Дистанционный контроль ранней стадии различных типов стресса растений

О. В. Григорьева¹, В. Н. Груздев^{1,2}, И. В. Дроздова³, Б. В. Шилин^{1,2}

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург, 197198, Россия
E-mail: alenka12003@mail.ru

² Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: bshilin@rambler.ru

³ Ботанический институт имени В. Л. Комарова РАН
Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: alyssum7@gmail.ru

При внезапном кратковременном или длительном воздействии неблагоприятных факторов у растений в короткие сроки — от нескольких до десятков часов — возникают спектральные аномалии в ближнем инфракрасном диапазоне 750–1000 нм до появления у растений видимых морфологических изменений. Приводятся результаты измерений аномалий коэффициента спектральной яркости (КСЯ) при воздействии таких стрессоров, как тяжёлые металлы, ионизирующие излучения, нефтепродукты, механические повреждения. Объекты исследований — фасоль, клён, дуб и др. В основном зафиксированы отрицательные аномалии (понижения КСЯ) из-за угнетающего воздействия на растения большинства стрессоров, хотя и наблюдается в ряде случаев положительная аномалия в виде инверсии яркостных контрастов. Величина спектральной аномалии и длительность её существования позволяют сделать уверенный вывод о возможности обнаружения и картографирования площадей растений, поражённых стрессом, по данным аэрокосмических видеоспектральных систем высокого пространственного и спектрального разрешения.

Ключевые слова: стресс растений, спектральные характеристики, видеоспектрометры, спектрорадиометры

Одобрена к печати: 15.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-131-142

Введение

В последние десятилетия в связи с существенным увеличением техногенной нагрузки на окружающую среду весьма актуальна разработка эффективных методов дистанционной диагностики этой нагрузки. Особенно это важно для случаев разового кратковременного вредного воздействия на растения неблагоприятных факторов, например при несанкционированных выбросах соединений тяжёлых металлов, радиоактивных изотопов, разливов нефтепродуктов и других токсичных веществ, когда у растений не возникает видимых морфологических изменений. При этом такая диагностика имеет не только фундаментальное, но и практическое значение при обнаружении техногенного воздействия на ранних стадиях и принятии своевременных мер для его устранения.

Как известно (см. работы (Кравцов и др., 2013; Кронберг, 1988; Ayala-Silva, Beyl, 2005; Jacquemoud, Ustin, 2001; Van der Meer et al., 2006)), индикаторами состояния, в том числе стрессового, для растений являются их спектральные характеристики в диапазоне 0,3–13,5 мкм. Спектральные характеристики (спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) и коэффициент спектральной яркости (КСЯ)) используются при выявлении стресса растений при постоянном воздействии стрессоров, например тяжёлых металлов (Bandaru et al., 2016; Zhang et al., 2019), в результате засоленности (Domínguez-Beisiegel et al., 2016) или над рудопрооявлениями полезных ископаемых (Кронберг, 1988; Bowker et al., 1985; Kruse,

Boardman, 2000). В работе (Wahabzada et al., 2015) рассматривается вопрос использования видеоспектральных данных при изучении динамики заболеваний растений.

И только небольшое количество публикаций посвящено исследованию тонких изменений спектральных характеристик при разовом техногенном воздействии тяжёлых металлов (Бакина и др., 2016; Григорьева и др., 2018; Груздев и др., 2018). Результаты указанных работ позволили провести более углублённые исследования по влиянию выбросов тяжёлых металлов на растения, а также других негативных факторов. В этих исследованиях в условиях естественного произрастания растений в открытом грунте были использованы современные средства дистанционного зондирования — видеоспектрометры, которые, в отличие от традиционных спектро радиометров, дают практически «одномоментную» (съёмка полевой панорамы или отрезка аэросъёмочного маршрута занимает секунды — десятки секунд) спектральную информацию по площади. Существующие авиационные и полевые видеоспектрометры имеют спектральное разрешение до 2 нм, мгновенный угол поля зрения — около 0,2–1,0 мрад и угол обзора — первые градусы — первые десятки градусов. Таким образом, формируемая при видеоспектральной съёмке спектральная информация, так называемый информационный параллелепипед, или гиперкуб, в сотни и тысячи раз более «представительна» и достоверна по сравнению с данными спектро радиометров и, что наиболее важно, позволяет объективно и в одинаковых условиях сравнивать спектральные характеристики объектов конкретной фоноцелевой обстановки, полученные с помощью полевых или авиационных приборов. К недостаткам видеоспектрального метода относится сложность сравнения результатов съёмок в разное время из-за изменения внешних условий (дымка, облачность), а также препятствия в использовании в лабораторных условиях из-за широкого поля обзора, где должна быть реализована тестовая, строго контролируемая обстановка на значительном количестве сравнительно малоразмерных объектов — вегетационных сосудов. Поэтому в 2019 г. было принято решение использовать для измерений в стабильных условиях оранжереи спектро радиометры с узким полем зрения и высоким спектральным разрешением.

