

Современные физические методы и технологии в сельском хозяйстве

С.В. Гудков, Р.М. Саримов, М.Е. Асташев, Р.Ю. Пищальников, Д.В. Яныкин, А.В. Симакин, А.В. Шкирин, Д.А. Серов, Е.М. Кончечков, Н.Г. Гусейн-Заде, В.Н. Леднёв, М.Я. Гришин, П.А. Сдвиженский, С.М. Першин, А.Ф. Бункин, М.Х. Ашуров, А.Г. Аксёнов, Н.О. Чилингарян, И.Г. Смирнов, Д.Ю. Павкин, Д.О. Хорт, М.Н. Московский, А.В. Сибирев, Я.П. Лобачевский, А.С. Дорохов, А.Ю. Измайлов

В обзоре приводятся новые теоретические и практические результаты применения современных физических методов и технологий в сельском хозяйстве. Рассматриваются физические технологии и материалы для пассивного управления солнечным спектром в теплицах. Проводится обзор приборной базы, применяемой для лазерного дистанционного зондирования агро- и биосистем, современные лазерные экспресс технологии, применяемые для экспресс-анализа химического состава вещества. Подробно описываются оптические методы, применяемые в биологической и сельскохозяйственной диагностике, в том числе и методы на основе мюллер-поляриметрии. Отдельная глава обзора посвящена получению и применению наноразмерных объектов в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Рассмотрено применение многочисленных плазменных технологий в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: физические технологии, сельское хозяйство, наночастицы, фотоконверсионные материалы, гиперспектральная съёмка, лидар, спектроскопия, плазма, композитные материалы

PACS numbers: 42.62. – b, 42.68.Wt, 52.77. – j

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.09.039577>

С.В. Гудков^(1,2,a), Р.М. Саримов^(1,b), М.Е. Асташев^(1,c), Р.Ю. Пищальников^(1,d), Д.В. Яныкин^(1,e), А.В. Симакин^(1,f), А.В. Шкирин^(1,g), Д.А. Серов^(1,h), Е.М. Кончечков^(1,i), Н.Г. Гусейн-Заде^(1,j), В.Н. Леднёв^(1,k), М.Я. Гришин^(1,l), П.А. Сдвиженский^(1,m), С.М. Першин^(1,n), А.Ф. Бункин^(1,o), М.Х. Ашуров^(1,p), А.Г. Аксёнов^(2,q), Н.О. Чилингарян^(2,r), И.Г. Смирнов^(2,s), Д.Ю. Павкин^(2,t), Д.О. Хорт^(2,u), М.Н. Московский^(2,v), А.В. Сибирев^(2,w), Я.П. Лобачевский^(2,x), А.С. Дорохов^(2,y), А.Ю. Измайлов^(2,z)

⁽¹⁾ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Российская Федерация

⁽²⁾ Федеральный научный агроинженерный центр, Всероссийский институт механизации, 1-й Институтский пр. 5, 109428 Москва, Российская Федерация

⁽³⁾ Институт ядерной физики АН Республики Узбекистан, пос. Улугбек 100214 Ташкент, Республика Узбекистан

E-mail: ^(a) S_makariy@rambler.ru, ^(b) rusa@kapella.gpi.ru, ^(c) Astashev@yandex.ru, ^(d) rpishchal@kapella.gpi.ru, ^(e) ya-d-ozh@rambler.ru, ^(f) avsimakin@gmail.com, ^(g) AVShkirin@mephi.ru, ^(h) dmitriy_serov_91@mail.ru, ⁽ⁱ⁾ eukmek@gmail.com, ^(j) namik@fpl.gpi.ru, ^(k) lednev@kapella.gpi.ru, ^(l) mikhael.grishin@phystech.edu, ^(m) pausdw@gmail.com, ⁽ⁿ⁾ pershin@kapella.gpi.ru, ^(o) abunkin@kapella.gpi.ru, ^(p) ashurov49@mail.ru, ^(q) 1053vim@mail.ru, ^(r) narek-s@list.ru, ^(s) rashn-smirnov@yandex.ru, ^(t) dimqaqa@mail.ru, ^(u) dmitriyhort@mail.ru, ^(v) maxmoskovsky74@yandex.ru, ^(w) sibirev2011@yandex.ru, ^(x) lobachevsky@yandex.ru, ^(y) dorokhov@rgau-msha.ru, ^(z) vim@vim.ru

Статья поступила 10 августа 2023 г., после доработки 25 сентября 2023 г.

Содержание

1. Введение (208).
 2. Теоретический анализ оптических свойств фотосинтетических пигментов и белков с помощью эволюционных алгоритмов оптимизации (209).
 3. Физические технологии и материалы для пассивного управления солнечным спектром в теплицах (210).
 4. Лазерное дистанционное зондирование для сельского хозяйства (212).
 5. Спектрометрия лазерно-индуцированной плазмы для экспрессного химического анализа в сельском хозяйстве (214).
 6. Применение мюллер-поляриметрии в биологической и сельскохозяйственной диагностике (215).
 7. Применение оптических методов для анализа качества молока и кормов (218).
 8. Получение и применение наноразмерных объектов в сельском хозяйстве и пищевой промышленности (219).
 9. Плазменные технологии в сельском хозяйстве (221).
 10. Оптические методы обнаружения фитопатогенов (223).
- Список литературы (224).

1. Введение

Очевидно, что устойчивое экологическое развитие нашего общества, прежде всего в аграрной сфере и перерабатывающей промышленности, невозможно без внедрения новых методов и технологий. Целью данного обзора яв-

ляется объективная оценка уровня применения, развития и разработки физических методов и технологий, направленных на решение проблем сельского хозяйства. В обзоре приводятся новые теоретические и практические результаты. Рассматриваются физические технологии и материалы для пассивного управления солнечным спектром в теплицах, приборы для лазерного дистанционного зондирования агро- и биосистем, современные лазерные экспресс-технологии химического анализа. Подробно описываются оптические методы, применяемые в биологической и сельскохозяйственной диагностике, в том числе и методы на основе мюллер-поляриметрии. Отдельная глава обзора посвящена получению и применению наноразмерных объектов в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Рассмотрено применение в сельском хозяйстве многочисленных плазменных технологий.

2. Теоретический анализ оптических свойств фотосинтетических пигментов и белков с помощью эволюционных алгоритмов оптимизации

Фотосинтез — это процесс образования органических веществ из углекислого газа и воды под действием света. Интенсивность фотосинтеза зависит от эффективности взаимодействия пигментов растений с квантами света. Интерпретация и анализ экспериментальных данных оптической спектроскопии органических молекул и кристаллов с помощью современных полуклассических квантовых теорий намного сложнее [1, 2], чем исследование оптики неорганических пигментов, и требует привлечения значительных вычислительных ресурсов. Главная особенность органических пигментов, помимо того, что они могут состоять из десятков и сотен атомов, — отсутствие идеально симметричных конфигураций атомов, не позволяющее упростить теоретические расчёты. То же самое относится к органическим кристаллам и фотосинтетическим пигмент-белковым комплексам. Фактически единственным решением данной проблемы является построение приближённых квантовых моделей разной степени сложности и проведение исключительно численного моделирования. Однако, с другой стороны, такой подход приводит к неоднозначности получаемых результатов, сложности оценки их статистической значимости и к необходимости приводить доказательства уникальности найденных моделей исследуемых физических процессов.

Современное развитие вычислительной техники и связанные с этим методы обработки данных и моделирования позволили вывести такую область прикладной математики, как моделирование физико-химических процессов в белках, на фундаментально новый уровень. Ключевую роль здесь сыграло развитие генетических алгоритмов оптимизации, разработанных для минимизации многопараметрических мультимодальных функций [3, 4]. Основной особенностью данного алгоритма является использование и формализация идей и понятий естественного отбора, таких как популяция, поколение, мутация, скрещивание. Применительно к исследованию первичных процессов фотосинтеза генетические алгоритмы уже использовались для моделирования переноса энергии в фотосистеме 1 из основной антенны в реакционный центр [5–7], для оценки электронных воз-

буждённых состояний хлорофиллов в реакционном центре фотосистемы 2 [8], для моделирования переноса энергии в ЛНСII светособирающем комплексе [9], в антенном комплексе Фенны–Меттьюса–Олсена зелёных серобактерий [10]. Учитывая, что главным недостатком указанного алгоритма является дискретный характер варируемости параметров минимизируемой функции и плохая сходимость, в целом, он применялся ограниченно.

Большинство слабых сторон генетических алгоритмов было устранено в так называемых эволюционных эвристических алгоритмах оптимизации [11–13]. Ключевой особенностью этих методов является преимущественная сфокусированность на способах мутации параметров, а не на разнообразии популяции. Никаких ограничений (гладкость, непрерывность) на минимизируемую функцию не накладывается. Важно отметить, что значения оптимизируемых параметров изменяются непрерывно, а не выбираются дискретным образом, как в генетическом алгоритме. Одним из широко используемых алгоритмов такого типа является дифференциальная эволюция [14, 15]. Применение данного метода для моделирования оптического отклика фотосинтетических пигментов и белков подробно исследовалось в следующем цикле работ [16–20]. Подгонка спектров осуществлялась с помощью специального программного обеспечения, включающего как процедуры алгоритма дифференциальной эволюции, так и процедуры расчётов линейного оптического отклика (рис. 1).

Моделирование спектров поглощения мономерных молекул в растворителях выполнялось в рамках теории многомодовых броуновских осцилляторов [21]. Данная полуклассическая теория позволяет рассчитать профиль линии поглощения электронного перехода любого органического пигмента, не прибегая к затратным *ab initio* квантовым вычислениям. Ключевым понятием данной теории является функция спектральной плотности, которая описывает взаимодействие электронного состояния с эффективными колебательными модами молекулы. Так как количество колебательных мод, а также их интенсивность взаимодействия с электронным переходом для каждой молекулы имеет свои особенности, то спектральная плотность может рассматриваться как уникальный идентификатор электронных переходов в молекуле.

В случае расчётов оптического отклика системы взаимодействующих пигментов, таких как молекулы хлорофиллов и феофитинов в реакционном центре фотосистемы 2 или фотосистемы 1 [5, 6, 8, 17, 20], итоговый спектр не может рассматриваться просто как сумма вкладов каждого пигмента. Для моделирования индивидуального вклада электронных переходов каждой молекулы необходимо использовать экситонную теорию [1, 2, 21], в контексте которой ищется численное решение уравнение Лиувилля–фон Неймана для матрицы плотности [22]. В зависимости от взаимного пространственного расположения пигментов в системе и интенсивности взаимодействия электронных возбуждений с колебательными модами и ближайшим белковым окружением, могут применяться разные методы расчёта релаксационного тензора [21].

Резюмируя вышесказанное, необходимо отметить, что согласованная работа оптимизационного алгоритма и процедур оптического отклика требует предварительной настройки и тестирования. Для достижения ре-

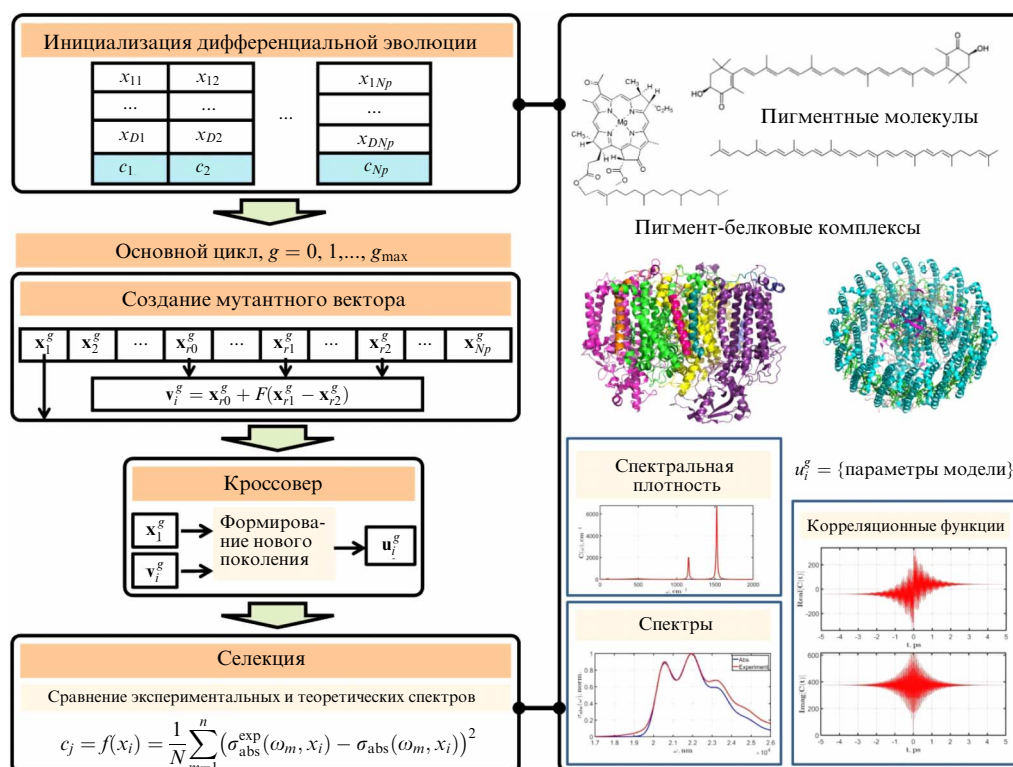


Рис. 1. Блок-схема алгоритма моделирования спектров поглощения пигментов и фотосинтетических пигмент-белковых комплексов. Слева приведена визуализация работы дифференциальной эволюции: начальный этап — инициализация, а потом основной цикл работы, включающий в себя функции вычисления мутантного вектора, кроссовера и селекции. Справа показаны химические структуры исследуемых пигментов и пигмент-белковых комплексов: хлорофилл А, каротиноиды, реакционный центр фотосистемы 2 и LH1 комплексов пурпурных бактерий. Внизу справа — три процедуры, необходимые для расчёта спектров поглощения в рамках теории многомодовых броуновских осцилляторов. Подробное описание работы данной оптимизационной схемы см. в [16, 19].

жима оптимальной работы необходимо выбирать подходящую стратегию расчёта мутантных векторов и установить такие параметры дифференциальной эволюции (F — весовой коэффициент и Cr — вероятность кроссовера), которые обеспечат максимальную скорость сходимости [17, 19].

Представленная методология позволяет моделировать оптический отклик пигмент-белковых комплексов, входящих в состав тилакоидных мембран высших растений, даёт возможность оценить эффективность обмена энергией между комплексами в случае потенциальных модификаций белкового матрикса или изменений пространственного расположения пигментов, что необходимо при молекулярно-биологических работах, нацеленных на повышение эффективности агросистем.

