

Отзыв

официального оппонента

на диссертационную работу на соискание ученой степени кандидата

биологических наук Шурыгина Бориса Михайловича

на тему **«Неинвазивная оценка состояния растительных объектов посредством пространственно-разрешенного анализа их оптических свойств»**

по специальности 1.5.2 – Биофизика (биологические науки)

Среди проблем, порожденных современной цивилизацией, важное место занимают экологические проблемы. Повсеместное загрязнение природной среды промышленными отходами, неправильная агротехника, уничтожение лесов и нарушение почвенного покрова приводят к неуклонному свертыванию генетического многообразия жизни, к нарушению экологического равновесия. Снижение продуктивности растительных сообществ наряду с возрастанием потребностей человека в продовольствии приводит к кризису, который не может быть решен только за счет интенсификации агробιοтехнологий. В связи с этим становится актуальным внедрение комбинированных методов мониторинга и анализа как отдельных растений и монокультур, так и растительных сообществ в масштабе целых экосистем. Решением этих насущных вопросов занимается феномика – раздел физиологии растений, предметом которой являются фенотипы и их детерминанты, связанные с геномом и эпигенетическими факторами (Yang et al., 2020; Zavafer et al., 2023; etc.). Методологической основой феномики служит фенотипирование, преимуществом которого является возможность неинвазивного и дистанционного получения информации о растительных объектах, их пространственно-разрешенных спектральных изображений.

Настоящая работа посвящена поиску подходов к интеграции «традиционных» методов анализа спектральных данных и алгоритмов машинного обучения.

Диссертация Б.М.Шурыгина посвящена изучению оптических характеристик растительных объектов и их связи с физиологическим состоянием в норме и при стрессе, а также в ходе онтогенеза для получения неинвазивной оценки функционального состояния и биохимического состава изученных видов методами, основанными на измерениях их оптических свойств во времени и в пространстве. В качестве объектов исследований были использованы плоды яблони разных сортов и листья растений салата в различном физиологическом состоянии. Работа выполнена методами пространственно-разрешенной оптической спектроскопии, компьютерной обработки изображений и машинного обучения, с проведением биохимического анализа.

В работе впервые дана количественная оценка пространственной гетерогенности содержания пигментов в плодах и листьях, учет которой (гетерогенности) повышает чувствительность неинвазивной оценки пигментного состава по гиперспектральным изображениям. Экспериментально доказано использование вегетационных индексов и спектральных коэффициентов отражения в алгоритмах машинного обучения (на примере детекции повреждений в плодах яблони), и показано преимущество вегетационных индексов в качестве входных параметров. Впервые разработан способ неинвазивного определения глубины зимнего покоя (на примере деревьев яблони), основанный на вейвлет-анализе временных рядов параметров переменной флуоресценции хлорофилла.

Возможность прогнозирования физиологического состояния растительного организма в ответ на действие неблагоприятных факторов среды имеет фундаментальное значение. Выбор биофизически обоснованных характеристик в качестве информативных признаков, рассмотрение алгоритмов машинного обучения как структурных параметров позволяют повысить точность и надежность работы. Важным аспектом практической значимости полученных результатов является целостный подход, основанный на синтезе классических методов оптической спектроскопии растений и современных алгоритмов компьютерного зрения. Такой подход раскрывает новые горизонты для изучения механизмов акклимации, и позволит создать высокопроизводительные и неинвазивные экспресс-методы фенотипирования растений. В целом, на настоящий момент актуальным является выявление индикаторов стрессового состояния растений. Это необходимо для уточнения сведений и дополнения теоретических основ, и также их практического применения как индикационных признаков устойчивости.

Диссертация построена по стандартной схеме и традиционно включает «Введение», «Обзор литературы» (глава 1, состоящая из четырех разделов), «Материалы и методы» (Глава 2), «Результаты и Обсуждение» (Глава 3, состоящая из четырех разделов), и завершающими являются «Заключение», «Выводы», «Список литературы». Работа изложена на 176 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка, 11 таблиц и приложение. Список цитируемой литературы включает 317 наименования.

В **Главе 1** «Обзор литературы» вопросы рассматриваются по разделам (1-4). Раздел 1 включает краткий обзор по фенотипированию растений. Раздел 2 посвящен механизмам адаптации растений к действию стресс-факторов; рассматривается фотозащитная роль пигментов на действие света; особое внимание автор уделил вопросам зимнего покоя растений. В разделе 3 рассмотрены основные пигменты и их роль в жизнедеятельности растений и развитии устойчивости фотосинтетического аппарата к воздействию стресс-факторов, а также трансформации пигментов в процессе онтогенеза. Раздел 4 посвящен вопросам спектроскопии отражения, которые включают описание оптических моделей, построение вегетационных индексов, объяснение алгоритмов машинного обучения для обработки изображений.