Материалы и методы

При исследовании спектральных характеристик растений в условиях стресса были выбраны спектро радиометры Spectral Evolution PSR 3500 и PSR 1100 (таблица).

Технические характеристики спектро радиометров

Параметр	PSR-3500	PSR-1100
Спектральный диапазон	350–3500 нм	320–1100 нм
Номинальное спектральное разрешение	3,0 нм (350–1000 нм) 8–1500 нм 6–2100 нм	3,2 нм
Детекторы (светодиодные линейки)	512-элементный Si (350–1000 нм) 256-элементный InGaAs (970–1900 нм) 256-элементный InGaAs (1900–2500 нм)	512-элементный Si (320–1000 нм)
Поле зрения входного объектива (основное)	4°	
Разрядность АЦП	16 бит	16 бит
Точность длины волны	0,5 нм	0,5 нм
Время интегрирования	8,4 мс минимум	8–2000 мс

Использование спектро радиометров рассмотренных модификаций имеет ряд особенностей.

В состав прибора PSR-3500 входит выносной контактный датчик, в котором установлен собственный источник света. Отражённое от объекта излучение источника поступает в полихроматор оптического блока по волоконно-оптическому кабелю. Измерения спектров отражения листьев проводились непосредственно на растении, в качестве подложки применялась подкладка чёрной ткани.

Спектрорадиометр PSR-1100 с полем зрения объектива 4° в лаборатории использовался с входящим в комплект прибора автономным осветителем. Лист исследуемого растения располагался на предметном столике. Измеряемая площадь определялась лучом встроенного в прибор лазера, положение которого геометрически соответствовало визированию поля зрения оптической системы спектрорадиометра.

В качестве объектов исследований были выбраны фасоль обыкновенная, подсолнечник однолетний, горчица белая, гречиха съедобная, хоста ланцетолистная, барбарис Тунберга, ель европейская, клён остролистный, дуб черешчатый и др. Всего было получено и проанализировано более 500 спектров КСЯ и СПЭЯ.

В лабораторных условиях растения выращивали в вегетационных сосудах с песком в контролируемых условиях с 16-часовым световым периодом при освещении светом от люминесцентных ламп OSRAM L36W/77 и поливом 1/2 концентрации питательного раствора Арнона. При экспериментах с тяжёлыми металлами большую часть растений опрыскивали, небольшое количество поливали (под корень) водными растворами сернокислых солей Cu, Ni, Zn и Cd. Два сосуда оставались контрольными, в них растения продолжали поливать питательным раствором. В ходе эксперимента использовалась концентрация тяжёлых металлов, соответствующая 3, 6 и 9 ПДК (предельно-допустимая концентрация). Сухие образцы растительного материала озолняли в муфельной печи при 450°C в течение 12 ч. Зола растворяли в 6 мл смеси кислот: 1,5 М HCl и 3,71 М HNO₃, затем разбавляли деионизированной водой до 25 мл. Концентрацию тяжёлых металлов в растениях определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре Квант-АФА, «Кортек», Россия.

Спектральные характеристики стресса растений

Регистрация стресса растений под воздействием тяжёлых металлов

В рамках работы исследовалось кратковременное воздействие растворов тяжёлых металлов (меди, кадмия, цинка) на изменения спектральных характеристик листьев фасоли и клёна.

Фасоль была выбрана в качестве нового объекта как растение, показывающее быстрый рост и имеющее удобные для измерений достаточно крупные листья. Для фасоли распыление меди в концентрации 6 и 9 ПДК привело к формированию на следующий день чёткой отрицательной аномалии КСЯ в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. Через пять дней характер аномалии сохранился (*рис. 1*, см. с. 134).

