

Дистанционный мониторинг состояния растений

УДК 634.11+58.084.5

doi: 10.15389/agrobiology.2023.3.473rus

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ
КАК ИНДИКАТОРЫ СОДЕРЖАНИЯ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ
ЯБЛОНИ (*Malus domestica* Borkh.)*****И.Ю. САВИН^{1, 2} ✉, С.Н. КОНОВАЛОВ³, В.В. БОБКОВА³, Д.В. ШАРЫЧЕВ¹**

Методы оперативного дистанционного (спутникового и беспилотного) сельскохозяйственного мониторинга в настоящее время базируются на использовании спектральных вегетационных индексов в качестве интегральных показателей состояния растений. В 1972 году для дистанционного мониторинга растительности был предложен первый спектральный вегетационный индекс NDVI (normalized difference vegetation index), а в последующие годы разработано около сотни индексов, предназначенных для детектирования разных свойств: от влажности, структуры листьев, архитектуры растений в посевах до содержания различных веществ, в том числе пигментов, регулирующих фотосинтез и продуктивность растений. Во многих случаях предлагаемые индексы надежно функционируют для конкретных растений или для растительности в целом. Для плодовых культур, в частности для яблони, подобных индексов практически нет. В представленной статье впервые показано, что спектральные вегетационные индексы, предложенные для детектирования пигментов в сельскохозяйственных растениях, нуждаются в уточнении при их использовании для подобного детектирования пигментов в листьях яблони конкретного сорта. Нашей целью был анализ связи между спектральными вегетационными индексами, рассчитанными для листьев яблони сорта Имрус, с содержанием в них хлорофилла и каротиноидов. Анализ спектральной отражательной способности листьев яблони (*Malus domestica* Borkh.) сорта Имрус посадки 2011 года проводили 19 октября 2021 года на территории опытного сада ФГБНУ ФНЦ садоводства (пос. Михнево, Московская обл., Ступинский р-н). Листья собирали в полуденное время случайным образом из средней части кроны с ветвей 2-5-летнего возраста. Всего для анализа содержания пигментов сформировали 26 смешанных образцов листьев. Содержание хлорофиллов а + b определяли в лабораторных условиях методом Винтерманса-Де Мотса, каротиноидов — методом фон Ветштейна. Спектральную отражательную способность оценивали с использованием полевого спектрорадиометра SR-6500 («Spectral Evolution», США), который работает в диапазоне 350–2500 нм с разрешающей способностью 1. Кривые спектральной отражательной способности получали в 5-кратной повторности для верхней поверхности листьев, осредняли для каждого листа, а затем для каждой из 26 смешанных групп листьев. На основании осредненных кривых спектрального отражения вычисляли наиболее распространенные спектральные вегетационные индексы. После этого был проведен анализ связи величин спектральных вегетационных индексов с содержанием пигментов в листьях. Установлено, что предложенные ранее многочисленные вегетационные индексы не могут быть использованы для бесконтактного детектирования содержания хлорофилла и каротиноидов в листьях яблони сорта Имрус. Связь между величиной индекса и содержанием пигмента практически отсутствует. Также не удается сгруппировать проанализированные листья по содержанию пигментов на основе построения дендрограммы сходства между кривыми спектрального отражения листьев в диапазоне 350–2500 нм. На основе корректировки индексов, показавших наиболее точную зависимость, предложены новые вегетационные индексы для бесконтактного детектирования содержания в листьях яблони каротиноидов и хлорофилла, которые позволяют получать регрессионные модели с R^2 выше 0,65. Перед широким использованием их необходимо протестировать для листьев яблони других сортов, а также для листьев, находящихся в разной стадии развития.

Ключевые слова: спектральная отражательная способность, *Malus domestica*, листья яблони, хлорофилл, каротиноиды, вегетационные индексы.

Данные дистанционного зондирования (преимущественно спутниковые данные) в настоящее время широко используются в качестве основного источника информации для оперативного и низкозатратного получения сведений о состоянии сельскохозяйственных растений на больших территориях. Согласно научным публикациям, спутниковый сельскохозяйственный мониторинг позволяет проводить оценку площадей сева (1, 2), оперативный мониторинг состояния посевов (3–5), оценку урожайности сельскохозяйственных культур (6–8), а также мониторинг агрономически

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-321)

важных свойств почв (9).

Методы спутникового сельскохозяйственного мониторинга за время своего развития с середины 1960-х годов эволюционировали от визуального анализа бумажных фотографий к интерактивному дешифрированию на мониторе компьютера (10) и далее — к построению алгоритмов полностью автоматизированного анализа (11) благодаря переходу от аналоговых изображений к спутниковым данным в виде набора цифровых (пиксельных) сцен. В результате появилась возможность автоматизированного компьютерного попиксельного анализа спутниковых данных с использованием комбинации нескольких каналов съемки в виде производных изображений, получаемых в результате арифметических операций над отдельными каналами. Это позволило значительно расширить список потенциальных спутниковых предикторов свойств растительности или почв как объектов дистанционного мониторинга. Оказалось, что во многих случаях использование не оригинальных спутниковых изображений, а производных от них более эффективно для детектирования и мониторинга свойств почв и растительности.

