УДК 57.087:582.772.2

Влияние компоновки побегов сосны при гиперспектральной съемке в лабораторных условиях на статистические характеристики вегетационных индексов

Дмитриев Павел Александрович[1], Козловский Борис Леонидович[1], Дмитриева Анастасия Анатольевна[1], Вардуни Татьяна Викторовна[1]

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

DOI: 10.18522/2308-9709-2023-46-3

Аннотация:

Масштабный мониторинг фенологии растительности средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), оснащенных спектральными сенсорами, дает уникальную информацию о состоянии растительного покрова, климатических процессах, развитии экологических систем. Вместе с тем дистанционная фенология вечнозеленых растений в отличие от листопадных растений, имеет ряд проблем. Это выбор эффективных для описания фенологии вегетационных индексов, диагностика состояний вегетации и покоя и др. Решить эти задачи можно в лабораторных условиях, в которых отсутствуют проблемы с пространственным, временным и спектральным разрешением, характерные для ДЗЗ. Вместе с тем, при спектральной съемке листьев или побегов растений с близкого расстояния остается проблема смешанных пикселей, объединяющих фон и растительный объект. Целью исследования был поиск оптимальной компоновки побегов сосны для гиперспектральной съемки в лабораторных условиях. Объектом исследования послужила *Pinus sylvestris* L. Протестированы два варианта компоновки побегов для гиперспектральной съемки в виде отдельного ауксибласта (первый вариант) и брахибластов, уложенных плотно в несколько рядов (второй вариант). Способ компоновки побегов сосны, существенно повлиял на средние значения нормализованного относительного индекс растительности (NDVI) и индекса фотохимического отражения (PRI), но не повлиял на значения индекса отношения содержания хлорофиллов к каротиноидам (CCI). При этом полиномиальные линии регрессий NDVI и PRI в первом и втором вариантах параллельны, а для CCI совпадают. Поэтому вариант компоновки побегов является не принципиальным для определения тренда временного ряда. Это может иметь значение для определения количественных характеристик фенологического развития сосны по временным рядам спектральных характеристик, таких как начало и завершение периода вегетации. Значения

NDVI и CCI в обеих вариантах не распределяются по нормальному закону. Второй вариант компоновки побегов приближает распределение значений PRI к нормальному типу. Поэтому сезонная динамика сосны может быть описана в виде временных рядов медианы NDVI и CCI и временных рядов средней арифметической PRI.

Ключевые слова: Гиперспектральная камера, вегетационный индекс, временной ряд спектральных характеристик, *Pinus sylvestris*, тест на нормальное распределение

Methodology for hyperspectral imaging of pine shoots under laboratory conditions

Dmitriev Pavel Alexandrovich[1], Kozlovsky Boris Leonidovich[1], Dmitrieva Anastasia Anatolievna[1], Varduni Tatiana Viktorovna[1]
[1]Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

DOI: 10.18522/2308-9709-2023-46-3

Abstract:

Large-scale monitoring of vegetation phenology by remote sensing instruments equipped with spectral sensors provides unique information on the state of vegetation cover, climatic processes, and the development of ecological systems. At the same time, remote phenology of evergreen plants, in contrast to deciduous plants, has a number of problems. These include selection of vegetation indices effective for describing phenology, diagnostics of vegetation and dormancy states, and others. These problems can be solved in laboratory conditions, in which there are no problems with spatial, temporal and spectral resolution characteristic of remote sensing. At the same time, when spectral imaging of plant leaves or shoots at close range, the problem of mixed pixels combining background and plant object remains. The aim of the study was to find the optimal arrangement for hyperspectral imaging of pine shoots in laboratory conditions. The object of the study was *Pinus sylvestris* L. Two variants of shoot arrangement for hyperspectral imaging in the form of a separate auxiblast (the first variant) and brachyblasts stacked densely in several rows (the second variant) were tested. The method of pine shoot arrangement significantly affected the mean values of the normalized relative vegetation index (NDVI) and photochemical reflectance index (PRI) but did not affect the values of the chlorophyll-to-carotenoid ratio index (CCI). Moreover, the polynomial lines of NDVI and PRI are parallel in the first and second variants and coincide for CCI. Therefore, the variant of shoot arrangement is not fundamental for determining the trend of the time series. This may have implications for quantifying pine phenological development from time series of spectral characteristics such as the beginning and end of the growing season. NDVI and SSI values in both variants are not normally distributed. The second variant of shoot arrangement brings the distribution of PRI values closer to the normal type. Therefore, the seasonal dynamics of pine can be described in the form of time series of median NDVI and CCI and time series of arithmetic mean PRI.

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) с помощью пассивных спектральных сенсоров, фиксирующих отражение растительности, успешно развивается и широко используется в сельском (Hatfield et al., 2008; Gao et al., 2018; Mirzaei et al., 2019; Sun et al., 2019; Sinha et al., 2020; Feng et al., 2021) и лесном (Dainelli et al., 2021; Yang and Kan, 2022; Lechner et al., 2020; Adão et al., 2017) хозяйствах, в экологическом мониторинге (Schmitter et al., 2017; Harrison et al., 2018; Abbas et al., 2021; Li et al., 2020), фенотипировании растений (Ubbens and Stavness, 2017; Nasiri et al., 2021) и других сферах. Вместе с тем, ряд проблем ДЗЗ, таких как идентификация видов древесных растений¸ диагностика состояний растений в их фенологическом цикле, определение типов стресса растений и других требуют получения принципиального ответа на вопрос о возможности решения этих задач с помощью спектральных характеристик растений. Для этого необходимо проведение «строгих» экспериментов, максимально исключающих действие случайных факторов на результирующий признак. Общеизвестно, что на современном этапе ДЗЗ испытывает проблемы низкого пространственного, временного и спектрального разрешения. Для исключения этих проблем в дизайне «строгих» экспериментов может быть использована контактная съемка или съемка с ближнего расстояния листьев растений в естественных (Guo et al., 2023; Yuan et al., 2022; Große-Stoltenberg et al., 2016; Dudeni-Tlhone et al., 2023), а также в лабораторных условиях. В лабораторных условиях для спектральной съемки используются листья, не отделенные от растения (контейнерная культура) (Liu et al., 2022) и изолированные листья (и даже части листовой пластинки) (Yang and Kan, 2022; Junttila et al., 2022).

При съемке листьев в естественных условиях, как правило, используются портативные спектрорадиометры, в лабораторных условиях – спектрорадиометры и спектральные камеры (Pandey et al., 2017).

Для поисковых экспериментов спектральная съемка растительных объектов в лабораторных условиях имеет преимущество перед съемкой средствами ДЗЗ (Clark et al., 2005). Это связано:

- с возможностью более строгого соблюдения принципа единственного различия;
- с использованием более сложного и габаритного оборудования;
- с отсутствием проблемы пространственного и временного разрешения.

Кроме того, для получения спектральных данных листьев используется стандартный процесс, нет проблем с обработкой изображений, таких как угол освещения и положение, данные имеют малый объем и требуют меньше компьютерных ресурсов (Yuan et al., 2022).

Проблема низкого спектрального разрешения в лабораторных условиях решается путем использования гиперспектральных сенсоров. Спектральные характеристики, полученные с помощью гиперспектральных сенсоров, имеют следующие отличия от мультиспектральных сенсоров (Wang et al., 2015):

- наличие большого количества спектральных диапазонов;
- узкая ширина спектральной полосы (менее 10 нм), что приводит к высокому спектральному разрешению;
- непрерывные спектральные полосы – датчики могут обеспечить почти непрерывный спектр в пределах 350–2500 нм;
- очень большой объем данных – объем данных значительно возрастает с увеличением количества спектральных каналов;
- большая информационная избыточность из-за корреляции соседних спектральных каналов.