Кадмий по сравнению с медью имеет заметно большее угнетающее воздействие. Через несколько часов после распыления происходит резкое понижение спектральной кривой. Отрицательная аномалия сохраняется в течение всех пяти дней измерений (*рис. 2*, см. с. 134).

Цинк является жизненно важным микроэлементом (активирует действие ферментов, входит в состав ферментативных систем, участвующих в дыхании, синтезе белков и ауксинов, повышает тепло-, засухо- и холодостойкость растений, играет важную роль в регулировании процессов роста), поэтому его применение в концентрации 6 ПДК оказало только стимулирующее воздействие на рост фасоли, что можно наблюдать по повышению значения КСЯ в ближней ИК-области. Скорее всего, растения испытывали недостаток цинка.

Изменения в КСЯ фасоли после опрыскивания никелем в концентрации 6 ПДК характеризуются понижением КСЯ в красной области спектра и в области 950–980 нм. Последняя соответствует максимуму поглощения воды, поэтому сказать о полностью отрицательном воздействии никеля на растение нельзя.

Результаты измерения спектральных характеристик клёна под воздействием меди и цинка представлены на *рис. 3* и *4* (см. с. 135).

Рис. 1. КСЯ фасоли при воздействии меди (6 ПДК): 1 — контрольное растение, измерение от 04.04.2019; воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности: 2 — измерение от 04.04.2019, 3 — измерение от 09.04.2019. Спектрорадиометр PSR 1100

Рис. 2. КСЯ фасоли при воздействии кадмия (6 ПДК): 1 — контрольное растение, измерение от 04.04.2019; воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности: 2 — измерение от 04.04.2019, 3 — измерение от 05.04.2019, 4 — измерение от 09.04.2019. Спектрорадиометр PSR 1100

Закономерность изменения спектральных характеристик характеризуется отрицательной динамикой воздействия меди на КСЯ в ближнем ИК-диапазоне с течением времени 4, 5 и 10 апреля после опрыскивания 2 апреля (см. рис. 3), что свидетельствует об отрицательном влиянии меди.

Воздействие цинка (см. рис. 4) на клён также носит угнетающее влияние, которое сохраняется в течение длительного времени (неделю) и также отображается в понижении значений КСЯ в красной и ближней инфракрасной областях спектра.

Под воздействием никеля для клёна наблюдается быстро возникающая отрицательная аномалия, которая через неделю постепенно уменьшается до контрольного значения.

Рис. 3. КСЯ клёна при воздушно-капельном загрязнении листовой поверхности медью (9 ПДК): 1 — измерение от 03.04.2019; 2 — измерение от 04.04.2019; 3 — измерение от 05.04.2019; 4 — измерение от 09.04.2019; 5 — измерение от 10.04.2019. Спектрорадиометр PSR 1100

Рис. 4. КСЯ клёна при воздействии цинка (6 ПДК): 1 — контрольное растение, измерение от 09.04.2019; воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности: 2 — измерение от 10.04.2019, 3 — измерение от 16.04.2019. Спектрорадиометр PSR 1100

Регистрация стресса растений под воздействием ионизирующего излучения

Воздействие ионизирующих излучений хорошо изучено на примере крупных радиационных аварий типа аварии на Чернобыльской атомной электростанции и при очень больших дозах — десятки и сотни рентген. Здесь возникают значительные изменения в цвете и морфологии растений (Шилин и др., 2012). Изучено влияние на растения небольших концентраций вносимых в почву радиоактивных элементов.

Представляется весьма актуальным выявление влияния на растения кратковременного облучения, например при несанкционированном распылении радиоактивных изотопов при техногенных утечках или террористических актах и т.п. Они могут быть обнаружены дистанционно аэрогаммасъёмкой с помощью гамма-радиометров, позволяющих регистрировать изменения кларковых значений радиоактивных элементов. Однако возможности метода

ограничены высотой полёта 50–75 м из-за полного поглощения гамма-излучения атмосферой. Кроме того, из-за низкого пространственного разрешения с помощью гамма-радиометра можно получить распределение радиоактивного изотопа с разрешением на местности в десятки метров при больших затратах лётного времени. При воздействии больших доз ионизирующего излучения возникающие значительные изменения спектральных характеристик (вплоть до изменения цвета) уверенно картографируются с больших высот с широким захватом и высоким разрешением (десятки сантиметров и метры) современными многоспектральными оптико-электронными аэрокосмическими системами. В случае возникновения тонких изменений спектральных характеристик растений при разовом воздействии ионизирующих излучений можно ожидать положительный эффект картографирования поражённых площадей до возникновения у растений видимых изменений.

