b = R_{550} - (a \times 550)$
4	Carter2	$R_{695} / R_{760}$
5	Carter3	$R_{605} / R_{760}$
6	Carter4	$R_{710} / R_{760}$
7	Carter5	$R_{695} / R_{670}$
8	Carter6	$R_{550}$
9	CI	$R_{675} \times R_{690} / R_{683}^2$
10	CI2	$R_{760} / R_{700} - 1$
11	CIInt	$\int_{600\text{nm}}^{735\text{nm}} R$
12	CRI1	$1 / R_{515} - 1 / R_{550}$
13	CRI2	$1 / R_{515} - 1 / R_{770}$
14	CRI3	$1 / R_{515} - 1 / R_{550} \times R_{770}$
15	CRI4	$1 / R_{515} - 1 / R_{700} \times R_{770}$
16	D1	$D_{730} / D_{706}$
17	D2	$D_{705} / D_{722}$
18	Datt	$(R_{850} - R_{710}) / (R_{850} - R_{680})$
19	Datt2	$R_{850} / R_{710}$
20	Datt3	$D_{754} / D_{704}$
21	Datt4	$R_{672} / (R_{550} \times R_{708})$
22	Datt5	$R_{672} / R_{550}$
23	Datt6	$R_{860} / R_{550} \times R_{708}$
24	DD	$(R_{749} - R_{720}) - (R_{701} - R_{672})$
25	DDn	$2 \times (R_{710} - R_{660} - R_{760})$
26	DPI	$D_{688} \times D_{710} / D_{697}^2$
27	DWSI4	$R_{550} / R_{680}$
28	EGFN	$(\max(D_{650:750}) + \max(D_{500:550})) / (\max(D_{650:750}) + \max(D_{500:550}))$
29	EGFR	$\max(D_{650:750}) / \max(D_{500:550})$
30	EVI	$2.5 \times ((R_{800} - R_{670}) / (R_{800} - 6 \times R_{670} - 7.5 \times R_{475} + 1))$
31	GI	$R_{554} / R_{677}$
32	Gitelson	$1 / R_{700}$
33	Gitelson2	$(R_{750} - R_{800} / R_{695} - R_{740}) - 1$
34	GMI1	$R_{750} / R_{550}$
35	GMI2	$R_{750} / R_{700}$
36	Green NDVI	$(R_{800} - R_{550}) / (R_{800} + R_{550})$
37	Maccioni	$(R_{780} - R_{710}) / (R_{780} - R_{680})$
38	MCARI	$((R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})) \times (R_{700} - R_{670})$
39	MCARI2	$((R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})) \times (R_{700} / R_{670})$
40	MPRI	$(R_{515} - R_{530}) / (R_{515} + R_{530})$



Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.  
Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью  
вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки

**Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»**

	ВИ	Формула
41	MSAVI	$0.5 \times (2 \times R_{800} + 1 - ((2 \times R_{800} + 1)^2 - 8 \times (R_{800} - R_{670}))^{0.5})$
42	mSR2	$(R_{750} / R_{705}) - 1 / (R_{750} / R_{705} + 1) \times 0.5$
43	MTCI	$(R_{754} - R_{709}) / (R_{709} - R_{681})$
44	MTVI	$1.2 \times (1.2 \times (R_{800} - R_{550}) - 2.5 \times (R_{670} - R_{550}))$
45	NDVI	$(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$
46	NDVI2	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$
47	NDVI3	$(R_{682} - R_{553}) / (R_{682} + R_{553})$
48	OSAVI	$(1 + 0.16) \times (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$
49	OSAVI2	$(1 + 0.16) \times (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} + 0.16)$
50	RARS	$R_{746} / R_{513}$
51	PRI	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$
52	PRI_norm	$PRI \times (-1) / (RDVI \times R_{700} / R_{670})$
53	PRI*CI2	$PRI \times CI2$
54	PSRI	$(R_{678} - R_{500}) / R_{750}$
55	PSSR	$R_{800} / R_{635}$
56	PSND	$(R_{800} - R_{470}) / (R_{800} + R_{470})$
57	RDVI	$(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670}) \times 0.5$
58	REP_Li	$700 + 40 \times ((R_{re} - R_{700}) / (R_{740} - R_{700}))$ $R_{re} = (R_{670} - R_{780}) / 2$
59	SAVI	$(1 + L) / (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + L)$
60	SPVI	$0.4 \times 3.7 \times (R_{800} - R_{670}) - 1.2 \times ((R_{530} - R_{670})^2) \times 0.5$
61	SR	$R_{800} / R_{680}$
62	SR1	$R_{750} / R_{700}$
63	SR2	$R_{752} / R_{690}$
64	SR3	$R_{750} / R_{550}$
65	SR4	$R_{700} / R_{670}$
66	SR5	$R_{675} / R_{700}$
67	SR6	$R_{750} / R_{710}$
68	SR8	$R_{515} / R_{550}$
69	Sum_Dr1	$\sum_{i=626}^{795} D1_i$
70	Sum_Dr2	$\sum_{i=680}^{780} D1_i$
71	TCARI	$3 \times ((R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550}) \times (R_{700} / R_{670}))$
72	TCARI/OSAVI	TCARI/OSAVI
73	TCARI2	$3 \times ((R_{750} - R_{705}) - 0.2 \times (R_{750} - R_{550}) \times (R_{750} / R_{705}))$
74	TCARI2/OSAVI2	TCARI2/OSAVI2
75	TGI	$-0.5 \times (190 \times (R_{670} - R_{550}) - 120 \times (R_{670} - R_{480}))$
76	TVI	$0.5 \times (120 \times (R_{750} - R_{550}) - 200 \times (R_{670} - R_{550}))$
77	Vogelmann	$R_{740} / R_{720}$
78	Vogelmann2	$(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{726})$
79	Vogelmann3	$D_{715} / D_{705}$
80	Vogelmann4	$(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{720})$

### 1.7. Математическая обработка данных

Для установления силы и направления связи, а также ее статистической значимости между концентрациями пигментов и значениями ВИ использовался непараметрический коэффициент корреляции Спирмана ( $r$ ). Выбор непараметрического коэффициента был обоснован тем, что объем выборки (количество наблюдений) менее 30 и характер распределения признаков не известен. Для оценки силы связи использовалась шкала Чеддока, согласно, которой сила связи очень слабая при  $r$  от 0,1 до 0,3, слабая – от 0,3 до 0,5, средняя – от 0,5 до 0,7, высокая – от 0,7 до 0,9, очень высокая – от 0,9 до 1,0.