В 1972 году для дистанционного мониторинга растительности был предложен первый спектральный вегетационный индекс NDVI (normalized difference vegetation index) (12), который вычислялся следующим образом:

$$NDVI = (R - NIR)/(R + NIR),$$

где R — яркость изображения в красном канале съемки, NIR — яркость изображения в ближнем инфракрасном канале съемки.

В многочисленных исследованиях на примере разных растительных ассоциаций было показано, что этот индекс хорошо отражает состояние растительности и коррелирует со многими ее свойствами (цвет листьев, надземная фитомасса, листовая поверхность и др.) (13). До сих пор NDVI широко используется в системах дистанционного сельскохозяйственного мониторинга во всем мире (2, 4, 14).

При этом велся поиск и других спектральных вегетационных индексов, которые были бы более чувствительны к конкретным свойствам растительности и почв. В настоящее время их предложено более сотни и количество постоянно растет (15). Значительный практический интерес представляют вегетационные индексы, разрабатываемые для бесконтактного (дистанционного) детектирования количества пигментов в листьях растений (в основном хлорофилла и каротиноидов), поскольку именно от их содержания зависит эффективность и продуктивность фотосинтеза (16, 17).

Как правило, авторы тестируют и валидируют свои модели и предлагаемые ими индексы на примере конкретных растений (в сельском хозяйстве это преимущественно однолетние растения) (18), а удобство их применение для других растений остается неисследованным.

Наименее изучены возможности использования вегетационных индексов для мониторинга многолетних плодовых насаждений. Причем во многих публикациях акцент сделан на разработке новых методов извлечения информации о содержании пигментов в растениях. Так, для листьев яблони в Китае (19, 20) предложены подходы, основанные на методах машинного обучения и нейронных сетях. С. Li с соавт. (21), оценили возможности дистанционного (спутникового) детектирования содержания хлорофилла для отдельных деревьев яблони. Однако подобных публикаций немного и бесконтактные методы оценки содержания пигментов в листьях яблони до сих пор недостаточно разработаны.

В представленной статье впервые показано, что спектральные веге-

тационные индексы, предложенные для детектирования пигментов в сельскохозяйственных растениях, нуждаются в уточнении при использовании для подобного детектирования пигментов в листьях яблони конкретного сорта.

Нашей целью был анализ связи между спектральными вегетационными индексами, рассчитанными для листьев яблони сорта Имрус, с содержанием в них хлорофилла и каротиноидов.

Методика. Анализ спектральной отражательной способности листьев яблони (*Malus domestica* Borkh.) сорта Имрус 2011 года посадки проводили на территории опытного сада ФГБНУ ФНЦ садоводства (пос. Михнево, Московская обл., Ступинский р-н) 19 октября 2021 года. В это время листья деревьев находятся в разном состоянии (от полностью зеленых до уже пожелтевших или покрасневших), что обеспечивало максимально полный охват возможных вариантов по содержанию пигментов. Имрус — зимний иммунный к парше (*Vf*) сорт (Антоновка обыкновенная × OR18T13) селекции ФГБНУ Всероссийский НИИ селекции плодовых культур (Орловская обл.)

Смешанные образцы листьев брали с двух соседних рядов по участкам, включающим 15–20 деревьев в каждом ряду, которые располагались друг напротив друга. Листья отбирали в полуденное время случайным образом из средней части кроны с ветвей 2–5-летнего возраста. Всего для анализа содержания пигментов было сформировано 26 смешанных образцов. Каждая проба включала листья с 30–40 деревьев. Содержание хлорофиллов а + b определяли в лабораторных условиях методом Винтерманса-Де Мотса (22), каротиноиды — методом фон Ветштейна (23).

Спектральную отражательную способность оценивали с использованием полевого спектрорадиометра SR-6500 («Spectral Evolution», США), который работает в диапазоне 350–2500 нм с разрешающей способностью 1 нм. Кривые спектральной отражательной способности получали в 5-кратной повторности для верхней поверхности листьев и осредняли для каждого листа, а затем для каждой из 26 смешанных групп листьев.

На основании осредненных кривых спектрального отражения вычисляли наиболее распространенные спектральные вегетационные индексы. После этого был проведен анализ связи величин спектральных вегетационных индексов с содержанием пигментов в листьях.