Наиболее просто спектральные изменения можно выявить в стабильных условиях оранжереи-лаборатории из-за технических сложностей использования радиоактивных источников в полевых условиях. В экспериментах был использован диск диаметром 4 см — часы с циферблатом и стрелками, светящимися за счёт радиоактивного изотопа. По гамма-излучению доза составила около 130–140 мкр/ч, т. е. примерно 4–5 фоновых значений. Источник располагался непосредственно под листом растений — фасоли, герани, сингониума, клёна и дуба — на время от нескольких часов до трёх суток.

Для клёна при суточном воздействии зафиксирована положительная аномалия КСЯ (30–40 %) в ближнем ИК-диапазоне (рис. 5). Через трое суток зафиксирована отрицательная аномалия КСЯ (10–15 %). То есть можно сделать вывод о стимулирующем влиянии слабого излучения на ранних стадиях воздействия и угнетающего — на более поздних.

Рис. 5. КСЯ клёна при воздействии ионизирующих излучений. Спектрорадиометр PSR 1100

Дуб реагирует на тот же источник слабо, аномалия возникает через несколько суток. Для листьев фасоли серия измерений даёт положительные спектральные аномалии через 19, 23 и 48 ч. Разовые измерения для герани и сингониума также выявили небольшие аномалии: положительную — для сингониума и отрицательную — для герани.

Регистрация факта аномалий важна для изотопов с преобладающей интенсивностью альфа- и бета-излучения, недоступных для регистрации аэрогаммасъёмкой. Очевидно, что при больших дозах и площадях, например в случае техногенных аварий, спектральные аномалии могут быть зарегистрированы видеоспектрометрами авиационного и космического базирования.

Регистрация стресса растений под механическим воздействием

Под механическим воздействием подразумевается нанесение зарубок и полное отделение частей кустарников и деревьев, например для маскирования криминальных схронов. Возникающий при этом «мгновенный» водный стресс из-за прекращения поступления воды отличается от «традиционного» медленно возникающего водного стресса при засухе. В первые часы и даже десятки часов у отделённых веток листва не отличается по морфологии и цвету от здоровых, но отрицательные спектральные аномалии в ближнем ИК-диапазоне возникают через 45 мин и существенно увеличиваются через два часа (рис. 6).

Рис. 6. КСЯ листа подсолнечника при механическом воздействии. Спектрорадиометр PSR 3500

Регистрация стресса растений под воздействием нефтепродуктов

Методики и технические средства аэрокосмического контроля в оптическом диапазоне загрязнений нефтепродуктами почв хорошо известны и успешно развиваются (Григорьева и др., 2010; Kuhn, Horig, 2004; Schwartz et al., 2009). Однако все они разработаны для условий длительного или постоянного воздействия загрязнений, и совершенно не исследован вопрос изменения спектральных характеристик на ранних стадиях стресса до появления у растений видимых изменений. Для решения этой задачи в условиях оранжереи была создана тестовая обстановка с посадками фасоли, клёна и дуба. Загрязнение нефтепродуктами осуществлялось внесением дизельного топлива (ДТ) объёмом 5 см³ специальным шприцом в нижний слой почвы.

Результаты исследования показали, что фасоль очень быстро реагирует на загрязнение. Уже на следующие сутки после внесения нефтепродукта формируется положительная спектральная аномалия в ближнем ИК-диапазоне (рис. 7, см. с. 138) и очень слабая отрицательная аномалия — в видимом диапазоне. На четвёртые сутки наблюдаются морфологические изменения в листьях.

При внесении нефтепродукта в почву с горшком дуба 24 апреля через два часа была зарегистрирована чёткая положительная аномалия в ближнем ИК-диапазоне и слабая — в видимом. Аналогичные аномалии были зафиксированы 25, 26 и 29 апреля, но в последний день имели место морфологические изменения листьев.

При внесении ДТ в почву с горшком клёна 4 апреля на следующий день зарегистрирована положительная аномалия в ближнем ИК-диапазоне, которая сохранилась 9 и 10 апреля. Только 16 апреля отмечается слабая отрицательная аномалия и небольшие визуально наблюдаемые изменения листьев.