Исследования спектральных характеристик листьев с помощью гиперспектральных сенсоров направлены на:

- определение эффективных спектральных областей, вегетационных индексов (ВИ) и алгоритмов для создания моделей идентификации растений (Große-Stoltenberg et al., 2016; Yuan et al., 2022; Li et al., 2021; Long et al., 2021; Liu et al., 2022; Yang and Kan, 2022);
- изучение возможности гиперспектральной визуализации для количественной оценки химических свойств растений (Pandey et al., 2017; Junttila et al., 2022);
- описания фенологического цикла растений (Dudeni-Tlhone et al., 2023);
- диагностики стресса (Behmann et al., 2014; Williams et al., 2023; Ma et al., 2020).

Следует отметить, что гиперспектральные камеры являются менее точным инструментом в сравнение с флуориметрами и спектрометрами. Основной смысл применения их в лабораторных исследованиях заключается в возможности использования результатов в ДЗЗ.

В лабораторных условиях съемка листьев с помощью спектральной камеры проводится при искусственном освещении, лист растения помещается на черный фон, объектив камеры направляется перпендикулярно листу (Yang and Kan, 2022).

При спектральной съемке растений в лабораторных условиях возникает ряд методических проблем. Это, прежде всего, автоматическое выделение объекта (region of interest – ROI) для отбора «чистых» спектральных профилей (пикселей, захватывающих только поверхность листа, без фона). Чем меньше площадь и сложнее форма листовой пластинки, тем больше доля смешанных пикселей, захватывающих как поверхность листа, так и фон. Попадание смешанных пикселей в выборку может существенно повлиять на значения статистик спектральных характеристик. Простым методом, не требующим больших вычислительных ресурсов, является выделение объекта съемки путем пороговой сегментации по спектральному каналу (Yang and Kan, 2022) или ВИ (Pandey et al., 2017; Dmitriev et al., 2023).

Особенно актуальна проблема выделения ROI для хвойных растений, имеющих очень мелкие чешуевидные или узкие игловидные листья. При съемке ауксибласта и хвои сосны фактически невозможно получить «чистые» пиксели. Кроме того, морфология ауксибласта такова, что при его съемке возникают проблемы с качеством изображения из-за разных углов освещения хвои, ее положения и удаления от объектива камеры. Ширина хвои, также может оказаться меньше размера пикселя, используемого гиперспектрального сенсора. Одним из путей решения этой проблемы является поиск оптимальной компоновки побегов на предметном столе.

В связи с этим задачей исследования был поиск оптимальной компоновки побегов для гиперспектральной съемки. Эта задача решается в рамках более широкого исследования – изучение динамики спектральных характеристик хвойных растений в годичном цикле для дистанционного, неинвазивного и оперативного мониторинга их качественного состояния.

1. Материалы и методы

1.1. Объекты исследования

Объектами исследования послужила *Pinus sylvestris* L. Это вечнозеленое дерево высотой 25–40 м. В естественных условиях растёт в Европе и Азии. Имеет большое экологическое значение и широкое практическое применение. Брахибласты несут по две зеленые хвоинки 4–6 см длиной и 1,5–2 мм шириной каждая.

В исследовании вид был представлен пятью образцами (деревьями). Все образцы, произрастают в коллекции голосеменных растений ботанического сада Южного федерального университета (Ботанического сада ЮФУ) в одинаковых условиях, в том числе по солнечному освещению. С каждого образца *P. sylvestris* отбиралось по семь ауксибластов, которые в течение часа доставлялись в лабораторию. Первая проба была отобрана 6 марта 2023 года, последняя проба – 18 октября 2023 года. Всего в этом интервале было проведено 27 отборов проб. В начале эксперимента это были однолетние ауксибласты, с календарной даты начала роста побегов (4 апреля) это стали двухлетние ауксибласты.

Было использовано два варианта компоновки побегов сосны для гиперспектральной съемки. Первый вариант – снимались отдельные ауксибласты. Второй вариант – брахибласты отделялись от ауксибласта, плотно укладывались в несколько рядов. Такая компоновка брахибластов осуществлялась три раза путем их случайного перемешивания. Каждая позиция в первом и втором варианте снималась три раза. Внешний вид компоновки объектов гиперспектральной съемки представлен на рисунке 1.

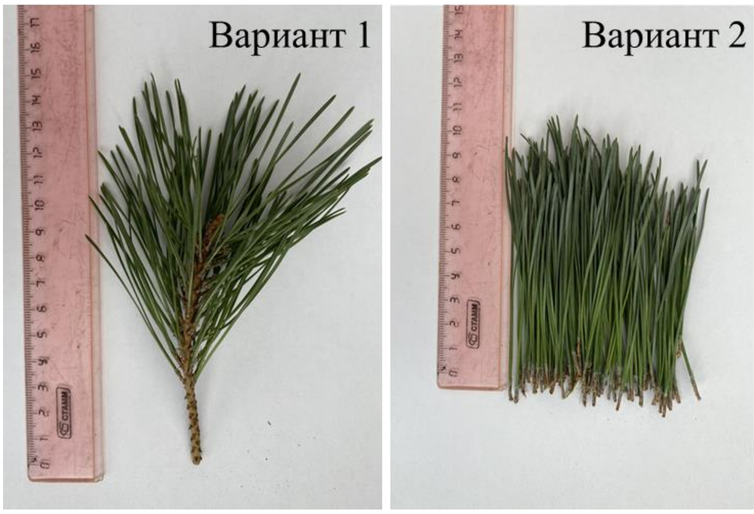

Рисунок 1 – Побеги *P. sylvestris* и варианты их компоновки для гиперспектральной съемки. Вариант 1 – ауксибласт; Вариант 2 – брахибласты, уложенные в несколько рядов.

Очевидно, что при первом варианте компоновки побегов сосны «чистые» пиксели получить сложно. Более перспективным в этом отношении представляется второй вариант компоновки побегов.

1.2. Методика гиперспектральной съемки побегов

Гиперспектральная съемка побегов *P. sylvestris* проводилась в лабораторных условиях. В исследовании использовалась гиперспектральная камера Cubert UHD-185 (Bareth et al., 2015; Aasen et al., 2015). Спектральный диапазон камеры 450–950 нм, количество спектральных каналов – 125, спектральное разрешение – 4 нм. Съемка проводилась при искусственном освещении. Спектральный диапазон искусственных осветителей перекрывал весь диапазон гиперспектральной камеры. Объектив камеры располагался на расстоянии 40 см от объекта и направлялся перпендикулярно ей. Размер пикселя составлял 0.25 см^2. Перед каждой съемкой проводилась калибровка камеры по белому эталону.

1.3. Предварительная обработка данных гиперспектральной съемки.

Для выделения ROI на гиперспектральном снимке был выбран ВИ Carter5 с порогом более 1,4 (Dmitriev et al., 2023). Формула для расчета этого ВИ следующая (Carter, 1994):

$$\mathrm{Carter5} = \frac{R_{695}}{R_{670}} \quad (1)$$

где R – спектральная яркость на определенной длине волны.

Гистограмма распределений значений Carter5 на гиперспектральном снимке представлена на рисунке 2.