Для моделирования связи между концентрациями пигментов и значением ВИ использовали линейные регрессии. Оценку корректности моделей и их тестирование проводили по значениям средней абсолютной процентной ошибки (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE) и коэффициенту детерминации  $R^2$ .

## **2. Результаты и обсуждение**

### 2.1. Сезонная динамика фотосинтетических пигментов в листьях кленов

Сезонная динамика фотосинтетических пигментов в листьях *A. campestre*, *A. negundo* и *A. saccharinum* L. за вегетационный период 2021 г. подробно описана в статье Игнатовой с соавторами [34]. Анализ временных рядов концентраций хл *a* + хл. *b* и каротиноидов у трех видов клена за вегетационные периоды 2021-2023 гг. показал, что они носят хорошо выраженный сезонный характер – весной наблюдается быстрый рост содержания пигментов, к концу весны началу лета они достигают максимума, затем следует стабильный период или медленное снижение, с начала августа происходит быстрое падение их содержания (рис. 1). Средний уровень содержания хлорофиллов и самый высокий – в 2021 г., самый низкий – в 2022 г. Самый низкий уровень каротиноидов отмечен в 2023 г.

Различия в уровне значений хл *a* + хл. *b* между видами кленов сохраняются по годам (содержание хлорофиллов в листьях *A. campestre* стабильно выше, чем у *A. negundo* и *A. saccharinum*).

В соответствии с параболической кривой пик значений хлорофиллов в 2021, 2022 и 2023 гг. наступает во второй декаде мая, в конце третьей декады мая и начале второй декады мая соответственно. При этом различия по видам не существенны. Эти сроки

Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.  
Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью  
вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки

Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»

совпадают с фенологической фазой «завершение роста побегов», которая наступает для *A. campestre*, *A. negundo* и *A. saccharinum* фактически одновременно [35].

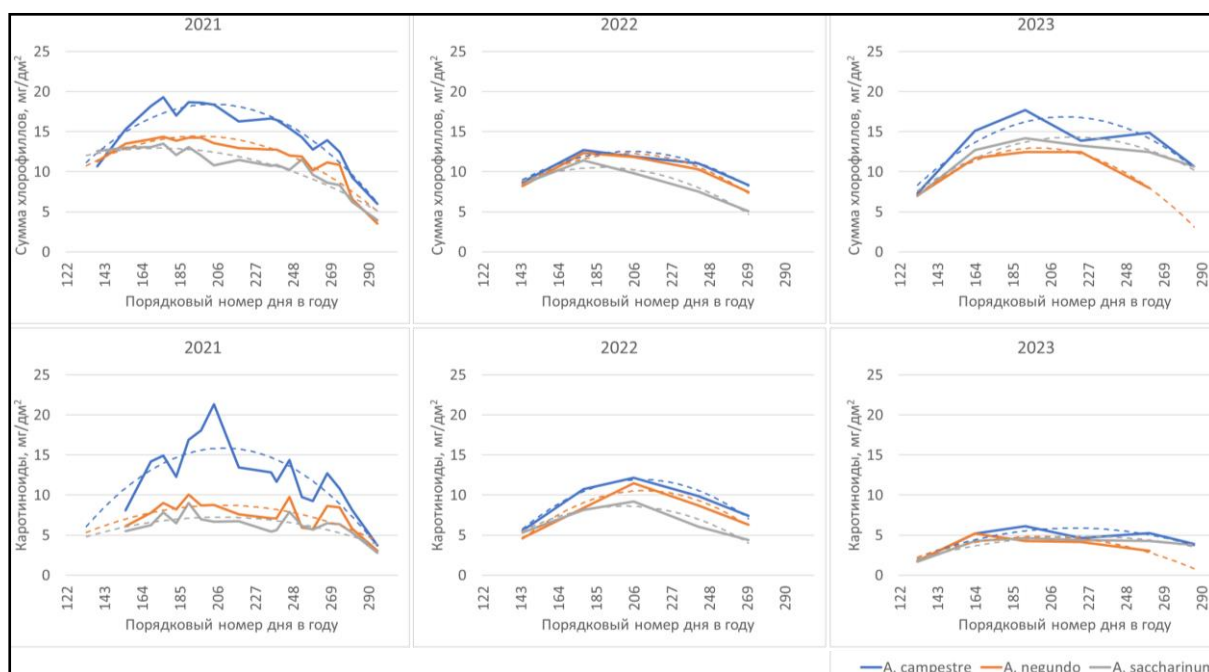


Рис. 1. Временные ряды концентраций хлорофиллов и каротиноидов за вегетационные периоды 2021, 2022 и 2023 гг. для *A. campestre*, *A. negundo* и *A. saccharinum*

## 2.2. Отбор ВИ для описания сезонной динамики фотосинтетических пигментов

Отбор ВИ, сезонная динамика которых хорошо совпадает с сезонной динамикой фотосинтетических пигментов в листьях трех видов клена, осуществляли по тесноте их связи с концентрациями хл. а, хл. b, хл а + хл. b и суммы каротиноидов. Кроме того, этим способом был проведен поиск ВИ, способных отражать динамику относительных показателей содержания фотосинтетических пигментов – отношения хлорофилла а к хлорофиллу b (хл.а/хл.б), суммы хлорофиллов к сумме каротиноидов (сумм. хл./ сумм. кар.).

