

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ДЕХРОМАЦИИ ЛИСТВЫ КАШТАНА КОНСКОГО ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ ОХРИДСКИМ МИНЕРОМ

С.В. Железова

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии» (ФГБНУ ВНИИФ), Россия, 143050, Московская обл., раб. пос. Большие Вяземы, ул. Институт, вл. 5

soferrum@mail.ru

Проведено сопоставление результатов визуальной и инструментальной оценки степени дехромиации листовой пластинки каштана конского обыкновенного при поражении охридским минером *Cameraria ohridella*. Сопоставлены данные обследований модельных деревьев за период 2014–2022 гг. в Московской области. Показана статистически достоверная регрессионная связь между результатами визуальной и инструментальной оценки дехромиации в многолетнем ряду наблюдений. Инструментальный мониторинг состояния листовой пластинки во время вегетации проводили на основе оценки вегетационного индекса NDVI с применением прибора GreenSeeker Handheld® (Trimble). На примере вегетационного сезона 2021 г. представлено сравнение сезонной динамики индекса NDVI листовой пластинки при поражении охридским минером и без поражения. Показано, что пораженные вредителем растения имеют более короткий период вегетации, и в среднем за сезон индекс NDVI на 25...30 % ниже, чем у неповрежденных растений. В многолетнем ряду наблюдений установлено, что переход индекса NDVI через пороговое значение 0,4 у пораженных охридским минером растений наблюдается в среднем на 30...40 дней раньше, чем у здоровых. Рассмотрена возможность оценки дехромиации листовой пластинки по результатам гиперспектральной съемки без визуализации с применением спектрометра Ocean Insight «Flame». Показано, что спектральные характеристики отражательной способности здоровых и поврежденных охридским минером листьев существенно различаются, что было продемонстрировано при сопоставлении кривых спектральной яркости отражения. Выявлены характерные зоны спектра в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, по которым успешно идентифицируется наличие поражения листьев минером. Установлено, что в области ближнего инфракрасного излучения отражение пораженных листьев существенно ниже, чем у здоровых листьев, что свидетельствует о снижении общей обводненности листовых пластинок каштана при повреждении вредителями. Рекомендуется применение мультиспектральной съемки, вегетационного индекса NDVI и данных оценки спектральной яркости листьев для разработки алгоритмов автоматического определения поражения листовой пластинки каштана конского обыкновенного минирующим вредителем охридский минер.

Ключевые слова: *Cameraria ohridella*, каштан конский обыкновенный, вегетационный индекс NDVI, спектральные характеристики листьев, кривые спектрального отражения, Ocean Insight «Flame» VIS-NIR

Ссылка для цитирования: Железова С.В. Инструментальный мониторинг дехромиации листовой пластинки каштана конского обыкновенного при повреждении охридским минером // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 5. С. 138–148. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-5-138-148

Научно-информационный подход в защите растений на основе оперативных инструментальных обследований позволяет получать объективную и своевременную информацию об оценке распространения и динамике развития вредных организмов, что необходимо при планировании и реализации защитных мероприятий. В 2020-е годы более широко применяются методы инструментального мониторинга для определения повреждений, наносимых вредителями и болезнями растений, поскольку стали доступнее обследования растений с помощью приборов на различных уровнях — от единичной растительной клетки до растительного насаждения и ландшафта в целом. Для этого используются материалы цифровой, мульти- и гиперспектральной

съемки, полученные с разным оптическим и спектральным разрешением. Так, оптическое пространственное разрешение при обследовании клетки растения составляет доли миллиметра, отдельного органа — сантиметры и дециметры, всего насаждения — метры, а уже на уровне ландшафта — сотни метров и километры [1].

Для разных уровней обследования используют различные подходы, и применяют стационарное приборное оборудование (микроскоп с цифровой камерой, спектрометр), либо камеры, установленные на подвижные носители (самоходную машину, беспилотный летательный аппарат). Для обследований ландшафта осуществляют дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и используют материалы космических съемок. Для всех перечисленных уровней инструментального обследования доступна цифровая, мульти-

и гиперспектральная съемка. При использовании гиперспектральной съемки для оценки состояния растений важное значение имеет спектральный диапазон измерений, включающий в себя длину волн от видимого до коротковолнового инфракрасного излучения, и спектральное разрешение, которое у современных приборов составляет от 0,3 до 6 нм.

Инструментальный мониторинг на основе спектральной съемки можно проводить как при дистанционном, так и при проксимальном (наземном) применении. Инструментальные методы оценки дехромации листы, вызванной разными причинами, являются одновременно и дополнением, и альтернативой визуальному обследованию. Для защиты растений имеются большие возможности мониторинга состояния растительного покрова с применением инструментальных методов и искусственного интеллекта при обработке данных [2]. Важное значение имеет накопление баз данных визуальных изображений повреждений растений различными патогенами или вредителями и пополнение наборов спектральных библиотек растительных объектов при разной степени поражения.

Цель работы

Цель работы — апробация инструментальных методов мониторинга на основе мультиспектральной съемки и спектроскопии в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне для оценки степени поражения листы каштана конского обыкновенного минирующим вредителем *Cameraria ohridella*.

Обоснование выбора объекта

Распространение и вредоносность охридского минера. Охридский минер (*Cameraria ohridella*) — вредитель каштана конского обыкновенного, широко распространен на территории европейской части России [3–8], в Белоруссии [9] и Средней Азии [10], особенно в последние 10–15 лет. Вредитель впервые описан на территории Москвы в 2006 г. [11], где он быстро адаптировался и начал массово размножаться [12], а затем распространился и в других городах европейской части России, нанося существенный вред декоративным посадкам каштана, вплоть до их полного, 100%-го поражения [13].

В условиях умеренно-континентального климата Центрально-Европейского региона РФ вредитель развивается в течение вегетационного сезона в 2–3 генерациях [6, 14, 15]. Для популяции характерно параллельное развитие нескольких поколений, при этом в насаждении одновременно присутствуют разные стадии развития: яйца, личинки разного возраста, куколки, имаго. В случае

массового размножения это приводит к полному прекращению функционирования листового аппарата дерева на 1,5...2 мес. раньше срока, вследствие чего наступает преждевременная дефолиация.

На первых стадиях развития повреждения охридским минером развивается дехромация листы, причем скорость развития личинок и нарастания площади мин зависит от погодных условий. Полный цикл развития вредитель проходит за 42...65 сут [3, 15]. В первую неделю развития вредителей размер мин не превышает 1 %, а через 3 нед. развития достигает 25...60 % их окончательного размера. Дехромация листы зависит не только от стадии развития вредителей, но и от количества мин на листе. Согласно методическим рекомендациям по проведению государственной инвентаризации лесов [16], определена шкала для оценки степени дехромации хвои или листы (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Классы повреждения листового аппарата древесных растений при разной степени дехромации кроны

Damage classes of the woody plants leaf apparatus at different degrees of crown dehromation

Класс повреждения	Степень дехромации кроны, %
0	< 10
1	11–25
2	26–50
3	51–75
4	Более 75

Оценку дехромации крон проводят визуально, желательно в солнечную погоду, для больших площадей лесных насаждений применяют методы ДЗЗ.