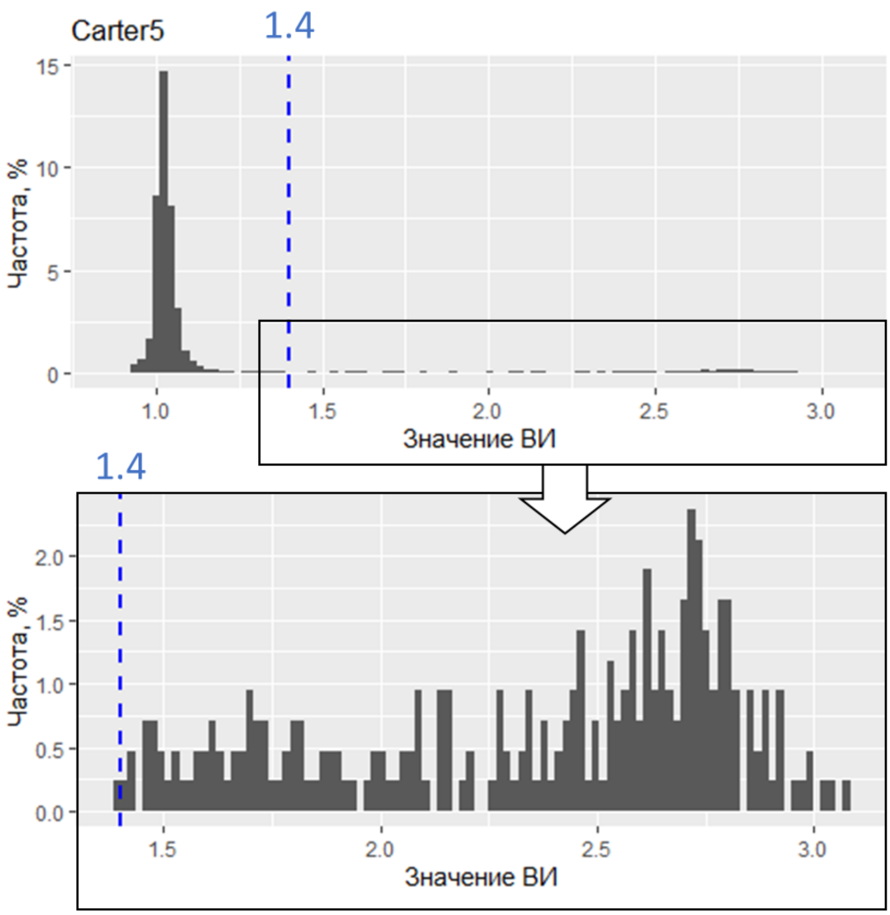

Рисунок 2 – Гистограмма распределений значений Carter5 на гиперспектральном снимке.

На втором этапе была применена морфологическая эрозия со структурирующим элементом размером 3×3 к маске результата пороговой фильтрации по индексу Carter5. Это позволяет избавиться как от изолированных пикселей, так и от граничных пикселей основного объекта.

Визуализированные, через значения нормализованного относительного индекс растительности (NDVI), объекты после двухэтапной сегментации представлены на рисунке 3.

Выбор пикселей с выделенного объекта проводили автоматически методом повторного случайного отбора. Спектральные профили каждого пикселя были сглажены с помощью фильтра Савицкого–Голея. Окно скользящего среднего в фильтре было установлено на 15 пунктов. В результате гиперспектральной съемки были получены значения 125 спектральных каналов.

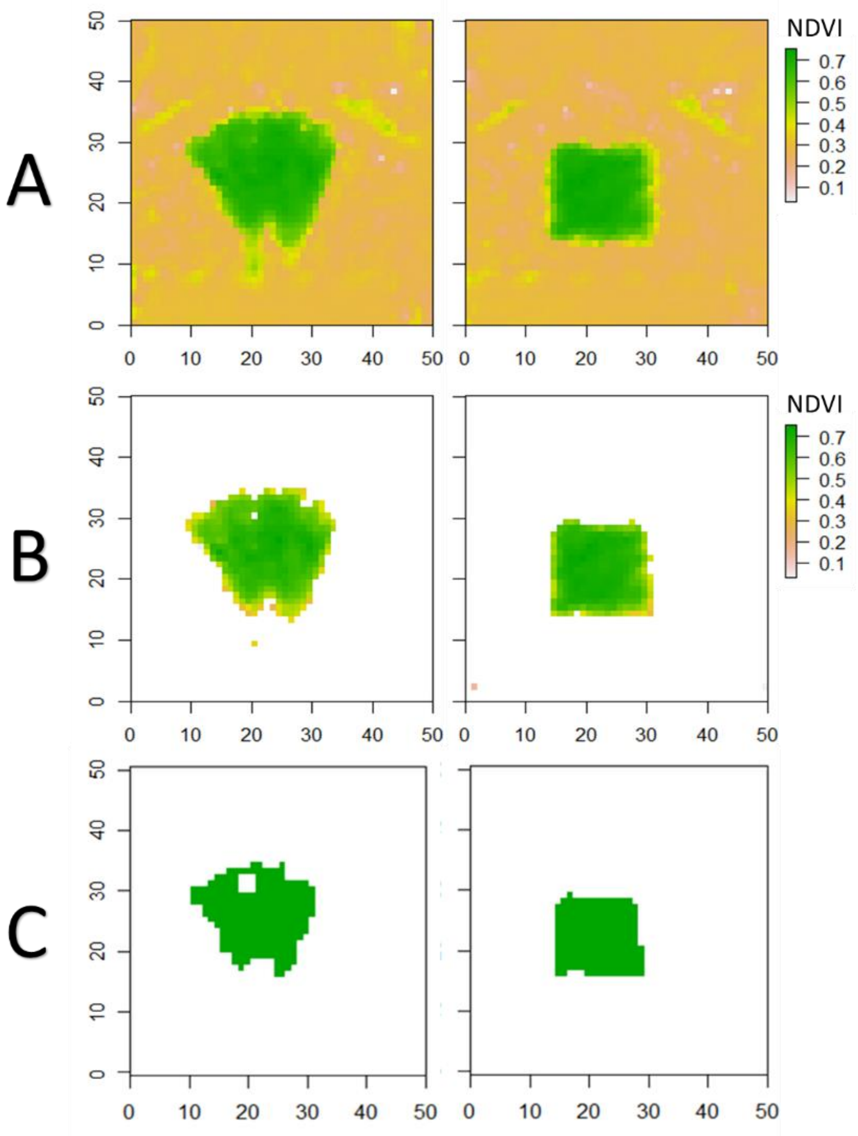

Рисунок 3 – Двухэтапная сегментация гиперспектрального снимка: A – визуализированные значения NDVI по пикселям на гиперспектральном снимке; B – результат пороговой фильтрации по индексу Carter5 > 1,4; C – результат применения морфологической операции эрозия.

1.4. Расчет ВИ

Ранее было установлено (D'Odorico et al., 2020; Wong et al., 2019; Gamon et al., 2016; Springer et al., 2017), что фенология хвойных растений хорошо описывается индексами фотохимического отражения (PRI) и отношения содержания хлорофиллов к каротиноидам (CCI).

По этой причине они были рассчитаны и использованы в этом исследовании. Кроме этих ВИ был рассчитан, традиционно применяющийся для описания фенологии растений, NDVI (Kowalski et al., 2020; Snyder et al., 2019; Wang et al., 2020; Lebrini et al., 2021; Swanson, 2021; Thapa et al., 2021).

Формулы для расчетов ВИ приведены ниже.

$$\mathrm{NDVI} = \frac{R_{900} - R_{680}}{R_{900} + R_{680}} \qquad (2)$$

$$\mathrm{PRI} = \frac{R_{528} - R_{570}}{R_{528} + R_{570}} \qquad (3)$$

$$\mathrm{CCI} = \frac{R_{528} - R_{645}}{R_{528} + R_{645}} \qquad (4)$$

1.5. Обработка данных гиперспектральной съемки

Задачей математического анализа была оценка влияния вариантов компоновки объектов гиперспектральной съемки:

- на характер распределения значений вегетационных индексов (средняя арифметическая, медиана, показатели асимметрии и эксцесса, тип распределения данных);
- на соответствие сезонной динамики эмпирических данных полиномиальным линиям регрессий.