3. Физические технологии и материалы для пассивного управления солнечным спектром в теплицах

Очевидно, что повышения эффективности агросистем можно добиться не только с помощью разработки растений с химерными или мутантными пигмент-белковыми комплексами. Альтернативным подходом является поиск оптимального источника света (по длительности, интенсивности, спектральному составу). В разное время было предложено или внедрено большое количество позволяющих улучшать инсоляцию подходов, которые можно условно объединить в несколько групп. В первую группу входят способы, направленные на увеличение об-

щей интенсивности света, падающего на растения, или так называемой плотности потока фотосинтетически активной радиации (ФАР). Наиболее простой, но самый затратный способ — досвечивание с применением самых разнообразных осветителей, от ламп накаливания до светодиодов [23–26]. Вторая группа объединяет подходы, направленные на изменение спектра солнечного света. Искусственное изменение спектра солнечного света без увеличения его интенсивности, а иногда даже при некотором его уменьшении, может быть целесообразно, поскольку известно, что растения используют солнечное излучение различной длины волны с неодинаковой эффективностью [27]. Ультрафиолетовое излучение (315–400 нм) может негативно сказываться на росте и развитии растений. В ряде работ продемонстрировано положительное влияние уменьшения ультрафиолетового излучения на растения [28]. Зелёный свет (500–565 нм) очень плохо поглощается фотосинтетическим аппаратом растений и его отсутствие, по некоторым данным, практически не сказывается на растениях [29]. Дальний красный свет (700–800 нм) напрямую также практически не используется в фотосинтезе [30]. Действие ультрафиолета, зелёного и дальнего красного света, как правило, сводится к регуляции биохимических и физиологических процессов в растениях, обусловленной изменением доли такого излучения в общем спектре. Для данной цели растениями были выработаны рецепторные системы [31]. Наиболее эффективно фотосинтез протекает в красном (600–700 нм) и синем (440–500 нм) диапазоне длин волн, т.е. в диапазоне максимального поглощения

света пигментами фотосинтетических антенных комплексов [32]. При этом в условиях недостаточной освещённости именно синий и красный свет наиболее эффективно интенсифицирует фотосинтез и, следовательно, рост и развитие растений, обеспечивая максимальную урожайность сельскохозяйственных растений [33].

Без использования искусственных источников освещения изменения спектра солнечного света в условиях теплиц можно достичь двумя способами: используя или фотоселективные покрытия, или фотоконверсионные. Первый способ основан либо на уменьшении интенсивности вредной для растений спектральной компоненты для минимизации повреждений, вызываемых таким светом, либо на изменении соотношения спектральных компонент с целью воздействия на рецепторные регуляторные системы растения для увеличения их продуктивности, а также формирования нужного фенотипа. Второй способ подразумевает избирательное поглощение света люминофорами и переизлучение в другом спектральном диапазоне [34].

Принцип действия фотоселективных покрытий основан на избирательном поглощении света определённого спектрального диапазона с помощью включённых в них красителей. Чаще всего данные красители поглощают УФ, красное или дальнее красное излучение, реже синий свет [35, 36]. Например, изменение отношения доли красного света к доле дальнего красного оказывает большое влияние на рост и развитие растений [37, 38]. На заре применения фотоселективных покрытий в качестве красителя активно использовали раствор сульфата меди, который уменьшает интенсивность дальнего красного света, способствуя регуляции высоты растений, количества и размеров листьев [39, 40]. Несмотря на свою эффективность, подобные покрытия обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение в растениеводстве. Среди таких недостатков выделяют высокую стоимость, сложность обслуживания и фитотоксичность. В качестве альтернативы были разработаны фотоселективные покрытия на основе органических красителей, позволяющие более избирательно поглощать свет. Как правило, состав этих красителей исследователи в своих работах не указывают, ссылаясь на коммерческую тайну. Среди преимуществ использования органических красителей выделяют их большое разнообразие, что позволяет выбирать их (а также сочетать) с целью регулирования освещённости в заданной части солнечного спектра. Другими неоспоримыми преимуществами органических красителей являются удобство в использовании, простота как процесса изготовления самих красителей, так и включения их в состав тепличных покрытий. Однако стоит отметить, что такие покрытия больше востребованы в сфере выращивания декоративных растений для получения более выгодного товарного вида, чем для выращивания сельскохозяйственных растений.

Известно, что доля фотонов синей и красной части спектра в общем количестве фотонов, достигающих поверхности Земли, не превышает 30 % [41]. Следовательно, большая часть солнечной энергии потенциально может быть использована без потери качества освещения [42]. Например, развиваются технологии преобразования энергии ультрафиолетовых, зелёных фотонов или фотонов дальнего красного диапазона в электрическую [43] или тепловую [44, 45] энергию, а также в красные и синие фотоны [46–48]. Электрическая и тепловая энергия

может быть использована для нужд самой теплицы, а поглощение фотонов с одними характеристиками и эмиссия фотонов с другими характеристиками (фотоконверсия) может качественно изменить солнечный спектр, повысив плотность ФАР и уменьшив при этом ненужную для растений составляющую спектра.

Применение фотоконверсионных покрытий отдельно или совместно с искусственным освещением позволяет значительно снизить затраты на электроэнергию и повысить урожайность сельскохозяйственных культур. Для того чтобы фотоконверсионное покрытие было эффективным, оно должно удовлетворять следующим требованиям: максимальное пропускание солнечного света, эффективно используемого растениями при фотосинтезе, максимальное поглощение света в целевых диапазонах, высокий квантовый выход люминесценции и минимальные реабсорбционные потери, а также высокая химическая и фотостабильность люминофоров. На практике очень сложно произвести материалы, отвечающие всем этим требованиям, однако фотоконверсионные покрытия совершенствуются с каждым годом [49].

Люминофоры, используемые в фотоконверсионных покрытиях, можно разделить на люминофоры, созданные на основе органических красителей [50–52], и люминофоры, представляющие собой металл-содержащие наночастицы [53, 54]. В настоящее время наиболее распространёнными являются люминофоры на основе органических красителей, так как они легко интегрируются в покрытие и, по сравнению с другими типами люминофоров, обладают низкой стоимостью. Однако покрытия, содержащие органические красители, быстро выгорают и теряют свою эффективность [55]. Люминофоры на основе редкоземельных металлов и их соединений (например, европия) обладают повышенной стабильностью, но низким квантовым выходом люминесценции [56]. Квантовые точки (кадмий–селен, цинк–сера и др.) плохо встраиваются в полимерные матрицы и очень чувствительны к активным формам кислорода, образующимся при функционировании люминофора [57–59].

Как уже упоминалось выше, рост и развитие растений наиболее эффективно стимулируется красным и синим светом, причём эффективность использования красных фотонов может быть значительно выше, чем синих. В связи с этим примерно 2/3 фотоконверсионных покрытий содержат люминофоры, преобразующие поглощённый свет в красный. В 15 % работ поглощённый свет преобразуется в синий. При этом в теплицах используют фотоконверсионные покрытия, поглощающие свет в тех частях солнечного спектра, которые мало используются растениями в процессе фотосинтеза (ультрафиолет, зелёный свет и дальний красный).

Чаще всего фотоконверсионные покрытия используются для повышения урожайности сельскохозяйственных культур (например, томата, салата, огурца, капусты, перца и др.). Реже такие покрытия используют при выращивании декоративных растений [60]. Это связано с тем, что фотоконверсионные покрытия качественно и направленно изменяют солнечный спектр. Основным недостатком фотоконверсионных покрытий пока является относительная сложность изготовления люминофоров, что зачастую приводит к увеличению их стоимости. В то же время методы получения фотоконверсионных наночастиц постоянно оптимизируются и, по оценкам специалистов, они в скором времени будут универсальным

альтернативным средством повышения урожайности сельскохозяйственных культур [61].

Большинство люминофоров в составе фотоконверсионных покрытий действуют как стоковские излучатели, излучая фотон с меньшей энергией, чем поглощённый. Некоторые люминофоры способны излучать фотоны с более высокой энергией, чем те, которые используются для возбуждения. Такие люминофоры называются апконверсионными. Применение апконверсионных люминофоров в составе тепличных покрытий может иметь перспективы, ввиду того что солнечный свет содержит большое количество низкоэнергетического излучения, практически не используемого растениями. Такие люминофоры были предложены в середине XX века [62]. Недавно в качестве покрытий для тепличных стёкол продемонстрировано несколько успешных применений апконверсионных люминофоров номинального состава $\text{Sr}_{0,46}\text{Ba}_{0,50}\text{Yb}_{0,02}\text{Er}_{0,02}\text{F}_{2,04}$ [63], $\text{Sr}_{0,910}\text{Yb}_{0,075}\text{Er}_{0,015}\text{F}_{2,090}$ [64] и $\text{Sr}_{0,955}\text{Yb}_{0,020}\text{Er}_{0,025}\text{F}_{2,045}$ [65]. У растений томата (*Solanum lycopersicum*) под такими покрытиями увеличивается число и площадь листьев, длина стебля, а также содержание хлорофилла. Установлено, что у этих растений в ответ на появление ультрафиолетовой составляющей в ростовой подсветке значительно меньше нарушается работа фотосинтетического аппарата, а восстановление нормальных показателей происходило значительно быстрее (примерно на 20–25 %).

Для повышения эффективности тепличных систем, использующих фотоконверсионные материалы, были предложены модификации систем освещения и фотоконверсии. Модификация Эртюрка предполагает использование Ламбертовского флуоресцентного отражателя [66], который способствует увеличению количества преобразуемых фотонов. Принцип его работы заключается в том, что свет собирается параболическими коллекторами, оснащёнными системами слежения за солнцем. Из коллекторов свет по светораспределительной системе (оптоволоконно, линзы, разветвители) подаётся к стеллажам с растениями. Оптоволоконно, выходящее с нижней части стеллажа, направлено на флуоресцентный отражатель в потолке, равномерно распределяющий свет. Флуоресцентный отражатель состоит из фотоконверсионного стекла с флуоресцентным красителем $\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}^{4+}$, преобразующим ультрафиолет и сине-зелёный свет (от 300 нм до 520 нм) в красный (с максимумами при 615 нм, 630 нм и 650 нм), и Ламбертовского отражателя. Следует отметить, что Ламбертовский отражатель во флуоресцентном покрытии увеличивает возможность повторного поглощения света флуоресцентными пигментами за счёт увеличения длины пути светового потока [67]. Результаты численного моделирования методом Монте-Карло прогнозируют 35 %-ный прирост урожайности салата латука (*Lactuca sativa*) при использовании вышеописанной системы.

Интересная модификация систем освещения теплиц была разработана Макаровым с соавторами. Разработчики предложили концентраторы с оптоволоконной связью [68]. Данная система позволяет освещать нижние листья растений, затеняемые верхними листьями. Система состоит из концентратора, заполненного люминофором (в работе [68] использовались квантовые точки $\text{CuInSe}_x\text{S}_{2-x}/\text{ZnS}$) и оптоволоконна, по которому передаётся свет. Эффективность описанной системы была продемонстрирована на растениях томата. По сравне-

нию с контрольной группой растений урожайность увеличилась на 7 %. Успех своей системы авторы связывают как с увеличением общего количества фотосинтетически активной радиации, так и с более равномерным освещением растения света. Известно, что в условиях низкоинтенсивного освещения увеличение ФАР на 1 % увеличивает урожайность до 1 % [69]. Несмотря на некоторые существенные недостатки (низкая эффективность переноса света вследствие поверхностных потерь в концентраторе и оптоволоконке), система показала хороший результат, что делает перспективной её дальнейшую модернизацию. Поверхностные потери являются ключевыми в люминесцентных солнечных концентраторах, и в последние десятилетия были предприняты многочисленные попытки их минимизации путём гомеотропного выравнивания люминофоров [70] и использования селективных зеркал для поляризации света [71]. Потери в оптоволоконке уменьшаются при использовании шероховатых поверхностей, материалов с разными показателями преломления, а также различных микро- или наноструктур [72].

Существующие способы преобразования света позволяют значительно повысить урожайность и улучшить морфологические показатели большинства растений. Однако выбор и применение тех или иных технологий определяется климатическими и сезонными условиями, а также потребностями выращиваемых растений.

4. Лазерное дистанционное зондирование для сельского хозяйства

Современное высокотехнологичное и высокоэффективное фермерство требует непрерывного мониторинга многочисленных параметров в процессе сельскохозяйственного производства, от стадии анализа качества почв и до оценки скорости роста и развития растений [73]. Непрерывный мониторинг состояния растений можно реализовать в условиях тепличного производства с помощью разнообразных сенсоров, однако основные объёмы сельскохозяйственных растений выращивают в открытых грунтах на больших площадях [74], поэтому создавать системы непрерывного контроля с помощью сенсоров затруднительно. Мониторинг больших площадей возможен только методами дистанционного зондирования, включая измерения со спутников и авианосителей [75, 76]. Данные подходы основаны на методах пассивного зондирования — фотометрирования интересующих площадей в различных диапазонах оптического спектра, в том числе с высоким спектральным разрешением [77]. Одним из главных недостатков такого подхода является сильная зависимость от внешних условий: спектральные параметры солнечного света сильно варьируются в зависимости от концентрации и природы аэрозолей в атмосфере, наличия туманов, географической широты, а также времени проведения измерений. Всё это требует калибровки камер и сенсоров непосредственно до и после проведения измерений, что снижает перспективы полной автоматизации подобных работ, а также затрудняет сравнение результатов, полученных разными группами учёных из разных географических областей.

Альтернативным подходом, лишённым вышеуказанного недостатка, является лазерное дистанционное зондирование [78]. Активное зондирование с помощью ли-

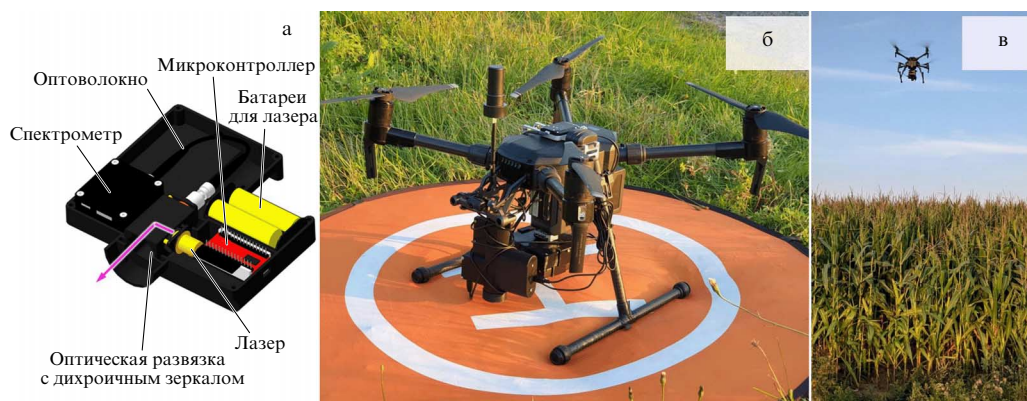


Рис. 2. (а) Схема компактного флуоресцентного лидара, (б) фотография флуоресцентного лидара, установленного на беспилотнике, (в) фотография процесса измерений поля кукурузы с беспилотника, оборудованного флуоресцентным лидаром.