Рис. 7. КСЯ фасоли под воздействием нефтепродуктов. Спектрорадиометр PSR 1100

Заключение

Опыт исследований 2014–2019 гг. (Алексеев и др., 2012; Бакина и др., 2016; Григорьева и др., 2018; Груздев и др., 2018) у растений спектральных изменений, возникающих при внезапных стрессовых воздействиях, с помощью современных авиационных и полевых видеоспектрометров и спектрорадиометров показывает, что изучение фундаментальных закономерностей наиболее эффективно и достоверно при работе в строго контролируемых условиях оранжереи. Использование при этом разработанных в последнее время спектрорадиометров с выносной головкой с осветителем и приёмником минимизирует зависимость результатов от условий проведения экспериментов. Могут быть также выявлены и учтены возможные изменения КСЯ между листьями одного растения и в пределах одного листа из-за неодинакового воздействия стрессора (например, при неравномерном распределении тяжёлого металла в пределах листа).

Рис. 8. Монохромные узкоспектральные изображения полигона твердых бытовых отходов. Авиационный видеоспектрометр «Фрегат»

Для сравнения влияния стрессоров на конкретную природную ситуацию следует использовать полевые или авиационные видеоспектрометры, дающие возможность получать спектральную информацию с больших площадей в одинаковых условиях краткого времени измерений (секунды – десятки секунд). Предпочтительнее использование для этих целей видеоспектрометров с полихроматором на дифракционной решётке (рис. 8 (см. с. 138) и 9).

Рис. 9. Спектральные характеристики некоторых элементов ландшафта на рис. 8

Изложенные выше и полученные ранее материалы позволяют сделать следующие выводы:

1. При внезапном воздействии различных стрессоров на растения у последних возникают спектральные аномалии до появления видимых морфологических изменений.
2. В зависимости от вида растения и типа стрессора аномалии возникают за сроки от нескольких часов до нескольких десятков часов.
3. Длительность существования аномалии зависит от времени воздействия стрессора.
4. Спектральные аномалии возникают в основном в ближнем ИК-диапазоне 750–1000 нм и в большинстве случаев имеют отрицательное значение по сравнению с фоном из-за угнетающего воздействия стрессоров, поэтому имеющие иногда место положительные аномалии часто инвертируются в отрицательные с течением времени. Ближний ИК-диапазон 1000–2500 нм не имеет значительной индикационной роли. Величина спектральной аномалии и длительность её существования позволяют сделать уверенный вывод о возможности обнаружения и картографирования площадей растений, поражённых стрессом, аэрокосмическими видеоспектральными системами высокого пространственного и спектрального разрешения.

Работа проведена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-29-09449).

Литература

1. Алексеев А. А., Шилин Б. В., Шилин И. Б. Опыт полевых видеоспектральных исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 89–94.
2. Бакина Л. Г., Груздев В. Н., Дроздова И. В., Шилин Б. В. Дистанционное обнаружение стресса растительности на ранних стадиях воздействия тяжелыми металлами // Региональная экология. 2016. № 1(43). С. 81–89.