Спектральная съемка растительности и инструментальный мониторинг вегетации по индексу NDVI на основе ДЗЗ нашли широкое применение в географических и экологических исследованиях, сельскохозяйственном мониторинге посевов, в распознавании лесных пород и мониторинге распространения вредителей лесных насаждений [17–23]. По результатам мульти- и гиперспектральной съемки выделяют спектральные каналы различных диапазонов, комбинируя которые, в расчетных формулах рассчитывают различные спектральные индексы [24]. По растительным индексам можно оценить развитие зеленой биомассы растений, площадь листовой поверхности, содержание хлорофилла и каротиноидов в листьях, относительные показатели обводненности тканей листы и другие показатели.

Наиболее известный и самый распространенный вегетационный индекс — нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference NIR/Red Normalized Difference Vegetation Index). Данный индекс уже около 50 лет (с начала 1970-х годов) является общепринятым показателем для оценки и сравнения фотосинтетического аппарата растений [25]. Вегетационный индекс NDVI рассчитывается по простой формуле с учетом интенсивности отражения красной и инфракрасной областей спектра зелеными растениями. Для зеленой вегетирующей растительности индекс NDVI принимает значения приблизительно от 0,20 до 0,90 (теоретически до 1,0). В разные периоды вегетационного сезона и в разные фазы развития индекс NDVI растительного покрова изменяется, т. е. он является динамичным сезонным показателем. В начале вегетации индекс NDVI зависит от площади проективного покрытия листьев и общей площади листовой поверхности. В пик вегетации помимо этих показателей сильное влияние на него оказывает количество хлорофилла в листьях и обводненность тканей, которые, в свою очередь, зависят от обеспеченности растений минеральными элементами (прежде всего азотом) и от метеоусловий вегетационного периода. В общих чертах, индекс NDVI древесных растений возрастает в начале вегетационного сезона, достигает пика примерно через неделю после полного разворачивания листы и в течение лета сохраняется на уровне пиковых значений или чуть ниже, вплоть до начала осеннего обесцвечивания листы.

Сезонную динамику вегетационного индекса NDVI исследуют с помощью ДЗЗ (спутниковая съемка в разных спектральных диапазонах), применяя оптические мультиспектральные камеры для беспилотной съемки и наземного применения [26, 27]. Несмотря на удобность вычислений и широкое использование, индекс NDVI тем не менее имеет ограниченные возможности, например не позволяет различать отдельные виды растений или их сорт [26, 28].

Гиперспектральная съемка, по сравнению с цифровой фотосъемкой и мультиспектральной съемкой, предоставляет больше возможностей для оценки растительности, в особенности для узкоспециализированных ее целей, например в точном земледелии [29] или для защиты растений [30]. Преимущества гиперспектральной съемки заключаются в более высокой чувствительности, возможности целенаправленного подбора спектральных диапазонов для выявления различных заболеваний растений или повреждений вредителями [1, 30].

Следует различать гиперспектральную съемку и спектрометрическую съемку без визуализации.

Последняя является одним из видов нефотографических съемок, т. е. информация об объектах съемки сохраняется не в виде изображения, а в виде набора цифр, зарегистрированных в памяти прибора в процессе регистрации (записи) спектральных характеристик отражения. На основе этих цифр можно построить кривые коэффициента спектральной яркости отражения объекта (КСЯО), которые на разных длинах волн электромагнитного спектра показывают разную интенсивность отражения от изучаемого объекта. Между собой кривые КСЯО будут отличаться для различных объектов в разных диапазонах спектра. Спектрометрирование растительных объектов (листьев, крон деревьев и т. п.) проводят в диапазонах видимого и ближнего инфракрасного электромагнитного излучения при длинах волн от 350 до 1000 нм. У различных моделей спектрометров диапазон съемки и спектральное разрешение может быть разным.

Обработку большого объема данных кривых КСЯО по результатам спектрометрических измерений можно проводить в автоматическом режиме с применением обученных нейросетей [31, 32].

Материалы и методы

Объектом исследования служили модельные деревья каштана конского обыкновенного, имеющие поражения листы охридским минером. Предмет исследования — изучение возможности инструментального обследования пораженных листы на основе мультиспектральной съемки и спектрометрирования в диапазоне от 350 до 1000 нм.

Нами проанализированы результаты традиционного (визуального) и новых инструментальных методов обследования, и выполнена их сравнительная оценка.

Описание объекта. Модельные деревья каштана конского обыкновенного (4 экз.) возрастом 16...25 лет и высотой 6...8 м, диаметр ствола у корневой шейки 18...23 см, были высажены на территории частного домовладения в Можайском районе Московской области в 1998 г. (не пересаживались). Почва участка — дерново-подзолистая тяжелосуглинистая, удобрения под деревья не вносились, в приствольных кругах имеется естественная травянистая растительность, растительный покров разреженный. В данном поселении на территории домовладений и на улицах есть другие экземпляры каштана конского обыкновенного возрастом от 15 до 40 лет. Все они ежегодно заселяются вредителем — охридским минером.

Впервые единичные заселения этого вредителя были отмечены в 2010 г. на дереве в пределах общественной территории, в частности, на въезде в поселение со стороны Минского шоссе.

Массовое размножение вредителя на всех деревьях каштана здесь началось с 2014 г. В некоторые годы вредитель развивался в трех генерациях, полностью уничтожая зеленую листву каштанов. При массовом поражении листва падает преждевременно. В этом случае побеги текущего года физиологически ослаблены, такие ветви плохо переносят перезимовку. Весной последующего года распускание листьев и цветение затруднены, после чего в течение лета верхушечные ветви отмирают.

Кроме того, отмечены попытки заселения охридским минером девичьего винограда пятилистничкового. Начиная с 2019 г. ежегодно выявляются единичные мины личинок первого поколения, размер мин не более 2 мм, и в дальнейшем вредитель на листьях винограда не развивается.

Для оценки состояния листьев использовали два оптических датчика. Сезонную динамику индекса NDVI изучали с помощью датчика GreenSeeker с активным источником излучения. Исследования проводили в масштабе крон деревьев. Во время проведения съемки при движении прибора вдоль кроны в поле зрения («скользящее окно») попадают несколько листьев. В серии наблюдений оценивалась вся нижняя часть кроны, доступная к обследованию с земли. Гиперспектрометрическую съемку без визуализации проводили спектрометром Ocean Insight «Flame» VIS-NIR, работающим по принципу пассивной съемки отражения, т. е. проводится регистрация спектральных характеристик отражательной способности листьев. На основании данных исследований была выполнена оценка спектральной яркости отдельно взятых листьев и их частей как с наличием мин, так и без них.

