Экспериментальное обоснование возможностей видеоспектральной дистанционной индикации кратковременного стресса растительности

О. В. Григорьева¹, И. В. Дроздова², Б. В. Шилин³

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

² Ботанический институт имени В. Л. Комарова РАН
Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: alyssum7@gmail.ru

³ Научно-исследовательский Центр экологической безопасности РАН
Санкт-Петербург, 197198, Россия
E-mail: bshilin@rambler.ru

В стационарных лабораторных условиях исследованы изменения коэффициента спектральной яркости растений при кратковременном воздействии тяжёлыми металлами (медь, цинк, никель) на корневую систему и листовую поверхность. Подтверждено появление аномалии коэффициентов спектральной яркости (спектральной аномалии) в ближнем инфракрасном диапазоне 700–900 нм. За короткое время (1–2 дня) формируется аномалия при загрязнении листовой поверхности и несколько позднее — субстрата. Детально рассмотрено явление инверсии спектральных аномалий для всех металлов. Зафиксированы как положительные, так и отрицательные спектральные аномалии поражённых растений по сравнению с контрольными. Проведён анализ закономерностей изменения спектральных характеристик под воздействием тяжёлых металлов с точки зрения их физиологического состояния, фазы вегетации и вида. Выявленные изменения могут быть представлены кривой «доза — эффект», выраженной через функцию Ричардса. По спектральным характеристикам растений рассчитаны специальные индексы содержания хлорофилла в растениях, подтверждающие выводы о влиянии растворов анализируемых металлов на пигменты листьев. Амплитуда спектральных аномалий и длительность их существования свидетельствуют о возможности их обнаружения и картографирования аэрокосмическими видеоспектральными системами высокого пространственного и спектрального разрешения до появления у растений видимых морфологических изменений.

Ключевые слова: коэффициент спектральной яркости, спектральная аномалия, видеоспектральная съёмка, тяжёлые металлы

Одобрена к печати: 27.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-78-88

Введение

Исследования спектральных отражательных характеристик различных компонентов ландшафта, в первую очередь растительности, в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне 0,4–2,5 мкм начались в середине прошлого века. Основная задача здесь — изучение фундаментальных закономерностей изменения спектральных характеристик в виде спектров отражения и коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) с целью построения фотографической и многоспектральной оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования и интерпретации материалов аэрокосмических съёмок с подобной аппаратурой. Для этого создавались различные атласы и каталоги, анализировавшие основные особенности изменений КСЯ (Чапурский, 1986). Было показано, что спектральные характеристики позволяют определять вещественный состав объекта, в том числе виды растительности и её состояние.

Как известно (Чапурский, 1986; Imaging..., 2006), спектральные характеристики растений зависят от большого количества факторов (Сидько и др., 2009): фазы вегетации, особенностей микроклимата (погоды), различных стрессовых факторов (засолённость, болезни,

паразитарные насекомые, дефицит или избыток влаги, общее ухудшение условий жизнедеятельности, в том числе под влиянием загрязнений тяжёлыми металлами, ионизирующих излучений и т.д.). Стресс под влиянием тяжёлых металлов изучен достаточно хорошо (Кронберг, 1988; Imaging..., 2006). В основном он выражается в изменении отражательной способности в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах 0,4–0,9 мкм. Однако все известные исследования проводились при постоянном (долговременном) воздействии тяжёлых металлов на растения, например на площадях повышенного их содержания над месторождениями полиметаллов (Кронберг, 1988) или на участках с постоянным загрязнением из атмосферных осадков в городах (Бузников, Тимофеев, 2010).