Для большой группы ВИ (от 20 до 30 ВИ) установлена высокая сила связи между их значениями и концентрациями хлорофиллов одновременно для всех трех видов клена. В таблице 2 приведены отобранные по силе связи 19 ВИ, а также NDVI (как ВИ, наиболее часто использующийся для выражения содержания хлорофиллов).

Большой набор чувствительных к хлорофиллу ВИ, полученный в исследовании, можно объяснить тем, что гиперспектральная съемка проводилась в лабораторных

условиях проксимально при искусственном освещении и с помощью гиперспектральной камеры. При проксимальной съемке отсутствуют проблемы с обработкой изображений (угол освещения и положение объекта) [36]. Кроме того, отсутствует проблема пространственного, спектрального (решается за счет использования гиперспектральной камеры) и временного разрешений, характерная для дистанционного зондирования [37]. В таких условиях должны хорошо «срабатывать» большинство хлорофиллчувствительных ВИ.

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции Спирмана между концентрацией хлорофиллов и значением ВИ для *A. campestre*, *A. negundo* и *A. saccharinum*

ВИ	<i>A. Campestre</i>			<i>A. Negundo</i>			<i>A. Saccharinum</i>		
	хл. a	хл. b	хл. a + хл. b	хл. a	хл. b	хл. a + хл. b	хл. a	хл. b	хл. a + хл. b
CARI	-0,88	-0,81	-0,87	-0,87	-0,82	-0,85	-0,86	-0,72	-0,83
DD	0,86	0,80	0,86	0,86	0,76	0,83	0,83	0,68	0,80
Maccioni	0,88	0,81	0,87	0,86	0,77	0,83	0,82	0,66	0,78
MTCI	0,90	0,84	0,89	0,82	0,72	0,79	0,82	0,66	0,79
SR6	0,87	0,81	0,86	0,79	0,72	0,77	0,84	0,75	0,83
mSR2	0,86	0,78	0,85	0,77	0,70	0,75	0,86	0,76	0,85
Vogelmann	0,87	0,81	0,86	0,79	0,71	0,77	0,84	0,70	0,81
Carter4	-0,85	-0,76	-0,84	-0,79	-0,72	-0,77	-0,84	-0,75	-0,82
TCARI_OSAVI	-0,91	-0,84	-0,91	-0,81	-0,69	-0,77	-0,80	-0,65	-0,75
REP_Li	0,85	0,78	0,85	0,82	0,74	0,79	0,82	0,67	0,79
Vogelmann2	-0,82	-0,74	-0,81	-0,78	-0,73	-0,77	-0,86	-0,74	-0,84
NDVI2	0,86	0,78	0,85	0,77	0,70	0,75	0,84	0,75	0,83
OSAVI2	0,86	0,78	0,85	0,77	0,70	0,75	0,84	0,75	0,83
Vogelmann4	-0,82	-0,74	-0,81	-0,78	-0,72	-0,76	-0,86	-0,74	-0,84
Datt	0,89	0,81	0,88	0,86	0,77	0,83	0,74	0,55	0,70
Datt2	0,83	0,75	0,83	0,78	0,71	0,76	0,84	0,70	0,81
D1	0,85	0,79	0,85	0,82	0,74	0,80	0,79	0,63	0,76
MCARI	-0,91	-0,87	-0,90	-0,81	-0,72	-0,79	-0,75	-0,55	-0,70
Vogelmann3	0,91	0,88	0,91	0,81	0,74	0,79	0,73	0,53	0,69
CI2	0,78	0,69	0,78	0,77	0,72	0,75	0,86	0,81	0,86
NDVI	0,33	0,21	0,31	0,60	0,61	0,57	0,63	0,75	0,66

Примечание: Во всех случаях, кроме NDVI ( $p < 0,05$ ), связь между признаками достоверна при  $p < 0,001$ .

Следует отметить, что со значениями концентраций хл. a, хл. b и хл. a + хл. b тесно коррелируют одни и те же ВИ (по этим трем характеристикам из 19 ВИ не совпадают только три индекса). В частности, индекс CARI имеет самую высокую силу связи одновременно с концентрациями хл a, хл. b и хл a + хл. b для всех видов клена. С одной стороны, это свидетельствует о том, что сезонные временные ряды ВИ тесно коррелируют

с временными рядами концентраций хлорофиллов и могут быть использованы для дистанционного и соответственно неразрушающего мониторинга содержания фотосинтетических пигментов. С другой стороны, с помощью использованного подхода не возможно найти ВИ, специфичные для хл. а и хл. b. Это можно объяснить близостью пиков поглощения и отражения этих двух хлорофиллов. По этой причине в современных исследованиях по спектроскопии пигментов растений определяют валовое содержание хлорофиллов (Leaf chlorophyll content – LCC) [38].

Вегетационных индексов, чьи сезонные временные ряды достоверно коррелируют с временными рядами концентраций каротиноидов, меньшее количество, чем в случае с хлорофиллами, связь средней силы – r от 0,5 до 0,7 (табл. 3).

Таблица 3. Значения коэффициента корреляции Спирмана между концентрацией каротиноидов и значением ВИ для *A. campestre*, *A. negundo* и *A. saccharinum*

ВИ	<i>A. Campestre</i>	<i>A. Negundo</i>	<i>A. Saccharinum</i>
Datt6	0,68**	0,52*	0,60*
TCARI2/OSAVI2	-0,71**	-0,51*	-0,51*
SR8	0,78***	0,39	0,54*
PSSR	0,62**	0,59*	0,50*
TCARI/OSAVI	-0,69**	-0,53*	-0,49
CI2	0,70**	0,50*	0,50*
Datt2	0,67**	0,51*	0,51*
mSR2	0,70**	0,49*	0,50*
CRI4	-0,67**	-0,49*	-0,53*
GMI2	0,70**	0,48	0,50*
NDVI	0,34	0,45	0,61*

Примечание: Связь между признаками достоверна при \*\*\*  $p < 0,001$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*  $p < 0,05$ .