На первом этапе проводили простой корреляционный анализ. После этого осуществляли кластеризацию кривых спектрального отражения и анализ группировки значений содержания хлорофилла и каротиноидов в разных группах кривых, выделенных по дендрограмме сходства кривых отражения. На последнем этапе была предпринята попытка коррекции наиболее подходящих индексов с целью их адаптации для определения содержания пигментов в листьях яблони на основе линейного регрессионного анализа.

Статистическую обработку данных — расчет средних значений, доверительных интервалов, оценку статистической значимости различий ($t_{0,05}$), предварительную обработку кривых спектрального отражения (их сглаживание и удаление выбросов) — проводили с использованием пакетов stats и prospectr в среде R (<https://www.r-project.org/>). Дендрограмма сходства была построена с использованием пакета Statistica 6.0 («StatSoft, Inc.», США). Регрессионный анализ и расчет p-value по *F*-критерию выполнены в программе Microsoft Excel.

Результаты. Формулы расчета вегетационных индексов для бесконтактного определения содержания пигментов в листьях представлены в таблице 1.

1. Спектральные вегетационные индексы для бесконтактного определения содержания хлорофилла и каротиноидов в листьях растений

| Формула для вычисления | Пигмент | Ссылка |
|---|-------------|--------|
| $ARI = 1/R_{550} - 1/R_{700}$ | Каротиноиды | (24) |
| $CRI = 1/R_{510} - 1/R_{550}$ | Каротиноиды | (24) |
| $CRI2 = 1/R_{510} - 1/R_{700}$ | Каротиноиды | (24) |
| $PSSRc = R_{800}/R_{500}$ | Каротиноиды | (25) |
| $SIPI = (R_{445} - R_{800})/(R_{670} - R_{800})$ | Каротиноиды | (26) |
| $CSI1 = R_{695}/R_{420}$ | Хлорофилл | (27) |
| $CSI2 = R_{695}/R_{760}$ | Хлорофилл | (27) |
| $G = R_{554}/R_{677}$ | Хлорофилл | (28) |
| $GM1 = R_{750}/R_{550}$ | Хлорофилл | (29) |
| $GM2 = R_{750}/R_{700}$ | Хлорофилл | (29) |
| $gNDVI = (R_{750} - R_{550})/(R_{750} + R_{550})$ | Хлорофилл | (30) |
| $MCARI = [(R_{700} - R_{670}) - 0,2 \cdot (R_{700} - R_{550})] \cdot (R_{700}/R_{670})$ | Хлорофилл | (31) |
| $NPQ1 = (R_{415} - R_{435})/(R_{415} + R_{435})$ | Хлорофилл | (32) |
| $PRI = (R_{528} - R_{567})/(R_{528} + R_{567})$ | Хлорофилл | (33) |
| $SR705 = SR_{705} = R_{750}/R_{705}$ | Хлорофилл | (34) |
| $TCARI = 3 \cdot [(R_{700} - R_{670}) - 0,2 \cdot (R_{700} - R_{550})] \cdot (R_{700}/R_{670}) / (1 + 0,16) \cdot (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0,16)$ | Хлорофилл | (35) |
| $TVI = 0,5 \cdot [120 \cdot (R_{750} - R_{550}) - 200 \cdot (R_{670} - R_{550})]$ | Хлорофилл | (36) |
| $VOG1 = R_{740}/R_{720}$ | Хлорофилл | (37) |
| $VOG2 = (R_{734} - R_{747})/(R_{715} - R_{720})$ | Хлорофилл | (37) |
| $ZTM = R_{750}/R_{710}$ | Хлорофилл | (38) |
| $SR(Chl a) = R_{675}/R_{700}$ | Хлорофилл | (30) |
| $SR(Chl b) = R_{675}/R_{650} \cdot R_{700}$ | Хлорофилл | (30) |
| $SR(Chl b2) = R_{672}/R_{708}$ | Хлорофилл | (30) |
| $SR(Chl tot) = R_{760}/R_{500}$ | Хлорофилл | (30) |
| $PSSRa = R_{800}/R_{675}$ | Хлорофилл | (25) |
| $PSSRb = R_{800}/R_{650}$ | Хлорофилл | (25) |
| $LCl = (R_{850} - R_{710})/(R_{850} + R_{680})$ | Хлорофилл | (39) |

Примечание. Rxxx в формулах означает отражение на указанной длине волны (xxx, нм).

Регрессионный анализ между содержанием в листьях пигментов и величиной разных вегетационных индексов показал практически полное отсутствие надежных регрессионных зависимостей. Для содержания каротиноидов самое высокое значение R^2 было установлено для индекса ARI ($ARI = 0,36$), для содержания хлорофилла — для индекса G ($G = 0,36$). Все остальные значения R^2 оказались ниже, чем 0,2 (табл. 2). Статистически значимыми (при $p = 0,01$) были лишь две модели.