В современных условиях появилась необходимость изучения стресса растительности при кратковременных неблагоприятных воздействиях, когда у растений не возникает видимых морфологических изменений. В первую очередь это относится к тяжёлым металлам, таким как медь, никель, кадмий, цинк, свинец. Соответствующие исследования были начаты нами в 2013 г. В полевых условиях в качестве растений-индикаторов были выбраны барбарис Тунберга (*Berberis thunbergii* DC), кизильник (*Coloneaster lucidus* Schltdl.), сирень венгерская (*Syringa josikaea* Jacq. fil.), хоста ланцетолистная (*Hosta lancifolia* Thunb.), гречиха (*Fagopyrum esculentum* Moench.), горчица белая (*Sinapis alba* L.), травяной газон (злаки с примесью разнотравья). Загрязнение представляло собой внесение растворов солей металлов 1–3 ПДК в почву под растения. Было выявлено (Бакина и др., 2016; Груздев и др., 2018) заметное влияние тяжёлых металлов на ранних стадиях разового воздействия до появления у растений видимых морфологических изменений. Спектральные аномалии возникают в основном в ближнем ИК-диапазоне 700–900 нм через день или несколько дней после разового воздействия. В режиме полевой видеоспектральной съёмки (Алексеев и др., 2012) результаты фиксируются по площади снимаемой панорамы в виде информационного параллелепипеда — сотни узкоспектральных монохромных изображений высокого геометрического и спектрального разрешения с последующим построением спектра отражённого излучения любого объекта панорамы в пределах мгновенного поля зрения видеоспектрометра.

Материалы и методы

Данные видеоспектральной съёмки в сотни и тысячи раз более представительны и достоверны (с позиции сравнения объектов) по сравнению с используемыми до сих пор спектрорадиометрами и, что особенно важно, позволяют объективно сравнивать спектральные характеристики конкретной фоноцелевой обстановки (время съёмки панорамы видеоспектрометром составляет 20–60 с, что полностью исключает влияние изменения внешних условий). При обработке видеоспектральных материалов можно усреднять данные по любой площади объекта панорамы, что также увеличивает достоверность результатов. К недостаткам видеоспектрометра относится сложность использования в лабораторных условиях из-за широкого поля обзора, где должна быть реализована тестовая строго контролируемая обстановка на значительном количестве сравнительно малоразмерных объектов (обычно небольших горшков).

Для этих условий оптимально использование спектрорадиометра с узким полем зрения и высоким спектральным разрешением. В связи с этим при экспериментальных исследованиях был выбран спектрорадиометр Spectral Evolution PSR 2500 (спектральный диапазон 350–2500 нм; разрешение 3 нм в диапазоне 350–1000 нм, 8 нм в диапазоне до 1500 нм и 6 нм в диапазоне до 2500 нм; поле обзора 4°). Прибор имеет различное периферийное оборудование, позволяющее свести практически к нулю влияние внешних условий.

В 2017–2018 гг. проводили лабораторные опыты на следующих видах растений: гречиха съедобная (*Fagopyrum esculentum* Moench.), горчица белая (*Sinapis alba* L.), подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus* L.). Растения выращивали в вегетационных сосудах с песком в контролируемых условиях с 16-часовым световым периодом при освещении от люминесцентных ламп OSRAM L36W/77 и поливом 1/2 концентрации питательного раствора Арнона. Затем в опытных вариантах одну половину растений опрыскивали, а другую — поливали (под

корень) водными растворами сернокислых солей Cu, Ni и Zn. Два сосуда оставались контрольными, в них растения продолжали поливать питательным раствором. В ходе эксперимента использовались концентрации тяжёлых металлов, соответствующие 3 и 6 долям предельно допустимой концентрации (ПДК) для Cu (35,4 мг/л $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, где ПДК — 3 мг/кг), 3–12 ПДК для Ni (57,4 мг/л $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, где ПДК — 4 мг/кг) и Zn (202 мг/л $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, где ПДК — 23 мг/кг) (ГН 2.1.7.2041-06, 2006). Сухие образцы растительного материала озоляли в муфельной печи при 450 °С в течение 12 ч. Зола растворяли в 6 мл смеси кислот: 1,5 М HCl и 3,71 М HNO_3 , затем разбавляли деионизированной водой до 25 мл. Концентрации Cu, Ni и Zn в растениях определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре Квант-АФА, ООО «Кортек», Россия.