Все представленные в таблице 3 ВИ, кроме PSSR, более тесно коррелируют с хлорофиллами. Поэтому их нельзя признать специфичными каротиноидам. Интерес представляет только PSSR, у которого связь с хлорофиллами является средней или слабой ( $r = 0,61$ ;  $0,49$  и  $0,44$  при  $p < 0,05$  для *A. campestre*, *A. negundo* и *A. saccharinum* соответственно). Отмечается, что точность оценки содержания каротиноидов с помощью ВИ пока не достигла точности, полученной для содержания Хл. [23].

Поиск ВИ, способных отражать динамику хл.а/хл.в путем оценки силы связи между ними не дал положительного результата. Наличие связи между этими характеристиками статистически доказано только для *A. saccharinum* ( $p < 0,01$ ). Ряд ВИ

имеют среднюю связь с величиной относительного показателя хл. a+b/сумм. кар, но только для *A. negundo* и *A. saccharinum* (табл. 4). Это может быть следствием наличия высокой силы связи этих ВИ с концентрацией суммы хл. a и хл. b. Для *A. campestre* такая связь, исходя из значений r и p, отсутствует. Это дополнительно подтверждает наличие значимых различий в содержании фотосинтетических пигментов и их пропорций между *A. campestre* и *A. negundo*, *A. saccharinum*. Задача выражения хл. a+b/сумм. кар через ВИ может быть решена только тогда, когда будут рассчитаны индексы чувствительные каротиноидам и одновременно не чувствительные к хлорофиллам.

Таблица 4. Значения коэффициента корреляции Спирмана между относительными показателями содержания пигментов и значением ВИ для *A. campestre*, *A. negundo* и *A. saccharinum*

ВИ	<i>A. campestre</i>	<i>A. negundo</i>	<i>A. saccharinum</i>
хл.a/хл.b			
PRI_CI2	-0,27	-0,44	-0,45
SR	0,15	-0,38	-0,63**
NDVI	0,16	-0,35	-0,63**
PRI	-0,26	-0,47*	-0,40
SAVI	0,14	-0,31	-0,62**
TCARI2	-0,47	-0,41	-0,19
MSAVI	0,14	-0,29	-0,60**
OSAVI	0,14	-0,29	-0,60**
PRI_norm	0,23	0,44	0,33
PSRI	-0,10	0,33	0,56*
хл. a+b/сумм. Кар			
Vogelmann3	-0,19	0,54*	0,71**
TCARI2	-0,29	0,54*	0,50*
Datt3	-0,09	0,63**	0,59*
MTCI	-0,11	0,49*	0,70**
EGFN	0,13	0,45	0,71**
Carter5	0,11	-0,42	-0,76**
SR8	-0,30	0,50*	0,48
D2	0,11	-0,48**	-0,69**
CARI	0,09	-0,49*	-0,69**
MCARI	0,11	-0,44	-0,72**
NDVI	-0,08	0,44	0,25

Примечание: Связь между признаками достоверна при \*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ .

### 2.3. Характер сезонной динамики ВИ

Временные ряды значений некоторых ВИ за вегетационные сезоны 2021–2023 гг. представлены на рис. 2.

Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.  
 Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью  
 вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки  
 .....  
 Электронный научно-производственный журнал  
 «АгроЭкоИнфо»  
 =====



Рис. 2. Временные ряды значений некоторых ВИ за вегетационные периоды 2021–2023 гг.

Индексы CARI и TCARI\_OSAVI имеют хорошо выраженную сезонную динамику, однако не очень удобны для использования, потому что имеют обратную связь со значениями пигментов. Для Datt3 характерны сильные колебания значений в течение

сезона. Шкала DD содержит как отрицательные, так положительные значения, что требует его нормирования при расчетах. Временные ряды NDVI не имеют выраженной сезонной динамики. Из представленных на рис. 2 ВИ наиболее удобен для использования Maccioni.

Временные ряды значений ВИ за вегетационный период имеют четко выраженный сезонный характер, аналогичный сезонной динамике содержания фотосинтетических пигментов (для некоторых ВИ в зеркальном отражении). В 2021 г. значения ВИ весной быстро нарастают, достигают максима в начале мая, затем наступает относительно стабильная стадия, продолжающаяся до середины июня, плавное снижение до сентября и следом резкое снижение. В 2022 и 2023 гг. динамика временных рядов ВИ более плавная и симметричная. В них в течение всех трех вегетационных сезонов хорошо проявляется видовая специфичность кленов – уровень значений ВИ для листьев *A. campestre* значительно отличается от *A. negundo* и *A. saccharinum*. Разница между *A. negundo* и *A. saccharinum* не существенна. Эта закономерность сохраняется по годам. Средний уровень временных рядов ВИ по всем видам кленов самый высокий в 2021 г, самый низкий в 2022 г. Эти закономерности временных рядов ВИ хорошо совпадают с временными рядами суммы хл. а и хл. b. (раздел 2.1).

#### 2.4. Однофакторные регрессионные модели содержания хлорофиллов через значения ВИ

По данным 2021 г. были построены однофакторные регрессионные модели суммарного содержания хлорофиллов (хл. а + хл. b). Рассчитанные линии регрессий и эмпирические точки представлены на рис. 3 уравнения регрессий и показатели корректности моделей ( $R^2$  и MAPE) даны в таблице 5. Связь между ВИ и суммой хлорофиллов в имеющемся диапазоне значений близка к линейной связи, что говорит о надежности однофакторных регрессионных моделей [39].