Обработку данных проводили в среде для статистических расчетов R (R Core Team).

2. Результаты и обсуждение

2.1 Оценка характера распределения значений вегетационных индексов в зависимости от варианта съемки

Среднее количество пикселей на одну календарную дату съемки в первом и втором варианте компоновки побегов после двухэтапной сегментации составило 440 и 180 соответственно.

Для оценки характера распределения значений PRI, CCI и NDVI были рассчитаны показатели асимметрии (As) и эксцесса (E) для каждой календарной даты гиперспектральной съемки (Рисунок 4).

Значения рассчитанных статистик существенно меняются в зависимости от даты съемки, что может быть связано с действием на объект исследования, как климатических факторов, так и факторов неучтенных в эксперименте. Различия показателей As и E между вариантами компоновки побегов сосны также оказались зависимыми от ВИ. Для PRI и CCI уровень эксцесса во втором варианте компоновки снижается (в некоторые календарные даты до нуля) и его варьирование по датам становится меньше. У NDVI – наоборот, значение эксцесса во втором варианте компоновки становится больше, а его варьирование по датам также становится меньше (Рисунок 4).

Распределение значений NDVI и CCI имеют высокий отрицательный (правосторонний) показатель асимметрии. При этом у NDVI для второго варианта показатель асимметрии выше, чем для первого варианта. Это дает основание утверждать, что правосторонняя асимметрия является характерной особенностью распределения значений NDVI. Распределение значений CCI также имеет правостороннюю асимметрию, ее значения во втором варианте компоновки снижаются. Хорошие результаты получены для PRI – при втором варианте компоновки побегов значения показателя асимметрии приближаются к нулю. Поэтому второй вариант компоновки побегов следует считать оптимальным для PRI. Это можно связать с тем, что во втором варианте компоновки побегов решаются такие проблемы съемки, как смешанные пиксели, угол освещения, положение и удаление хвои от объектива камеры.

Таким образом компоновка побегов в виде стопки брахибластов (второй вариант) изменяет уровень асимметрии и эксцесса и снижает варьирование этих статистик по датам съемки. Поскольку второй вариант компоновки побегов увеличивает количество «чистых» пикселей, то проблема существенного варьирования показателей асимметрии и эксцесса может быть связана с «качеством» отобранных пикселей.

Оценка распределения значений ВИ на соответствие нормальному распределению была проведена с помощью трех тестов: критерий согласия Пирсона, критерий Лиллиефорса, критерий согласия Крамера — Мизеса — Смирнова. Результаты тестов представлены в таблице 1.

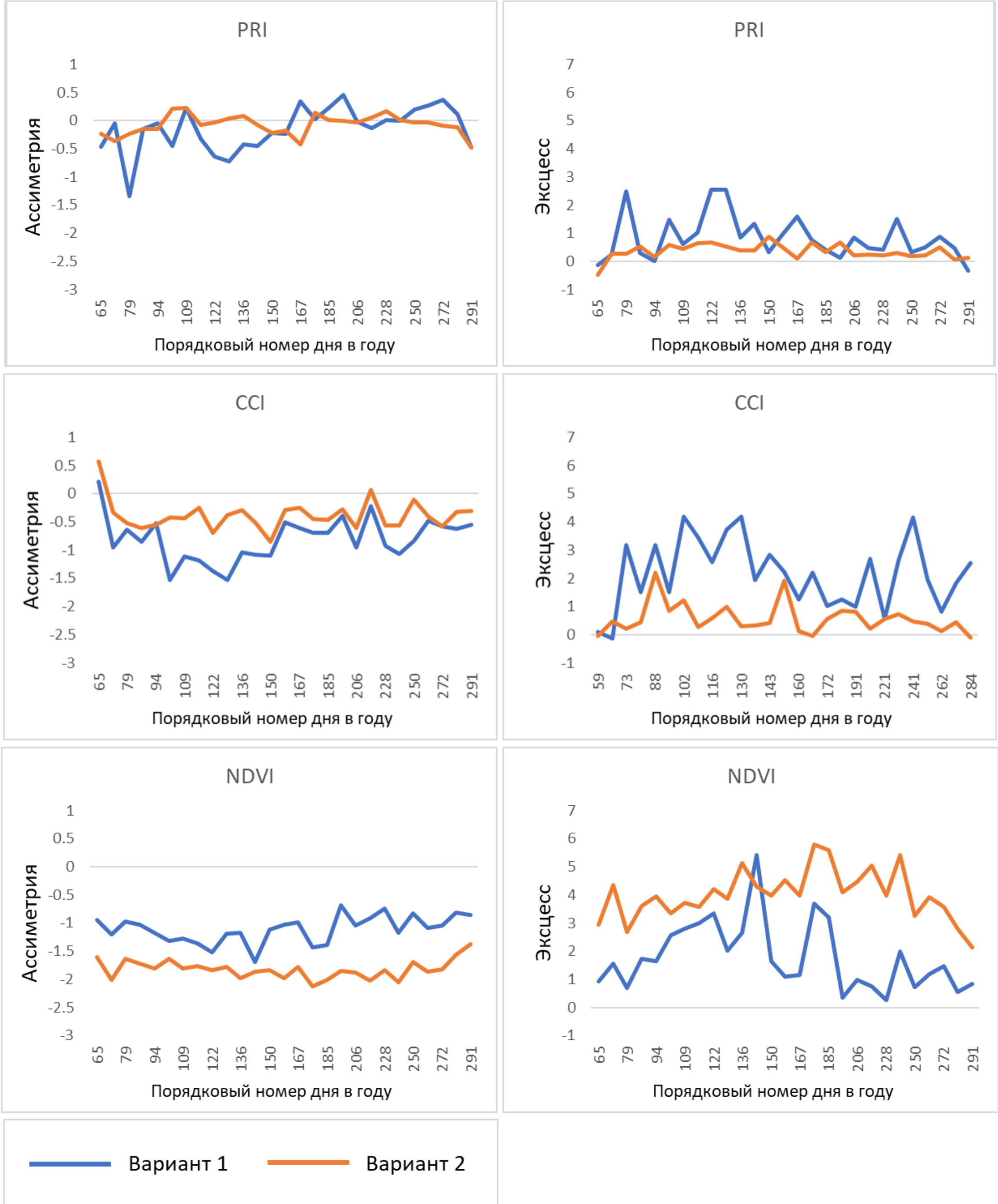

Рисунок 4 – Показатели эксцесса и асимметрии распределений значений ВИ по датам гиперспектральной съемки в зависимости от вариантов компоновки побегов сосны.

Результаты тестирования указывают на то, что распределение значений PRI приближается к нормальному распределению и компоновка побегов, когда брахибласты плотно укладывались в несколько рядов (второй вариант), улучшает эту характеристику. Значения индексов NDVI и CCI не распределяются по нормальному закону. Формальная причина этого – наличие правосторонней асимметрии и положительного эксцесса.