2. Эффективность использования вегетационных индексов для регрессионного моделирования содержания пигментов в листьях яблони (*Malus domestica* Borkh.) сорта Имрус (пос. Михнево, Московская обл., Ступинский р-н, 2021 год)

| Индекс | R^2 линейной регрессии | p-value | Пигмент |
|-----------|--------------------------|-------------|-------------|
| ARI | 0,36 | 8,84184E-05 | Каротиноиды |
| CRI | 0,08 | 0,11982 | Каротиноиды |
| CRI2 | 0,03 | 0,41109 | Каротиноиды |
| PSSRc | 0,12 | 0,66258 | Каротиноиды |
| SIPI | 0,17 | 0,11075 | Каротиноиды |
| CSI1 | 0,02 | 0,10390 | Хлорофилл |
| CSI2 | 0,04 | 0,06195 | Хлорофилл |
| G | 0,36 | 8,89972E-06 | Хлорофилл |
| GM1 | 0,11 | 0,46123 | Хлорофилл |
| GM2 | 0,07 | 0,13564 | Хлорофилл |
| gNDVI | 0,03 | 0,48826 | Хлорофилл |
| MCARI | 0,16 | 0,37879 | Хлорофилл |
| NPQ1 | 0,19 | 0,37090 | Хлорофилл |
| PRI | 0,08 | 0,65917 | Хлорофилл |
| SR705 | 0,03 | 0,24438 | Хлорофилл |
| TCARI | 0,18 | 0,37874 | Хлорофилл |
| TVI | 0,03 | 0,33811 | Хлорофилл |
| VOG1 | 0,02 | 0,11980 | Хлорофилл |
| VOG2 | 0,04 | 0,78741 | Хлорофилл |
| ZTM | 0,09 | 0,14587 | Хлорофилл |
| SR(Chl a) | 0,11 | 0,02127 | Хлорофилл |
| SR(Chl b) | 0,17 | 0,08067 | Хлорофилл |

| | | | |
|--------------|------|---------|-----------|
| SR (Chl b2) | 0,08 | 0,13811 | Хлорофилл |
| SR (Chl tot) | 0,12 | 0,02885 | Хлорофилл |
| PSSRa | 0,02 | 0,16915 | Хлорофилл |
| PSSRb | 0,06 | 0,14184 | Хлорофилл |
| LCI | 0,16 | 0,01012 | Хлорофилл |

Судя по дендрограмме сходства кривых спектрального отражения листьев яблони при анализе 26 смешанных образцов, все кривые достаточно надежно разделились на две крупные группы и одна кривая (19ав) не вошла ни в одну из этих групп (рис. 1).

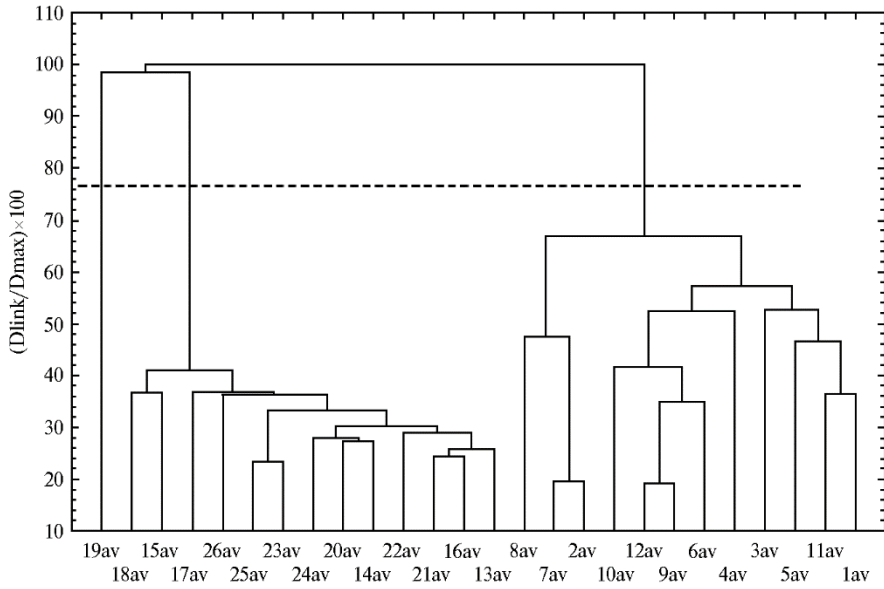


Рис. 1. Дендрограмма сходства кривых спектрального отражения листьев яблони (*Malus domestica* Borkh.) сорта Имрус: 1ав-26ав — соответственно каждый из 26 смешанных образцов листьев (пос. Михнево, Московская обл., Ступинский р-н, 2021 год).