Модели оценки содержания хлорофиллов, построенные по значениям CARI, TCARI/OSAVI, Datt3, Maccioni, DD наиболее корректны для *A. negundo*, менее – для *A. saccharinum*. По результатам оценки корректности моделей NDVI оказался не пригоден в качестве прокси-метрики содержания хлорофиллов в листьях кленов. Эффективность CARI, Datt1, Datt2, OSAVI, TCARI и TCARI/OSAVI в качестве метрик содержания хлорофиллов подтверждена другими исследованиями [6].

Отмечают [6], что интегрированные ВИ (TCARI/OSAVI, и TCARI2/OSAVI2)



Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.  
Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью  
вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки

Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»

являются весьма перспективными для дистанционного определения хлорофиллов.

Наблюдается значимое варьирование величины МАРЕ как по ВИ, так и по видам клена. Это указывает на то, что эффективность одного ВИ для оценки хлорофиллов видов даже в пределах одного рода может быть разной. Это означает, что на практике для каждого вида может быть подобран свой ВИ.

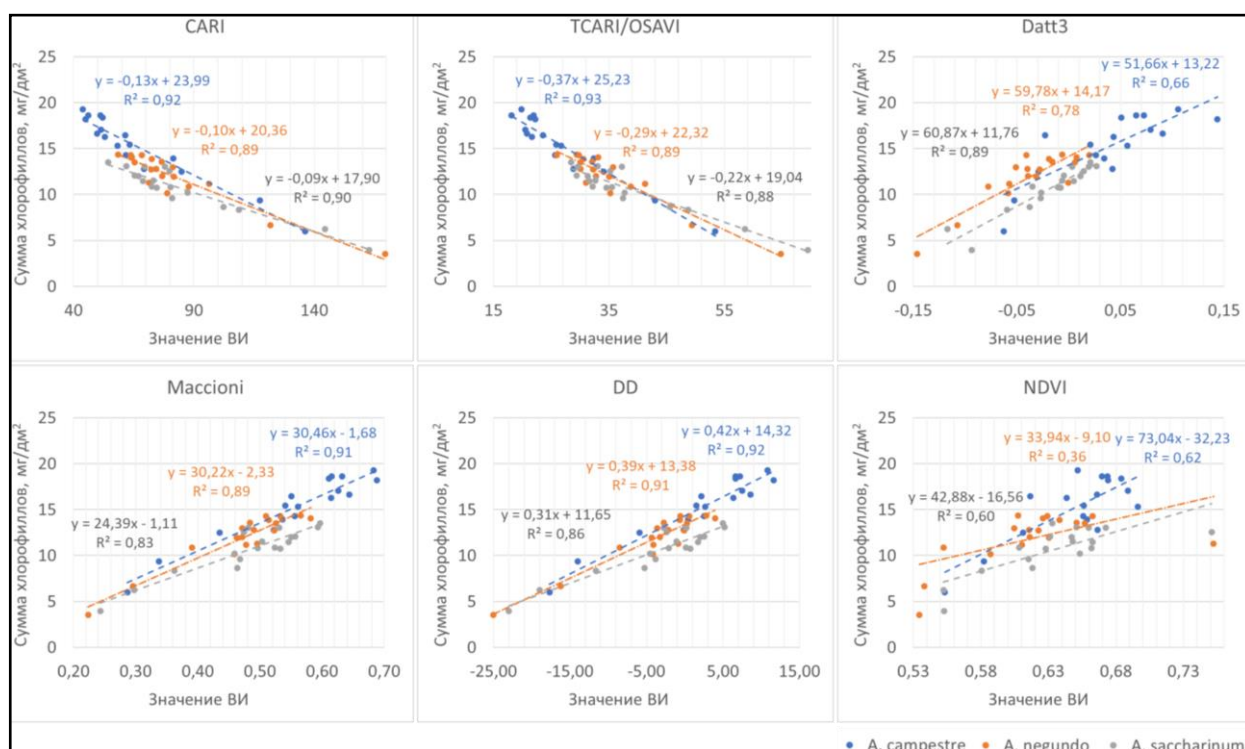


Рис. 3. Эмпирические точки и линейные регрессии концентрации хлорофиллов  $a + b$  по значениям ВИ (2021 год)

Таблица 5. Однофакторные регрессионные модели концентрации хлорофиллов по значениям ВИ. Результаты проверки корректности моделей

ВИ	<i>A. campestre</i>	<i>A. negundo</i>	<i>A. saccharinum</i>
хл.а/хл.б			
PRI_CI2	-0,27	-0,44	-0,45
SR	0,15	-0,38	-0,63**
NDVI	0,16	-0,35	-0,63**
PRI	-0,26	-0,47*	-0,40
SAVI	0,14	-0,31	-0,62**
TCARI2	-0,47	-0,41	-0,19
MSAVI	0,14	-0,29	-0,60**
OSAVI	0,14	-0,29	-0,60**
PRI_norm	0,23	0,44	0,33
PSRI	-0,10	0,33	0,56*

Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.  
Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью  
вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки

Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»

ВИ	<i>A. campestre</i>	<i>A. negundo</i>	<i>A. saccharinum</i>
хл. a+b/сумм. Кар			
Vogelmann3	-0,19	0,54*	0,71**
TCARI2	-0,29	0,54*	0,50*
Datt3	-0,09	0,63**	0,59*
MTCI	-0,11	0,49*	0,70**
EGFN	0,13	0,45	0,71**
Carter5	0,11	-0,42	-0,76**
SR8	-0,30	0,50*	0,48
D2	0,11	-0,48**	-0,69**
CARI	0,09	-0,49*	-0,69**
MCARI	0,11	-0,44	-0,72**
NDVI	-0,08	0,44	0,25

Тестирования регрессионных моделей было проведено по данным 2022 и 2023 гг.  
(табл. 6).