Оптический датчик GreenSeeker® Handheld Crop Sensor используется для проведения измерений вегетационного индекса NDVI в ручном режиме (рис. 1). Датчик снабжен активным источником света, поэтому может использоваться даже в условиях недостаточной освещенности. Измерение индекса NDVI листвы каштана проводили регулярно в течение вегетационных сезонов 2014–2022 гг. по 4–8 раз за сезон. Оценку индекса NDVI листьев проводили в нижней части кроны на высоте от 1,2 до 2 м от поверхности земли. Расстояние от принимающего окошка прибора до объекта съемки должно быть не менее 45 см, таким образом в поле зрения прибора попадает овальное пятно в кроне размером приблизительно 0,5×0,2 м. В принимающее окно приходит отраженный от поверхности листвы сигнал в области красного и ближнего инфракрасного излучения, используемый для автоматического вычисления индекса NDVI с помощью встроенного алгоритма прибора. Входящий сигнал несет усредненную по



Рис. 1. Оптический датчик GreenSeeker® Handheld Crop Sensor для измерения индекса NDVI

Fig. 1. GreenSeeker® Handheld Crop Sensor for NDVI index measurement

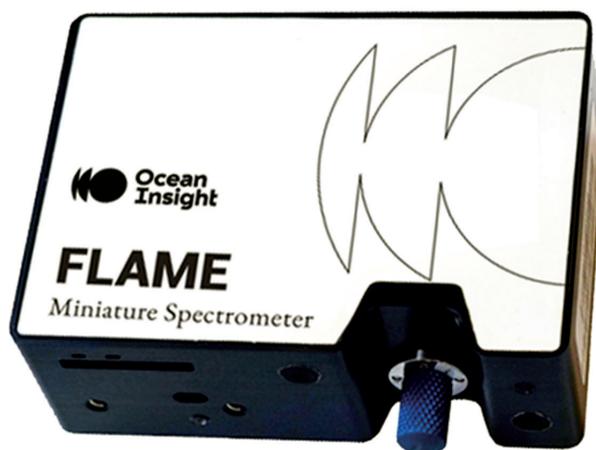


Рис. 2. Спектрометр Ocean Insight «Flame» VIS-NIR, измеряющий яркость отражения в диапазоне видимого и ближнего инфракрасного излучения

Fig. 2. Ocean Insight «Flame» VIS-NIR spectrometer measuring brightness reflectance in the visible and near-infrared range

площади обследования информацию: чем больше пятен на листве, тем слабее поглощение красного цвета и сильнее поглощение инфракрасных лучей. При перемещении над листвой прибор выполняет измерения непрерывно со скоростью два измерения в секунду, пока нажата кнопка включения. После выключения кнопки прибор вычисляет среднее значение индекса NDVI и выводит этот показатель на экран (см. рис. 1). Для обследования одного дерева достаточно 1–2 мин, при этом средний показатель индекса NDVI будет высчитан из 120...240 индивидуальных последовательно полученных значений.

По результатам нескольких измерений индекса NDVI в разные сезоны были построены кривые его сезонной динамики при поражении охридским минером. В качестве контроля (растения без поражения) были взяты усредненные показатели индекса NDVI по другим древесным породам с гладкой неопушенной листвой, не поврежденной вредителями: клену обыкновенному, дубу красному, бархату амурскому. Эти растения произрастают на той же территории в непосредственной близости к модельным деревьям каштана конского в таких же агроэкологических условиях.

Обработку данных по вегетационному индексу NDVI и построение графиков хода сезонной динамики проводили в пакете программ Excel MS Office.

Помимо изучения сезонной динамики индекса NDVI в июле 2022 г. провели однократное измерение спектральной яркости отражения листьев каштана при поражении и без поражения охридским минером. Для этого использовали спектрометр Ocean Insight «Flame» VIS-NIR (рис. 2). Измерения проводили в первой половине дня в условиях рассеянного света с теневой стороны одноэтажного здания. Источником излучения служил солнечный свет. Для анализа были выбраны листья с разной степенью пораженности минером — от 30 до 100 % (как пример — листья на рис. 3). Для проведения съемки листья были сорваны с дерева. В качестве контроля (без поражения) для съемки были использованы непораженные участки листьев. Строго говоря, такие листья не могут служить контролем, так как на них имеются мины вредителя (хотя и в малом количестве), а следовательно, это в любом случае оказывает негативное влияние на физиологический статус листа — лист не может считаться здоровым. Поскольку на модельных деревьях не было ни одного непораженного листа, в качестве контроля пришлось использовать листья других видов растений, либо листья каштана при малом поражении и выбирать на таких листьях непораженные участки.

По каждому листу каштана с разной степенью поражения проведено по 400 измерений КСЯО. Предварительная обработка данных и построение кривых спектральной яркости осуществлялось в специально созданном скрипте на языке программирования Python с использованием стандартных библиотек.

Результаты и обсуждение

Визуальная оценка дехромации листвы была сопоставлена со значениями индекса NDVI в разные сезоны и в разные фазы развития вредителя (рис. 3, табл. 2).

При сопоставлении визуальной оценки (класс дехромации) и инструментальной оценки индекса NDVI по ежегодным данным за май — август выявлена достоверная регрессионная зависимость между этими показателями состояния кроны, которую описывает уравнение параболы (рис. 4). Коэффициент детерминации данного уравнения составляет 0,49 (при $p < 0,05$) для данных, включающих в себя оценки класса дехромации и индекс NDVI в мае, когда листва еще не полностью распустилась. Если исключить майские данные из анализа и оставить только данные летних месяцев, то коэффициент детерминации возрастает до значения 0,76 (при $p < 0,05$). Максимальное значение индекса NDVI за весь период наблюдений составляло 0,84, причем это значение встречалось даже при дехромации класса 2. Это говорит о том, что оценка дехромации по классам грубее, чем инструментальная оценка. В целом, индекс NDVI древесных растений в Подмоскowie в начале июля (в пик вегетации) при благоприятных метеоусловиях составляет 0,85...0,90.

Сезонная динамика индекса NDVI древесных растений зависит от метеоусловий вегетационного сезона и влияния угнетающих растения факторов — засухи, недостаточного минерального питания, развития болезней, размножения вредителей. На рис. 5 представлена сезонная (за 2021 г.) динамика индекса NDVI каштана конского, поврежденного охридским минером в сильной степени, по сравнению с листвой крон деревьев с нормальным развитием и без повреждения вредителями.