Таблица 1 – Результаты проверки нормальности распределений ВИ

Порядковый номер дня в году	Критерий согласия Пирсона						Критерий Лиллиефорса						Критерий согласия Крамера — Мизеса — Смирнова					
	NDVI		PRI		CCI		NDVI		PRI		CCI		NDVI		PRI		CCI	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
73	0.00	0.00	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00
79	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
88	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
94	0.00	0.00	0.05	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.02	0.00	0.00
102	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
109	0.00	0.00	0.03	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
116	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
122	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
130	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
136	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
143	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00
150	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
160	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
167	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
172	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
185	0.00	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00
191	0.00	0.00	0.00	0.01	0.28	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
206	0.00	0.00	0.15	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
221	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00
228	0.00	0.00	0.38	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
241	0.00	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.00	0.00
250	0.00	0.00	0.06	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
262	0.00	0.00	0.04	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00
272	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
284	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
291	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Примечание: зеленым выделены значения уровня значимости p>0,05

2.2. Оценка эмпирических и полиномиальных линий регрессий средних значений вегетационных индексов

В связи с тем, что распределение значений PRI близко к нормальному типу, а NDVI и CCI нет, средние значения первого индекса были выражены через среднюю арифметическую, а второго и третьего – через медиану (Рисунок 5).

Влияние компоновки побегов на средние значения различается в зависимости от вегетационного индекса. Так, при втором варианте компоновки побегов среднее значение NDVI значительно выше, чем в первом варианте, во все календарные даты съемки. Обратное соотношение между средними значениями по вариантам наблюдается для PRI. Среднее значение индекса CCI не зависит от варианта компоновки побегов сосны.

Полиномиальные линии регрессий сезонной динамики средних значений NDVI и PRI хотя и различаются по вариантам уровнем, но фактически параллельны, что следует из рисунка 4 и уравнений регрессии. Таким образом, независимо от варианта съемки, регрессии сезонной динамики вегетационных индексов одинаково отражали тренд. Коэффициент детерминации (R^2), который измеряет, насколько хорошо уравнение регрессии моделирует эмпирические точки данных, мало отличается по вариантам для всех трех вегетационных индексов. Для NDVI и PRI модели имеют среднюю точность, для CCI – низкую.

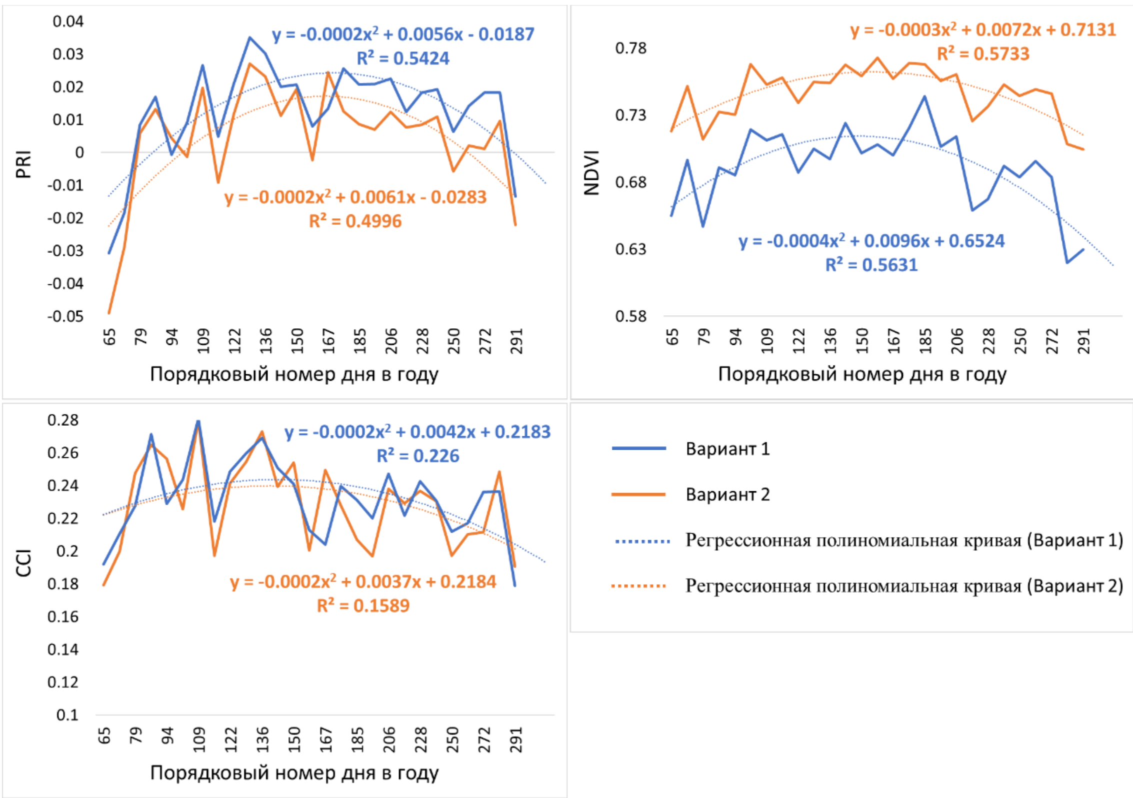

Рисунок 5 – Эмпирические и полиномиальные линии регрессий средних значений ВИ по вариантам компоновки побегов сосны.

3. Обсуждение

По результатам исследования следует обсудить три вопроса:

- характер распределения значений ВИ;
- влияние компоновки побегов сосны на значения ВИ;
- варьирование значений ВИ по календарным датам периода вегетации.

3.1. Характер распределения значений ВИ

Характер распределения значений признака во многом определяет выбор методов математической обработки данных. Так, применение параметрических методов, например, таких как дисперсионный анализ, факторный и регрессионный анализы, *t*-тесты, требуют, чтобы значения признака распределялись по нормальному закону. В этом случае для описания признака можно использовать среднее арифметическое и дисперсию. При отклонении распределения признака от нормального закона следует применять непараметрические статистики. Для его описания используют медиану и квартили. В исследовании показано, что значения PRI в большинство дат съемки для второго варианта компоновки побегов распределяются по нормальному закону, тогда как распределения NDVI и CCI имеют правостороннюю асимметрию и положительный эксцесс (рисунок 4, 6). Поэтому сезонная динамика PRI может быть выражена через среднюю арифметическую, сезонная динамика NDVI и CCI – через медиану. Проведение предварительного теста на характер распределения значений ВИ является важным, так, например, сезонная динамика NDVI, выраженная в виде эмпирической линии регрессии средней арифметической и медианы, значительно различается по уровню (рисунок 7).