Таблица 6. Результаты тестирования моделей на данных 2022 и 2023 годов

ВИ	<i>A. campestre</i>	<i>A. negundo</i>	<i>A. saccharinum</i>
хл.а/хл.б			
PRI_CI2	-0,27	-0,44	-0,45
SR	0,15	-0,38	-0,63**
NDVI	0,16	-0,35	-0,63**
PRI	-0,26	-0,47*	-0,40
SAVI	0,14	-0,31	-0,62**
TCARI2	-0,47	-0,41	-0,19
MSAVI	0,14	-0,29	-0,60**
OSAVI	0,14	-0,29	-0,60**
PRI_norm	0,23	0,44	0,33
PSRI	-0,10	0,33	0,56*
хл. a+b/сумм. Кар			
Vogelmann3	-0,19	0,54*	0,71**
TCARI2	-0,29	0,54*	0,50*
Datt3	-0,09	0,63**	0,59*
MTCI	-0,11	0,49*	0,70**
EGFN	0,13	0,45	0,71**
Carter5	0,11	-0,42	-0,76**
SR8	-0,30	0,50*	0,48
D2	0,11	-0,48**	-0,69**
CARI	0,09	-0,49*	-0,69**
MCARI	0,11	-0,44	-0,72**
NDVI	-0,08	0,44	0,25

Значения MAPE в зависимости от ВИ (результаты тестирования NDVI не  
обсуждаются) и вида клена изменяется от 5,15 до 39,19%. При этом значение R2 средние,

высокие или очень высокое (кроме Datt3, для значений которого характерны сильные колебания в сезоне). Это означает, что прогнозируемая сезонная динамика хлорофиллов будет отличаться от их фактической динамики по уровню значений, но хорошо совпадает по трендам. Это наглядно представлено на графиках зависимости концентраций хлорофиллов от значений ВИ (рис. 4).

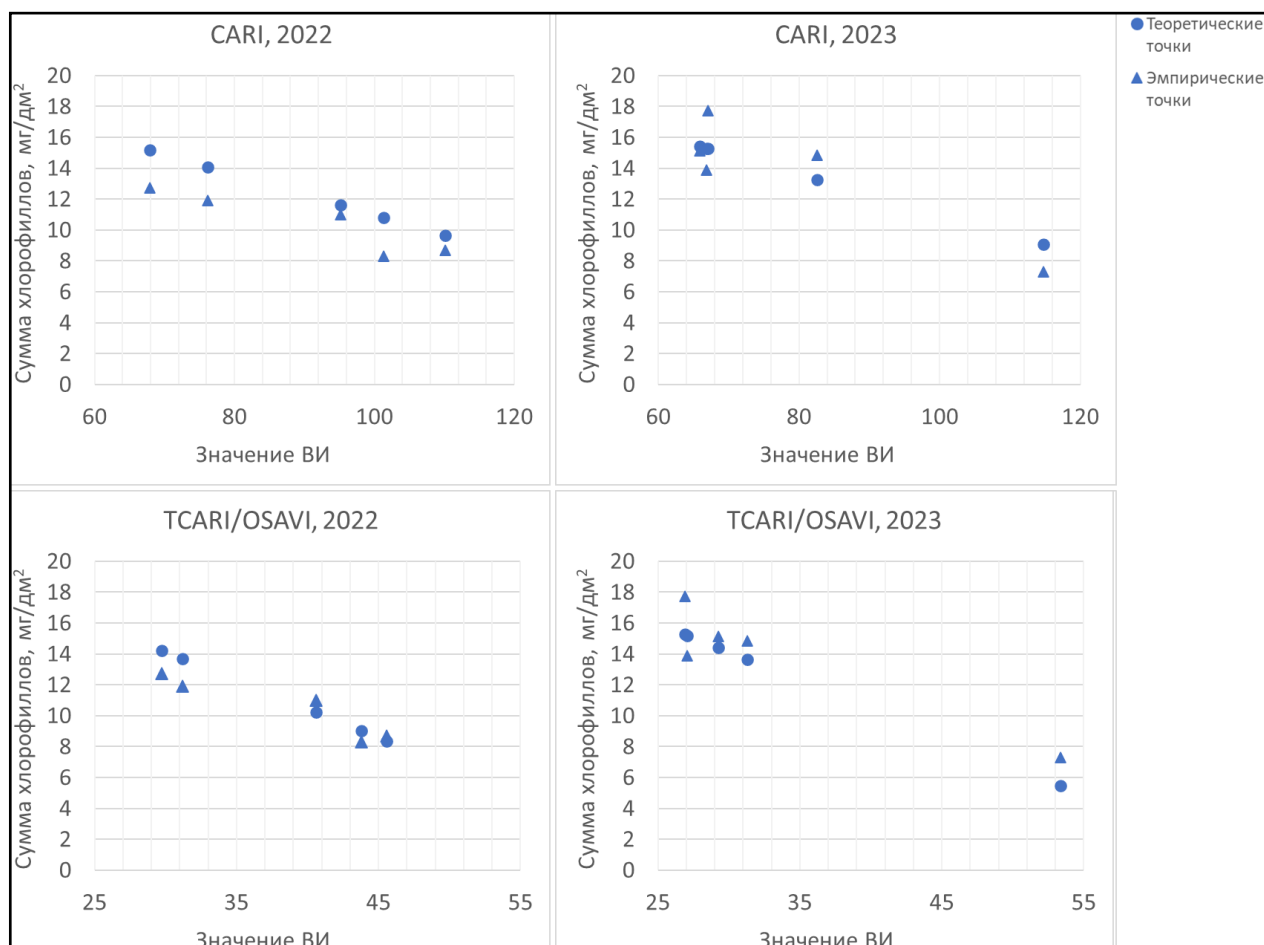


Рис. 4. Сезонная динамика хлорофиллов *A. campestre*, построенная по модельным и эмпирическим данным

Для оценки влияния внешних абиотических и биотических факторов на содержание хлорофиллов в рамках одного вегетационного сезона такие модели вполне приемлемы.