даров (от англ. LIDAR — Light Detection And Ranging, "обнаружение и измерение расстояния с помощью света") обеспечивает преимущества по сравнению с пассивным зондированием методами мультиспектральной визуализации: нет необходимости в точной калибровке прибора; можно работать ночью и днём, так как нет сильного влияния солнечного света; применение методики синхронного детектирования позволяет выделять очень слабые сигналы. Первые работы, в которых были разработаны лидары, были сфокусированы на зондирование воздушных и водных сред. В 1980–1990-х гг. появились работы по диагностике состояния лесов с помощью лазерного дистанционного зондирования [79]. Систематические исследования возможностей лазерного зондирования лесов были проведены в рамках проекта Лазерфлер (LASFLEUR), в котором команда европейских учёных разработала лидар для регистрации спектров флуоресценции, позволяющих сделать вывод как об общем состоянии растения, так и о причинах, вызвавших стресс растения [80, 81], однако такие лидары были тяжёлыми (> 130 кг) и энергоёмкими (> 1500 Вт). Параллельно в СССР в Институте общей физики РАН была разработана серия лидаров для задач диагностики океана с борта летательного аппарата [82, 83], использованных также для зондирования растительности на поверхности суши. Переход к применению лидаров для задач сельского хозяйства в 1990-х гг. не состоялся по трём причинам: высокая стоимость лидаров; высокая стоимость эксплуатации авиационного транспорта; отсутствие открытого доступа, а впоследствии — малая точность системы глобального позиционирования [84]. В 2000-х гг. появились компактные пользовательские приёмники для системы глобального позиционирования, а также произошёл значительный прогресс в разработке компактных и эффективных лазерных источников и систем регистрации оптического излучения. Ситуация кардинально изменилась в 2010-х гг., когда появились небольшие и экономичные беспилотные авианосители, что было обусловлено появлением лёгких, энергоёмких и высокотокковых литиевых аккумуляторов, а также доступных быстродействующих микроконтроллеров, управляющих вращением многочисленных моторов аппарата [85]. Появление подобных дронов стимулировало применение компактных цветных, мульти- и гиперспектральных камер, установленных на беспилотниках, для мониторинга сельскохозяйственных культур, однако в

отношении применения лидаров подобного объёма работ не наблюдалось в связи с технической сложностью задачи по разработке лидаров малых размеров ($20 \times 20 \times 20 \text{ см}^3$), малого энергопотребления (менее 30 Вт) и малой массы (менее 2–3 кг), связанной с ограничениями на массу и энергопотребление прибора, транспортируемого современными малыми беспилотными авианосителями (коптерами). Только в последние несколько лет появились первые публикации, где были разработаны флуоресцентные лидары для мониторинга в сельском хозяйстве и экологического контроля [86–89].

Две научные группы разработали действительно компактные лидары для беспилотных авианосителей. Наиболее компактный флуоресцентный лидар был разработан в ИОФ РАН для диагностики состояния растений в городской среде (оперативный экологический мониторинг) и на сельскохозяйственных полях (переход к точному земледелию) [90]. На рисунке 2 представлена схема компактного флуоресцентного лидара (масса 310 г) и фотографии в процессе измерений с борта беспилотника. Данный прибор позволил находить области поля, где растения испытывают наибольший стресс. Дополнительным применением этого прибора стала разработка подхода экспрессного измерения влажности силоса, что имеет важное значение для высокой эффективности животноводства [91].

Также компактный лидар был разработан в Южно-Китайском педагогическом университете. Лидар обладает большей дальностью зондирования, что отразилось на значительном увеличении массы прибора (3,2 кг) [92]. Разработанный лидар был применён для экспрессного экологического мониторинга поверхности пресных водоёмов, а также для оценки состояния деревьев в городской среде.

Одним из наиболее перспективных приложений лазерной спектроскопии и лазерной физики для решения практических задач сельскохозяйственного промышленного производства является разработка лидаров для дистанционного зондирования. Сочетание невысокой стоимости эксплуатации беспилотного авианосителя и прогресса в лазерной технике позволяет разрабатывать компактные лидары для зондирования с расстояния в единицы метров, что вполне достаточно для картирования полей сельскохозяйственных культур или оценки экологической обстановки. Применение флуоресцентных лидаров предоставляет информацию о состоянии растений,

в том числе в динамике их цикла развития, что является ещё одним инструментом для перехода на точное земледелие. Для широкого применения лидаров в сельском хозяйстве необходима дальнейшая миниатюризация лидаров при сокращении их энергопотребления, что возможно реализовать по мере развития лазерной техники и совершенствования детекторов.

5. Спектрометрия лазерно-индуцированной плазмы для экспрессного химического анализа в сельском хозяйстве

Высокие темпы урбанизации и бурный рост населения оказывают значительное негативное влияние на окружающую среду и агропромышленный комплекс. Хозяйственная деятельность человека приводит к загрязнению среды обитания. Например, происходит загрязнение воды и почвы тяжёлыми металлами, которые могут не только снижать урожайность культур, но и попадать с растительным кормом в организм домашних животных, накапливаясь в опасных концентрациях [93]. Последнее может представлять серьёзную угрозу конечному потребителю сельскохозяйственной продукции — человеку. Обнаружение тяжёлых металлов в продуктах питания человека и животных является важной задачей ответственного фермера или производителя высококачественных продуктов питания. Современные аналитические методы определения элементного химического состава, такие как атомно-абсорбционная спектроскопия, атомно-эмиссионная спектроскопия, масс-спектрометрия, отвечают всем требованиям к методам анализа почв, воды, растительности и продуктов питания. Однако перечисленные методы требуют покупки дорогостоящего оборудования и работы специалиста высокой квалификации, а также значительных временных и трудовых затрат на подготовку проб и саму процедуру анализа [94]. На современном сельскохозяйственном предприятии востребованы приборы, не требующие высокой квалификации персонала для получения надёжных результатов, а ещё лучше, позволяющие проводить измерения в полевых условиях или осуществлять онлайн-контроль непосредственно на производственной линии. Хорошим вариантом решения поставленных задач является применение портативных приборов на основе рентгеновской флуоресцентной спектрометрии [95] и спектрометрии лазерно-индуцированной плазмы (СЛИП) [96]. Первый метод широко используется в практике уже больше десяти лет, для проведения одного измерения требуется несколько минут, но при этом необходима специальная защита от рентгеновского излучения, чего сложно добиться при большом объёме работ, проводимых неквалифицированным персоналом. В то же время в последнее десятилетие всё больший интерес в прикладном химическом анализе уделяют методу СЛИП, обладающему рядом преимуществ, таких как: высокая скорость анализа (несколько секунд); отсутствие опасности поражения рентгеновским излучением; возможность одновременного анализа тяжёлых и лёгких элементов; дистанционный анализ.

СЛИП является разновидностью атомно-эмиссионного метода анализа, в котором применяют мощные лазерные импульсы для отбора и анализа пробы [97, 98]. При воздействии наносекундного импульсного лазерного излучения на поверхность образца происходит его пробоотбор (испарение), индуцирование лазерной плаз-

мы, где происходит атомизация материала и возбуждение спектров электронных переходов атомов и ионов. Для проведения качественного и количественного анализа исследуют характеристические спектральные линии в получаемом эмиссионном спектре лазерной плазмы. Отличительным преимуществом метода является возможность получения информации о химическом составе образца в любом агрегатном состоянии и в любых условиях, если есть возможность доставить лазерные фотоны и собрать фотоны эмиссии плазмы. Вследствие таких преимуществ, как возможность проведения неразрушающего контроля, возможность многоэлементного и локального анализа, экспрессность анализа, СЛИП является перспективным методом для контроля химического состава [99].

СЛИП-исследования почвы и воды. Поступление тяжёлых металлов через систему почва – культура считается преобладающим путём воздействия на человека тяжёлых металлов из окружающей среды в сельскохозяйственных районах [100]. Первые работы по определению примесей в почве методом спектрометрии лазерно-индуцированной плазмы были опубликованы ещё в середине 1990-х гг. [101, 102]. В этих работах авторы продемонстрировали, что предел обнаружения для таких токсичных металлов, как Cd, Pb, Cr, методом СЛИП достаточен для выявления опасных уровней загрязнения. Однако количественный анализ элементного состава почв является сложной задачей для СЛИП вследствие матричных эффектов, сильно влияющих на свойства лазерной плазмы [103]. Эффективным подходом для улучшения метрологических характеристик анализа почв стало применение двухимпульсного режима СЛИП [104]. Последовательное воздействие двух наносекундных лазерных импульсов с микросекундной задержкой между ними позволило улучшить чувствительность анализа (снизить пределы обнаружения) для различных образцов почв. Разработанный группой Паллески безэталоный подход для СЛИП [105] позволил получить информацию о содержании основных и минимальных компонентов почвы без использования стандартных образцов. Появление компактных переносных приборов очень востребовано и при экспрессном анализе почвы непосредственно в интересующей локации [106].

Метод СЛИП применяется не только для определения токсичных примесей, но и для мониторинга основных макрокомпонентов, от которых зависят питательные свойства почвы. В работе [107] авторы продемонстрировали количественный анализ P, Fe, Mg, Ca и Na в почвах и удобрениях. Для улучшения пределов обнаружения и воспроизводимости результатов анализа почв применяют подходы статического анализа (корреляционный анализ, анализ главных компонентов и кластерный анализ) [108]. Применяя СЛИП, можно измерить гранулометрический состав почвы [109] и даже показатель её кислотности [110].

Вода, используемая для орошения сельскохозяйственных угодий, также может содержать тяжёлые элементы. При анализе жидкостей СЛИП уступает по надёжности получаемых результатов методам аналитической химии, однако появление компактных и недорогих приборов в течение последнего десятилетия стимулировало разработку простых методик для элементного анализа водных растворов. Отметим, что СЛИП водных растворов осложняется такими мешающими факторами, как

более короткое время жизни лазерной плазмы, более слабый спектральный сигнал, разбрызгивание [111]. Для минимизации мешающих факторов и улучшения метрологических характеристик анализа воды применяют различные подходы для предварительной пробоподготовки: замораживание [112], предварительное концентрирование с помощью абсорбирующих материалов [113] или создание аэрозоля [114].

СЛИП для исследования растений. Возможность проведения экспрессного многоэлементного анализа, в том числе и лёгких элементов, а также возможность построения карт распределения макро- и микроэлементов стимулировали работы по диагностике состояния и роста растений. Отметим, что прямой анализ без пробоподготовки является нетривиальной задачей вследствие гетерогенной структуры образцов и разнообразия их физических свойств (оптических, термодинамических, механических), которые значительно влияют на свойства лазерной плазмы и регистрируемые СЛИП сигналы [115]. Для улучшения воспроизводимости СЛИП-измерений применяют различные процедуры предварительной пробоподготовки растительных образцов. Например, распространённой практикой является измельчение растительного материала с целью уменьшения размеров частиц образца и гомогенизации его поверхности для увеличения представительности единичного измерения. Измельчённый и перемешанный растительный материал прессуют в таблетки для образования плоской поверхности, что улучшает воспроизводимость измерений [116]. Важным фактором получения надёжных результатов анализа является контроль плотности мощности на поверхности образца [117]. С использованием этих подходов ранее продемонстрированы возможности СЛИП для определения содержания макроэлементов и микроэлементов в листьях сахарного тростника [118], определено содержание тяжёлых элементов в листьях горчицы [119] и подсолнечника [120].

Такие преимущества СЛИП, как возможность проведения локального анализа за счёт малого пятна фокусировки лазерного пучка на поверхности образца (диаметр до 10 мкм) и квазинеразрушающего анализа (масса испаряемого материала за один лазерный импульс не превышает десятков нанограм), позволяют применять метод для картирования элементного состава в образцах [121]. Так, в работе [122] авторы исследовали процесс поглощения и распределения хрома в различных частях растения (корень, стебель, листья) с помощью СЛИП-картирования. Было продемонстрировано, что в листьях и корнях накапливается больше хрома, чем в стебле. Большое количество работ по исследованию распределения элементов в различных растениях и их частях с использованием разных подходов были проведены группой Кайзера [123, 124]. Подходы к калибровке СЛИП-системы для количественного анализа гетерогенных растительных образцов соевого шрота с применением картирования были представлены авторами в работах [125, 126].

СЛИП для анализа продуктов питания. Метод СЛИП уже успешно зарекомендовал себя для анализа различных пищевых продуктов. Например, Бильдж и др. продемонстрировали возможности СЛИП для определения концентрации кальция в муке [127]. Мартелли с соавторами применили СЛИП в сочетании с хемометрическими методами для классификации тканей зерна пшеницы [128]. Контроль содержания основных элементов и при-

месей был выполнен на примере сухого молока и состава детских смесей [129]. Продемонстрирована [130] возможность классификации красных вин с защищённым наименованием места происхождения с помощью сочетания СЛИП-измерений и нейронных сетей. В работе [131] авторы показали перспективы применения СЛИП для сортировки мяса птицы по содержанию кальция на производственной линии. Большое количество работ посвящено использованию СЛИП для оценки содержания макро- и микроэлементов в различных видах риса [132, 133]. Для проведения непрерывного контроля производства продуктов питания на ферме или на производственной линии необходимо проводить несколько сотен измерений в день, поэтому необходимо иметь компактные инструменты, позволяющие осуществлять экспрессный анализ. Расцвет производства компактных СЛИП-приборов [134], в том числе и отечественной разработки, делает их перспективными для применения в современных фермерских хозяйствах, ориентированных на высокоэффективное производство продуктов питания высокого качества.

6. Применение мюллер-поляриметрии в биологической и сельскохозяйственной диагностике

При проведении неразрушающей диагностики находят применение оптические методы, основанные на регистрации проходящего или рассеянного света [135–138]. Однако часто оптические приборы измеряют только интенсивность света без учёта изменений состояния его поляризации. Методы, обнаруживающие изменения поляризации, могут предоставить дополнительную информацию об исследуемой среде и повысить точность измерений. Матрица Мюллера (ММ, 4×4) наиболее полно описывает взаимодействие произвольного объекта с полностью или частично поляризованным электромагнитным излучением; поэтому существующие поляриметрические методы могут быть обобщены формализмом матриц Мюллера, и это обобщение называется мюллер-поляриметрией (МП) [139–141].

В случае дисперсных сред матрица рассеяния света (МРС), определяемая как матрица Мюллера, содержит наиболее полную информацию о светорассеивающих частицах, доступную для статического рассеяния. Элементы МРС, являясь функциями угла рассеяния, зависят также от длины волны зондирующего излучения, оптических свойств и распределения по размерам дисперсного вещества [142–144]. В частном случае сферических частиц она имеет блочно-диагональную форму:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & M_{34} \\ 0 & 0 & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix},$$

где $M_{11} = M_{22}$, $M_{12} = M_{21}$, $M_{34} = -M_{43}$ и $M_{33} = M_{44}$. Физический смысл элемента $M_{11}(\theta)$ — индикатриса рассеяния, т.е. угловое распределение интенсивности рассеянного света (θ — угол рассеяния).

Диагностика частиц с помощью ММ осуществляется, по сути, путём математической обработки её элементов, измеренных для рассеяния, пропускания или отражения света в соответствии с выбранной структурной моделью исследуемой среды или образца с целью извлечь значения его микрофизических параметров [141]. Простейшая

структурная модель представляет собой совокупность сферических частиц. Однако частицы могут быть как твёрдыми элементами, так и скоплениями таких частиц, а также иметь различную форму и размеры, к которым также чувствительна ММ. Для решения обратной задачи из ММ используются различные математические подходы. Чаще всего это декомпозиции непосредственно измеренных ММ [140, 145], в частности, с помощью теории групп [146] или стохастического моделирования методом Монте-Карло [147–150]. Моделирование методом Монте-Карло ММ для многократно рассеивающих сред очень важно при интерпретации ММ, измеренных для мутных сред, таких как биологические ткани [151, 152].

Оптические методы и приборы неразрушающей диагностики можно разделить на четыре группы. К первой группе относятся методы, основанные на измерении углового распределения света, рассеянного образцом (скаттерометры), и поляризационных характеристик рассеянного света. Вторая группа — системы визуализации плотноструктурированных объектов, таких как биологические ткани, в частности те, которые отражают обратно рассеянный свет из узкого слоя в глубине, посредством низкокогерентной интерферометрии; это метод оптической когерентной томографии (ОКТ). К третьей группе относятся спектрофотометры, измеряющие зависимость пропускания/поглощения света образцом от длины волны света, т.е. спектральные методы. Четвертая группа посвящена флуоресцентным спектрометрам. С учётом литературных источников ниже анализируются схематические особенности всех перечисленных групп и условия их применения. Ко всем методам можно применить общий принцип модификации оптической схемы путём окружения исследуемого образца поляризметрическими блоками, чтобы расширить возможности измерения от одной интенсивности света до полной матрицы Мюллера.