Попытка установить связи между содержанием пигментов в листьях с указанными группами также не была успешной. В частности, содержание каротиноидов в одной из групп составляло $0,57 \pm 0,06$ мг/г, в другой — $0,56 \pm 0,06$ мг/г, а содержание хлорофиллов а + b — соответственно $2,27 \pm 0,27$ и $2,17 \pm 0,26$ мг/г (при $p = 0,05$).

Таким образом, спектральные вегетационные индексы, предложенные другими исследователями для бесконтактного детектирования пигментов в листьях растений, в нашем случае не позволили получить удовлетворительные результаты. Это, скорее всего, связано с тем, что большая часть индексов (см. табл. 1) была предложена и протестирована для растительности на уровне фитоценоза, а не отдельных листьев, без разделения на виды (24, 26, 32) или для конкретных сельскохозяйственных растений (28, 30, 31). Строение листьев у яблони имеет свою специфику и значительно отличается от такового у других растений, что предопределяет особенности светоотражения.

Проанализировав связь предложенных ранее вегетационных индексов с содержанием пигментов в листьях яблони, мы попытались подобрать более надежные индексы. Поскольку общие закономерности построения индексов должны сохраняться, в качестве базовых были отобраны индексы, которые показали наилучшие результаты при проведении регрессионного анализа, а затем мы уточнили их для листьев яблони посредством измене-

ния задействованных в вычислении длин волн.

Для детектирования содержания хлорофилла был выбран индекс G (28). При уточнении длины волны, для которой берется величина отражения при расчете по формуле, качество регрессионной модели (судя по R²) возросло почти в 2 раза. В результате был получен новый вегетационный индекс для бесконтактного детектирования содержания хлорофилла в листьях яблони:

$$G_apple = R_{580}/R_{685}.$$

Регрессионная зависимость (R² = 0,66) с этим индексом представлена на рисунке 2, А, параметры регрессионной модели — в таблице 3.

Для каротиноидов в качестве базового был выбран вегетационный индекс ARI (24):

$$ARI_apple = (1/R_{560}) - (1/R_{690}).$$

Величина R² регрессионной модели с этим вегетационным индексом достигла 0,65 (см. рис. 2, Б), параметры регрессионной модели представлены в таблице 3.

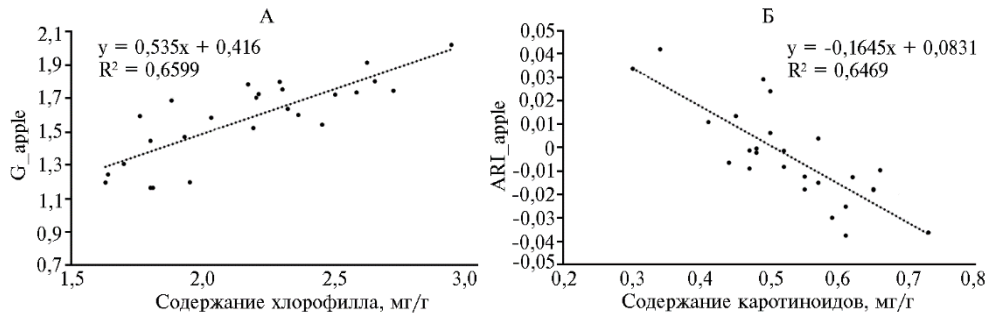


Рис. 2. Регрессионная зависимость величины спектральных вегетационных индексов ARI_apple (А) и G_apple (Б) от содержания хлорофиллов а + b (А) и каротиноидов (Б) в листьях яблони (*Malus domestica* Borkh.) сорта Имрус (пос. Михнево, Московская обл., Ступинский р-н, 2021 год).

3. Параметры регрессионных моделей, характеризующих зависимость величины спектральных вегетационных индексов от содержания пигментов в листьях яблони (*Malus domestica* Borkh.) сорта Имрус (пос. Михнево, Московская обл., Ступинский р-н, 2021 год)

| Индекс ARI_apple—содержание хлорофиллов а + b (рисунок 2, А) | | | | | | |
|--|--------------|--------------------|--------------|-------------|--------------|--|
| Регрессионная статистика | | | | | | |
| Множественный R | 0,804310212 | | | | | |
| R-квадрат | 0,646914918 | | | | | |
| Нормированный R-квадрат | 0,632203039 | | | | | |
| Стандартная ошибка | 0,060379302 | | | | | |
| Наблюдения | 26 | | | | | |
| Дисперсионный анализ | | | | | | |
| | df | SS | MS | F | значимость F | |
| Регрессия | 1 | 0,160308005 | 0,160308005 | 43,97228542 | 7,3744E-07 | |
| Остаток | 24 | 0,087495841 | 0,003645660 | | | |
| Итого | 25 | 0,247803846 | | | | |
| Y-пересечение | коэффициент | стандартная ошибка | t-статистика | p-value | | |
| Переменная X1 | -3,933057307 | 0,593117523 | -6,631160187 | 7,3744E-07 | | |
| Индекс G_apple—содержание каротиноидов (рисунок 2, Б) | | | | | | |
| Регрессионная статистика | | | | | | |
| Множественный R | 0,812355896 | | | | | |
| R-квадрат | 0,659922102 | | | | | |
| Нормированный R-квадрат | 0,645752189 | | | | | |
| Стандартная ошибка | 0,217909933 | | | | | |
| Наблюдения | 26 | | | | | |

