

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата биологических наук Шурыгина Бориса Михайловича
на тему: «Неинвазивная оценка состояния растительных объектов
посредством пространственно-разрешённого анализа их оптических
свойств» по специальности 1.5.2. Биофизика (биологические науки)**

Актуальность темы

Диссертационная работа Шурыгина Бориса Михайловича «Неинвазивная оценка состояния растительных объектов посредством пространственно-разрешённого анализа их оптических свойств» посвящена разработке новых подходов к проксимальному имиджингу растений, учитывающих фактор пространственного распределения измеряемых оптических показателей.

Развитие глобальных изменений климата и рост антропогенной нагрузки на биосферу приводят к необходимости повышения эффективности культивирования растений; особенно, в нестабильных и неблагоприятных условиях среды. Развитие «точного» земледелия является одним из путей решения такой проблемы; при этом, мониторинг состояния растения является ключевым компонентом точного земледелия.

Оптические методы мониторинга растений, которые, в частности, базируются на измерениях спектральных характеристик отраженного света или измерениях флуоресценции, отличаются неинвазивностью, высокой скоростью и относительно низкой себестоимостью, что делает их перспективным инструментом для оценки состояния растений. Однако, большинство методов оптического мониторинга растения фокусируется на анализе «точечных» показателей, имея низкое пространственное разрешение и в слабой степени учитывая пространственный фактор.

Ограниченный анализ пространственного фактора особенно актуален для проксимального имиджинга растений, так как на малых (менее 10 м) расстояниях до объекта пространственная неоднородность может оказывать очень существенное влияние на результат измерений. При этом, важно

отметить, что проксимальный имиджинг позволяет осуществлять мониторинг состояния отдельных частей и органов растения, что может стать основой для разработки новых показателей состояния растительного организма и значительно повышать эффективность оценки такого состояния.

Таким образом, пространственное распределение оптических показателей является важным и, одновременно, слабо исследованным фактором, влияющим на дистанционный и, особенно, на проксимальный оптический имиджинг растений. С учетом этого, диссертационная работа Шурыгина Б.М., направленная на реализацию комплексного подхода к развитию неинвазивной оценки функционального состояния и биохимического состава растительных объектов на основании измерения их пространственного распределения и временной динамики оптических свойств, имеет очень высокую актуальность.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 176 страницах; к ее основным разделам относится введение, обзор литературы, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, выводы и список литературы. В целом, диссертация построена по классической схеме. Работа включает в себя 53 рисунка, 11 таблиц и одно приложение. Список литературы включает в себя 317 источников и является достаточным; цитируемые источники современны.

В разделе «Введение» обоснована актуальность исследования; четко и понятно сформулирована цель диссертационной работы. Четыре задачи исследования конкретны и соответствуют цели работы. Обзор литературы показывает современное состояние исследований в области диссертации, показывает основные проблемы и ограничения оптического мониторинга растений и, тем самым, подтверждает актуальность темы исследования, включая необходимость анализа роли пространственного фактора для оценки состояния растений оптическими методами.

Раздел «Материалы и методы» подробно описывает основные объекты исследования (растения салата, растения и плоды яблони) и условия их выращивания. Далее излагаются основные использованные в диссертационном исследовании методы, включая как экспериментальные методы (в частности, методы анализа биохимического состава, методы спектральных и флуоресцентных измерений и др.), так и методы анализа получаемых данных (в частности, расчет вегетационных индексов, разложение спектров на компоненты, связанные с конкретными пигментами, методы машинного обучения и др.). Все приведенные методы имеют высокую точность и являются современными. Отдельно показаны использованные статистические методы и методы анализа временных рядов при мониторинге.

Раздел «Результаты и обсуждения» включает в себя четыре смысловых блока. Первый блок описывает развитие методов мониторинга водного стресса с использованием срезанных листьев салата, которые были использованы в качестве простой модельной системы для развития водного дефицита. В рамках первого блока было показано, что «точечная» спектроскопия отраженного света имеет низкую эффективность для выявления повреждения листа вследствие гетерогенности такого повреждения. Напротив, анализ пространственного распределения вегетационных индексов (CI_{678} и PSRI), позволил выделить изменения индексов, обусловленные изменениями содержания хлорофилла и соотношения каротиноидов к хлорофиллам, соответственно; в частности, такой анализ позволил выявить изменения, вызванные развитием водного стресса. Важно также отметить, что спектроскопические измерения оказались более чувствительными к развитию водного стресса, нежели измерения максимального квантового выхода фотосистемы II; изменения последнего были слабо выраженными.

Второй блок результатов был посвящен развитию методов оптического мониторинга трансформации пигментов при созревании плодов (яблок). Для

этого были использованы гиперспектральные изображения яблок и метод разложения спектров на компоненты, связанные с различными пигментами. Было показано, что такой подход позволил наблюдать трансформацию пигментов в плодах без применения деструктивных методов; в частности, он позволил выявить гетерогенность концентрации пигментов в различных участках поверхности плодов.

Третий блок результатов описывает выявление повреждения яблок на основе спектральных и пространственных признаков с использованием машинного обучения. Прежде всего, было показано, что выявление повреждения плодов с помощью гиперспектральных снимков не уступает точности экспертной оценки. Было выявлено сильное влияние взвешивания классов и выборки на эффективность попиксельной классификации при оценке качества плодов. Наконец, была показана значительная избыточность спектральных коэффициентов отражения и возможность повышения эффективности классификации при дополнительном использовании пространственных признаков. В то же время, отдельно пространственная информация (без спектральных характеристик) имела низкую эффективность для выявления повреждений.