Глава 2 «Материалы и методы» включает характеристику объектов исследования, и стратегию их выбора. В качестве объектов исследований использованы растения салата (*Lactuca sativa* var. *crispa* 'Revolution'), трехлетние деревья яблони сорта «Флагман», плоды яблони (*Malus domestica* Borkh.) разных сортов. Дано описание методик деструктивного (биохимического анализа) пигментов и жирных кислот, спектральных измерений, постановки неинвазивных экспериментов. Важное значение уделено использованию параметров флуоресценции в оценке стресс-устойчивости растений. В целом, на настоящий момент актуальным является выявление индикаторов стрессового состояния растений. Это необходимо для уточнения сведений и дополнения теоретических основ, и также их практического применения как индикационных признаков устойчивости.

В Главе 3 «Результаты и обсуждение» представлены основные результаты диссертационной работы, отражающие задачи исследования. Соискателем был проведен (раздел 3.1) мониторинг действия водного стресса (увлажнение/обезвоживание) на растения зеленого салата для оценки степени деградации тканей листа. В ходе деструктивных тестов и биохимического анализа показано, что процесс увядания сопровождается снижением степени насыщенности жирных кислот и высоким разбросом содержания вторичных каротиноидов, хлорофиллов и воды в тканях между растениями внутри одного варианта. Для неинвазивного мониторинга состояния срезанных растений салата были использованы метод изображающей флуориметрии (для интегральной оценки физиологического состояния растений) и гиперспектральные изображения (HRI), основанные на вегетационных индексах (ВИ: CI_{678} и PSRI). В ходе проведенных экспериментов установлено, что наиболее информативным и применимым способом для оценки содержания и стресс-индуцированной трансформации фотосинтетических пигментов является пространственно-разрешенная спектрометрия. Разработанный подход к анализу гиперспектральных изображений нашел применение для мониторинга трансформации пигментов в созревающих плодах яблони (раздел 3.2). В процессе созревания плодов выявлены изменения в форме спектров отражения, соответствующие деградации хлорофилла и накоплению вторичных каротиноидов, в области 550-680 нм. Экспериментальным путем соискателем установлено преимущество подхода по разложению спектральных коэффициентов отражения на вклады отдельных групп пигментов, что предоставляет возможности для неинвазивного фенотипирования плодов, накапливающих антоцианы, для которых применение методов на основе вегетационных индексов неприменимо. В разделе 3.3 представлен сравнительный анализ информативности спектральных и пространственных признаков при использовании машинного обучения. Отрадно отметить, что соискатель удачно составил сводную таблицу (приложение 1) с характеристикой яблок, использованных в эксперименте. Среди классификаторов для зондирования и классификации фруктов по доле поврежденной поверхности плода был выбран RF-

классификатор («случайный лес»), показавший точность и устойчивость, и использующий в качестве входных данных как вегетационные индексы, так и текстурные признаки. Раздел 3.4 посвящен мониторингу зимнего покоя древесных растений методами РАМ-флуориметрии. Наряду с оптическими методами, разработан подход с применением неинвазивных флуориметрических измерений для оценки широкого спектра состояний ФСА в побегах яблони (от нормального функционирования до необратимого низкотемпературного повреждения). В ходе работы Б.М.Шурыгиным на основе экспериментальных данных (параметры индукционных кривых флуоресценции хлорофилла *a*) сделано заключение о пригодности использования временных рядов измерений переменной флуоресценции хлорофилла для оценки глубины покоя древесных растений, а величину тепловой диссипации энергии в пересчете на реакционный центр, DI_0/RC — чувствительного к этому комплексу адаптаций параметра.

В **Заключении** Б.М.Шурыгин свидетельствует о том, что проксимальное пространственно-разрешенное оптическое зондирование представляет собой сдвиг парадигмы в фенотипировании растений. В сравнении с дистанционным, в проксимальном зондировании пространственная гетерогенность служит объектом изучения. В рамках настоящей работы автором показано, что выделение функционально и физиологически однородных зон позволяет выявлять мельчайшие изменения, не обнаруживаемые спектрометрическими методами, при адаптации к условиям внешней среды. Предлагаемый соискателем подход требует накопления большого числа (миллионы и десятки миллионов) параметров, тщательно отобранных в эксперименте. Проведенная соискателем работа представляет собой целостный подход, основанный на синтезе классических методов оптической спектроскопии растений и современных алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения. В целом, применение проксимального пространственно-разрешенного оптического зондирования способствует усовершенствованию исследований механизмов адаптации в растениях и позволяет более эффективно проводить экологический мониторинг путем создания высокопроизводительных, массовых и неинвазивных экспресс-методов фенотипирования растений.