Концом периода активного фотосинтеза можно считать снижение значения индекса NDVI ниже 0,4. Пораженные вредителем растения имеют более короткий период вегетации, и в среднем за сезон индекс NDVI на 25...30 % ниже, чем у неповрежденных растений. Переход индекса NDVI через пороговое значение 0,4 у пораженных охридским минером растений наблюдается в среднем на 30...40 дней раньше, чем у здоровых.

Индекс NDVI рассчитывается по сопоставлению всего двух длин волн — красного и ближнего инфракрасного диапазонов. Однако более подробную информацию содержат в себе спектральные сигнатуры здоровых и пораженных листьев, полученные при проведении спектрометрирования.

Яркость отражения в разных диапазонах спектра у здоровых и пораженных охридским минером листьев отличается практически зеркально. В видимом диапазоне спектра (VIS) отражение пораженных листьев существенно более яркое по всему диапазону, чем у здорового листа. В то



Рис. 3. Сопоставление визуальной оценки степени пораженности листовых пластинок каштана конского охридским минером (%) и инструментального обследования вегетационного индекса NDVI прибором GreenSeeker® Handheld Crop Sensor: *a* — август 2014 г., 5...8 %, NDVI = 0,78...0,80; *б* — август 2015 г., 10...12 %, NDVI = 0,74...0,76; *в* — август 2016 г., 80...85 %, NDVI = 0,55...0,57

Fig. 3. Comparison of visual assessment of the horse chestnut leaf plates infestation degree by Ochrid Miner (%) and instrumental survey of vegetation index NDVI by GreenSeeker® Handheld Crop Sensor: *a* — August 2014, 5...8 %, NDVI = 0,78...0,80; *б* — August 2015, 10...12 %, NDVI = 0,74...0,76; *в* — August 2016, 80...85 %, NDVI = 0,55...0,57

Т а б л и ц а 2

Визуальная оценка дехромации листы каштана конского (в классах повреждения) при поражении охридским минером и значения вегетационного индекса NDVI, соответствующие каждому классу повреждения

Visual assessment of horse chestnut foliage dechromatisation (in damage classes) when infected by Ochreidium minerum and NDVI vegetation index values corresponding to each damage class

Год	ГТК	Май		Июнь		Июль		Август	
		Класс	NDVI	Класс	NDVI	Класс	NDVI	Класс	NDVI
2014	0,81	0	0,57...0,65	0	0,80...0,82	0	0,77...0,80	0	0,78...0,80
2015	1,92	0	0,75...0,80	0	0,75...0,76	1	0,72...0,75	2	0,68...0,70
2016	1,31	0	0,78...0,81	3	0,65...0,75	4	0,58...0,64	4	0,43...0,53
2017	2,16	Нет данных		1	0,84...0,85	2	0,80...0,84	4	0,55...0,60
2018	1,15	0	0,68...0,74	2	0,76...0,79	3	0,69...0,73	4	0,57...0,61
2019	1,06	0	0,65...0,68	1	0,79...0,83	2	0,78...0,79	4	0,53...0,59
2020	2,89	0	0,60...0,67	2	0,70...0,72	3	0,53...0,61	4	0,45...0,48
2021	1,32	0	0,50...0,65	0	0,75...0,80	2	0,61...0,64	4	0,55...0,63
2022	1,24	0	0,45...0,57	1	0,78-0,80	3	0,65-0,69	4	0,50-0,53

Примечание. ГТК — гидротермический коэффициент по Селянину за период май — август.

же время в области инфракрасного излучения (NIR) здоровые листья показывают более яркое отражение, чем листья пораженные (рис. 6). В области так называемого «красного склона» (при длинах волн от 680 до 740 нм) и ближнего инфракрасного излучения (длины волн от 750 до 1000 нм) отражение пораженных листьев снижается, что свидетельствует о снижении обводненности тканей растений при повреждении вредителями. По результатам гиперспектральной съемки, косвенно можно судить о степени снижения фотосинтеза и о потере воды растениями. Различия спектральных сигнатур можно рассчи-

тать в автоматическом режиме по разработанным алгоритмам, что позволит оценивать степень дехромации листы каштана и выявлять характерные особенности спектра при повреждении вредителями.

Существенным недостатком гиперспектральной съемки является ее высокая чувствительность к интенсивности освещения объекта. При малейшем изменении освещенности (в частности, при переменной облачности) следует проводить перекалибровку прибора на новые условия. Это существенно ограничивает применение данного метода в полевых условиях.

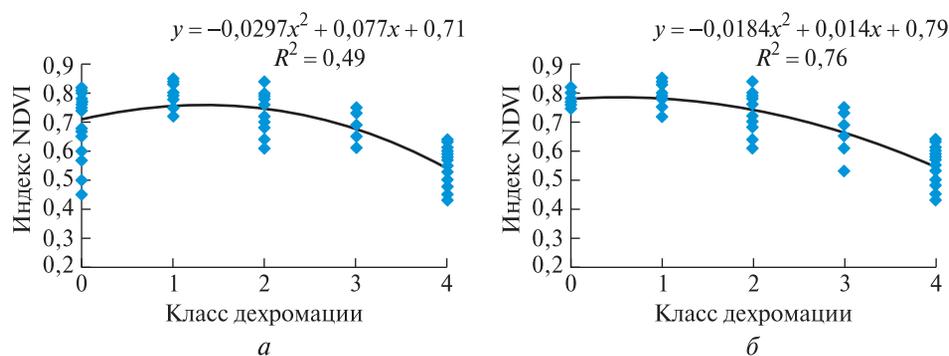


Рис. 4. Регрессионная зависимость результатов визуальной и инструментальной оценки дехромации в многолетнем ряду наблюдений: *a* — по всем месяцам; *б* — только по летним месяцам

Fig. 4. Regression dependence of the visual and instrumental assessment results of dechromacy in a multi-year series of observations: *a* — for all months; *b* — for summer months only

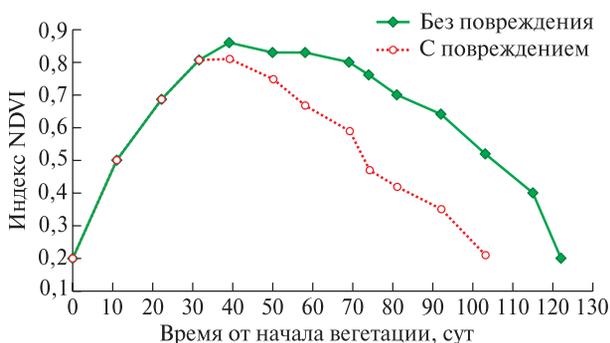


Рис. 5. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI (2021) на примере каштана конского обыкновенного, при повреждении листьев охридским минером и усредненного индекса NDVI древесных пород без повреждения вредителями