Наиболее простыми являются мюллер-поляризметрические приборы. Мюллер-поляриметр обычно состоит из источника света (ИС), генератора состояния поляризации (ГСП), кюветы с тестовым образцом (О), анализатора состояния поляризации (АСП) и фотодетектора (ФД). Источники света могут варьироваться, в зависимости от назначения поляризметрического прибора и точности измерений, от широкополосных ламп и суперлюминесцентных диодов [153] до лазеров [154]. ГСП представляет собой пропускающую оптическую систему, позволяющую генерировать любое произвольное состояние поляризации (обычно эллиптическое) и используется для преобразования поляризации исходного излучения, которое изначально не поляризовано или имеет постоянную поляризацию, в набор состояний поляризованного света, необходимых для измерения матрицы Мюллера произвольного объекта. ГСП могут иметь различную конструкцию; наиболее распространённый ГСП в поляризметрических приборах состоит из комбинации фазовых модуляторов, фазовых пластин и линейного поляризатора. АСП также представляет собой комбинацию фазовых оптических элементов (фазовых модуляторов, фазовых пластин) и линейного поляризатора, служащего для измерения компонент вектора Стокса излучения, выходящего из объекта.

Скаттерометрия — это неразрушающий метод диагностики, основанный на измерении света, рассеянного образцом. Данный метод измеряет угловое распределе-

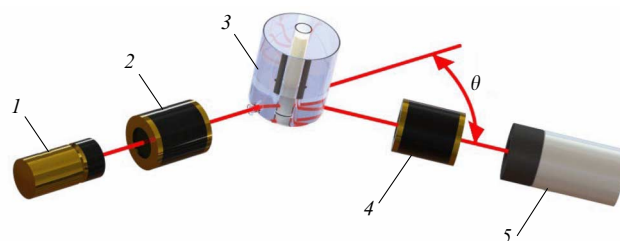


Рис. 3. Упрощённая схема мюллер-скаттерометра: 1 — лазер, 2 — ГСП, 3 — образец, 4 — АСП, 5 — фотодетектор.

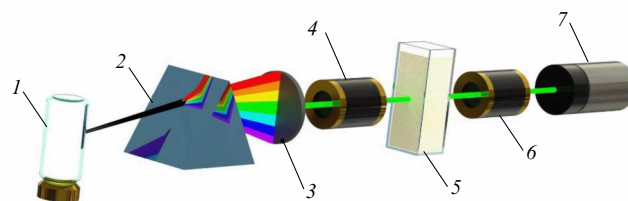


Рис. 4. Общая схема однолучевого сканирующего мюллер-спектрополяриметра: 1 — источник света, 2 — монохроматор, 3 — апертура, 4 — ГСП, 5 — образец, 6 — АСП, 7 — фотодетектор.

ние интенсивности света, рассеянного образцом. Преимущества указанного метода заключаются в относительной простоте и гибкости выбора источников света и фотоприёмников; можно использовать как монохроматические лазеры с разными длинами волн, так и широкополосные лампы. Упрощённая схема скаттерометра с применением МП представлена на рис. 3.

Спектрофотометрия исследует спектральные свойства электромагнитного излучения, отражённого или пропущенного материалом, с помощью специального прибора (фотометра), измеряющего интенсивность на разных длинах волн. Наиболее распространены спектрофотометры ближнего инфракрасного (ИК), видимого и ультрафиолетового (УФ) диапазонов, хотя существуют также микроволновые и рентгеновские спектрофотометры. Спектрофотометры бывают однолучевые и двухлучевые. Однолучевой спектрофотометр измеряет относительную интенсивность светового луча до и после введения исследуемого образца. Двухлучевой спектрофотометр сравнивает интенсивность между двумя световыми путями, один из которых направлен на исследуемый образец, а другой — на эталон. Кроме того, спектрофотометры можно разделить на сканирующие и матричные. В сканирующем спектрофотометре используется один детектор и подвижный дисперсионный элемент, а в матричном спектрофотометре используется матрица детекторов и стационарный дисперсионный элемент. Сочетание спектрофотометрии с МП позволяет измерять спектры оптической анизотропии, что даёт дополнительную информацию о конфигурации сложных органических молекул и, например, о вторичной структуре биополимеров. Такие комбинированные системы называются мюллер-спектрополяриметрами, возможная схема с использованием однолучевого сканирующего спектрофотометра показана на рис. 4.

Мюллер-поляризметрическая визуализация (МПВ) основана на измерениях пространственно-зависимых поляризационных свойств образцов в виде двумерных картин элементов ММ, как правило, с помощью матрич-

ных фотодетекторов, таких как ПЗС-камеры [155–157]. В зависимости от свойств образца и исследуемых структур внутри него мюллер-изображения могут быть зарегистрированы в конфигурациях пропускания [156] и отражения [157] или обратного рассеяния [155]. Тонкие срезы тканей можно визуализировать с помощью трансмиссионной мюллер-микроскопии, а для объёмных образцов тканей наиболее подходящим является наблюдение обратного рассеяния. МПВ может предоставить важные детали микроструктуры ткани [155], клеточных функций и взаимодействий между клеточными структурами [157].

Оптическая когерентная томография (ОКТ) относится к классу методов оптической визуализации, используемых для получения микрометрового разрешения 2D и 3D изображений оптически рассеивающих сред, таких как биологические ткани. Этот метод основан на интерферометрии с малой длиной когерентности, обычно реализуемой в ближнем инфракрасном диапазоне (БИК, 800–1300 нм). В отличие от классической лазерной интерферометрии с большой длиной когерентности, в ОКТ интерференция возникает в пределах нескольких микрометров из-за использования источников света с широкой полосой пропускания. Оптическая когерентная томография во временной области основана на интерференции низкокогерентного зондирующего оптического излучения, обратного рассеянного от неоднородностей среды и отражённого от эталонного зеркала. В ОКТ условие когерентности для опорного и обратно рассеянного света может быть выполнено в пределах тонкого слоя образца. Регулируя задержку пути для эталонного луча, можно сканировать всю глубину образца и, таким образом, получать объёмное изображение.

Использование поляриметрии с ОКТ не обязательно подразумевает измерение матрицы Мюллера. Так, в [158] сравнивались два подхода: поляризационно-чувствительная ОКТ (ПЧ-ОКТ) и мюллер-ОКТ (М-ОКТ). Эти подходы решают несколько разные задачи: например, ПЧ-ОКТ позволяет получить детальные изображения исследуемого образца, а М-ОКТ позволяет исследовать его свойства. Полную информацию об оптических свойствах ткани можно получить путём интеграции МПВ и ПЧ-ОКТ. На рисунке 5 показана комбинация ПЧ-ОКТ и МПВ, предложенная в [158].

Флуориметрия — высокочувствительный метод, основанный на измерении интенсивности флуоресценции, т.е. способности вещества излучать свет при поглощении внешнего электромагнитного излучения преимущественно на длине волны, большей, чем у поглощаемого излучения. Принципы, лежащие в основе использования поляризации флуоресценции для изучения белок-белковых взаимодействий и взаимодействий белок-ДНК, изложены в [159]. Поляризационные свойства флуоресценции содержат потенциально ценную информацию о химическом составе, молекулярной структуре и ориентации, а также о локальном окружении флуоресцентных элементов. Метод, сочетающий флуориметрию и поляриметрию, можно назвать флуориополяриметрией. Метод оказался мощным диагностическим инструментом, при этом достаточно простым и недорогим. Типичная схема поляриметрического флуоресцентного спектрометра с измерением ММ показана на рис. 6.

Эллипсометрия — высокочувствительный метод определения оптических параметров отражающих образцов,

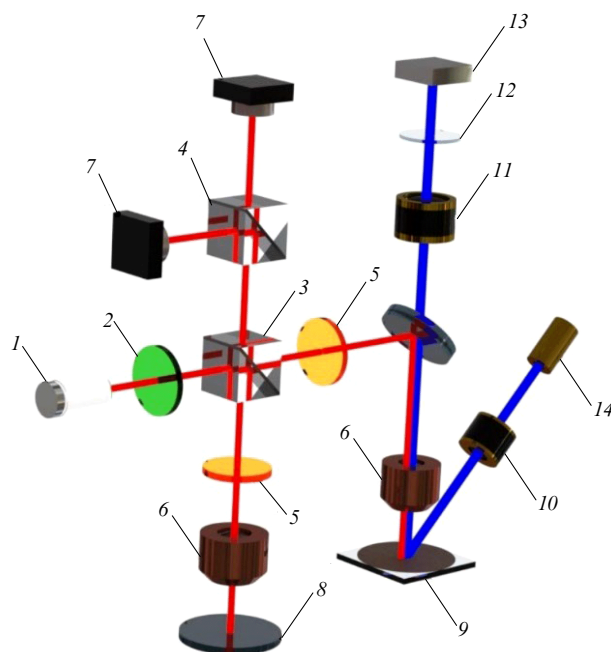


Рис. 5. Комбинированная схема ПЧ-ОКТ и МПВ: 1 — низкокогерентный источник света, 2 — линейный поляризатор, 3 — неполяризационный лучевой делитель, 4 — поляризационный лучевой делитель, 5 — четырёхволновые пластины, 6 — объективы, 7 — фотодетекторы, 8 — зеркало, 9 — образец, 10 — ГСП, 11 — АСП, 12 — линза, 13 — ПЗС-камера, 14 — лазер.

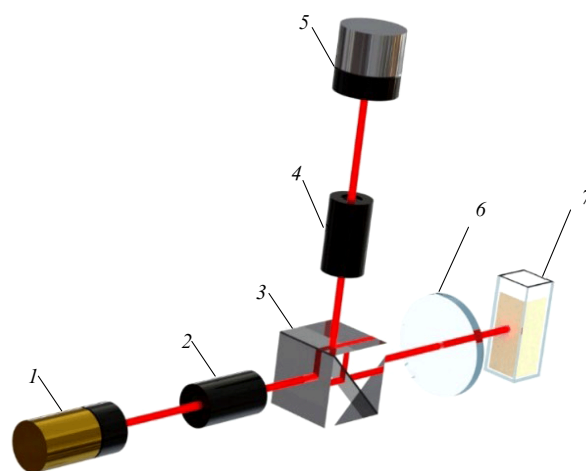


Рис. 6. Типичная схема мюллер-флуоресцентного спектрометра: 1 — лазер, 2 — ГСП, 3 — лучевой делитель, 4 — АСП, 5 — спектрометр, 6 — линза, 7 — образец.

основанный на относительном изменении в результате отражения амплитуд и фаз компонент электрического поля электромагнитной волны, параллельных и поперечных плоскости падения волны на образец.

Спектроэллипсометрия в ИК-диапазоне находит применение при анализе многокомпонентных органических материалов с характерными линиями ИК-поглощения. Для работы с толстыми образцами в стандартный фурье-ИК-спектрометр (ИК-Фурье) может быть установлено устройство нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) в сочетании с ахроматическими поляриметрическими элементами для измерения отражения ММ сыпучих материалов в спектральном диапазоне от 3 до 14 мкм [160]. Схема мюллер-НПВО-ИК-фурье-

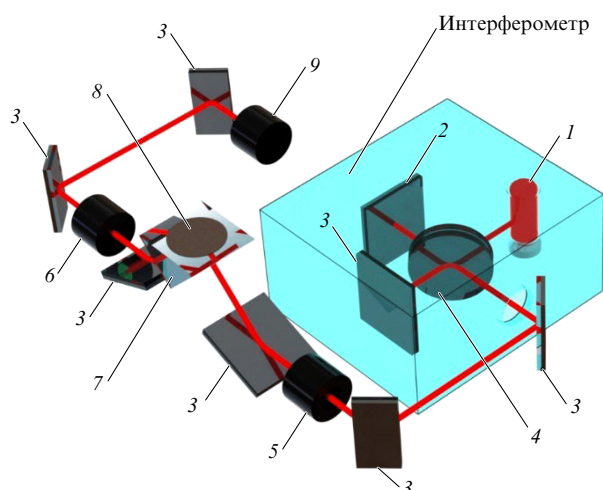


Рис. 7. Схема мюллер-НПВО-ИК-фурье-спектрометра для измерения ИК-спектров матричных элементов Мюллера образца, помещённого на поверхность НПВО: 1 — ИК-излучатель, 2 — подвижное зеркало, 3 — зеркала, 4 — лучевой делитель, 5 — ГСП, 6 — АСП, 7 — оптический элемент НПВО, 8 — образец, 9 — фотодетектор.

спектрометра для измерения ИК-спектров элементов ММ образца, помещённого на поверхность элемента НПВО, представлена на рис. 7.

Существующие реализации МП способны характеризовать органические и микробиологические дисперсии, поверхностные структуры и биологические ткани, получая поляризационно-контрастные изображения и микрофизические свойства (распределение частиц по размерам, фрактальные и анизотропные свойства) из измеренных ММ. Кроме того, МП может анализировать содержание органических компонентов в сельскохозяйственных материалах и продуктах (молоке и напитках, кормах и т.д.), а также диагностировать свойства почвы и растительности. Из ММ можно вывести специфические для материала параметры, которые могут служить индикаторами качества сельскохозяйственной продукции. Таким образом, МП можно рассматривать как эффективный диагностический инструмент в биологических и сельскохозяйственных исследованиях.

Рассмотренные примеры реализации МП показывают, что МП является мощным инструментом неинвазивной диагностики биоорганических систем, особенно в сочетании с другими оптическими методами, значительно расширяя их возможности. Приведённый выше обзор установок МП позволяет систематизировать оптические методы, дополненные ММ-измерениями, на группы в зависимости от

- геометрии образца: объёмной (мюллер-скаттерометрия, мюллер-спектрофотометрия, мюллер-флуориметрия) или поверхностной (мюллер-ОКТ и мюллер-эллипсометрия);

- свойства приходящего излучения: спектральных (спектрофотометрия и спектроскопическая мюллер-скаттерометрия, мюллер-флуориметрия и мюллер-эллипсометрия) или несектральных (мюллер-ОКТ и одноволновая мюллер-скаттерометрия, мюллер-флуориметрия и мюллер-эллипсометрия);

- полученной информации: визуальной (мюллер-ОКТ и другие методы поляризационно-чувствительной визуализации) или структурной (все методы, измеряющие ММ

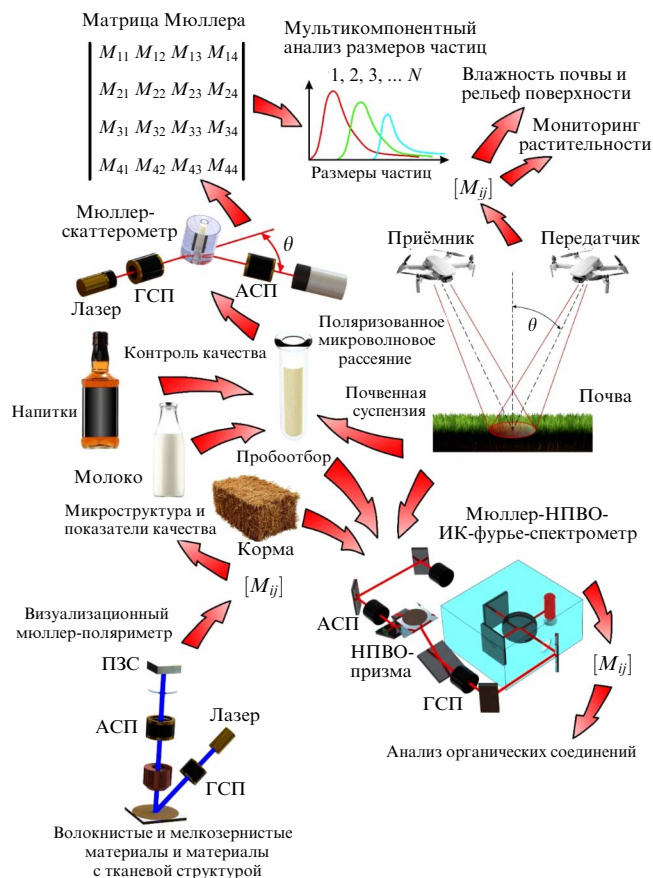


Рис. 8. Основные направления применения МП в сельском хозяйстве.