| | Дисперсионный анализ | | | | значимость <i>F</i> |
|---------------|----------------------|--------------------|----------------------|-------------|---------------------|
| | <i>df</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | |
| Регрессия | 1 | 2,211462417 | 2,211462417 | 46,57206635 | 4,65864E-07 |
| Остаток | 24 | 1,139633737 | 0,047484739 | | |
| Итого | 25 | 3,351096154 | | | |
| | коэффициент | стандартная ошибка | <i>t</i> -статистика | p-value | |
| Y-пересечение | 0,225012363 | 0,288248014 | 0,780620689 | 0,442657485 | |
| Переменная X1 | 1,23344918 | 0,18074176 | 6,824372964 | 4,65864E-07 | |

Полученные результаты показали, что для бесконтактного определения содержания пигментов в листьях яблони можно использовать простые вегетационные индексы, но они должны быть адаптированы для конкретного сорта. Качество результатов при этом вполне сопоставимо с таковым, полученным на основе методов машинного обучения (19) или методов, основанных на использовании нейронных сетей (20). При этом в отличие от сложных методов, предлагаемые нами подходы более просты в использовании. Наши исследования подтверждают результаты С. Li с соавт. (21), несмотря на то, что они были получены для отдельных деревьев.

Итак, предложенные ранее многочисленные вегетационные индексы не могут быть использованы для бесконтактного детектирования содержания хлорофилла и каротиноидов в листьях яблони сорта Имрус. Связь между величиной индекса и содержанием пигмента практически отсутствует. Также не удастся провести группировку проанализированных листьев по содержанию пигментов на основе построения дендрограммы сходства между кривыми спектрального отражения листьев в диапазоне 350–2500 нм. На основе корректировки индексов, показавших наиболее точную зависимость, предложены новые вегетационные индексы для бесконтактного детектирования содержания каротиноидов и хлорофилла в листьях яблони. Эти индексы позволяют получать регрессионные модели с R^2 выше 0,65. Перед широким использованием такие модели необходимо протестировать для листьев яблони других сортов, а также для листьев, находящихся на разной стадии развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ennouri K., Kallel A. Remote sensing: an advanced technique for crop condition assessment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 2019:9404565 (doi: 10.1155/2019/9404565).
2. Толпин В.А., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Савин И.Ю., Флитман Е.В. Возможности информационного сервера СДМЗ АПК. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2010, 7(2): 221–232.
3. Savin I.Yu., Nègre T. *Agro-meteorological monitoring in Russia and Central Asian countries*. Ispra, OPOCE, 2006.
4. Becker-Reshef I., Justice C., Sullivan M., Vermote E., Tucker C., Anyamba A., Small J., Pak E., Masuoka E., Schmaltz J., Hansen M., Pittman K., Birkett C., Williams D., Reynolds K., Doorn B. Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: the Global Agriculture Monitoring (GLAM) project. *Remote Sensing*, 2010, 2(6): 1589–1609 (doi: 10.3390/rs2061589).
5. Wu B., Meng J., Li Q., Yan N., Du X., Zhang M. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(2): 113–137 (doi: 10.1080/17538947.2013.821185).
6. Savin I. Crop yield prediction with SPOT VGT in Mediterranean and Central Asian countries. In: *ISPRS Archives XXXVI-8/W48 Workshop proceedings: Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates. Commission VIII, WG VIII/10*. OPOCE, Stresa, 2007: 130–134.
7. Rembold F., Atzberger C., Savin I., Rojas O. Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection. *Remote Sensing*, 2013, 5(4): 1704–1733 (doi: 10.3390/rs5041704).
8. Береза О.В., Страшная А.И., Лупян Е.А. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2015, 12(1): 18–30.