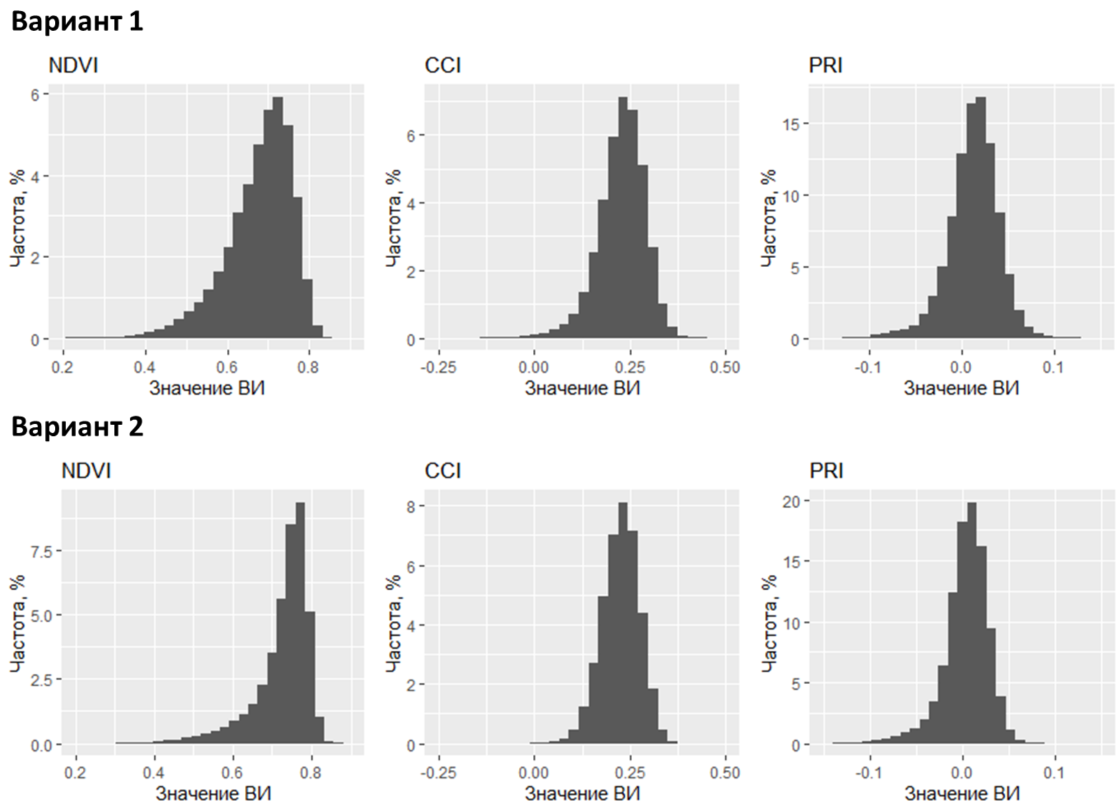

Рисунок 6 – Гистограмма распределений значений вегетационных индексов PRI, NDVI и CCI побегов сосны за все календарные даты съемок.

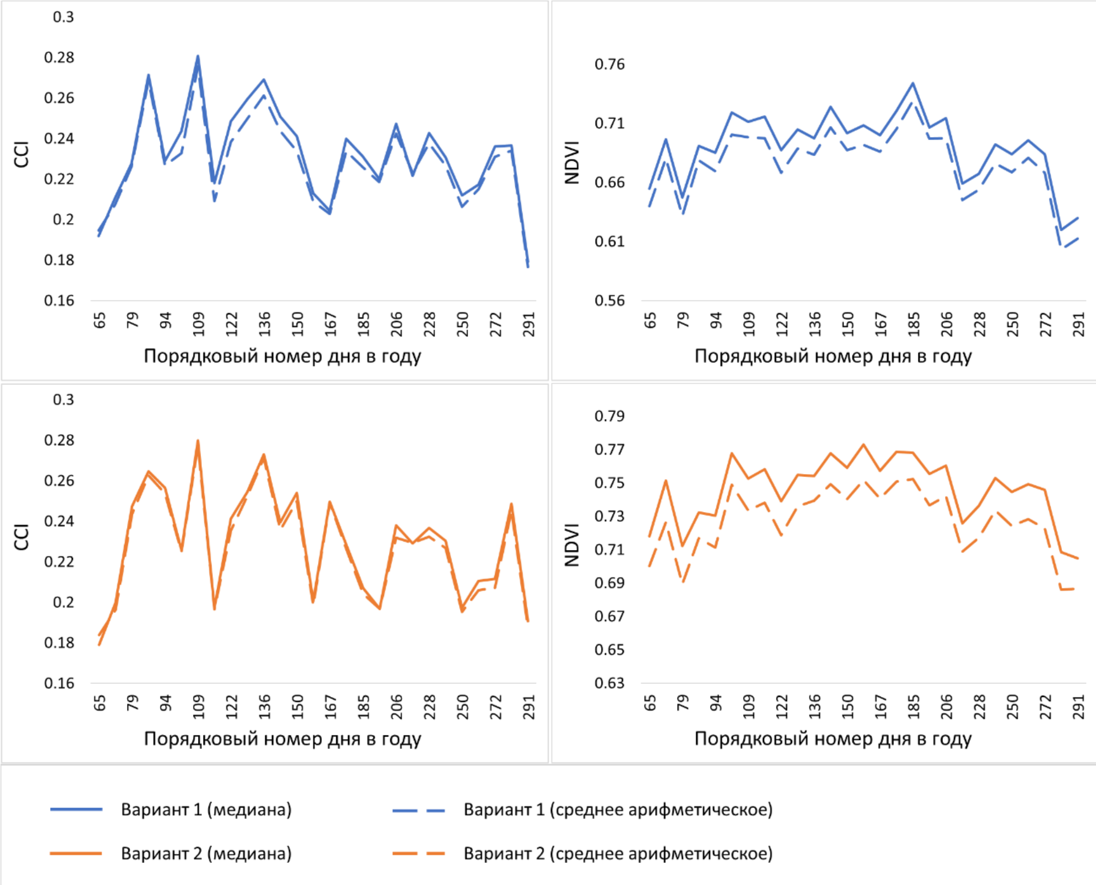

Рисунок 7 – Сезонные динамики CCI и NDVI, выраженные через среднюю арифметическую и медиану.

В ранних исследованиях отмечалось, что распределения значений NDVI и некоторых других ВИ близки к нормальному распределению (Tony et al., 1994). Однако в ряде последних работ показано, что NDVI не распределяется по нормальному закону (Raeva and Karel, 2020; Martín-Sotoca et al., 2019; Bounouh et al., 2020). При этом, в работах по дистанционной фенологии растений на основе NDVI, как правило, не приводятся результаты тестов на нормальное распределение значений и не указывается регрессии каких статистик (средней арифметической или медианы) описывают фенологию объекта (Kowalski et al., 2020; Snyder et al., 2019; Wang et al., 2020; Venkatappa et al., 2020; Lebrini et al., 2021; Swanson, 2021; Thapa et al., 2021).

В целом сезонные регрессии средней арифметической и медианы значений NDVI и CCI параллельны и одинаково отражают характер процесса (Рисунок 7). Однако, сроки начала и окончания вегетации (эти фенологические фазы широко используются в дистанционной фенологии), полученные на основании моделей сезонной динамики средних арифметических и медианы ВИ, могут существенно различаться.

3.2 Влияние компоновки побегов сосны на значения ВИ

Влияние вариантов компоновки побегов сосны на средние значения ВИ оказалось неоднозначным (рисунок 5). Средние значения NDVI во временном ряду в каждую календарную дату при втором варианте компоновки побегов были выше, тогда как средние значения PRI, наоборот, были ниже. Полиномиальные линии регрессий временных рядов ВИ двух вариантов компоновки побегов при этом параллельны. Среднее значения CCI не зависит от варианта компоновки побегов сосны.

В данном случае, вероятно, имеет место эффект разной чувствительности ВИ к факторам, которые могут повлиять на их значение (наличие смешанных пикселей, угол освещения, положение и удаление объекта от объектива камеры и др.). Наличие смешанных пикселей во многих исследованиях (Burchard-Levine et al., 2021; Feng and Fan, 2021; Xu et al., 2016; Raj and Minz, 2020) характеризуется как важный фактор, влияющий на результат ДЗЗ. В настоящее время существует более 100 ВИ (Xue and Su, 2017), и далеко не по всем из них можно найти информацию об их чувствительности к наличию на спектральном снимке смешанных пикселей.

3.3 Варьирование значений ВИ по календарным датам периода вегетации

Временные ряды средних значений ВИ, использованных в данной работе, значительно варьируют по датам (Рисунок 5). Особенно это относится к CCI. Известно, что во временных рядах значений ВИ, полученных бортовыми сенсорами спутников, присутствует шум из-за атмосферных возмущений, облачности, отказа датчиков, неблагоприятной геометрии обзора поверхности и т. д. (Li, S. et al., 2021; Geng et al., 2014; Somvanshi and Kumari, 2020; Gonsamo and Pellikka, 2012). Это, соответственно приводит к значительным колебаниям средних значений ВИ во временных рядах, не связанных с изменением изучаемого фактора.