Результаты экспериментальных исследований

Наиболее полные и представительные материалы были получены для горчицы белой (рис. 1–6, см. с. 81–82). Первый цикл измерений включал в себя посадку семян 1 декабря 2017 г., обработку (опрыскивание листьев и полив) 14 и 17 декабря растворами солей металлов в концентрациях 3 и 6 ПДК. Непосредственно измерения спектральных характеристик листьев проводились 15 и 18 декабря. При опрыскивании раствором сульфата меди в концентрации 3 ПДК на следующий день наблюдалась чёткая положительная аномалия в ближнем ИК-диапазоне 750–900 нм (см. рис. 1). При поливе в зону корневой системы раствором соли меди такой аномалии нет, поскольку механизм поступления металлов из почвы зависит от многих факторов и является более длительным процессом, чем через листовую пластину. Для варианта с цинком зарегистрирована заметная положительная аномалия также только для опрыскивания, а для никеля аномалий не зафиксировано.

Через три дня для меди наблюдалась чёткая отрицательная аномалия в ближнем ИК-диапазоне и для опрыскивания, и для полива, особенно она была велика для последнего (см. рис. 2). Чёткие отрицательные аномалии наблюдались и для цинка (см. рис. 3), и для никеля.

Анализ кривых КСЯ на рис. 1–3 показывает, что выделенные аномалии наблюдаются и в диапазоне 1500–1800 нм, но различия у них существенно меньше.

С учётом результатов работ первого цикла второй эксперимент в апреле 2018 г. проводился для большего количества тест-объектов для различных доз загрязнения листовой поверхности и субстрата. Посев семян горчицы белой выполнен 30 марта, обработка растворами солей меди, цинка и никеля — 23 апреля. На следующий день 24 апреля получена чёткая отрицательная аномалия в ближнем ИК-диапазоне при опрыскивании листовой поверхности раствором сульфата меди в концентрации 3 ПДК (см. рис. 4). Аномалия заметна также в диапазоне 1500–1800 нм. Отрицательная аномалия наблюдалась для цинка при дозах 3 и 6 ПДК (см. рис. 5); при большем значении ПДК аномалия более интенсивна в диапазоне 1500–1800 нм. Для никеля отрицательная аномалия примерно одинаковой амплитуды отмечалась для 6 и 12 ПДК. При поливе под корень зафиксированы отрицательные аномалии для меди (6 ПДК) (см. рис. 4), цинка (9 ПДК) (см. рис. 5) и никеля (15 ПДК). Через три дня, 27 апреля, отрицательная аномалия для вариантов с опрыскиванием листьев раствором сульфата меди сохранилась, но с меньшей интенсивностью. В то же время практически исчезли аномалии для цинка и никеля. Также с меньшей амплитудой для вариантов с корневым поливом сохранилась аномалия для меди, но исчезли аномалии для цинка и никеля.

Для гречихи и подсолнечника получены материалы, позволяющие пока делать отдельные выводы.

Для гречихи было проведено две серии измерений на разных фазах вегетации. При первом эксперименте воздействие Cu и Ni на спектры отражения гречихи менее выражено, чем у горчицы. Эффект угнетения в виде отрицательной аномалии в ближнем инфракрасном диапазоне проявляется только на третьи сутки после опрыскивания и сохраняется на короткое время (см. рис. 6).