Fig. 5. Seasonal dynamics of NDVI vegetation index (2021) on the example of horse chestnut, when leaves were damaged by *Ochridia minerum* and average NDVI index of tree species without pest damage

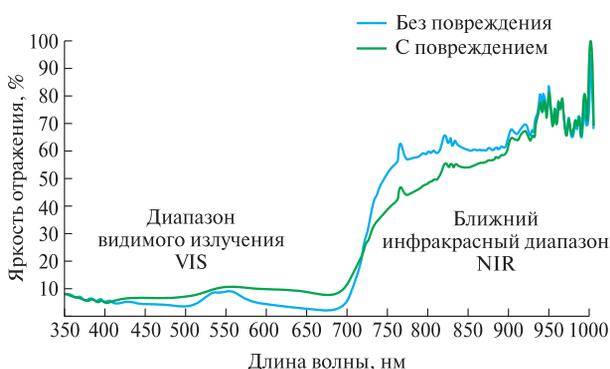


Рис. 6. Кривые спектральной яркости листьев каштана конского обыкновенного неповрежденных и поврежденных охридским минером (поражено 80...90 % площади листьев). Съемка проведена 17 июля 2022 г. при естественном солнечном освещении. Каждая кривая является усредненной из 400 исходных измерений данного объекта

Fig. 6. Spectral brightness curves of horse chestnut leaves undamaged and damaged by *Ochridia miner* (80...90 % of leaf area affected). The survey was conducted on 17 July 2022 under natural sunlight. Each curve is an average of 400 original measurements of the given object

Выводы

При обследовании с применением мультиспектральной и гиперспектральной съемок отражающей способности листьев каштана конского обыкновенного при поражении их охридским минером было выявлено, что спектр отражения пораженных насекомыми листьев существенно отличается от спектра контрольных растений без поражения. Вычисленный индекс NDVI и его сезонный ход (динамика) позволяют оценивать степень повреждения и сопоставлять его с визуальной оценкой дехромации листьев по классам.

Спектральные сигнатуры здоровых и поврежденных вредителем листьев существенно различаются, причем эти различия закономерны и воспроизводимы для листьев разной степени дехромации. На этом основании можно разработать алгоритм распознавания поврежденных листьев и определения класса дехромации в автоматическом режиме.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, номер проекта 075-15-2021-1409.

Список литературы

- [1] Thomas S., Kuska M.T., Bohnenkamp D., Brugger A., Alisaac E., Wahabzada M., Behmann J., Mahlein A.K. Benefits of hyperspectral imaging for plant disease detection and plant protection: A technical perspective // *J. Plant Dis. Prot.*, 2018, v. 125, pp. 5–20.
- [2] Родимцев С.А., Павловская Н.Е., Вершинин С.В., Зелюкин В.И., Горькова И.В., Гагарина И.Н. Моделирование условий вегетации как инструмент ИТ-технологий управления производственным процессом в растениеводстве : монография. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 181 с. DOI: <https://doi.org/10.23682/125019>
- [3] Аникин В.В., Сачков А. Мониторинг распространения инвазивного вида *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: graciariidae) в Самаре в сентябре 2022 года // *Науч. тр. Государственного природного заповедника «Присурский»*, 2022. Т. 37. С. 34–37.
- [4] Гниненко Ю.И., Раков А.Г. Охридский минер, или каштановая минирующая моль-пестрянка // *Защита и карантин растений*, 2011. № 2. С. 34–35.
- [5] Раков А.Г. Охридский минер и другие инвазивные дендрофильные филлофаги в условиях формирования их ареалов в европейской части России: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2015.
- [6] Беднова О.В. Охридский минер *Cameraria ohridella* deschka&dimic: особенности инвазивных очагов и перспективы биологического контроля численности // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 1. С. 5–16.
- [7] Мельников Е.Ю. Охридский минер *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: graciariidae) в г. Энгельсе // *Энтомологические и паразитологические исследования в Поволжье*, 2020. № 17. С. 94–97.
- [8] Ряскин Д.И., Кулинич, О.А. Гниненко Ю.И., Арбузова Е.Н. Охридский минер *Cameraria ohridella* deschka & dimic (Lepidoptera: graciariidae): распространение на территории России и возможные меры контроля // *Фитосанитария. Карантин растений*, 2022. № 1 (9). С. 32–39.
- [9] Гниненко Ю.И., Мухамадиев Н.С., Ашикбаев Н.Ж. Охридский минер *Cameraria ohridella* (Lepidoptera, graciariidae) – обнаружение в Центральной Азии // *Российский журнал биологических инвазий*, 2016. Т. 9. № 4. С. 14–18.
- [10] Рогинский А.С., Буга С.В. Оценка вредоносности каштановой минирующей моли – инвазивного вредителя зеленых насаждений Беларуси // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук*, 2020. Т. 65. № 3. С. 374–378.
- [11] Gninenko Y.I., Muhamadiev N.S., Ashikbaev N.Z. *Cameraria ohridella*: the first record in Central Asia // *Russian J. of Biological Invasions*, 2017, t. 8, no. 1, pp. 10–13.
- [12] Каштанова О.А. Охридский минер в дендрарии Главного ботанического сада РАН // *Защита и карантин растений*, 2009. № 11. С. 47.
- [13] Аникин В.В., Аникин Д.Б. Полное заселение охридским минером конского каштана г. Саратова в 2021 году // *Энтомологические и паразитологические исследования в Поволжье*, 2021. № 18. С. 95–101.
- [14] Беднова О.В., Губарев И.В. Особенности очагов охридского минера (*Cameraria ohridella*) в насаждениях Москвы // *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2021. № 59. С. 113–117.
- [15] Łaszczycza P., Nakonieczny M., Kędziorski A., Babczyńska A., Wiesner M. Towards understanding *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Graciariidae) development: effects of microhabitat variability in naturally growing horse-chestnut tree canopy // *Int J. Biometeorol*, 2021, v. 65, pp. 1647–1658. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02119-8>
- [16] Приказ Рослесхоза от 10.11.2011 N 472 (ред. от 15.03.2018) Об утверждении Методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902325555> (дата обращения 12.12.2022).
- [17] Чабан Л.Н., Березина К.В. Анализ информативности спектральных признаков при классификации растительности по гиперспектральным аэроснимкам // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*, 2018. Т. 62. № 1. С. 85–95. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-1-85-95
- [18] Кортаева А.Э., Пашкевич М.А. Применение данных спектральной съемки для экологического мониторинга водной растительности // *Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-тех. журн.)*, 2021. № 5–2. С. 231–244.
- [19] Комарова А.Ф., Журавлева И.В., Яблоков В.М. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова // *Принципы экологии*, 2016. №1 (17). С. 40–80.
- [20] Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П. К вопросу определения степени интенсификации агротехнологий на основе анализа вегетационных индексов растений методами математической статистики // *Агрофизика*, 2022. № 4. С. 40–50.
- [21] Князева С.В., Королева Н.В., Эйшлина С.П., Соколова Е.Н. Оценка состояния растительности в очаге массового размножения сибирского шелкопряда по спутниковым данным // *Лесоведение*, 2019. № 5. С. 385–398.
- [22] Ковалев А.В. Анализ устойчивости лесных насаждений к повреждениям сибирским шелкопрядом по данным дистанционного зондирования // *Сибирский лесной журнал*, 2021. № 5. С. 71–78.
- [23] Аникеев А.А., Хорохоров А.В., Аникеева Э.Н. Методы оценки состояния сельскохозяйственных культур при гиперспектральной съемке листового покрова // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*, 2020. № 2 (61). С. 31–35.
- [24] Index Database. Международная свободная база данных индексов, используемых для оценки и описания растительных и нерастительных объектов по результатам дистанционного зондирования Земли в разных диапазонах электромагнитного излучения. URL: <http://www.indexdatabase.de/> (дата обращения: 24.04.2023).
- [25] Дубинин М. NDVI — теория и практика. Теоретические основы использования индекса NDVI. URL: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения 24.04.2023)
- [26] Железова С.В., Гурова Т.А., Гусев Д.В. Использование спутниковых снимков высокого разрешения для оценки состояния посевов на Полевой опытной станции РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева // *Матер. 2-й Всерос. науч. конф. «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве»*. СПб.: Изд-во ФГБНУ АФИ, 2018. С. 125–131.
- [27] Железова С.В. Применение оптических датчиков для оценки состояния посевов озимой пшеницы // *Агрофизика*, 2018. №3. С. 42–48. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.03.08
- [28] Игнатова М.А., Козловский Б.Л., Дмитриев П.А., Федоринова О.И., Дмитриева А.А., Вардуни Т.В. Сезонная динамика NDVI у видов клена // *Живые и биокосные системы*, 2022. № 39. Ст. 1. DOI: 10.18522/2308-9709-2022-39-1