Причины значительных колебаний средних значений ВИ во временных рядах, полученных в лабораторных условиях для авторов публикации не ясны. Для этого необходимо проведение дополнительных исследований, в частности связывающих значения ВИ с физиологическим состоянием растений на момент съемки.

4. Заключение

Способ компоновки побегов для гиперспектральной съемки в виде отдельного ауксибласта (первый вариант) и брахибластов, уложенных плотно в несколько рядов (второй вариант), существенно повлиял на средние значения NDVI, меньше повлиял на средние значения PRI и фактически не повлиял на средние значения CCI. При этом полиномиальные линии регрессий NDVI и PRI в первом и втором вариантах параллельны, а для CCI совпадают. Поэтому вариант компоновки побегов является не принципиальным для определения тренда временного ряда. Это может иметь значение для определения по временным рядам спектральных характеристик метрик фенологического развития сосны, таких как начало и завершение периода вегетации.

Значения NDVI и CCI в обеих вариантах не распределяются по нормальному закону. Второй вариант компоновки побегов приближает распределение значений PRI к нормальному типу. Поэтому сезонная динамика сосны может быть описана в виде временных рядов медианы NDVI и CCI и временных рядов средней арифметической PRI.

Вариант компоновки побегов не влияет на варьирование средних значений ВИ по датам, но существенно влияет на варьирование показателей асимметрии и эксцесса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00390, https://rscf.ru/project/23-24-00390/, в Южном федеральном университете.

Литература

1. Aasen, H. et al., 2015. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. JPRS. 108, 245-259. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002
2. Abbas, S., Peng, Q., Wong, M. S. et al., 2021. Characterizing and classifying urban tree species using bi-monthly terrestrial hyperspectral images in Hong Kong. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 177, 204–216. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.003
3. Adão, T., Hruška, J., Pádua, L. et al., 2017. Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. Remote Sens. 9, 1110. https://doi.org/10.3390/rs9111110
4. Bareth, G. et al., 2015. Low-weight and UAV-based hyperspectral full-frame cameras for monitoring crops: Spectral comparison with portable spectroradiometer measurements. Photogramm. Fernerkundung, Geoinf. 69-79. https://doi.org/10.1127/PFG/2015/0256
5. Behmann, J., Steinrücken, J., Plümer, L., 2014. Detection of early plant stress responses in hyperspectral images, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 93, Pages 98-111, ISSN 0924-2716. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.016
6. Bounouh, O., Tarquis, A.M., Essid H. et al., 2020. "Normality of NDVI Time Series Under Scope: Case Study of Various Plant Types of Tunisia, A Mediterranean Country," 2020 Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS), Tunis, Tunisia, pp. 355-358. https://doi.org/10.1109/M2GARSS47143.2020.9105227

7. Burchard-Levine, V., Nieto, H., Riaño, D. et al., 2021. The effect of pixel heterogeneity for remote sensing based retrievals of evapotranspiration in a semi-arid tree-grass ecosystem, Remote Sensing of Environment, Volume 260, 112440, ISSN 0034-4257. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112440
8. Carter, G.A., 1994. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. Int. J. of Remote Sens. 15(3), 697–703. https://doi.org/10.1080/01431169408954109
9. Clark, M.L., Roberts, D.A., Clark, D.B., 2005. Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales, Remote Sensing of Environment, Volume 96, Issues 3–4, Pages 375-398, ISSN 0034-4257. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.009
10. Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S.F. et al., 2021. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing—A Systematic Review. Part II: Research Applications. Forests 12, 397. https://doi.org/10.3390/f12040397
11. Dmitriev, P.A., Kozlovsky, B.L., Dmitrieva, A.A. et al., 2023. Classification of invasive tree species based on the seasonal dynamics of the spectral characteristics of their leaves. Earth Sci Inform. https://doi.org/10.1007/s12145-023-01118-0
12. D'Odorico, P., Besik, A., Wong, C.Y.S. et al., 2020. High-throughput drone-based remote sensing reliably tracks phenology in thousands of conifer seedlings. New Phytol. 226(6):1667-1681. https://doi.org/10.1111/nph.16488
13. Dudeni-Tlhone, N., Mutanga, O., Debba, P. et al., 2023. Distinguishing Tree Species from In Situ Hyperspectral and Temporal Measurements through Ensemble Statistical Learning. Remote Sens. 15, 4117. https://doi.org/10.3390/rs15174117
14. Feng, L., Wu, B., He, Y. et al., 2021. Hyperspectral imaging combined with deep transfer learning for rice disease detection. Front. Plant Sci. 12:693521. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.693521
15. Feng, S. and Fan, F., 2021. "Analyzing the Effect of the Spectral Interference of Mixed Pixels Using Hyperspectral Imagery," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 14, pp. 1434-1446. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3045712
16. Gamon, J.A., Huemmrich, K.F., Wong, C.Y.S. et al., 2016. A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 113: 13087–13092.
17. Gao, J., Nuyttens, D., Lootens, P. et al., 2018. Recognising weeds in a maize crop using a random forest machine-learning algorithm and near-infrared snapshot mosaic hyperspectral imagery. Biosyst. Eng. 170, 39–50. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.006
18. Geng, L., Ma, M., Wang, X. et al., 2014. Comparison of Eight Techniques for Reconstructing Multi-Satellite Sensor Time-Series NDVI Data Sets in the

Heihe River Basin, China. Remote Sens. 6, 2024-2049. https://doi.org/10.3390/rs6032024
19. Gonsamo, A., Pellikka, P., 2012. The sensitivity based estimation of leaf area index from spectral vegetation indices, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 70, pp. 15-25. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.03.009
20. Große-Stoltenberg, A., Hellmann, C., Werner, C. et al., 2016. Evaluation of Continuous VNIR-SWIR Spectra versus Narrowband Hyperspectral Indices to Discriminate the Invasive Acacia longifolia within a Mediterranean Dune Ecosystem. Remote Sens. 8, 334. https://doi.org/10.3390/rs8040334
21. Guo, K., Li, X., Du, H. et al., 2023. Wavelet Vegetation Index to Improve the Inversion Accuracy of Leaf V^{25}_{cmax} of Bamboo Forests. Remote Sens. 15, 2362. https://doi.org/10.3390/rs15092362
22. Harrison, D., Rivard, B. and Sanchez-Azofeifa, A., 2018. Classification of tree species based on longwave hyperspectral data from leaves, a case study for a tropical dry forest. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 66, 93–105. https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.11.009
23. Hatfield, J.L., Gitelson, A.A., Schepers, J.S. et al., 2008. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. Papers in Natural Resources. 257. https://digitalcommons.unl.edu/natrespapers/257
24. Junttila, S., Hölttä, T., Saarinen, N. et al., 2022. Close-range hyperspectral spectroscopy reveals leaf water content dynamics, Remote Sensing of Environment, Volume 277, 113071, ISSN 0034-4257. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113071
25. Kowalski, K., Senf, C., Hostert, P. et al., 2020. Characterizing spring phenology of temperate broadleaf forests using Landsat and Sentinel-2 time series. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 92, 102172. https://doi.org/10.1016/j.jag. 2020.102172
26. Lebrini, Y., Boudhar, A., Laamrani, A. et al., 2021. Mapping and Characterization of Phenological Changes over Various Farming Systems in an Arid and Semi-Arid Region Using Multitemporal Moderate Spatial Resolution Data. Remote Sens. 13, 578. https:// doi.org/10.3390/rs13040578
27. Lechner, A., Foody, G., Boyd, D., 2020. Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management. One Earth. 2. 405-412. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001
28. Li, J., Pei, Y., Zhao, S. et al., 2020. A Review of Remote Sensing for Environmental Monitoring in China. Remote Sens. 12, 1130. https://doi.org/10.3390/rs12071130
29. Li, S., Xu, L., Jing, Y. et al., 2021. High-quality vegetation index product generation: A review of NDVI time series reconstruction techniques, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,