Рис. 1. КСЯ горчицы белой при воздействии меди. Измерения 15 декабря 2017 г. (3 ПДК): 1 — контрольное растение; 2 — загрязнение корневой системы; 3 и 4 — воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности

Рис. 2. КСЯ горчицы белой при воздействии меди. Измерения 18 декабря 2017 г.: 1 — контрольное растение; 2 — загрязнение корневой системы (3 ПДК); 3 и 4 — воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности 3 и 6 ПДК

Рис. 3. КСЯ горчицы белой при воздействии никеля. Измерения 18 декабря 2017 г.: 1 — контрольное растение; 2 — загрязнение корневой системы 9 ПДК; 3 — воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности 6 ПДК

Рис. 4. КСЯ горчицы белой при воздействии меди. Измерения 24 апреля 2018 г.: 1 — контрольное растение; 2 — загрязнение корневой системы 6 ПДК; 3 и 4 — воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности 3и 6 ПДК

Рис. 5. КСЯ горчицы белой при воздействии цинка. Измерения 24 апреля 2018 г.: 1 — контрольное растение; 2 — загрязнение корневой системы 9 ПДК; 3 и 4 — воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности 3 и 6 ПДК

Рис. 6. КСЯ гречихи съедобной при воздействии меди. Измерения 8 декабря 2017 г. (3 ПДК): 1 — контрольное растение; 2 и 3 — воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности

Через 10 дней наблюдается восстановление спектра отражения до контрольного состояния. Воздействие Zn на спектры отражения гречихи также менее выражено, чем у горчицы (Григорьева, 2018). Во втором эксперименте опрыскиванию подвергалось растение в более позднюю фазу вегетации. На следующий день после опрыскивания появились незначительные положительные аномалии меди при опрыскивании растворами в концентрациях 6 и 9 ПДК, а для никеля и цинка аномалии отсутствовали. В случае полива появилась слабая положительная аномалия для меди и никеля при использовании растворов в концентрациях 9 и 12 ПДК и значительная положительная аномалия для цинка при 6 и 12 ПДК. Через пять дней аномалии исчезли.

Для подсолнечника однозначные выводы сделать затруднительно, поскольку можно наблюдать только незначительные положительные аномалии для цинка и меди при первом опрыскивании и отсутствие каких-либо закономерностей изменения спектральных характеристик при последующих опрыскиваниях.

Анализ результатов

Как показали результаты исследований, реакция на воздействие тяжёлых металлов для разных видов растений значительно различается, также как и реакция на разные виды тяжёлого металла для одного растения.

Так, подсолнечник обладает хорошей металлоустойчивостью к фолиарному воздействию (из воздуха) за счёт твёрдой кутикулы листа. В соответствии с этим на разовое, тем более воздушно-капельное, воздействие могут реагировать только чувствительные виды растений. Наиболее чувствительными оказались горчица и в несколько меньшей степени — гречиха.

Следует также учитывать, что среди тяжёлых металлов имеются элементы, необходимые для жизнедеятельности растения. К ним относятся и микроэлементы, растворами солей которых проводилось опрыскивание и полив: Cu, Ni и Zn. Они участвуют практически во всех процессах, происходящих в растительной клетке: энергетическом обмене, первичном и вторичном метаболизме, гормональной регуляции, передачи сигнала и др. (Титов и др., 2014). Однако их избыток, как и недостаток, может приводить к стрессу растений. Например, нормальным уровнем содержания Cu в растениях считается 1,1–41 мг/кг сухого вещества, при этом уровне недостатка меди в растениях можно считать 1–5 мг/кг, приводящем к задержке развития. Для Zn нормой является 15–100 мг/кг, недостатком — 5–13 мг/кг, а для Ni — 0,05–5 мг/кг.

В связи с этим в проведённых экспериментах в начале фазы развития растений одноразовое воздействие растворами тяжёлых металлов оказывало стимулирующее воздействие, выраженное в виде положительной аномалии в области ближнего ИК-диапазона, но после повторного воздействия и накопления металла, превышающего нормальный уровень, металл начал оказывать токсическое воздействие и наблюдалась отрицательная аномалия.