- [29] Щедрин В.Н., Васильев С.М., Бабичев А.Н., Скиданов Р.В., Подлипов В.В., Журавель Ю.Н. Наземная гиперспектральная аппаратура для измерения вегетативных индексов в задачах прецизионного орошения сельскохозяйственных культур // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, 2018. № 1 (29). С. 1–14.
- [30] Данилов Р.Ю., Исмаилов В.Я., Третьяков В.А., Кремнева О.Ю., Шумилов Ю.В., Ризванов А.А., Кривошеин В.В., Костенко И.А. Разработка прецизионных технологий фитосанитарного мониторинга агроэкосистем на основе использования данных дистанционного гиперспектрального зондирования Земли // Достижения науки и техники АПК, 2018. Т. 32. № 10. С. 82–86.
- [31] Feng L., Zhu S., Lin F., Su Z., Yuan K., Zhao Y., He Y., Zhang C. Detection of Oil Chestnuts Infected by Blue Mold Using Near-Infrared Hyperspectral Imaging Combined with Artificial Neural Networks // Sensors, 2018, v. 18, p. 1944.
- [32] Zhelezova S.V., Pakholkova E.V., Veller V.E., Voronov M.A., Stepanova E.V., Zhelezova A.D., Sonyushkin A.V., Zhuk T.S., Glinushkin A.P. Hyperspectral Non-Imaging Measurements and Perceptron Neural Network for Pre-Harvesting Assessment of Damage Degree Caused by Septoria/Stagonospora Blotch Diseases of Wheat // Agronomy, 2023, v. 13, p. 1045. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041045>

Сведения об авторе

Железова Софья Владиславовна — д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр., ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии» (ФГБНУ ВНИИФ), soferrum@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2023.

Одобрено после рецензирования 14.06.2023.

Принята к публикации 21.08.2023.

HORSE CHESTNUT FOLIAR DECHROMATION INSTRUMENTAL MONITORING DAMAGED BY *CAMERARIA OHRIDELLA*

S.V. Zhelezova

All-Russian Research Institute of Phytopathology, 5, Institut st., 143050, Bolshie Vyazemy, Moscow reg., Russia

soferrum@mail.ru

A comparison of the visual and instrumental assessments of the horse chestnut foliar dechromation degree infested by the Ohrid miner (*Cameraria ohridella*) was carried out. The data of surveys of model trees for the period 2014–2022 in the Moscow region are compared. A statistically reliable regression relationship between the results of visual and instrumental assessment of dechromation in a long-term series of observations is shown. Instrumental monitoring of the leaves damages during the growing season was carried out based on the assessment of the NDVI vegetation index using the GreenSeeker Handheld® (Trimble) device. The seasonal dynamics of the NDVI index of foliage under Ohrid miner damage is presented on the example of the 2021 season. It is shown that the plants affected by the pest have a shorter growing season, and the average NDVI index for the season is 25...30 % lower than that of undamaged plants. In a nine-year series of observations, it was found that the transition of the NDVI index over the threshold value of 0.4 in plants affected by the Ohrid miner is observed on average 30...40 days earlier than in healthy plants. The possibility of assessing foliage dechromation based on the results of hyperspectral imaging without visualization using the Ocean Insight «Flame» spectrometer is considered. It is shown that the spectral characteristics of the reflectivity of healthy and damaged Ohrid miner leaves differ significantly, which was demonstrated by comparing the spectral brightness curves of reflection. Characteristic spectral zones in the visible and near infrared ranges have been identified, according to which the presence of leaf damage by a miner is successfully identified. It was found that in the near-infrared radiation area, the reflection of damaged leaves are significantly lower than that of healthy leaves, which indicates a decrease in the overall water content of chestnut leaf blades when damaged by pests. According to the results of multi- and hyperspectral surveys, it is possible to automatically determine the lesion of the horse chestnut foliage by the leaf-mining pest *Cameraria ohridella*.

Keywords: *Cameraria ohridella*, horse chestnut, NDVI, spectral signatures of leaves, spectral reflection curves, Ocean Insight «Flame» VIS-NIR

Suggested citation: Zhelezova S.V. Instrumental'nyy monitoring dekhromatsii listvy kashtana konskogo obyknovennogo pri povrezhdenii okhridskim minerom [Horse chestnut foliar dechromation instrumental monitoring damaged by *Cameraria ohridella*]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 138–148. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-5-138-148

References

- [1] Thomas S., Kuska M.T., Bohnenkamp D., Brugger A., Alisaac E., Wahabzada M., Behmann J., Mahlein A.K. Benefits of hyperspectral imaging for plant disease detection and plant protection: A technical perspective. J. Plant Dis. Prot., 2018, v. 125, pp. 5–20.