Четвертый блок результатов был посвящен мониторингу зимнего покоя древесных растений (яблони) на основании анализа индукционных кривых флуоресценции хлорофилла. Было показано, что анализ временных рядов вариации параметров таких индукционных кривых показывает процессы медленной акклимации растений, включая индукцию глубокого покоя в осенне-зимний период.

Разделы «Заключение» обобщает результаты диссертационной работы и показывают дальнейшие перспективы их использования. В частности, отмечается важность полученных результатов для развития высокопроизводительных, массовых и неинвазивных экспресс-методов оценки акклимации растений, что может быть использовано как инструмент для фенотипирования.

Выводы полностью обоснованы результатами исследования и соответствуют положениям, выносимым на защиту. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Научная новизна и практическая значимость работы

Диссертантом впервые продемонстрирована возможность количественной оценки пространственной неоднородности содержания пигментов в плодах и листьях, а также неоднородность органов растения по темпам созревания и старения. Впервые выявлено, что учет такой неоднородности повышает эффективность оценки пигментного состава на основании гиперспектрального имиджинга. Предложены методы анализа пространственного распределения оптических характеристик, позволяющие оценить состояние растений и их органов.

Показан ряд подходов, повышающих эффективность использования машинного обучения для оценки состояния плодов (на примере повреждения яблок), включая использование вегетационных индексов для такого обучения и учет пространственного распределения. Также выявлена возможность эффективного использования мультиспектральных камер вместо гиперспектральных для оценки такого состояния.

Разработан метод определения глубины зимнего покоя древесных растений (на примере яблони), который включает в себя вейвлет-анализ временных рядов вариации параметров переменной флуоресценции хлорофилла.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность полученных научных результатов не вызывает сомнения. Работы выполнены на высоком научно-методическом уровне с применением современных экспериментальных методов исследования биофизических характеристик растений и плодов (в частности, спектроскопия отраженного света и анализ индукционных кривых

флуоресценции), а также современных методов анализа полученных данных (в частности, машинное обучение, спектральный анализ и многие другие).

Полученные в диссертации результаты опубликованы в 11 статьях, включая статьи в ведущих международных изданиях; доложены на международных и всероссийских конференциях. Диссертантом получен один патент и два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ в области диссертационного исследования.

Диссертационная работа Шурыгина Бориса Михайловича «Неинвазивная оценка состояния растительных объектов посредством пространственно-разрешённого анализа их оптических свойств» производит очень хорошее впечатление. В то же время, при ее анализе возникает несколько небольших вопросов и комментариев, ответы на которые могут представлять интерес для понимания роли пространственного распределения оптических свойств в оценке состояния растений.

1. В ряде случаев, авторы использовали искусственное освещение; в том числе, одновременное освещение от источников с разными спектрами (исследование листьев салата, Рис. 19). Каким образом при анализе пространственного распределения устранялось влияние возможной спектральной неоднородности освещения различных участков листа?

2. На странице 86 выдвигается гипотеза о стратегии выживания растения, которое при водном дефиците «жертвует» частью листа, сохраняя при этом активность оставшейся части. Эта гипотеза выглядит крайне интересной и перспективной, но возникает вопрос – нельзя ли объяснить возникающую неоднородность просто неравномерной потерей воды в центре и у краев листа? Так в центральную часть листа может поступать вода из остатка основания; в то время как до краев листа эта вода может доходить очень ограниченно. В этом случае, становится открытым вопрос – является ли выявленный эффект результатом специальной стратегии растения или простым следствием анатомии листа?

3. Авторы неоднократно отмечают использование метода РАМ-флуориметрии, но скорее используют анализ индукционных кривых с использованием ОЛР-теста. Формализм этого анализа отличается от формализма при использовании РАМ-метода. Возможно, здесь есть некоторая неоднозначность терминов.

4. Индексы, описанные уравнениями (7) и (8) выглядят очень близкими по смыслу. В чем отличие между ними? Почему были использованы два варианта индекса?

5. В разделе 2.4.1, термин «потенциальный максимальный фотохимический квантовый выход» кажется не очень удачным. Обычно, F_v/F_m обозначают либо как потенциальный квантовый выход, либо как максимальный квантовый выход.

Отмеченные вопросы и комментарии касаются частных вопросов и не снижают научную значимость результатов и выводов диссертационной работы Шурыгина Б.М.

Заключение

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.5.2. Биофизика (по биологическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении 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.

Таким образом, соискатель Шурыгин Борис Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.2. Биофизика (биологические науки).

Официальный оппонент:

кандидат биологических наук, доцент кафедры биофизики Института биологии и биомедицины Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

СУХОВ Владимир Сергеевич

«11» февраля 2025 г.

Контактные данные:

тел.:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

03.00.12 – физиология и биохимия растений

Адрес места работы:

603022, Нижегородская область г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Институт биологии и
биомедицины, кафедра биофизики
Тел.: +7(831)4623003; e-mail: unn@unn.ru

Подпись Сухова В. С. удостоверяю.

Ректор

Григорьев