Это подтверждается результатами измерений спектральных характеристик контрольных растений (горчицы) в первом эксперименте, где из-за нехватки меди с течением времени наблюдается возрастание КСЯ листьев как в ближней инфракрасной, так и, в меньшей степени, зелёной областях (см. *рис. 2*). В результате рост контрольных растений замедлился. Этот вывод подтверждается по результатам расчётов вегетационных индексов, которые для контрольных растений оказались ниже, чем для опрысканных раствором меди в первый день (*табл. 1*). Приведённые в таблице вегетационные индексы показывают общую «зелённость» и содержание хлорофилла в листьях (NDVI, MTCI, DATT), а также стрессовое состояние и деградацию растений (DD):

$$\text{NDVI} = \frac{R_{850} - R_{660}}{R_{850} + R_{660}};$$

$$\text{MTCI} = \frac{R_{760} - R_{720}}{R_{720} + R_{650}} \text{ (Dash, Curran, 2004);}$$

$$DATI = \frac{R_{760} - R_{720}}{R_{760} + R_{650}} \text{ (Datt, 1999);}$$

$$DD = \frac{R'_{725}}{R'_{702}}.$$

Последний индекс DD позволяет обнаружить максимальный наклон спектра яркости путём его дифференцирования R' в интервале длин волн 700–740 нм (Григорьева и др., 2015). На *рис. 7а* приведён увеличенный фрагмент спектральных сигнатур, представленных на *рис. 2*, в этом диапазоне, подтверждающий информативность индекса DD.

Аналогичное стимулирующее воздействие на растение низких концентраций меди наблюдается и во втором эксперименте.

Таблица 1. Средние значения вегетационных индексов экспериментальных и контрольных растений в первом эксперименте (по итогам первого и второго опрыскивания)

Индекс	Контроль (среднее)	Раствор Cu (3 ПДК) 1-е опрыскивание	Раствор Cu (3 ПДК) 2-е опрыскивание
<i>NDVI</i>	0,82	0,85	0,80
<i>MTCI</i>	0,36	0,51	0,31
<i>DATI</i>	0,27	0,34	0,23
<i>DD</i>	0,66	0,90	0,59

Однако с ростом растения потребность в микроэлементах становится менее значимой, поскольку необходимые для жизнедеятельности металлы уже присутствуют в достаточном количестве, а их превышение может привести только к угнетению, что наблюдалось в первом эксперименте при повторном опрыскивании растений и во втором эксперименте, когда горчица перешла уже в другую стадию развития. При этом значения КСЯ контрольных растений с 24 по 27 апреля начали падать в зелёной и ближней инфракрасной области с одновременным увеличением вегетационных индексов, что свидетельствует о нормальном росте и достаточном питании контрольных растений горчицы во втором эксперименте по сравнению с первым.

Рис. 7. Увеличенные фрагменты спектральных сигнатур, представленных на *рис. 2*, в диапазонах 700–740 нм (а) и 660–780 нм (б)

По этой же причине не фиксируется отрицательная аномалия для опрысканной раствором меди горчицы 27 апреля по сравнению с контрольным растением при условии, что для поражённых растений спектральная сигнатура за три дня после опрыскивания практически не изменилась. Результаты расчёта вегетационных индексов после второго опрыскивания (см. табл. 1) в первом и втором эксперименте также подтверждают сделанные выводы (табл. 2). Видно, что значения вегетационных индексов опрысканных листьев горчицы ниже контрольных. Это связано с тем, что повышенное содержание меди выше 70 мг/кг вызывает дефицит железа и марганца, что, в свою очередь, ведёт к нарушению фотосинтеза растений, в частности снижению содержания хлорофиллов *a* и *b*. Именно эти изменения могут определяться по значениям рассчитанных вегетационных индексов, оценивающих изменение полос поглощения и отражения хлорофилла на спектральных сигнатурах растительности (рис. 7б). В свою очередь, для опрысканных раствором Cu горшков в концентрации 3 ПДК индексы соизмеримы с контрольными горшками, что говорит об отсутствии воздействия незначительных концентраций этого металла на растения в данную фазу вегетации.