Volume 105, 102640, ISSN 1569-8432. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102640

30. Li, Y., Al-Sarayreh, M., Irie, K. et al., 2021. Identification of Weeds Based on Hyperspectral Imaging and Machine Learning. Front. Plant Sci. 11:611622. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.611622
31. Liu, K-H., Yang, M-H., Huang, S-T. et al., 2022. Plant Species Classification Based on Hyperspectral Imaging via a Lightweight Convolutional Neural Network Model. Front. Plant Sci. 13:855660. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.855660
32. Long, Y., Rivard, B., Sanchez-Azofeifa, A. et al., 2021. Identification of spectral features in the longwave infrared (LWIR) spectra of leaves for the discrimination of tropical dry forest tree species, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 97, 102286, ISSN 1569-8432. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102286
33. Ma, D., Wang, L., Zhang, L. et al., 2020. Stress Distribution Analysis on Hyperspectral Corn Leaf Images for Improved Phenotyping Quality. Sensors 20, 3659. https://doi.org/10.3390/s20133659
34. Martín-Sotoca, J.J., Saa-Requejo, A., Moratiel, R. et al., 2019. Statistical analysis for satellite-index-based insurance to define damaged pasture thresholds, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 19, 1685–1702. https://doi.org/10.5194/nhess-19-1685-2019
35. Mirzaei, M., Marofi, S., Abbasi, M. et al., 2019. Scenario-based discrimination of common grapevine varieties using in-field hyperspectral data in the western of Iran. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 80, 26–37. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.002
36. Nasiri, A., Taheri-Garavand, A., Fanourakis, D. et al., 2021. Automated grapevine cultivar identification via leaf imaging and deep convolutional neural networks: a proof-of-concept study employing primary iranian varieties. Plants 10:1628. https://doi.org/10.3390/plants10081628
37. Pandey, P., Ge, Y., Stoerger, V. et al., 2017. High Throughput In vivo Analysis of Plant Leaf Chemical Properties Using Hyperspectral Imaging. Front. Plant Sci. 8:1348. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01348
38. Raeva, P., Karel, P.Jr., 2020. GEOSPATIAL AND TEMPORAL ANALYSES OF RURAL AREA FOR VEGETATION ANALYSIS. Stavební obzor - Civil Engineering Journal. 29. 246-254. https://doi.org/10.14311/CEJ.2020.02.0021
39. Raj, A., Minz, S., 2020. Game Theory Based Pixel Approximation for Remote Sensing Imagery, Applied Soft Computing, Volume 93, 106365, ISSN 1568-4946. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106365
40. Schmitter, P., Steinruecken, J., Roemer, C. et al., 2017. Unsupervised domain adaptation for early detection of drought stress in hyperspectral images.

ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 131, 65–76. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.003

41. Sinha, P., Robson, A., Schneider, D. et al., 2020. The potential of in-situ hyperspectral remote sensing for differentiating 12 banana genotypes grown in Uganda. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 167, 85–103. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.023
42. Snyder, K.A., Huntington, J.L., Wehan, B.L. et al., 2019. Comparison of Landsat and Land-Based Phenology Camera Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for Dominant Plant Communities in the Great Basin. Sensors, 19, 1139.
43. Somvanshi, S.S., Kumari, M., 2020. Comparative analysis of different vegetation indices with respect to atmospheric particulate pollution using sentinel data, Applied Computing and Geosciences, Volume 7, 100032, ISSN 2590-1974. https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100032
44. Springer, K.R., Wang, R., Gamon, J.A., 2017. Parallel Seasonal Patterns of Photosynthesis, Fluorescence, and Reflectance Indices in Boreal Trees. Remote Sens. 9, 691. https://doi.org/10.3390/rs9070691
45. Sun, J., Zhou, X., Hu, Y. et al., 2019. Visualizing distribution of moisture content in tea leaves using optimization algorithms and NIR hyperspectral imaging. Comput. Electron. Agric. 160, 153–159. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.004
46. Swanson, D.K., 2021. Start of the Green Season and Normalized Difference Vegetation Index in Alaska's Arctic National Parks. Remote Sens. 13, 2554. https://doi.org/10.3390/rs13132554
47. Thapa, S., Garcia Millan, V.E., Eklundh, L., 2021. Assessing Forest Phenology: A Multi-Scale Comparison of Near-Surface (UAV, Spectral Reflectance Sensor, PhenoCam) and Satellite (MODIS, Sentinel-2) Remote Sensing. Remote Sens. 13, 1597. https://doi.org/10.3390/rs13081597
48. Tony K., 1994. Yanev, Theoretical distributions of vegetation indices and their approximation by normal distributions, Acta Astronautica, Volume 32, Issue 6, Pages 463-470, ISSN 0094-5765, https://doi.org/10.1016/0094-5765(94)90047-7
49. Ubbens, J.R. and Stavness, I., 2017. Deep plant phenomics: a deep learning platform for complex plant phenotyping tasks. Front. Plant Sci. 8:1190. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01190
50. Venkatappa, M., Anantsuksomsri, S., Castillo, J.A. et al., 2020. Mapping the Natural Distribution of Bamboo and Related Carbon Stocks in the Tropics Using Google Earth Engine, Phenological Behavior, Landsat 8, and Sentinel-2. Remote Sens. 12, 3109. https://doi.org/10.3390/rs12183109
51. Wang, X., Zeng, Y., Wang, S. et al., 2015. Identification of Conifer Species Based on Laboratory Spectroscopy and an Artificial Neural Network. Journal of Software Engineering, 9: 362-372.

52. Wang, X., Zhou, Y., Wen, R. et al., 2020. Mapping Spatiotemporal Changes in Vegetation Growth Peak and the Response to Climate and Spring Phenology over Northeast China. Remote Sens. 12, 3977. https://doi.org/10.3390/rs12233977
53. Williams, D., Karley, A., Britten, A. et al., 2023. Raspberry plant stress detection using hyperspectral imaging. Plant direct. 7. e490. https://doi.org/10.1002/pld3.490
54. Wong, C.Y.S., D'Odorico, P., Bhathena, Y. et al., 2019. Carotenoid based vegetation indices for accurate monitoring of the phenology of photosynthesis at the leaf-scale in deciduous and evergreen trees. Remote Sensing of Environment 233: e111407.
55. Xu, C., Liu, Z., Hou, G., 2016. Simulation of the Impact of a Sensor's PSF on Mixed Pixel Decomposition: 1. Nonuniformity Effect. Remote Sens. 8, 437. https://doi.org/10.3390/rs8050437
56. Xue, J., Su, B., 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. Journal of Sensors. 2017. 1-17. https://doi.org/10.1155/2017/1353691
57. Yang, R., Kan, J., 2022. Classification of Tree Species in Different Seasons and Regions Based on Leaf Hyperspectral Images. Remote Sens. 14, 1524. https://doi.org/10.3390/rs14061524
58. Yuan, S., Song, G., Huang, G. et al., 2022. Reshaping Hyperspectral Data into a Two-Dimensional Image for a CNN Model to Classify Plant Species from Reflectance. Remote Sens. 14, 3972. https://doi.org/10.3390/rs14163972