По результатам двухлетнего тестирования лучшими из рассмотренных ВИ для аппроксимации значений суммы хлорофиллов является TCARI/OSAVI, худшим – NDVI.

### Заключение

Временные ряды большой группы ВИ (CARI, Carter4, Datt3, DD, Maccioni, MTCl, mSR2, NDVI2, OSAVI2, REP\_Li, SR6, TCARI\_OSAVI, Vogelmann2, Vogelmann и др. всего более 20 ВИ) имеют хорошо выраженную сезонную динамику, когерентную с сезонной динамикой концентраций хлорофиллов. Коэффициент линейной корреляции Спирмана между значениями ВИ и хлорофиллов превышает значение 0,8. Связь между значениями ВИ и концентрациями каротиноидов менее тесная.

Однофакторные регрессионные модели концентрации хлорофиллов с ВИ в качестве независимой переменной (CARI, TCARI/OSAVI, Datt3, Maccioni и DD) имеют высокий уровень корректности –  $R^2$  в интервале от 0,66 до 0,93 и MAPE в интервале от 1,45 до 13,63%, в зависимости от ВИ и вида клена. По результатам тестирования лучшими, из рассмотренных ВИ, для аппроксимации значений суммы хлорофиллов являются TCARI/OSAVI. Для CARI значения MAPE прогнозируемой сезонной динамики хлорофиллов относительно высокое (более 10%) при высоком значении  $R^2$  – 0,65. Соответственно, прогнозируемая сезонная динамика хлорофиллов будет отличаться от их фактической сезонной динамики по уровню значений, но хорошо совпадает по трендам.

Сезонная динамика содержания хлорофиллов и значений ВИ является видоспецифичной – уровень этих процессов для листьев *A. campestre* выше, чем у *A. negundo* и *A. saccharinum*. Разница между *A. negundo* и *A. saccharinum* не существенна. Эта закономерность сохраняется по годам.

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

### Список использованных источников:

1. Jespersen D., Zhang J., Huang B. Chlorophyll loss associated with heat-induced senescence in bentgrass // Plant Sci. – 2016. – V. 249. - P. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.04.016>
2. Глаз Н.В., Казакова Н.И., Уфимцева Л.В. Методические подходы к выбору условий пробоотбора и оценке содержания хлорофилла в листьях растений кукурузы // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 3(102). – С. 73–77.
3. Petibon F., Wiesenberg G.L.B. Characterization of complex photosynthetic pigment

profiles in European deciduous tree leaves by sequential extraction and reversed-phase high-performance liquid chromatography // *Front. Plant Sci.* – 2022. – 13, 3576. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.957606>

4. Gholizadeh A., Saberioon M., Boruvka L., Wayayok A. Leaf chlorophyll and nitrogen dynamics and their relationship to lowland rice yield for site-specific paddy management // *Information Processing in Agriculture.* – 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.08.002>.

5. Zhang H., Ge Y., Xie X. High throughput analysis of leaf chlorophyll content in sorghum using RGB, hyperspectral, and fluorescence imaging and sensor fusion // *Plant Methods.* – 2022. – V. 18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00892-0>

6. Kooistra L., Clevers J. Estimating potato leaf chlorophyll content using ratio vegetation indices // *Remote Sensing Letters.* – 2016. – V. 7(6). - P. 611-620. DOI: <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1171925>

7. Xue J., Baofeng S. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications // *Journal of Sensors.* – 2017. – P. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.

8. Zhu X., Yang Q., Chen X., Ding Z. An Approach for Joint Estimation of Grassland Leaf Area Index and Leaf Chlorophyll Content from UAV Hyperspectral Data // *Remote Sens.* – 2023. – V. 15, 2525. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15102525>

9. Taifeng D., Ji-Hua M., Jiali S., Jianguo L., Bingfang W. Evaluation of Chlorophyll-Related Vegetation Indices Using Simulated Sentinel-2 Data for Estimation of Crop Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation // *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* – 2015. – V. 8. – P. 4049-4059. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2400134>

10. Silleos N., Alexandridis T., Gitas I., Perakis K. Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years // *Geocarto Intern.* – 2006. – V. 21(4). - P. 21–28.

11. Vincini M., Frazzi E. Empirical Estimation of Leaf Chlorophyll Density in Winter Wheat Canopies Using Sentinel-2 Spectral Resolution // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2014. – V. 52 (6). - P. 3220–3235. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2271813>.

12. Zarco-Tejada P., Miller J., Noland T., Mohammed G., Sampson P. Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2001. – V. 39. - P. 1491–1507.

13. Gitelson A., Gritz Y., Merzlyak M. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // *Journal of Plant Physiology.* – 2003. – V. 1 (160). - P. 271-282.

14. Pinty B., Laverigne T., Widlowski J., Gobron N., Verstraete M. On the need to observe vegetation canopies in the near-infrared to estimate visible light absorption // *Remote*

Sens. Environ. – 2009. – V. 113. - P. 10-23.

15. Fawcett D., Bennie J., Anderson K. Monitoring spring phenology of individual tree crowns using drone-acquired NDVI data // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2020. – 7. DOI: <https://doi.org/10.1002/rse2.184>

16. Ji-Jhong C., Shuyang Z., Youping S. Estimating Leaf Chlorophyll Content of Buffaloberry Using Normalized Difference Vegetation Index Sensors // Hort Technology. – 2021. – V. 32. - P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04808-21>

17. Wang H., Shi R., Liu P.D., Gao W. The study of vegetation indices for the monitoring of differences in chlorophyll and carotenoid composition in green vegetables // The International Society for Optical Engineering. – 2016. – V. 36(7). - P. 2189-2194. DOI: [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2016\)07-2189-06](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2016)07-2189-06)

18. Chappelle E.W. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves // Remote Sens. Environ. – 1992. – V. 3. - P. 22-32.