с последующим восстановлением микрофизических параметров образца с помощью обратного анализа;

- условий эксплуатации: стационарных или мобильных.

Основные сельскохозяйственные применения МП систематизированы с помощью блок-схемы на рис. 8.

7. Применение оптических методов для анализа качества молока и кормов

Производственный контроль качества молока, а также производимых из него продуктов является важной проблемой современной молочной промышленности. Важной задачей является создание технологических решений для экспресс-анализа сырого молока в процессе доения, без временной задержки. Обзор оптических методов, применяемых для диагностики состава молока, детально проведён в работе [161]. Самым популярным методом оценки качества молока оказалась ИК-спектроскопия в среднем инфракрасном диапазоне (~ 50 % работ). Наиболее часто анализируемыми компонентами, характеризующими качество исследуемого молока, являлись концентрации жира [162], общего белка, углеводов (лактозы) [163], а также казеина [164]. В небольшом числе исследований была рассмотрена возможность идентификации соматических клеток (индикатор мастита) [165, 166]. Также сообщалось о возможности обнаружения с помощью спектроскопии в среднем и ближнем ИК-диапазонах меламина [167] и свинца [168] в молоке.

Существенной проблемой при анализе сырого молока является агрегация жировых мицелл и белковых гло-

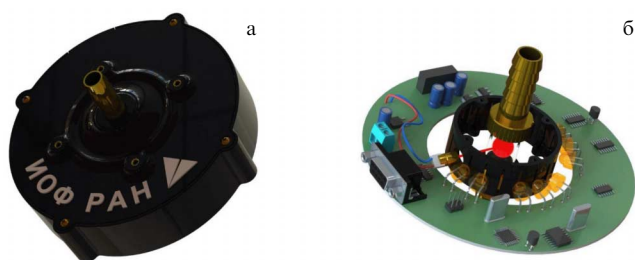


Рис. 9. Лазерный скаттерометрический датчик, разработанный в ИОФ РАН (концептуальная модель): (а) общий вид датчика; (б) компоновка датчика.

бул, препятствующих точной диагностике вследствие рассеяния [169]. Наличие воды в молоке усложняет БИК-спектроскопический анализ, в свою очередь, наличие микро- и макропузырьков воздуха также создаёт помехи [170]. Молоко содержит около 88 % воды, что даёт очень сильные полосы в ближнем ИК-диапазоне около 960, 1440, 1950 и 2076 нм, перекрывающиеся с некоторыми интересующими полосами [171]. Метод ИК-спектроскопии нуждается в точной калибровке и подборе оптимального алгоритма для интерпретации полученных спектров. Наиболее часто используются модели, построенные с использованием частичной регрессии наименьших квадратов (PLS) [172]. Для улучшения качества измерений необходимо применение более сложных моделей с предварительной обработкой спектральных данных [173]. Нужно отметить, что подавляющее большинство известных ИК-установок работают только с заранее отобранными пробами, измерение в потоке практически неосуществимо [161].

В ИОФ РАН разработан датчик для определения содержания жира в потоке молока (рис. 9а), имеющий цилиндрическую геометрию измерительной камеры, совместимой с молокопроводами (рис. 9б). Датчик основан на измерении углового распределения света, рассеянного молоком, протекающим внутри оптически прозрачной цилиндрической стеклянной трубки, с помощью лазерного диода, работающего на видимой длине волны, вместе с аксиальным фотодиодным массивом [174]. В настоящее время датчик интегрирован в первую российскую роботизированную доильную установку, разработанную ФНАЦ ВИМ. Наряду с измерением содержания основных компонентов молока актуальной задачей является также выявление крупномасштабных примесей, таких как соматические клетки. Эксперименты показывают, что начиная с определённого уровня концентрации (10^5 мл^{-1}) наличие в молоке крупных примесей приводит к относительному изменению интенсивности прямого рассеяния по сравнению с чистым молоком.

Очевидно, что эффективность молочного производства можно значительно повысить за счёт внедрения недорогих и компактных приборов [175]. В соответствии с требованием использовать контрольные устройства, которые не приводят к значительному падению давления в молочном шланге, при разработке датчиков качества молока для оборудования молочной фермы в первую очередь перспективны оптические методы диагностики, поскольку эти методы позволяют выполнять бесконтактную и неразрушающую диагностику с высокой чувствительностью и скоростью [138, 176, 177].

Как известно, качество и объём производимой молочной продукции зависят от состава и сбалансированности употребляемого животными корма. В связи с этим отдельное внимание уделяется контролю кормов сельскохозяйственных животных [178]. По данным литературы, для анализа кормов преимущественно применяется метод спектроскопии отражения в ближнем ИК-диапазоне (~90 % работ) и лишь в нескольких работах применялась спектроскопия в средней ИК-области. При этом наиболее часто анализируемыми при помощи БИК-спектроскопии компонентами кормов сельскохозяйственных животных, определяющими их энергетическую ценность и усвояемость, являются: содержание сырого протеина (СР), жиров, нейтрально-детергентной клетчатки (NDF), кислотно-детергентной клетчатки (ADF), водорастворимых углеводов (WSC), а также общего азота (N). Примечательно, что для анализа состава кормов также применяют другие оптические методы, в том числе люминесцентный анализ. В частности, в работах лаборатории Павкина сообщалось о возможности контроля гомогенности кормовых смесей при регистрации фотолюминесценции в диапазоне длин волн 390–540 нм (длины волн возбуждения 362 и 424 нм) [179, 180]. Подробно с применением оптических методов контроля кормов можно ознакомиться в обзоре [161].

8. Получение и применение наноразмерных объектов в сельском хозяйстве и пищевой промышленности

Антимикробные свойства металлов известны с древних времён. Широкий ряд металлов обладает противомикробным действием: Ag, Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Te, Zn [181]. В настоящее время значительно возрастает интерес к наночастицам (НЧ) металлов и их оксидов как соединениям с антибактериальным потенциалом [182]. Антимикробные свойства НЧ обусловлены, прежде всего, антимикробными свойствами элементов, входящих в их состав. Так, в частности, в случае НЧ серебра и его оксидов в качестве антимикробного соединения будут выступать ионы серебра Ag^+ [183]. Для НЧ оксидов металлов описано как минимум пять механизмов антибактериальной активности (рис. 10).

Первый механизм — непосредственное связывание наночастиц с клеточной стенкой бактерий и нарушение целостности клеточной стенки, прямое повреждение клеточной оболочки и компонентов цитоплазмы [184]. Предполагается, что после проникновения НЧ оксидов металлов в бактериальную клетку происходит высвобождение ионов металлов, обладающих бактерицидной активностью по описанным ниже механизмам.

Второй механизм токсичности — связывание ионов металлов (Ag^+ , Zn^{2+}) с SH-группами белков с последующим нарушением их функций. В частности, описана вызванная серебром и железом инактивация бактериальных ферментов, в частности, дегидрогеназ дыхательной цепи [185]. Это, в свою очередь, угнетает синтез аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ) и нарушает энергетический баланс в клетках [186]. Кроме того, НЧ оксидов металлов в ряде случаев способны высвобождать O_2 , который также может проявлять антибактериальную активность [187].

Третий механизм — развитие окислительного стресса. Описано два пути развития окислительного стресса.

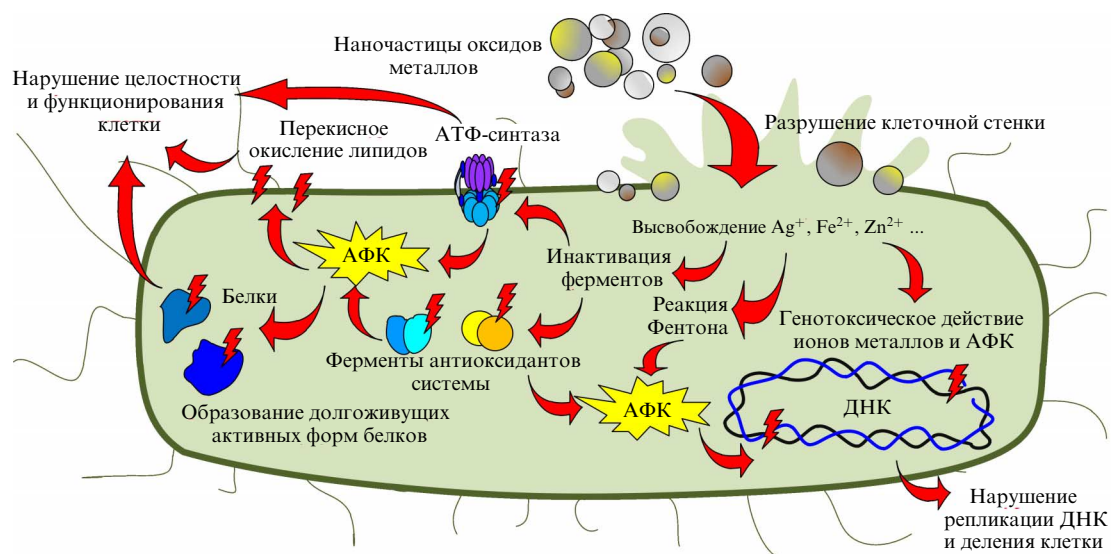


Рис. 10. Основные механизмы антибактериального действия НЧ оксидов металлов.

Первый — генерация активных форм кислорода (АФК) в реакции Фентона или подобной ей [188]. Второй — уменьшение активности ферментов антиоксидантной системы (SOD, каталазы, глутатионредуктазы) за счёт связывания ионов металлов с меркапто- ($-SH$), амино- ($-NH$) и карбоксильными ($-COOH$) группами белков [189]. АФК, в свою очередь, вызывают модификации белков и оказывают генотоксическое действие [190]. Кроме того, ионы металлов способны ускорять перекисное окисление липидов, нарушать липидно-белковые взаимодействия в бактериальной мембране [191]. Увеличение образования АФК приводит к разрушению клеточной стенки и биомембран как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий [192].

Четвёртым механизмом антибактериальной активности НЧ оксидов металлов является генотоксическая активность, обусловленная взаимодействием катионов металлов не только с белками, но и с остатками фосфорной кислоты в молекулах ДНК [193]. В частности, соединения серебра из НЧ Ag_2O или НЧ Ag также способны связываться с атомом N7 гуанина в ДНК, тем самым нарушая процесс её репликации и подавляя деление клеток [194]. НЧ оксидов металлов могут нарушать нормальную экспрессию генов у бактерий, в частности, снижать экспрессию генов, отвечающих за антибиотикорезистентность у антибиотикорезистентных бактерий, высвобождаемых из операционных [195].

Пятый механизм — фотокаталитическая активность, заключающаяся в усилении генерации АФК в присутствии света [196]. Примечательно, что композиты НЧ из нескольких оксидов, например, Ag_2O/TiO_2 или Ag_2O/ZnO демонстрируют повышенную фотокаталитическую активность по сравнению с НЧ, состоящими только из одного оксида [197].

Методы синтеза наночастиц металлов и их оксидов многочисленны и включают в себя химические, физико-химические и физические методы. К химическим методам синтеза можно отнести осаждение, термическое разложение, химическое осаждение из паровой фазы, низкотемпературный синтез, золь-гель метод, метод микроэмульсии, метод синтеза на полимере в качестве матрицы [198, 199]. К физико-химическим методам относятся

электрохимический, гидротермический, сонохимический [200, 201]. Физическими методами синтеза являются лазерная абляция в растворителе или газе, микроволновый, ультразвуковой метод, электроэрозивное диспергирование, электрический взрыв скрученных проводников [202–208]. Антимикробное действие зависит от условий синтеза НЧ, их размера и формы. Как правило, антимикробная активность НЧ растёт с уменьшением их размера [209]. НЧ округлой или звёздчатой формы чаще всего наиболее эффективны против бактерий [182].

Наночастицы металлов и их оксидов могут применяться в широком диапазоне областей, включая пищевую промышленность [210]. Применение в пищевой промышленности может включать создание новой биоразлагаемой упаковки с антибактериальными свойствами или защитных покрытий для рабочих поверхностей, в частности, на производстве мясной продукции [211, 212]. Добавление НЧ оксидов металлов в полимерную матрицу может позволить создать материалы нового поколения с антимикробными свойствами. В частности, НЧ оксидов металлов могут быть добавлены в полимерную матрицу из боросилоксана, PLGA (поли-лактат-ко-гликолевая кислота) или фторопласта (политетрафторэтилена) [212–214]. Наноматериалы на основе боросилоксана могут найти применение в изготовлении спортивной одежды, защитных самовосстанавливающихся покрытий для экранов техники, протезов и биомедицинских устройств, многоразового сухого дезинфицирующего средства [215]. Добавление НЧ оксидов металлов в полимерную матрицу PLGA позволит создавать материалы для биомедицинских применений, в том числе в протезировании [216]. Примечательно, что нанокompозит НЧ оксида серебра с PLGA проявлял выраженные бактериостатические свойства при концентрации НЧ менее 0,1 % от массы, что ниже, чем у других наноматериалов с НЧ оксида серебра, в частности, наноматериалов по типу НЧ/хитозан [217, 218]. Нанокompозит НЧ ZnO , Ag_2O или железа с фторопластом синтезируется в виде жидкой фазы, удобной для нанесения на различные поверхности, в том числе путём распыления. После затвердевания состава образуется прочная защитная плёнка, значительно ингибирующая рост эпидемиологически значимых

грамположительных (*L. monocytogenes*, *S. aureus*) и грам-отрицательных (*P. aeruginosa*, *S. typhimurium*) бактерий [211, 219]. При этом полученный композит не оказывал цитотоксического действия на культуру клеток эукариотов [211, 220]. Подобный наноматериал нашёл применение в пищевой промышленности, в частности, для обработки разделочных досок на мясоперерабатывающих предприятиях [219, 220].