3. Григорьева О. В., Саидов А. Г., Панин А. В. Индикатор состояния почво-грунтов в районах обращения нефти и нефтепродуктов, полученный неконтактными средствами наблюдений // Экология и промышленность России. 2010. № 10. С. 2–5.
4. Григорьева О. В., Дроздова И. В., Шилин Б. В. Экспериментальное обоснование возможностей видеоспектральной дистанционной индикации кратковременного стресса растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 78–88. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-78-88.
5. Груздев В. Н., Дроздова И. В., Кузнецов А. Ю., Шилин Б. В. Решение задач экологической безопасности видеоспектральным методом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 8–17. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-9-17.
6. Кравцов С. Л., Голубцов Д. В., Лисова Е. Н. Анализ спектральных каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности (по зарубежным публикациям) // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 79–91. DOI: 10.7868/S020596141301003X.
7. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований / пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
8. Шилин Б. В., Горный В. И., Веремьев В. И. История применения дистанционных методов при ликвидации аварии на Чернобыльской атомной станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 27–36.
9. Ayala-Silva T., Beyl C. A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency // Advances in Space Research. 2005. V. 35. P. 305–317. DOI: 10.1016/j.asr.2004.09.008.
10. Bandaru V., Daughtry C. S., Codling E. E., Hansen D. J., White-Hansen S., Green C. E. Evaluating Leaf and Canopy Reflectance of Stressed Rice Plants to Monitor Arsenic Contamination // Intern. J. Environmental Research and Public Health. 2016. V. 13(6). Art. No. 606. 16 p. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph13060606>.
11. Bowker D. E., Davis R. E., Myrick D. L., Stacy K., Jones W. T. Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies / NASA Reference Publication. 1139. 1985. 188 p.
12. Domínguez-Beisiegel M., Castañeda C., Mougenot B., Herrero J. Analysis and Mapping of the Spectral Characteristics of Fractional Green Cover in Saline Wetlands (NE Spain) Using Field and Remote Sensing Data // Remote Sensing. 2016. V. 8(7). Art. No. 590. 19 p. URL: <https://doi.org/10.3390/rs8070590>.
13. Jacquemoud S., Ustin S. L. Leaf optical properties: a state of the art // Proc. 8th Intern. Symp. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing. Aussois, France. 2001. P. 223–232.
14. Kruse F. A., Boardman J. W. Characterization and Mapping of Kimberlites and Related Diatremes Using Hyperspectral Remote Sensing // Proc. IEEE AeroSpace Conf. Big Sky, Montana. 2000. V. 3. P. 299–304. DOI: 10.1109/AERO.2000.879859.
15. Kuhn F., Horig B. Hydrocarbon Index — An algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons // Intern. J. Remote Sensing. 2004. V. 25(12). P. 2467–2473. DOI: 10.1080/01431160310001642287.
16. Schwartz G., Eshel G., Ben-Haim M., Ben-Dor E. Reflectance spectroscopy as a rapid tool for qualitative mapping and classification of hydrocarbons soil contamination. Tel Aviv, Israel, 2009. 7 p. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/fe4b/e6cb350831bf8067d8e6cb8519ca4781cb70.pdf>.
17. Van der Meer F. D. Imaging spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications. Kluwer Academic Publishers, 2006. 403 p.
18. Wahabzada M., Mahlein A.-K., Bauckhage C., Steiner U., Oerke E.-C., Kersting K. Metro Maps of Plant Disease Dynamics — Automated Mining of Differences Using Hyperspectral Images // PLoS ONE. 2015. V. 10(1). Art. No. e0116902. 20 p. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116902>.
19. Zhang C., Ren H., Dai X., Qin Q., Li J., Zhang T., Sun Y. Spectral characteristics of copper-stressed vegetation leaves and further understanding of the copper stress vegetation index // Intern. J. Remote Sensing. 2019. V. 40(12). P. 4473–4488. DOI: 10.1080/01431161.2018.1563842.

Remote control of early stages of different types of stress in various plants

O. V. Grigorieva¹, V. N. Gruzdev^{1,2}, I. V. Drozdova³, B. V. Shilin^{1,2}

¹ A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg 197198, Russia
E-mail: alenka12003@mail.ru

² Saint Petersburg Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS
Saint Petersburg 197110, Russia
E-mail: bshilin@rambler.ru

³ Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg 197376, Russia
E-mail: alyssum7@gmail.ru

Plants under a short- or long-term influence of adverse factors (stressors) quickly, from several to tens of hours, develop spectral anomalies in the near infrared range of 750–1000 nm, long before any visible morphological changes. The results of measurements of the anomalies in spectral reflectance coefficient (SRC) caused by such stressors as heavy metals, ionizing radiation, oil products, and mechanical damage are presented. The objects of research are beans, maple, oak, etc. It was mainly recorded, that due to the inhibitory effect of most stressors, anomalies were negative (SRC lowered), although in some cases a positive anomaly was observed in the form of an inversion of brightness contrasts. The spectral anomaly magnitude and its duration let us make a confident conclusion that we can detect and map areas of plants affected by stress with the help of aerospace video spectral systems of high spatial and spectral resolution.