9. Савин И.Ю., Вернюк Ю.И., Фараслис И. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для оперативного мониторинга продуктивности почв. *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*, 2015, 80: 95-105 (doi: 10.19047/0136-1694-2015-80-95-105).
10. Виноградов Б.В. *Аэрокосмический мониторинг экосистем*. М., 1984.
11. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. *Аэрокосмические методы географических исследований*. М., 2011.
12. Krieglner F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1969: 97-131.
13. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao C. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32: 1-6 (doi: 10.1007/s11676-020-01155-1).
14. Nakalembe C., Becker-Reshef I., Bonifacio R., Hu G., Humber M.L., Justice C.J., Keniston J., Mwangi K., Rembold F., Shukla S., Urbano F., Whitcraft A.K., Li Y., Zappacosta M., Jarvis I., Sanchez A. A review of satellite-based global agricultural monitoring systems available for Africa. *Global Food Security*, 2021, 29: 100543 (doi: 10.1016/j.gfs.2021.100543).
15. Xue J., Su B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 2017: 1353691 (doi: 10.1155/2017/1353691).
16. Montero F. Photosynthetic pigments. In: *Encyclopedia of astrobiology* /M. Gargaud, R. Amils, J.C. Quintanilla, H.J.(J.) Cleaves, W.M. Irvine, D.L. Pinti, M. Viso (eds.). Berlin, Heidelberg, Springer (doi: 10.1007/978-3-642-11274-4_1205).
17. Кизеев А.Н., Мерзляк М.Н., Соловченко А.Е. Применение спектроскопии отражения для неинвазивного анализа пигментов в растительных тканях. *Молодой ученый*, 2010, 6(17): 90-97.
18. Cui B., Zhao Q., Huang W., Song X., Ye H., Zhou X. A new integrated vegetation index for the estimation of winter wheat leaf chlorophyll content. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 974 (doi: 10.3390/rs11080974).
19. Cheng J., Yang G., Xu W., Feng H., Han S., Liu M., Zhao F., Zhu Y., Zhao Y., Wu B., Jang H. Improving the estimation of apple leaf photosynthetic pigment content using fractional derivatives and machine learning. *Agronomy*, 2022, 12(7): 1497 (doi: 10.3390/agronomy12071497).
20. Ta N., Chang Q., Zhang Y. Estimation of apple tree leaf chlorophyll content based on machine learning methods. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3902 (doi: 10.3390/rs13193902).
21. Li C., Zhu X., Wei Y., Cao S., Guo X., Yu X., Chang C. Estimating apple tree canopy chlorophyll content based on Sentinel-2A remote sensing imaging. *Sci. Rep.*, 2018, 8: 3756 (doi: 10.1038/s41598-018-21963-0).
22. Wintermans J.E.G., De Motts A. Spectrophotometric characteristics of chlorophyll a and b and their phaeophytins in ethanol. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1965, 109(2): 448-453 (doi: 10.1016/0926-6585(65)90170-6).
23. von Wettstein D. Chlorophyll-letale und der submikroskopische Formwechsel der Plastiden. *Experimental Cell Research*, 1957, 12(3): 427-506 (doi: 10.1016/0014-4827(57)90165-9).
24. Gitelson A., Kaufman Y., Stark R., Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76-87 (doi: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9).
25. Blackburn G.A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3): 273-285 (doi: 10.1016/S0034-4257(98)00059-5).
26. Peñuelas J., Filella I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 1998, 3(4): 151-156 (doi: 10.1016/S1360-1385(98)01213-8).
27. Carter G.A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(3): 517-520 (doi: 10.1080/01431169408954109).
28. Zarco-Tejada P.J., Ustin S.L., Whiting M.L. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3): 641-653 (doi: 10.2134/agronj2003.0257).
29. Gitelson A.A., Merzlyak M.N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, 1998, 22(5): 689-692 (doi: 10.1016/S0273-1177(97)01133-2).
30. Datt B. Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(2): 111-121 (doi: 10.1016/S0034-4257(98)00046-7).
31. Daughtry C.S.T., Walthall C.L., Kim M.S., Brown de Colstoun E., McMurtrey J.E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229-239 (doi: 10.1016/S0034-4257(00)00113-9).
32. Barnes J.D., Balaguer L., Manrique E., Elvira S., Davison A.W. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher

- plants. *Environmental and Experimental Botany*, 1992, 32(2): 85-100 (doi: 10.1016/0098-8472(92)90034-Y).
33. Gamon J.A., Peñuelas J., Field C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44 (doi: 10.1016/0034-4257(92)90059-S).
 34. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2-3): 337-354 (doi: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X).
 35. Haboudane D., Miller J.R., Tremblay N., Zarco-Tejada P.J., Dextraze L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2-3): 416-426 (doi: 10.1016/S0034-4257(02)00018-4).
 36. Broge N.H., Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76(2): 156-172 (doi: 10.1016/S0034-4257(00)00197-8).
 37. Vogelmann J.E., Rock B.N., Moss D.M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1563-1575 (doi: 10.1080/01431169308953986).
 38. Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Noland T.L., Mohammad G.H., Sampson P.H. Scaling-up and model inversion methods with narrow band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyper spectral data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, 39(7): 1491-1507 (doi: 10.1109/36.934080).
 39. Datt B. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using eucalyptus leaves. *Journal of Plant Physiology*, 1999, 154(1): 30-36 (doi: 10.1016/S0176-1617(99)80314-9).