- [2] Rodimtsev S.A., Pavlovskaya N.E., Vershinin S.V., Zelyukin V.I., Gor'kova I.V., Gagarina I.N. *Modelirovanie usloviy vegetatsii kak instrument IT-tehnologiy upravleniya produktsionnym protsessom v rastenievodstve* [Modeling of vegetation conditions as a tool of IT-technologies for managing the production process in crop production]. Moscow: M.: Ay Pi Ar Media [IPR-media], 2023, 181 p. DOI: <https://doi.org/10.23682/125019>
- [3] Anikin V.V., Sachkov A. *Monitoring rasprostraneniya invazivnogo vida Cameraria ohridella (Lepidoptera: gracillariidae) v Samare v sentyabre 2022 goda* [Monitoring the distribution of the invasive species *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: gracillariidae) in Samara in September 2022]. Nauchnye trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Prisurskiy» [Scientific Works of the Prisursky State Nature Reserve], 2022, t. 37, pp. 34–37.
- [4] Gninenko Yu.I., Rakov A.G. *Okhridskiy miner, ili kashtanovaya miniruyushchaya mol'-pestryanka* [Horse chestnut leafminer *Cameraria ohridella*, or chestnut moth moth]. Zashchita i karantin rasteniy [Plant protection and quarantine], 2011, no. 2, pp. 34–35.
- [5] Rakov A.G. *Okhridskiy miner i drugie invazivnye dendrofil'nye fillofagi v usloviyakh formirovaniya ikh arealov v evropeyskoy chasti Rossii* [Horse chestnut leafminer and other dendrophilous phyllophages in the conditions of the formation of their habitats in the European part of Russia]. Dis. Cand. Sci. (Biol.). Moscow, Russian agrarian University, 2015.
- [6] Bednova O.V. *Okhridskiy minor Cameraria ohridella Deschka&Dimic: osobennosti invazionnykh ochagov i perspektivy biologicheskogo kontrolya* [Ohrid miner *Cameraria ohridella* Deschka & Dimic: features of invasive foci and perspectives of biological control]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-5-16
- [7] Mel'nikov E.Yu. *Okhridskiy miner Sameraria ohridella (lepidoptera: gracillariidae) v g. Engel'se* [Horse chestnut leafminer *Cameraria ohridella* (lepidoptera: gracillariidae) in the city of Engels]. Entomologicheskie i parazitologicheskie issledovaniya v Povolzh'e [Entomological and parasitological research in the Volga region], 2020, no. 17, pp. 94–97.
- [8] Ryaskin D.I., Kulnich, O.A. Gninenko Yu.I., Arbuzova E.N. *Okhridskiy miner Sameraria ohridella deschka & dimic (lepidoptera: gracillariidae): rasprostranenie na territorii Rossii i vozmozhnye mery kontrolya* [Horse chestnut leafminer *Cameraria ohridella* deschka&dimic (lepidoptera: gracillariidae): spreading on the Russia territory and possible control measures]. Fitosanitariya. Karantin rasteniy [Phytosanitary. Plant quarantine], 2022, no. 1 (9), pp. 32–39.
- [9] Gninenko Yu.I., Mukhamadiev N.S., Ashikbaev N.Zh. *Okhridskiy miner Sameraria ohridella (lepidoptera, gracillariidae) — obnaruzhenie v Tsentral'noy Azii* [Horse chestnut leafminer *Cameraria ohridella* (lepidoptera: gracillariidae) — finding in the Central Asia]. Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy [Russian Journal of Biological Invasions], 2016, t. 9, no. 4, pp. 14–18.
- [10] Roginskiy A.S., Buga S.V. *Otsenka vredonosnosti kashtanovoy miniruyushchey moli — invazivnogo vreditelya zelenykh nasazhdeniy Belarusi* [Assessment of harmfulness of horse chestnut leafminer, the invasive pest of green park spaces of Belarus]. Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya biologicheskikh nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological sciences series], 2020, t. 65, no. 3, pp. 374–378.
- [11] Gninenko Y.I., Muhamadiev N.S., Ashikbaev N.Z. *Cameraria ohridella: the first record in Central Asia*. Russian J. of Biological Invasions, 2017, t. 8, no. 1, pp. 10–13.
- [12] Kashtanova O.A. *Okhridskiy miner v dendrarii Glavnogo botanicheskogo sada RAN* [Horse chestnut leafminer in the dendrarium of the Main botanical garden of Russian Academy of science]. Zashchita i karantin rasteniy [Plant protection and quarantine], 2009, no. 11, p. 47.
- [13] Anikin V.V., Anikin D.B. *Polnoe zaselenie okhridskim minerom konskogo kashтана g. Saratova v 2021 godu* [The total settlement of horse chestnut leafminer in Saratov-city]. Entomologicheskie i parazitologicheskie issledovaniya v Povolzh'e [Entomological and parasitological research in the Volga region], 2021, no. 18, pp. 95–101.
- [14] Bednova O.V., Gubarev I.V. *Osobennosti ochagov okhridskogo minera (Cameraria ohridella) v nasazhdeniyakh Moskvy* [Features of foci of horse chestnut leafminer (*Cameraria ohridella*) in Moscow green park-spaces]. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of forestry complex], 2021, no. 59, pp. 113–117.
- [15] Łaszczycza P., Nakonieczny M., Kędzioński A., Babczyńska A., Wiesner M. *Towards understanding Cameraria ohridella (Lepidoptera: Gracillariidae) development: effects of microhabitat variability in naturally growing horse-chestnut tree canopy*. Int J. Biometeorol, 2021, v. 65, pp. 1647–1658. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02119-8>
- [16] *Prikaz Rosleskhoza ot 10.11.2011 N 472 (red. ot 15.03.2018) Ob utverzhenii Metodicheskikh rekomendatsiy po provedeniyu gosudarstvennoy inventarizatsii lesov* [Order of the Russian Forest Management Committee. On approval of Methodological recommendations for the State forest inventory]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902325555> (accessed 12.12.2022).
- [17] Chaban L.N., Berezina K.V. *Analiz informativnosti spektral'nykh i tekturnykh priznakov pri klassifikatsii rastitel'nosti po giperspektral'nykh aerosnirkam* [Analysis of the information content of spectral and textural features in the classification of vegetation by hyperspectral aerial photographs]. Izv. vuzov «Geodeziya i aerofotos'emka» [Proceedings of the universities «Geodesy and aerial photography»], 2018, t. 62, no. 1, pp. 85–95. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-1-85-95
- [18] Korotaeva A.E., Pashkevich M.A. *Primenenie dannykh spektral'noy s'emki dlya ekologicheskogo monitoringa vodnoy rastitel'nosti* [The application of spectral survey for the analysis of aquatic vegetation]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2021, no. 5–2, pp. 231–244.
- [19] Komarova A.F., Zhuravleva I.V., Yablokov V.M. *Otkrytye mul'tispektral'nye dannye i osnovnye metody distantsionnogo zondirovaniya v izuchenii rastitel'nogo pokrova* [Open multispectral data and basic remote sensing methods in the study of vegetation cover]. Printsipy ekologii [Principles of ecology], 2016, no. 1 (17), pp. 40–74.
- [20] Yakushev V.P., Bure V.M., Mitrofanova O.A., Mitrofanov E.P. *K voprosu opredeleniya stepeni intensifikatsii agrotekhnologii na osnove analiza vegetatsionnykh indeksov rasteniy metodami matematicheskoy statistiki* [On the issue of determining the degree of intensification of agrotechnologies based on the analysis of vegetation indices of plants by methods of mathematical statistics]. Agrofizika [Agrophysics], 2022, no. 4, pp. 40–50.
- [21] Knyazeva S.V., Koroleva N.V., Eydlina S.P., Sochilova E.N. *Otsenka sostoyaniya rastitel'nosti v ochage massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada po sputnikovym dannym* [Assessment of the state of vegetation in the center of mass reproduction of the Siberian silkworm by satellite data]. Lesovedenie [Forest science], 2019, no. 5, pp. 385–398.
- [22] Kovalev A.V. *Analiz ustoychivosti lesnykh nasazhdeniy k povrezhdeniyam sibirskim shelkopryadom po dannym distantsionnogo zondirovaniya* [Analysis of the resistance of forest stands to damage by Siberian silkworm according to remote sensing data].

- Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian forest journal], 2021, no. 5, pp. 71–78.
- [23] Anik'ev A.A., Khorokhorov A.V., Anik'eva E.N. *Metody otsenki sostoyaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur pri giperspektral'noy s'emke listvennogo pokrova* [Methods for assessing the state of agricultural crops in hyperspectral survey of foliage cover]. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Michurinsk State Agrarian University], 2020, no. 2 (61), pp. 31–35.
- [24] Index Database. *Mezhdunarodnaya svobodnogo dostupa baza dannykh indeksov, ispol'zuemykh dlya otsenki i opisaniya rastitel'nykh i nerastitel'nykh ob'ektov po rezul'tatam distantsionnogo zondirovaniya Zemli v raznykh diapazonakh elektromagnitnogo izlucheniya* [Index Database. Freely accessible database of indexes used to evaluate and describe plant and non-plant objects based on the results of remote sensing of the Earth in different ranges of electromagnetic radiation]. Available at: <http://www.indexdatabase.de/> (accessed 24.04.2023).
- [25] Dubinin M. *NDVI — teoriya i praktika. Teoreticheskie osnovy ispol'zovaniya indeksa NDVI* [NDVI — theory and practice. Theoretical foundations of using the NDVI index]. Available at: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (accessed 24.04.2023).
- [26] Zhelezova S.V., Gurova T.A., Gusev D.V. *Ispol'zovanie sputnikovyykh snimkov vysokogo razresheniya dlya otsenki sostoyaniya posevov na Polevoy opytной stantsii RGAU–MSKhA imeni K.A. Timiryazeva* [The use of high-resolution satellite images to assess the condition of crops at the Field Experimental Station of the RGAU-MSHA named after K.A. Timiryazev]. *Mater. 2-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v sel'skom khozyaystve»* [Materials of the 2nd All-Russian Scientific Conference «The use of remote sensing of the Earth in agriculture»]. St. Petersburg: Agrophysical Institute, 2018, pp. 125–131.
- [27] Zhelezova S.V. *Primenenie opticheskikh datchikov dlya otsenki sostoyaniya posevov ozimoy pshenitsy* [Application of optical sensors to assess the condition of winter wheat crops]. *Agrofizika* [Agrophysics], 2018, no. 3, pp. 42–48. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.03.08
- [28] Ignatova M.A., Kozlovskiy B.L., Dmitriev P.A., Fedorinova O.I., Dmitrieva A.A., Varduni T.V. *Sezonnaya dinamika NDVI u vidov klena* [Seasonal dynamics of NDVI in maple species]. *Zhivye i biokosnye sistemy* [Living and biocontainable systems], 2022, no. 39, at. 1. DOI: 10.18522/2308-9709-2022-39-1
- [29] Shchedrin V.N., Vasil'ev S.M., Babichev A.N., Skidanov R.V., Podlipnov V.V., Zhuravel' Yu.N. *Nazemnaya giperspektral'naya apparatura dlya izmereniya vegetativnykh indeksov v zadachakh pretsizionnogo orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Ground-based hyperspectral equipment for measuring vegetative indices in precision irrigation of agricultural crops]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Melioration Problems], 2018, no. 1 (29), pp. 1–14.
- [30] Danilov R.Yu., Ismailov V.Ya., Tret'yakov V.A., Kremneva O.Yu., Shumilov Yu.V., Rizvanov A.A., Krivoshein V.V., Kostenko I.A. *Razrabotka pretsizionnykh tekhnologiy fitosanitarnogo monitoringa agroekosistem na osnove ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo giperspektral'nogo zondirovaniya Zemli* [Development of precision technologies for phytosanitary monitoring of agroecosystems based on the use of remote hyperspectral Earth sensing data]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology of agro-industrial complex], 2018, t. 32, no. 10, pp. 82–86.
- [31] Feng L., Zhu S., Lin F., Su Z., Yuan K., Zhao Y., He Y., Zhang C. Detection of Oil Chestnuts Infected by Blue Mold Using Near-Infrared Hyperspectral Imaging Combined with Artificial Neural Networks. *Sensors*, 2018, v. 18, p. 1944.
- [32] Zhelezova S.V., Pakholkova E.V., Veller V.E., Voronov M.A., Stepanova E.V., Zhelezova A.D., Sonyushkin A.V., Zhuk T.S., Glinushkin A.P. Hyperspectral Non-Imaging Measurements and Perceptron Neural Network for Pre-Harvesting Assessment of Damage Degree Caused by Septoria/Stagonospora Blotch Diseases of Wheat. *Agronomy*, 2023, v. 13, p. 1045. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041045>

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project number 075-15-2021-1409.

Author's information

Zhelezova Sof'ya Vladislavovna — Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher of the Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Research Institute of Phytopathology», soferrum@mail.ru

Received 24.05.2023.

Approved after review 14.06.2023.

Accepted for publication 21.08.2023.