Keywords: plant stress, spectral characteristics, video spectrometers, spectroradiometers

Accepted: 15.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-131-142

References

1. Alekseev A. A., Shilin B. V., Shilin I. B., Operational experience of the imaging spectrometer using in field-work, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 89–94 (in Russian).
2. Bakina L. G., Gruzdev V. N., Drozdova I. V., Shilin B. V., Remote Detection of Human Induced Stress on Vegetation in The Early Stages of Exposure to Heavy Metals, *Regional'naya ekologiya*, 2016, No. 1(43), pp. 81–89 (in Russian).
3. Grigoryeva O. V., Sahidov A. G., Panin A. V., The Indicator of Soil Condition in Areas of Oil and Oil Products Circulation Obtained by Non-Contact Means of Monitoring, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2010, No. 10, pp. 50–53 (in Russian).
4. Grigorieva O. V., Drozdova I. V., Shilin B. V., Experimental substantiation of the capabilities of videospectral remote indication of short-term vegetation stress, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 78–88 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-78-88.
5. Gruzdev V. N., Drozdova I. V., Kuznetsov A. Yu., Shilin B. V., Solving the Problems of Environmental Safety by Videospectral Method, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 8–17 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-9-17.
6. Kravtsov S. L., Golubtsov D. V., Lisova E. N., Optimal Spectral Channels of Aerospace Equipment for Vegetation Remote Sensing Monitoring (Foreign Publications Review by the Problem), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 1, pp. 79–91 (in Russian), DOI: 10.7868/S020596141301003X.
7. Kronberg P., *Fernerkundung der Erde. Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie*, Stuttgart: Enke, 1985, 394 s.
8. Shilin B. V., Gornyi V. I., Verem'ev V. I., History of Remote Sensing Methods Application During Elimination of Chernobyl Nuclear Power Plant Accident, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 27–36 (in Russian).
9. Ayala-Silva T., Beyl C. A., Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency, *Advances in Space Research*, 2005, Vol. 35, pp. 305–317, DOI: 10.1016/j.asr.2004.09.008.

10. Bandaru V., Daughtry C. S., Codling E. E., Hansen D. J., White-Hansen S., Green C. E., Evaluating Leaf and Canopy Reflectance of Stressed Rice Plants to Monitor Arsenic Contamination, *Intern. J. Environmental Research and Public Health*, 2016, Vol. 13(6), Art. No. 606, 16 p., available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph13060606>.
11. Bowker D. E., Davis R. E., Myrick D. L., Stacy K., Jones W. T., *Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies*, NASA Reference Publication, 1139, 1985, 188 p.
12. Domínguez-Beisiegel M., Castañeda C., Mougenot B., Herrero J., Analysis and Mapping of the Spectral Characteristics of Fractional Green Cover in Saline Wetlands (NE Spain) Using Field and Remote Sensing Data, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8(7), Art. No. 590, 19 p., available at: <https://doi.org/10.3390/rs8070590>.
13. Jacquemoud S., Ustin S. L., Leaf optical properties: a state of the art, *Proc. 8th Intern. Symp. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Aussois, France, 2001, pp. 223–232.
14. Kruse F. A., Boardman J. W., Characterization and Mapping of Kimberlites and Related Diatremes Using Hyperspectral Remote Sensing, *Proc. IEEE AeroSpace Conf.*, Big Sky, Montana, 2000, Vol. 3, pp. 299–304, DOI: 10.1109/AERO.2000.879859.
15. Kuhn F., Horig B., Hydrocarbon Index — An algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons, *Intern. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25(12), pp. 2467–2473, DOI: 10.1080/01431160310001642287.
16. Schwartz G., Eshel G., Ben-Haim M., Ben-Dor E., *Reflectance spectroscopy as a rapid tool for qualitative mapping and classification of hydrocarbons soil contamination*, Tel Aviv, Israel, 2009, 7 p., available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/fe4b/e6cb350831bf8067d8e6cb8519ca4781cb70.pdf>.
17. Van der Meer F. D., *Imaging spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications*, Kluwer Academic Publishers, 2006, 403 p.
18. Wahabzada M., Mahlein A.-K., Bauckhage C., Steiner U., Oerke E.-C., Kersting K., Metro Maps of Plant Disease Dynamics — Automated Mining of Differences Using Hyperspectral Images, *PLoS ONE*, 2015, Vol. 10(1), Art. No. e0116902, 20 p., available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116902>.
19. Zhang C., Ren H., Dai X., Qin Q., Li J., Zhang T., Sun Y., Spectral characteristics of copper-stressed vegetation leaves and further understanding of the copper stress vegetation index, *Intern. J. Remote Sensing*, 2019, Vol. 40(12), pp. 4473–4488, DOI: 10.1080/01431161.2018.1563842.