¹ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт

им. В.В. Докучаева,

119017 Россия, г. Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2,

e-mail: savin_iyu@esoil.ru ✉, sharychev_dv@esoil.ru;

²Институт экологии,

ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов,

117198 Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 8, к. 2;

³ФГБНУ Федеральный научный

селекционно-технологический центр садоводства

и питомниководства,

115598 Россия, г. Москва, Загорьевская ул., 4,

e-mail: vstisp.agrochem@yandex.ru

Поступила в редакцию

31 января 2023 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2023, V. 58, № 3, pp. 473-482

SPECTRAL VEGETATION INDEXES AS INDICATORS OF LEAF PIGMENT CONTENT IN APPLE (*Malus domestica* Borkh.)

I.Yu. Savin^{1, 2} ✉, S.N. Konovalov³, V.V. Bobkova³, D.V. Sharychev¹

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Pyzhyovskii per. 7/str. 2, Moscow, 119017 Russia, e-mail savin_iyu@esoil.ru (✉ corresponding author), sharychev_dv@esoil.ru;

²Institute of Environmental Engineering of RUDN, 8/2, ul. Miklukho-Maklaya, Moscow, 117198 Russia;

³Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology, and Nursery, 4, Zagoryevskaya ul., Moscow, 115598 Russia, e-mail vstisp.agrochem@yandex.ru

ORCID:

Savin I.Yu. orcid.org/0000-0002-8739-5441

Bobkova V.V. orcid.org/0000-0002-2797-7394

Konovalov S.N. orcid.org/0000-0002-4447-7340

Sharychev D.V. orcid.org/0000-0002-6799-3209

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported financially by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement № 075-15-2022-321)

Final revision received January 31, 2022

doi: 10.15389/agrobiol.2023.3.473eng

Accepted February 01, 2023

Abstract

Methods of operational remote (satellite and unmanned) agricultural monitoring are currently based on the use of spectral vegetation indices as some integral indicators of plant condition. Since the first of them (Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) appeared in the early 1970's, rich experience has been accumulated in their use to detect various properties of agricultural plants and agrophytocenoses as a whole. About a hundred different indices have been proposed to

detect different properties, e.g., moisture, leaf structure, architecture of plants in crops, the content of various substances, including pigments regulating photosynthesis and plant productivity. In many cases, the proposed indices function reliably for specific plants or for the vegetation as a whole. For fruit crops and, in particular, for apple-tree, there are practically no such indices. In this paper, it is shown for the first time that the spectral vegetation indices proposed for the detection of pigments in agricultural plants need to be refined when they are used for similar detection of pigments in the leaves of an apple tree of a particular variety. Our goal was to analyze the relationship between the spectral vegetation indices calculated for the leaves of the Imrus apple tree (*Malus domestica* Borkh.) with the leaf content of chlorophyll and carotenoids. We evaluated the applicability of several dozen vegetation indices proposed for determining the content of chlorophylls and carotenoids in the leaves of various plants to the non-contact determination of these pigments in the leaves of the Imrus apple tree. On October 19, 2021, leaves were collected at noon randomly from 2-5-year old branches of the middle part of the crown of model Imrus trees grown from 2011 at the test plot (Stupino District, Moscow Province, Russia). In total, 26 mixed leaf samples were collected for pigment content analysis. The content of chlorophylls a + b was determined in the laboratory by the Wintermans-De Mots method, carotenoids by the von Wetshtein method. For the same leaves, spectral reflectance was measured under field conditions using a SR-6500 field spectroradiometer (Spectral Evolution, USA), which operates in the 350-2500 nm range with a resolution of 1 nm. Spectral reflectivity curves were plotted in 5 replicates for the upper surface of the leaves, averaged for each leaf, and then for each of the 26 mixed groups of leaves. Based on the averaged spectral reflectance curves, the most common spectral vegetation indices were calculated, followed by an analysis of the relationship between the values of the spectral vegetation indices and the content of pigments in the leaves. It has been established that the previously proposed numerous vegetation indices cannot be used for non-contact detection of the content of chlorophyll and carotenoids in the leaves of the Imrus apple tree. There is practically no connection between the index value and pigment content. It is also not possible to group the analyzed leaves according to the content of pigments based on the construction of a dendrogram of the similarity between the spectral reflectance curves of leaves in the range of 350-2500 nm. Based on the correction of the indices that showed the most accurate dependence, new vegetation indices were proposed for non-contact detection of the content of carotenoids and chlorophyll in apple leaves, which make it possible to obtain regression models with R^2 above 0.65. Before widespread use, they must be tested for leaves of apple trees of other varieties, as well as for leaves at different stages of development.

Keywords: spectral reflectance, *Malus domestica*, apple leaves, chlorophyll content, carotenoids content, vegetation indexes.