В целом, подведены общие итоги работы, сформулированы основные выявленные закономерности, подчеркнута новизна и значимость результатов. На основании анализа полученных экспериментальных результатов и сопоставления их с ранее опубликованными в литературе данными Б.М.Шурыгиным сформулированы обоснованные **выводы**, которые адекватно отражают результаты и подводят конкретные итоги работы, свидетельствуют о выполнении поставленной цели, задач и положений диссертации, выносимых на защиту.

Материалы диссертации могут быть рекомендованы к использованию в учебном процессе при реализации образовательных программ по направлениям «Биофизика», «Физиология и биохимия растений», а также для дальнейшего развития новых технологий фенотипирования и усовершенствования феномных

платформ. Диссертация Шурыгина Бориса Михайловича «Неинвазивная оценка состояния растительных объектов посредством пространственно-разрешенного анализа их оптических свойств» является завершённым научным исследованием. Автором в полной мере достигнута заявленная цель и решены поставленные для этого задачи. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Замечания и вопросы по содержанию и оформлению работы.

1) В тексте встречаются ошибки, опечатки и неудачные формулировки (с.4: вместо «объективной и информации» следует писать «объективной информации»; с.13: вместо «приводится» следует писать «приводит»; с.15: вместо «резко обрётших» следует писать «резко обретших»; с.66: вместо «...глубокого покоя (б) распускание почек...» следует писать «...глубокого покоя, (б) распускание почек...»; с.80: вместо «в полиэтиленовую плёнку» следует писать «в полиэтиленовой плёнке» и др..

2) Какая статистика (разброс данных) использована в таблицах 4, 5, 6, 9 и на рисунках 24, 27, 32, 38, 40; после знака $\pm$? Стандартное отклонение или ошибка среднего?

3) В Обзоре литературы и далее при обсуждении результатов соискатель часто использует фразу «машинное обучение». Считаю, что это понятие следовало бы раскрыть подробнее.

4) Чем обусловлен выбор объектов (растения салата, растения и плоды яблони)?

5) В каких областях знаний полученные результаты могут найти практическое применение?

Указанные замечания и вопросы не имеют принципиального значения для оценки работы. Соискателю удалось показать важность представленной к защите диссертации. Работа объемная, обладает необходимой научной новизной, теоретической и практической значимостью. Результаты диссертации прошли апробацию на нескольких российских и международных научных конференциях, и опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах.

Соответствие требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Считаю, что диссертационная работа Шурыгина Бориса Михайловича «Неинвазивная оценка состояния растительных объектов посредством пространственно-разрешенного анализа их оптических свойств» по своей актуальности, новизне, теоретической и практической значимости, достоверности и обоснованности выводов, апробации основных положений соответствует требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.5.2 Биофизика (биологические науки) и критериям, определенным пп. 2.1-2.5 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова», а также оформлена согласно требованиям «Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени

кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», и ее автор Шурыгин Борис Михайлович заслуживает присуждения искомой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.2. Биофизика (биологические науки).

Официальный оппонент

Доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (является обособленным подразделением Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»)

ДЫМОВА Ольга Васильевна



«10» февраля 2025 г.

Контактные данные:

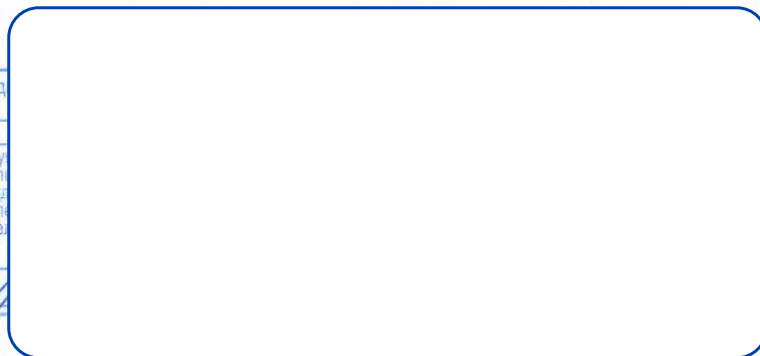
Тел. +8(8212) 24-96-87; e-mail: dymovao@ib.komisc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 03.01.05 — физиология и биохимия растений

Адрес места работы: 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, Коммунистическая ул., 28; Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН; тел.: +7(8212) 24-01-63; e-mail: directorat@ib.komisc.ru

Подпись и сведения о О.В.Дымовой заверяю.

Под
Ведущий
Уральского
государственного
исследовательского
отдела
«



ПРИЗНАНИЕ НАУЧНОСТИ