9. Плазменные технологии в сельском хозяйстве

С начала XX в. основное внимание в исследованиях плазменных технологий было уделено изучению физики разрядов как источника низкотемпературной плазмы (НТП) атмосферного давления, разработке систем энергоснабжения, а также применению НТП в процессах очистки питьевой воды и воздушной среды. С начала 1990-х гг. наблюдается значительный прогресс в развитии технологий создания эффективных систем генерации НТП. В результате появились новые области применения, в том числе сельское хозяйство, обеспечение безопасности и сохранности продуктов питания [221]. Действие НТП на биологические объекты имеет сложный многофакторный характер. Основную вклад оказывают поток заряженных частиц и химически активные формы частиц, инфракрасное излучение (тепло), электрическое поле, механические волны, ультрафиолетовое излучение. Для сельского хозяйства, а точнее применительно к растениям и посадочному материалу, можно выделить несколько ключевых эффектов такого синергетического воздействия. Во-первых, предпосевная обработка семян НТП может стимулировать их прорастание, повышение выхода семян, а также улучшить дальнейший их рост и развитие [222]. Воздействие НТП приводит к активации физиологических процессов и увеличению проницаемости клеточных мембран, что в свою очередь способствует более эффективному поглощению влаги и питательных веществ. Во-вторых, плазменную обработку можно использовать для профилактики и борьбы с заболеваниями растений, уничтожения бактерий и грибков, а также для дезинфекции семян и почвы [223]. В-третьих, обработка НТП взрослых растений может приводить к повышению содержания хлорофилла, ускорению фотосинтеза, увеличению плодоношения, способствовать росту корней и увеличению устойчивости растений к стрессам различной природы [224].

Существующие в настоящее время источники низкотемпературной плазмы для применения в сельском хозяйстве обычно являются прототипами приборов с ограниченными возможностями применения в полевых условиях, которые предъявляют повышенные требования не только к уровню квалификации персонала, но и к электробезопасности, состоянию помещения и т.д. К недостаткам таких приборов можно отнести неравномерность воздействия плазмы на объекты сложной формы, что снижает результативность и выход качественной (годной) продукции. Также нерешённой проблемой является сопоставление результатов воздействия генераторов низкотемпературной плазмы различных видов и характеристик, а также экстраполяция этих результатов на все востребованные виды сельскохозяйственных растений. Перечисленные особенности в совокупности с техническими сложностями при масштабировании тех-

нологии замедляют внедрение плазменной обработки растений и посадочного материала в реальный сектор экономики [225].

Альтернативный, легко масштабируемый способ использования источников НТП в сельском хозяйстве — изготовление с их помощью плазменно-активированной воды (ПАВ) или солевых растворов (ПАР) и последующая обработка с помощью них биологических объектов. Это, в свою очередь, потребовало изучения и анализа реакций, протекающих между воздушной и водной средой под действием НТП газовых разрядов. В настоящее время разработано большое количество методов исследования жидкостей и радикальных реакций, происходящих в них [226–232]. Известно, что при воздействии плазмы на жидкость в ней возникает широкий спектр вторичных активных частиц, в том числе обладающих малыми константами скорости реакции. При взаимодействии содержащихся в ПАВ и ПАР долгоживущих АФК и активных форм азота (АФА) [233–235] с биологическими объектами наблюдается каскад физико-химических процессов с концентрационно-зависимым характером. ПАВ и ПАР сохраняют химическую активность сравнительно длительное время и могут быть экологически чистой альтернативой химическим удобрениям. Исследование наработки АФА и АФК в жидкостях необходимо для характеристики и стандартизации любого лабораторного или промышленного источника НТП.

В основу работы основных типов источников НТП, получивших широкое применение в последние годы в агроботанике, заложены: 1) коронный разряд, 2) искровой разряд, 3) подводный электрический разряд, 4) разряд с диэлектрическим барьером и 5) генерация плазменной струи.

Коронный разряд возникает из-за ионизации воздуха, сопровождающейся свечением, под действием сильно неоднородного электрического поля вблизи проводника. Коронный разряд происходит только вблизи одного электрода, и свечение короны не распространяется на противоположный электрод, который может находиться на значительном удалении, и в его роли может выступать обрабатываемый объект. Коронный разряд широко применяется для очистки газов от пыли и загрязнений, а также в озонаторах. При воздействии коронного разряда на поверхность воды наблюдается изменение химического состава [236, 237]. Обеззараживающее действие плазмы коронного разряда на грибковые заболевания семян озимой пшеницы и озимого ячменя продемонстрировано в [238]. Исследование воздействия коронного разряда на дисперсные среды (плодородная почва, глина, песок) [239] показало не только значительное изменение электропроводности, гранулометрического и макроэлементного составов, но и увеличение содержания азотсодержащих компонентов, что приводит к улучшению плодородия почвы.

Искровой разряд возникает между электродами, расположенными на некотором расстоянии друг от друга. В качестве второго электрода может выступать обрабатываемый объект. Мощность источника питания при этом должна быть недостаточной для поддержания дугового разряда или тлеющего. В системе с прямым воздействием искрового разряда, где в качестве электрода используется пьезоэлектрический трансформатор (многофункциональный источник "Cold Atmospheric Plasma — САРКО" разработан в ИОФ РАН), один из режимов

работы позволяет инициировать искровой разряд над поверхностью жидкостей [240, 241]. Единовременный объём жидкости, подвергаемый воздействию плазмы, не превышает 100 мл, а потребляемая мощность источника не превышает 10 Вт. Такая энергоэффективная методика позволяет активировать жидкости различного состава, при этом происходит генерация АФК и АФА. Для генерации ПАР больших объёмов для сельскохозяйственных приложений в ИОФ РАН разработан модульный многоискровой кольцевой реактор, позволяющий осуществлять как обработку заданного объёма жидкости, так и непрерывную обработку в проточном режиме [242]. В установке реализуется высоковольтный импульсно-периодический многоэлектродный разряд в жидкости с инъекцией газа в межэлектродных промежутках. Благодаря высокой энергии и достаточно большой длительности импульсов в каждом промежутке (1,6 Дж; 1,5 мкс) удаётся достичь относительно высокой скорости генерации ПАР. В зависимости от режимов работы, инъектируемого газа, материала электродов и состава исходной жидкости возможно создать ПАР с широким диапазоном концентраций АФК и АФА, а также растворённых металлов и наночастиц.

Подводный электрический разряд, как правило, формируется в импульсном режиме погружённым в жидкость электродом. За счёт электрохимических процессов и перегрева жидкости разряд возникает в парогазовых пузырьках у поверхности электрода, а также в пузырьках воздуха, при необходимости подаваемого через трубки в область разряда. Процесс сопровождается эмиссией электронов с катода под воздействием ударов ионов и фотоэлектронной эмиссии. Из-за эрозии материала электрода ПАР содержит наночастицы, растворённые ионы металлов и их соединений. Один из вариантов реализации данной схемы генерации ПАВ представлен в статье [243], в которой при использовании углеродных электродов и дополнительной инъекции воздуха были получены существенные концентрации АФА и АФК в водных растворах. Это привело к большей по сравнению с контролем всхожести семян огурца (*Cucumis sativus*), обработанных таким ПАВ.

Более продуктивный реактор разработан в ИОФ РАН под руководством Данилейко. В основу конструкции реактора положены схожие принципы, в сосуд с электролитом погружены два электрода — активный и пассивный [244]. Электроды могут быть изготовлены из различных материалов, например, активный электрод из платины, пассивный электрод из пиролитического графита. Они подключаются к высокочастотному генератору, способному работать в широком диапазоне частот, при этом вкладываемая в разряд мощность достаточна для образования парогазового пузыря на активном электроде и поджига разряда в паровой фазе [245]. В качестве обрабатываемой жидкости используется электролит: водный раствор соли (в зависимости от целей это NaCl, KNO₃ и т.п.) с концентрацией 1–5%. Свежеприготовленный раствор на основе NaCl обладает хорошими дезинфицирующими свойствами, что продемонстрировано при создании низкотемпературного стерилизатора ножей для мясных производств [246]. Другие устройства авторов на основе подводного электрического разряда способны к наработке в растворе условий, в которых химически активные соединения сохраняются достаточно долго. В то же время наблюдается медленное разру-

шение активного электрода с образованием наночастиц с характерным размером 10–20 нм. Растворы, полученные с помощью таких устройств, часто применяются в разбавленном виде (от 1:100 до 1:2000) для полива, наполнения гидропонных, аэропонных систем и систем генерации тумана. Эффективность ПАР продемонстрирована и на примере проращивания семян сорго [247]: растение демонстрирует устойчивость к засухе, поставлены обширные полевые эксперименты в солончаковой полупустыне Северного Прикаспия. Также ПАР может способствовать более качественному срастанию срезов растений при их прививке [248], а также оказывать существенное влияние на содержание Са в плодах яблони при поливе [249], что может положительным образом сказаться на длительности хранения плодов.

Разряд с диэлектрическим барьером, или диэлектрический барьерный разряд (ДБР), является простым и относительно безопасным методом создания плазмы, так как в этом типе разряда ток проводимости и перенос заряда блокируются диэлектрическим барьером. Представляет собой серию быстропотекающих микроударов в газе при условии, что хотя бы один из электродов отделён от газа диэлектрическим барьером. Размеры электродов в ДБР значительно превышают ширину разрядного зазора, который варьируется от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Такие разряды широко применяются для обработки поверхностей с большой площадью, а в агробиологии для непосредственной обработки посадочного материала или поверхности растения с целью дезинфекции и борьбы с патогенами.

В работах [248, 250] описывается оригинальная методика прививки садовых растений (груши и черешни) с использованием ДБР. Исследования показали, что плазменная обработка срезов привоя и подвоя приводит в дальнейшем к более качественному формированию зоны прививки и более быстрому набору биомассы растения и, как следствие, к уменьшению срока вывода растения на рынок. Методом импедансной спектроскопии [251, 252] показано, что после плазменной обработки наблюдается формирование более развитой сосудистой системы в зоне прививки.

Плазменная струя атмосферного давления создаётся плазменными генераторами на основе электродуговых разрядов и индукционных разрядов высокой частоты. Электродуговые разряды обладают мощностями от сотен Вт до нескольких МВт, при этом генерируемая плазма содержит частицы электродов из-за их эрозии. Впоследствии были разработаны генераторы, использующие индукционный разряд высокой и сверхвысокой частоты. Такие генераторы позволяют изолировать разряд от электродов и стенок разрядной камеры и получать плазму без контакта с элементами плазмотрона. Подобные системы, как правило, применяются в решении экологических задач, требующих высоких температур и значительного энергетического вложения. Более экономичные плазменные струи создаются с помощью искрового разряда или разряда с диэлектрическим барьером с протоком инертных газов (например, аргона и гелия). Они получили наибольшее распространение в области медицины.

В цикле работ [253, 254] описывается многоэлектродный коаксиальный плазмотрон как источник низкотемпературной плазмы с большой площадью обработки. Инициация разряда происходит в протоке инертного газа с помощью микроволнового излучения с частотой

2,45 ГГц и мощностью в факеле ~ 100 Вт. Другим коллективом на основе СВЧ-плазмотрона создана установка активации воды для широкого спектра биологических приложений [255]. Источником энергии для генерации плазмы является магнетрон мощностью 1,2 кВт, который работает на частоте 2,45 ГГц в режиме непрерывной генерации. Полученные на этой установке ПАР, разбавленные в дистиллированной воде до концентрации 0,5–1,0 %, повышают энергию прорастания, защищают от фузариоза и гипертермии семени хлопчатника, пшеницы и земляники [256].

В целом, исследования по применению низкотемпературной плазмы и плазменно-активированных растворов (ПАР) в сельском хозяйстве демонстрируют высокий потенциал по увеличению урожайности и качества сельскохозяйственных культур, уменьшению заболеваемости растений, борьбе с вредителями и патогенами, а также по улучшению устойчивости к стрессовым условиям. Плазменные технологии представляют компромиссный подход с точки зрения экологической безопасности, который может снизить использование химических удобрений и пестицидов. Дальнейшее исследование и практическое внедрение плазменных технологий может оказать значительное влияние на сельскохозяйственное производство.

10. Оптические методы обнаружения фитопатогенов

Болезни растений рассматриваются как фактор риска, поскольку их трудно обнаружить и идентифицировать на ранних стадиях [257]. Фитопатогены могут поражать как растения, так и собранный урожай. Вовремя проведённая диагностика может спасти больше 50 % общего урожая сельскохозяйственных культур во всём мире, а также сэкономить на использовании пестицидов посредством ранней изоляции больных растений и, как следствие, недопущения распространения инфекции. В данном разделе приводится обзор последних достижений в области оптических методов, применяемых в фитопатологии. Оптические методы отличает быстрота, простота использования, возможность скрининга больших площадей, невысокая цена, малое количество обслуживающего персонала. Развитие технических средств получения оптической информации, систем мониторинга и компьютерной обработки данных также способствует активному внедрению оптических методов в сферу обнаружения фитопатогенов [258].

Спектральная визуализация — пожалуй, самый обширный класс методов — основан на детекции отражённого, реже поглощённого или прошедшего через объект света. Методы предполагают получение изображений объектов, в которых каждый пиксель несёт спектральную информацию — по увеличению количества спектральных полос и уменьшению их ширины. Выделяют RGB imaging, мультиспектральную и гиперспектральную визуализацию (HyperSpectral Imagery, HSI) [259]. Считается, что HSI даёт большое количество информации и позволяет обнаруживать более широкий спектр болезней, нежели RGB визуализация. При этом HSI имеет недостатки: высокая стоимость, сложность сенсоров и оптических компонентов, большие времена получения данных и сложность обработки и анализа. На основе спектральной визуализации разработана оптиче-

ская система с модулем ориентации для обнаружения поверхностных повреждений и заражений клубней картофеля [260].

ИК-спектроскопия. ИК-спектры обычно грубо разделяют на три области: ближняя ИК (NIR) (780–2500 нм), средняя ИК (MIR) (2500–25000 нм) и дальняя ИК (FIR) (25000–300000 нм). NIR- и MIR-спектроскопия позволяет извлекать информацию о химических составляющих и генерировать так называемые "отпечатки пальцев". Спектры MIR могут более подходящим образом использоваться для изучения основных колебаний и связанных с ними структур вращательных колебаний, в то время как спектры NIR могут более легко активировать обертоны или гармонические колебания. С помощью ИК-спектроскопии разработан метод для диагностики грибковой инфекции рода *Fusarium* овса сорта "Залп" [261].

Спектроскопия комбинационного рассеяния. Главное преимущество спектроскопии комбинационного рассеяния — отсутствие влияния воды на спектр, недостатки же — возможная флуоресценция образца, которая может скрыть спектр, а также интенсивное лазерное излучение источника, способное повредить образец. Использование NIR лазеров позволяет избежать флуоресценции образцов. Обычно применяются ИК-лазеры, реже зелёные лазеры. Детекция сдвига производится обычно в диапазоне 700–1800 см^{-1} . Анализируют интенсивность и сдвиг линий, иногда — ширину пиков. С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния определяют микотоксины грибов рода фузариум на семенах озимой пшеницы [262].

Флуоресцентные методы. Флуоресценция — явление переизлучения поглощённого света с некоторой потерей энергии, обусловленной особенностями строения вещества. В отличие от спектров отражения, спектры флуоресценции связаны с электронными состояниями молекул. Концентрация и химические модификации молекул позволяют судить о функциональном состоянии растения, поэтому измерение флуоресценции зачастую связано с биохимическими и физиологическими изменениями, индуцированными патогенами и/или другими факторами. С помощью флуоресцентных методов выявляют фузариоз [263–265]. Флуоресцентную спектроскопию используют для обнаружения гнили в овощных и фруктовых культурах [266, 267].