19. Datt B. Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a + b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves // Remote Sens. Environ. – 1998. – V. 2. - P. 1-12.

20. Blackburn G. Retrieval of chlorophyll concentration from leaf reflectance spectra using wavelet analysis // Remote Sens. Environ. – 2008. – V. 112. - P. 1614-1632.

21. Gitelson A., Zur Y., Chivkunova O., Merzlyak M. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy // Photochem. Photobiol. – 2002. – V. 75. - P. 272-281.

22. Gitelson, A., Keydan, G., Merzlyak, M. Three-Band Model for Noninvasive Estimation of Chlorophyll Carotenoids and Anthocyanin Contents in Higher Plant Leaves // Geophysical Research Letters. – 2006 – V. 33. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL026457>

23. Fassnacht F., Stenzel S., Gitelson A. Non-destructive estimation of foliar carotenoid content of tree species using merged vegetation indices // Journal of Plant Physiology. – 2015. – V. 176. - P. 210-217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.11.003>

24. Hernández-Clemente R., Navarro-Cerrillo R. Carotenoid content estimation in a heterogeneous conifer forest using narrow-band indices and PROSPECT+ DART simulations Remote Sens. Environ. – 2012. – V. 127. - P. 298-315.

25. Gamon J., Huemmrich K., Wong C., Ensminger I., Garrity S., Hollinger D., Noormets A., Penuelas J. A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – V. 113. - P. 160-172. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1606162113>

26. Zhang J., Zhang D., Cai Z., Wang L., Wang J., Sun L., Fan X., Shen Sh., Zhao J. Spectral technology and multispectral imaging for estimating the photosynthetic pigments and SPAD of the Chinese cabbage based on machine learning // Computers and Electronics in Agriculture. – 2022. – V. 195. SP – 106814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106814>

27. Che S., Du G., Zhong X., Mo Z., Wang Z., Mao Y. Quantification of Photosynthetic Pigments in *Neopyropia yezoensis* Using Hyperspectral Imagery // *Plant Phenomics*. – 2023. – V. 5. Article 0012. DOI: <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0012>
28. Зозулин Г.М. Леса Нижнего Дона. - Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1992. - 200 с.
29. Федоринова О.И., Козловский Б.Л., Куропятников М.В. Инвазионная активность *Acer negundo* L. на техногенных субстратах в пойме реки Темерник // Труды Ботанического сада Южного федерального университета: сборник научных трудов. Вып. 6: монография / под ред. Т.В. Вардуни. - Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2021. - С. 112–135.
30. Vonwettstein D. Chlorophyll-letale und der submikroskopische Formwechsel der Plastiden // *Experimental Cell Research*. – 1957. – V. 12(3), P. 427–506. DOI: [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(57\)90165-9](https://doi.org/10.1016/0014-4827(57)90165-9)
31. Blackburn G. Quantifying Chlorophylls and Carotenoids at Leaf and Canopy Scales: An Evaluation of Some Hyperspectral Approaches // *Remote Sensing of Environment*. – 1998. – V. 66 (3). - P. 273-285. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00059-5)
32. Carter G.A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress // *J. of Remote Sens.* - 1994. – V. 15(3). - P. 697–703. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169408954109>
33. Dmitriev P., Kozlovsky B., Dmitrieva A. Classification of invasive tree species based on the seasonal dynamics of the spectral characteristics of their leaves // *Earth Sci Inform.* – 2023. – V. 16. - P. 3729–3743. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01118-0>
34. Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриев П.А., Куропятников М.В., Вардуни Т.В. Сезонная динамика фотосинтетических пигментов *Acer campestre* L., *A. negundo* L. и *A. saccharinum* L. в Ростове-на-Дону // *Биосфера*. - 2022. - Т. 14. - № 2. - С. 82–97. DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v14i2.670>.
35. Козловский Б.Л., Куропятников М.В., Федоринова О.И. Фенология древесных интродуцентов Ботанического сада ЮФУ. - Ростов-на-Дону – Таганрог: Южный федеральный университет, 2020. – 228 с. – ISBN 978-5-9275-3553-8.
36. Wang Q., Tang Y., Ge Y., Xie H., Tong X., Atkinson P. M. A comprehensive review of spatial-temporal-spectral information reconstruction techniques // *Science of Remote Sensing*. – 2023. – V. 8. - P. 100-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100102>
37. Yuan S., Song G., Huang G., Wang Q. Reshaping Hyperspectral Data into a Two-Dimensional Image for a CNN Model to Classify Plant Species from Reflectance // *Remote Sens.* – 2022. – V. 14 N. 3972. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14163972>
38. Lu S., Lu F., You W. A robust vegetation index for remotely assessing chlorophyll content of dorsiventral leaves across several species in different seasons // *Plant Methods*. – 2018. – V. 14 N. 15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0281-z>
39. Lopatin J. Estimation of Foliar Carotenoid Content Using Spectroscopy Wavelet-

Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.  
Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью  
вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки

.....  
*Электронный научно-производственный журнал*  
**«АгроЭкоИнфо»**  
=====

Based Vegetation Indices // Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2023. – V. 20. - P. 1-5.

DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3237010>  
=====

**Цитирование:**

Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В., Дмитриев П.А.  
Оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментов в листьях кленов с помощью  
вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки [Электрон.  
ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2024. – № 2. –  
Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/2/st\\_206.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/2/st_206.pdf)  
DOI: <https://doi.org/10.51419/202142206>.