Терагерцевая спектроскопия во временной области — это спектроскопический метод, в котором свойства вещества исследуются с помощью коротких импульсов терагерцевого излучения. Метод THz-TDS позволяет чётко установить наличие или отсутствие патогена в растении, требует довольно длительной подготовки образцов перед измерением. Показано, что метод THz-TDS позволяет оценивать степень заражения семян злаков (овёс, пшеница и ячмень) фузариозом и клубней картофеля — фитофторозом. Изменения наблюдаются в показателях преломления, коэффициентах поглощения и диэлектрических функциях у здоровых и заражённых растений [268]. Также метод THz-TDS применим для идентификации грибковых поражений каштанов [269]. В целом, в ближайшее время можно ожидать большого количества работ по детекции патогенов растений с помощью THz-TDS [270].

В настоящее время применение оптических методов носит эмпирический, опытный, поисковый характер. Не

всегда понятен механизм, лежащий в основе оптических признаков заболевания, не хватает работ, объясняющих и обладающих способностью предсказывать эти оптические изменения. Оптические методы имеют несомненные перспективы в будущей массовой диагностике патогенов и болезней растений, хотя и нуждаются в дальнейшем улучшении как инструментальной, так и аналитической частей.

Список литературы

- Jang S J, Mennucci B *Rev. Mod. Phys.* **90** 035003 (2018)
- Mirkovic T et al. *Chem. Rev.* **117** 249 (2017)
- Goldberg D E *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning* (Reading, MA: Addison-Wesley Publ. Co., 1989)
- Holland J H *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence* (Ann Arbor, MI: Univ. of Michigan Press, 1975)
- Vaitekonis S, Trinkunas G, Valkunas L *Photosynth. Res.* **86** 185 (2005)
- Brüggemann B et al. *J. Phys. Chem. B* **108** 13536 (2004)
- Trinkunas G, Holzwarth A R *Biophys. J.* **71** 351 (1996)
- Raszewski G, Saenger W, Renger T *Biophys. J.* **88** 986 (2005)
- Trinkunas G et al. *J. Phys. Chem. B* **101** 7313 (1997)
- Adolphs J, Renger T *Biophys. J.* **91** 2778 (2006)
- Darwish A, Hassanien A E, Das S *Artif. Intell. Rev.* **53** 1767 (2020)
- Del Ser J et al. *Swarm Evolut. Comput.* **48** 220 (2019)
- Slowik A, Kwasnicka H *Neural Comput. Appl.* **32** 12363 (2020)
- Bilal et al. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **90** 103479 (2020)
- Storn R, Price K J. *Global Optimizat.* **11** 341 (1997)
- Pishchalnikov R Y et al. *Photosynth. Res.* **156** 3 (2023)
- Chesalin D D, Pishchalnikov R Y *Mathematics* **10** 959 (2022)
- Pishchalnikov R Y et al. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **21** 25707 (2019)
- Pishchalnikov R J. *Comput. Phys.* **372** 603 (2018)
- Chesalin D D et al. *Algorithms* **16** (1) 3 (2023)
- Mukamel S *Principles of Nonlinear Optical Spectroscopy* (New York: Oxford Univ. Press, 1995)
- Tretiak S, Mukamel S *Chem. Rev.* **102** 3171 (2002)
- Smirnov A A et al. *Agriculture* **12** 1988 (2022)
- Semenova N A et al. *Energies* **15** 8076 (2022)
- Semenova N A et al. *Appl. Sci.* **12** 7190 (2022)
- Tikhonov P et al. *Agriculture* **12** 1215 (2022)
- Gudkov S V et al. *Phys. Wave Phenom.* **25** 207 (2017)
- Chen Y et al. *Front. Plant Sci.* **10** 1563 (2019) <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01563>
- Smith H L, McAusland L, Murchie E H J. *Exp. Botany* **68** 2099 (2017)
- Zhen S, Haidekker M, van Iersel M W *Physiol. Plantarum* **167** (1) 21 (2019)
- Kreslavski V D et al. *Biochim. Biophys. Acta BBA Bioenerg.* **1859** 400 (2018)
- Petroutsos D et al. *Nature* **537** 563 (2016)
- McCree K J *Agric. Meteorol.* **9** 191 (1971–1972)
- Paskhin M O, Yanykin D V, Gudkov S V *Horticulturae* **8** 885 (2022)
- Magnani G et al. *Acta Hort.* **801** 163 (2008)
- Stagnari F et al. *J. Sci. Food Agric.* **94** 713 (2014)
- Casal J J, Sánchez R A *Seed Sci. Res.* **8** (3) 317 (1998)
- Penfield S, King J *Proc. R. Soc. Lond. B* **276** 3561 (2009)
- Kambalappally V R, Rajapakse N C *Hortic. Sci.* **33** 1028 (1998)
- Rajapakse N C, Kelly J W *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **117** 481 (1992)
- Hernández R, Kubota C *Acta Hort.* **956** 187 (2012)
- Mishra K, Stanghellini C, Hemming S *Adv. Sustain. Syst.* **7** 2200503 (2023)
- Shubbak M H *Renew. Sustain. Energy Rev.* **115** 109383 (2019)
- Lu L et al. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **52** (Pt. A) 102077 (2022)
- Gudkov S V et al. *J. Photochem. Photobiol. B* **213** 112056 (2020)
- Shen L, Yin X *Nano Convergence* **9** 36 (2022)
- Ivanyuk V V et al. *Front. Phys.* **8** 616040 (2020) <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.616040>
- Simakin A V et al. *Appl. Sci.* **10** 8025 (2020) <https://doi.org/10.3390/app10228025>
- Shoji S et al. *Sci. Rep.* **12** 17155 (2022)
- Ke-li Z et al. *Wuhan Univ. J. Nat. Sci.* **7** 365 (2002)
- Sánchez-Lanuz M B et al. *Materials* **14** 2357 (2021)
- Yoon H I et al. *Hortic. Environ. Biotechnol.* **61** 999 (2020)
- Parrish C H (II) et al. *Commun. Biol.* **4** 124 (2021)
- Wu W et al. *J. Rare Earths* **38** 539 (2020)
- Chiu Y-H et al. *Catalysts* **9** 430 (2019)
- Палкина К К и др. *Журн. неорганической химии* **45** 586 (2000); Palkina K K et al. *Russ. J. Inorg. Chem.* **45** 515 (2000)
- Minich A S et al. *Вестн. Томского гос. педагогического ун-та* (8(110)) 78 (2011)
- Fitzmorris B C et al. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **5** 2893 (2013)
- Pu Y-C et al. *J. Mater. Chem. A* **6** 17503 (2018)
- Powles S B *Annu. Rev. Plant Physiol.* **35** 15 (1984)
- Grinberg M et al. *Plants* **11** 229 (2022)
- Овсянкин В В, Феофилов П П *Письма в ЖЭТФ* **3** 494 (1966); Ovsyankin V V, Feofilov P P *JETP Lett.* **3** 322 (1966)
- Yanykin D V et al. *Agronomy* **12** 108 (2022)
- Burmistrov D E et al. *Appl. Sci.* **11** 10726 (2021)
- Yanykin D V et al. *Appl. Sci.* **12** 7480 (2022)
- Yalçın R A, Ertürk H *Biosyst. Eng.* **193** 25 (2020)
- Campbell P, Green M A *J. Appl. Phys.* **62** 243 (1987)
- Makarov N S et al. *ACS Nano* **13** 9112 (2019)
- Marcelis L F M et al. *Acta Hort.* **711** 97 (2006)
- MacQueen R W et al. *Opt. Express* **18** (S2) A161 (2010)
- de Boer D K G et al. *Appl. Phys. Lett.* **98** 021111 (2011)
- Bulatov M I et al. *Phys. Wave Phenom.* **30** 397 (2023)
- Chang A et al. *Comput. Electron. Agric.* **141** 232 (2017)
- Khanal S et al. *Remote Sens.* **12** 3783 (2020)
- Sishodia R P, Ray R L, Singh S K *Remote Sens.* **12** 3136 (2020)
- Kior A, Sukhov V, Sukhova E *Photonics* **8** 582 (2021)
- Weiss M, Jacob F, Duveiller G *Remote Sens. Environ.* **236** 111402 (2020)
- Neumann G A *Phys. Today* **56** (1) 50 (2003); Bunkin A, Voliak K *Laser Remote Sensing of the Ocean: Methods and Applications* (New York: Wiley, 2001)
- Wang L et al. *Remote Sens. Environ.* **231** 111223 (2019)
- Günther K P, Dahn H-G, Lüdeker W *Remote Sens. Environ.* **47** 10 (1994)
- Lavrov A et al. *Opt. Spectrosc.* **112** 271 (2012)
- Bunkin A et al. *Laser Phys.* **4** 1198 (1994)
- Bunkin A F, Pershin S M *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Suppl. Phys. Vibrations* **61** (3) 164 (1997)
- Myasnikov A V et al. *Phys. Wave Phenom.* **30** 119 (2022)
- Fan B et al. *Chinese J. Electron.* **29** (2) 199 (2020)
- Zhao X et al. *IEEE Sensors J.* **20** 4901 (2020) <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2966034>
- Леднев В Н и др. *Краткие сообщения по физике ФИАН* (3) 40 (2023); Lednev V N et al. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **50** (3) 103 (2023)
- Lednev V N et al. *Photonics* **9** 963 (2022)
- Lu J et al. *Appl. Opt.* **59** (10) C1 (2020) <https://doi.org/10.1364/AO.59.0000C1>
- Гришин М Я и др. *Доклады РАН. Физика, технические науки* **498** 3 (2021); Grishin M Ya et al. *Dokl. Phys.* **66** (6) 153 (2021)
- Гришин М Я и др. *Доклады РАН. Физика, технические науки* **500** 7 (2021); Grishin M Ya et al. *Dokl. Phys.* **66** (10) 273 (2021)
- Wang X et al. *Appl. Phys. B* **124** 207 (2018)
- Yu K, Ren J, Zhao Y *Artif. Intell. Agric.* **4** 127 (2020)
- Soodan R K et al. *Talanta* **125** 405 (2014)
- Palmer P T et al. *J. Agric. Food Chem.* **57** 2605 (2009)
- Arantes de Carvalho G G et al. *J. Anal. Atom. Spectrom.* **33** 919 (2018)
- Sdvizhenskii P A, Lednev V N *Phys. Wave Phenom.* **30** 37 (2022)
- Lednev V N et al. *Phys. Wave Phenom.* **29** 221 (2021)
- Yang Z et al. *Sensors* **22** 5858 (2022)
- Senesi G S et al. *Environmental Res.* **109** 413 (2009)
- Wisbrun R et al. *Anal. Chem.* **66** 2964 (1994)
- Ciucci A et al. *Appl. Phys. B* **63** 185 (1996)
- Popov A M et al. *Spectrochim. Acta B* **148** 205 (2018)
- Першин С М *Квантовая электроника* **39** 63 (2009); Pershin S M *Quantum Electron.* **39** 63 (2009)
- Corsi M et al. *Appl. Geochem.* **21** 748 (2006)
- Erlar A et al. *Sensors* **20** 418 (2020)

107. Diaz D, Hahn D W, Molina A *Appl. Spectrosc.* **66** 99 (2012)
108. Zaytsev S M et al. *Spectrochim. Acta B* **140** 65 (2018)
109. Villas-Boas P R et al. *Geoderma* **263** 195 (2016)
110. Ferreira E C et al. *Spectrochim. Acta B* **110** 96 (2015)
111. Zhang Y, Zhang T, Li H *Spectrochim. Acta B* **181** 106218 (2021)
112. Sobral H, Sanginés R, Trujillo-Vázquez A *Spectrochim. Acta B* **78** 62 (2012)
113. Kang J et al. *J. Anal. Atom. Spectrom.* **32** 2292 (2017)
114. Järvinen S T, Saarela J, Toivonen J *Spectrochim. Acta B* **86** 55 (2013)
115. Sezer B, Bilge G, Boyaci I H *TrAC Trends Anal. Chem.* **97** 345 (2017)
116. Yang P et al. *J. Anal. Atom. Spectrom.* **37** 1948 (2022)
117. Lednev V N et al. *J. Anal. Atom. Spectrom.* **37** 2563 (2022)
118. Nunes L C et al. *J. Anal. Atom. Spectrom.* **25** 1453 (2010)
119. Barbaferi M et al. *Chem. Ecology* **27** (sup1) 161 (2011)
120. Galiová M et al. *Spectrochim. Acta B* **62** 1597 (2007)
121. Kaiser J et al. *Spectrochim. Acta B* **64** 67 (2009)
122. Kumar R et al. *Spectrosc. Lett.* **47** 554 (2014)
123. Krajcarová L et al. *Talanta* **173** 28 (2017)
124. Modlitbová P, Pořízka P, Kaiser J *TrAC Trends Anal. Chem.* **122** 115729 (2020)
125. Lednev V N et al. *Photonics* **8** 563 (2021)
126. Lednev V N et al. *Appl. Opt.* **62** 2030 (2023)
127. Bilge G et al. *Eur. Food Res. Technol.* **242** 1685 (2016)
128. Martelli M R et al. *J. Agric. Food Chem.* **58** 7126 (2010)
129. Zhao M et al. *Food Chem.* **309** 125704 (2020)
130. Moncayo S et al. *Talanta* **158** 185 (2016)
131. Andersen M-B S et al. *Food Control* **64** 226 (2016)
132. Kim G et al. *J. Agric. Food Chem.* **60** 718 (2012)
133. Jabbar A et al. *Optoelectron. Lett.* **15** 57 (2019)
134. Senesi G S, Harmon R S, Hark R R *Spectrochim. Acta B* **175** 106013 (2021)
135. Penkov N V, Penkova N A *Phys. Wave Phenom.* **29** 164 (2021)
136. Likhachev I G, Pustovoy V I *Phys. Wave Phenom.* **30** 91 (2022)
137. Berry G C *J. Solution Chem.* **25** 919 (1996)
138. Palberg T, Ballauff M (Eds) *Optical Methods and Physics of Colloidal Dispersions* (Progress in Colloid and Polymer Science, Vol. 104) (Berlin: Springer-Verlag, 1997) <https://doi.org/10.1007/BFb0110733>
139. Arwin H et al. *Appl. Sci.* **11** 6742 (2021)
140. Boulvert F et al. *Opt. Commun.* **282** 692 (2009)
141. Ignatenko D N et al. *Appl. Sci.* **12** 5258 (2022)
142. Shkirin A V et al. *Agriculture* **11** 1028 (2021)
143. Shkirin A V et al. *Phys. Wave Phenom.* **30** 186 (2022)
144. Kolokolova L et al. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **100** 199 (2006)
145. Ghosh N, Vitkin A I *J. Biomed. Opt.* **16** 110801 (2011)
146. Fanjul-Velez F et al., in *2007 29th Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 22–26 August 2007* (Piscataway, NJ: IEEE, 2007) p. 3339, <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353045>
147. Ramella-Roman J C, Prah S A, Jacques S L *Opt. Express* **13** 4420 (2005)
148. Ramella-Roman J C, Prah S A, Jacques S L *Opt. Express* **13** 10392 (2005)
149. Wang X, Yao G, Wang L V *Appl. Opt.* **41** 792 (2002)
150. Wang L-F "Monte Carlo simulation model for electromagnetic scattering from vegetation and inversion of vegetation parameters", Thesis Ph.D. (Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2007); <http://hdl.handle.net/1721.1/38923>
151. Tuchin V V *J. Biomed. Opt.* **21** 071114 (2016) <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.7.071114>
152. Tuchin V V, Dan Z, Genina E A *Handbook of Tissue Optical Clearing: New Prospects in Optical Imaging* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2022)
153. Shindo Y et al. *Rev. Sci. Instrum.* **64** 1161 (1993)
154. Проценко Е Д, Тымпер С И, Шкирин А В *Приборы и техника эксперимента* (2) 118 (2008); Protsenko E D, Tymper S I, Shkirin A V *Instrum. Exp. Tech.* **51** 268 (2008)
155. He H et al. *J. Lightwave Technol.* **37** 2534 (2019)
156. Pezzaniti J L, Chipman R A *Opt. Eng.* **34** 1558 (1995) <https://doi.org/10.1117/12.202109>
157. Mujat M, Ferguson R D, Iftimia N "Mueller matrix microscopy", in *Polarization Science and Remote Sensing VI, 26, 28–29 August 2013, San Diego, CA, USA* (Proc. SPIE, Vol. 8873, Eds J A Shaw, D A LeMaster) (Bellingham, WA: SPIE, 2013) p. 88730E
158. Chue-Sang J et al. *J. Biomed. Opt.* **21** 071109 (2016)
159. Lundblad J R, Laurance M, Goodman R H *Mol. Endocrinology* **10** 607 (1996) <https://doi.org/10.1210/mend.10.6.8776720>
160. Deibler L L, Smith M H *Appl. Opt.* **40** 3659 (2001)
161. Burmistrov D E et al. *Photonics* **8** 551 (2021)
162. Kalinin A V, Krashennnikov V N *J. Appl. Spectrosc.* **75** 288 (2008)
163. Lei Y et al. *J. Mol. Struct.* **974** 88 (2010)
164. Cheruiyot E K et al. *Front. Genet.* **9** 607 (2018) <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00607>
165. Rienesl L et al. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* **67** 1221 (2019)
166. Khakimov A R et al. *Appl. Sci.* **12** 6621 (2022)
167. Balabin R M, Smirnov S V *Talanta* **85** 562 (2011) <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2011.04.026>
168. Moguilnaia T Yu et al., in *Photonic Detection and Intervention Technologies for Safe Food* (Proc. SPIE, Vol. 4206, Eds Y-R Chen, S-I Tu) (Bellingham, WA: SPIE, 2000) p. 256
169. Cattaneo T M P, Holroyd S E *J. Near Infrared Spectrosc.* **21** 341 (2013)
170. Агеев А И, Осипцов А Н *Доклады РАН. Физика, технические науки* **493** 38 (2020); Ageev A I, Osipov A N *Dokl. Phys.* **65** 242 (2020)
171. Mohamed H et al. *Food Chem.* **334** 127436 (2021)
172. Melenteva A et al. *Food Chem.* **203** 190 (2016)
173. Soyeyrt H et al. *J. Dairy Sci.* **94** 1657 (2011)
174. Shkirin A V et al. *Appl. Sci.* **12** 12517 (2022)
175. Kirsanov V V et al. *Photonics* **8** 390 (2021)
176. Khosroshahi M E, Patel Y, Woll-Morison V *Laser Phys. Lett.* **19** 075602 (2022)
177. Щербаков И А *Доклады РАН. Физика, технические науки* **492** 4 (2020); Shcherbakov I A *Dokl. Phys.* **65** (6) 195 (2020)
178. Nikitin E A et al. *Appl. Sci.* **12** 3230 (2022)
179. Беляков М В, Никитин Е А, Ефременков И Ю *Сельскохозяйственные машины и технологии* **16** (3) 55 (2022) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-55-61>
180. Беляков М В и др. *Техника и оборудование для села* (2) 31 (2023)
181. Lemire J A, Harrison J J, Turner R J *Nat. Rev. Microbiol.* **11** 371 (2013)
182. Gudkov S V et al. *Front. Phys.* **9** 641481 (2021)
183. Gudkov S V et al. *Pharmaceuticals* **15** 968 (2022)
184. Sondi I, Salopek-Sondi B *J. Colloid Interface Sci.* **275** 177 (2004)
185. Gomaá E Z *J. Gen. Appl. Microbiol.* **63** (1) 36 (2017)
186. Gabrielyan L et al. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **103** 2773 (2019)
187. Sullivan K T et al. *Combust. Flame* **160** 438 (2013)
188. Fenton H J H *J. Chem. Soc. Trans.* **65** 899 (1894)
189. Janani B et al. *J. Environment. Health Sci. Eng.* **19** 389 (2021)
190. Bruskov V I et al. *Free Radical Res.* **46** 1280 (2012)
191. Gudkov S V et al. *Nanomaterials* **12** 2635 (2022)
192. Das B et al. *Arabian J. Chem.* **10** 862 (2017)
193. Гудков С В, Черников А В, Брусков В И *Российский химический журн.* **58** (3–4) 103 (2014); Gudkov S V, Chernikov A V, Bruskov V I *Russ. J. Gen. Chem.* **86** 1531 (2016)
194. Osoy I et al. *ACS Nano* **7** 8972 (2013)
195. AlMatar M et al. *Current Drug Deliv.* **15** 470 (2018)
196. Saha R K et al. *Sci. Rep.* **10** 2598 (2020)
197. Allahverdiyev A M et al. *Future Microbiol.* **6** 933 (2011)
198. Верная О И и др. *Вестн. Московского ун-та. Сер. 2. Химия* (6) 388 (2016); Vernaya O I et al. *Moscow Univ. Chem. Bull.* **72** 6 (2017)
199. Tuzyrikova I A et al. *ACS Omega* **5** 8146 (2020)
200. Lozhkomoev A S et al. *J. Nanopart. Res.* **23** 73 (2021)
201. Li W et al. *Biomater. Sci.* **8** 4492 (2020)
202. Pridvorova S M et al. *Phys. Wave Phenom.* **29** 47 (2021)
203. Luk'yanchuk B S et al. *Phys. Wave Phenom.* **30** 217 (2022)
204. Ashikalieva K K et al. *Phys. Wave Phenom.* **30** 17 (2022)
205. Omelchenko A I et al. *Laser Phys.* **25** 025607 (2015)
206. Кострюков В Ф, Игонина А Е *Конденсированные среды и межфазные границы* **22** 504 (2020); Kostryukov V F, Igonina A E *Condens. Matter Interphases* **22** 504 (2020)
207. Abramova A V et al. *Beilstein J. Nanotechnol.* **5** 532 (2014)
208. Kazantsev S O et al. *Nanomaterials* **12** 3888 (2022)
209. Gudkov S V et al. *Antibiotics* **10** 884 (2021)

210. Smaoui S et al. *Food Packag. Shelf Life* **36** 101045 (2023)
 211. Gudkov S V et al. *Int. J. Mol. Sci.* **24** 869 (2023)
 212. Burmistrov D E et al. *Polymers* **14** 4764 (2022)
 213. Simakin A V et al. *J. Compos. Sci.* **6** (10) 298 (2022)
 214. Chaouf D N et al. *Materials* **15** 527 (2022)
 215. Tee B C-K et al. *Nat. Nanotechnol.* **7** 825 (2012)
 216. Smirnova V V et al. *Materials* **14** 6915 (2021)
 217. Tripathi S, Mehrotra G K, Dutta P K. *Bull. Mater. Sci.* **34** 29 (2011)
 218. Hu Z, Chan W L, Szeto Y S J. *Appl. Polymer Sci.* **108** 52 (2008)
 219. Serov D A et al. *Nanomaterials* **12** 4158 (2022)
 220. Serov D A et al. *Polymers* **14** 4880 (2022)
 221. Ranieri P et al. *Plasma Process. Polym.* **18** 2000162 (2021)
 222. Judickaitė A et al. *Plants* **11** 611 (2022)
 223. Mildaziene V, Sera B. *Plants* **11** 1018 (2022)
 224. Attri P et al. *Processes* **8** 1002 (2020)
 225. Ohta T "Plasma in agriculture", in *Cold Plasma in Food and Agriculture. Fundamentals and Applications* (Eds N N Misra, O Schlüter, P J Cullen) (Amsterdam: Elsevier. Academic Press, 2016) p. 205, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00008-1>
 226. Shcherbakov I A. *Phys. Wave Phenom.* **30** 129 (2022)
 227. Bunkin N F et al. *Phys. Wave Phenom.* **30** 196 (2022)
 228. Pogorelov A G et al. *Phys. Wave Phenom.* **30** 209 (2022)
 229. Shcherbakov I A. *Phys. Wave Phenom.* **29** 89 (2021)
 230. Bruskov V I et al. *Phys. Wave Phenom.* **29** 94 (2021)
 231. Gudkov S V et al. *Phys. Wave Phenom.* **29** 108 (2021)
 232. Svidlov A A et al. *Phys. Wave Phenom.* **29** 180 (2021)
 233. Shutov D A et al. *Plasma Chem. Plasma Process.* **43** 577 (2023)
 234. Piskarev I M. *Plasma Chem. Plasma Process.* **41** 1347 (2021)
 235. Sirotkin N A, Khlyustova A V, Titov V A. *Plasma Chem. Plasma Process.* **40** 187 (2020)
 236. Piskarev I M. *Plasma Chem. Plasma Process.* **41** 1415 (2021)
 237. Piskarev I M, Ivanova I P. *Plasma Chem. Plasma Process.* **41** 447 (2021)
 238. Bychkov V L et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **49** 1034 (2021)
 239. Bychkov V L et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **48** 350 (2020)
 240. Артемьев К В и др. *Известия вузов. Физика* (11) 105 (2019); Artem'ev K V et al. *Russ. Phys. J.* **62** 2073 (2020)
 241. Konchekov E M et al. *Front. Phys.* **8** 616385 (2021)
 242. Barkhudarov E M et al. *J. Atom. Mol. Phys.* **2013** 429189 (2013)
 243. Наумова И К и др. *Прикладная физика* (4) 40 (2021)
 244. Belov S V et al. *Front. Phys.* **8** 618320 (2021)
 245. Danileiko Y K et al. *Opera Med. Physiol.* **9** (3) 15 (2022)
 246. Belov S V et al. *Processes* **10** 1536 (2022)
 247. Danilejko Yu K et al. *Plants* **10** 2161 (2021)
 248. Konchekov E M et al. *Plants* **11** 1373 (2022)
 249. Kuzin A et al. *Plants* **12** 385 (2023)
 250. Izmailov A et al. *Appl. Sci.* **12** 4953 (2022)
 251. Astashev M E et al. *Sensors* **22** 8310 (2022)
 252. Filippov R A et al. *Appl. Sci.* **13** 583 (2023)
 253. Antipov S N et al. *Phys. Scr.* **98** 025604 (2023)
 254. Антипов С Н и др. *Физика плазмы* **49** 407 (2023); Antipov S N et al. *Plasma Phys. Rep.* **49** 559 (2023)
 255. Sergeichev K F et al. *Front. Phys.* **8** 614684 (2021)
 256. Ashurov M Kh et al. *ChemEngineering* **6** (6) 91 (2022)
 257. Ali M M et al. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* **108** 101426 (2019)
 258. Farber C et al. *TrAC Trends Anal. Chem.* **118** 43 (2019)
 259. Terentev A et al. *Sensors* **22** 757 (2022)
 260. Dorokhov A et al. *Agriculture* **13** 1188 (2023)
 261. Pankin D et al. *Agronomy* **11** 2402 (2021)
 262. Moskovskiy M N et al. *Photonics* **8** 587 (2021)
 263. Moskovskiy M N et al. *Agriculture* **13** 619 (2023)
 264. Belyakov M V et al. *Appl. Sci.* **12** 4824 (2022)
 265. Chen M et al. *Plos One* **17** (7) e0270593 (2022) <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270593>
 266. Matveyeva T A et al. *Appl. Sci.* **12** 3391 (2022)
 267. Sarimov R M et al. *Front. Phys.* **8** 640887 (2021)
 268. Penkov N V et al. *Pathogens* **10** 1336 (2021)
 269. Di Girolamo F V et al. *Food Control* **123** 107700 (2021)
 270. Ge H et al. *Photonics* **8** 518 (2021)

Modern physical methods and technologies in agriculture

S.V. Gudkov^(1,2,a), R.M. Sarimov^(1,b), M.E. Astashev^(1,c), R.Yu. Pishchalnikov^(1,d), D.V. Yanykin^(1,e), A.V. Simakin^(1,f), A.V. Shkirin^(1,g), D.A. Serov^(1,h), E.M. Konchekov^(1,i), N.G. Gusein-Zade^(1,j), V.N. Lednev^(1,k), M.Ya. Grishin^(1,l), P.A. Sdvizhenskii^(1,m), S.M. Pershin^(1,n), A.F. Bunkin^(1,o), M.Kh. Ashurov^(1,p), A.G. Aksenov^(2,q), N.O. Chilingaryan^(2,r), I.G. Smirnov^(2,s), D.Yu. Pavkin^(2,t), D.O. Hort^(2,u), M.N. Moskovskiy^(2,v), A.V. Sibirev^(2,w), Ya.P. Lobachevsky^(2,x), A.S. Dorokhov^(2,y), A.Yu. Izmailov^(2,z)

⁽¹⁾ Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, 119991 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskii pr. 5, 109428 Moscow, Russian Federation

⁽³⁾ Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, pos. Ulugbek, 100214 Tashkent, Uzbekistan

E-mail: ^(a) S_makariy@rambler.ru, ^(b) rusa@kapella.gpi.ru, ^(c) Astashev@yandex.ru, ^(d) rpishchal@kapella.gpi.ru,

^(e) ya-d-ozh@rambler.ru, ^(f) avsimakin@gmail.com, ^(g) AVShkirin@mephi.ru, ^(h) dmitriy_serov_91@mail.ru,

⁽ⁱ⁾ eukmek@gmail.com, ^(j) namik@fpl.gpi.ru, ^(k) lednev@kapella.gpi.ru, ^(l) mikhail.grishin@phystech.edu,

^(m) pausdw@gmail.com, ⁽ⁿ⁾ pershin@kapella.gpi.ru, ^(o) abunkin@kapella.gpi.ru, ^(p) ashurov49@mail.ru,

^(q) 1053vim@mail.ru, ^(r) narek-s@list.ru, ^(s) rashn-smirnov@yandex.ru, ^(t) dimqaqa@mail.ru,

^(u) dmitriyhort@mail.ru, ^(v) maxmoskovsky74@yandex.ru, ^(w) sibirev2011@yandex.ru, ^(x) lobachevsky@yandex.ru,

^(y) dorokhov@rgau-msha.ru, ^(z) vim@vim.ru

The review presents both new theoretical and practical results of the application of modern physical methods and technologies in agriculture. Physical technologies and materials for passive management of the solar spectrum in greenhouses are considered. A review of the instrumentation used for laser remote sensing of agro- and biosystems and modern laser express technologies used for express analysis of the chemical composition of a substance is carried out. Optical methods used in biological and agricultural diagnostics, including methods based on Muller polarimetry, are described in detail. A separate chapter of the review is devoted to the production and application of nano-sized objects in agriculture and the food industry. The use of numerous plasma technologies in agriculture is considered.

Keywords: physical technologies, agriculture, nanoparticles, photoconversion materials, hyperspectral imaging, lidar, spectroscopy, plasma, composite materials

PACS numbers: **42.62.** – b, **42.68.** Wt, **52.77.** – j

Bibliography — 270 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (2) 208–226 (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.09.039577>

Received 10 August 2023, revised 25 September 2023

Physics – Uspekhi **67** (2) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.09.039577>