Таблица 2. Средние значения вегетационных индексов экспериментальных и контрольных растений во втором эксперименте (по итогам 1-го и 2-го опрыскивания)

Индекс	Контроль	Раствор Cu (6 ПДК)	Раствор Cu (3 ПДК)
<i>NDVI</i>	0,82	0,79	0,82
<i>MTCI</i>	0,28	0,24	0,27
<i>DATT</i>	0,21	0,19	0,21
<i>DD</i>	0,53	0,44	0,51

Выявленные закономерности хорошо обосновываются и описываются известной зависимостью «доза — эффект», которую можно выразить в виде логистической функции Ричардса (КСЯ — концентрация раствора для опрыскивания или содержание металла в листьях (Виноградов, 1983). Следует отметить, что функция будет разной для каждой фазы развития (от начала роста до увядания), вида растения и металла.

В нашем случае в качестве эффекта могут рассматриваться спектральные характеристики растительности, в частности вегетационные индексы, а в качестве дозы — концентрация раствора для опрыскивания или содержание металла в листьях. По результатам первого и второго экспериментов с горчицей функции Ричардса описываются следующей зависимостью:

$$I(C) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{1 + \exp(a_1 + a_2 C + a_3 C^2)} + I_{\min},$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ — возможные минимальные и максимальные значения индекса; C — концентрация раствора для опрыскивания или содержание металла в листьях; a — параметры функции, которые могут быть получены одним из методов оптимизации при наличии как минимум трёх измерений I и C .

Например, с использованием метода оптимизации Левенберга — Марквардта были найдены следующие параметры функции Ричардса, выражающей зависимость вегетационного индекса *DD* от концентрации раствора меди для ранней стадии вегетации горчицы (образование укороченных побегов и розеток): $a_1 = -0,46$; $a_2 = 1,5$; $a_3 = 0,26$. Для поздней стадии вегетации (бутонизация) параметры функции принимают значения: $a_1 = -0,46$; $a_2 = -0,08$; $a_3 = 0,01$. При этом минимальные и максимальные значения индекса были приняты как 0,95 и 0,2 соответственно.

В основу функции положена концепция устойчивости экосистемы, в соответствии с которой при увеличении дозы токсического воздействия металла на растения его состояние проходит стадии от стимуляции роста (за исключением случаев воздействия чужеродных элементов, не участвующих в метаболизме растений) до стадии морфологических изменений.

В зависимости от фазы вегетации растения и изначального содержания в нём металла этап стимуляции может отсутствовать, что наблюдается во втором эксперименте, когда измерения спектральных характеристик горчицы проводилось в более позднюю фазу развития. При прекращении воздействия наблюдается восстановление растений до нормального состояния, однако только в том случае, если растение не перешло в стадию критических изменений, после которого самовосстановление невозможно.

Заключение

На большом фактическом материале с современным спектрорадиометром и по усовершенствованной методике подтверждён известный факт возникновения в короткие сроки (1–2 дня) спектральной аномалии в ближнем инфракрасном диапазоне у некоторых растений при загрязнении субстрата тяжёлыми металлами. Аналогичные аномалии формируются при воздушно-капельном загрязнении листовой поверхности, но в более ранние сроки.

Результаты подтвердили существование положительных и отрицательных аномалий (Кронберг, 1980), а также явление инверсии спектральной аномалии (Григорьева и др., 2018; Груздев и др., 2018) при разовом воздействии тяжёлых металлов. Наиболее вероятно, что спектральная аномалия и её инверсия возникают для разных видов растений на разных стадиях вегетации и сохраняются различное время. С высокой степенью достоверности можно предположить, что положительная аномалия формируется при стимулирующем воздействии металла на физиологические параметры растений, отрицательная — при угнетающем воздействии. Существенную роль при этом играет также видовая дифференциация в поглощении металлов и степень устойчивости вида к стрессам. Видовая специфика коэффициентов спектрального отражения была показана ранее для некоторых наиболее распространённых видов деревьев и кустарников зелёных насаждений Санкт-Петербурга (Уфимцева, Терехина, 2005).

На новом фактическом материале подтверждён вывод о возможности регистрации и мониторинга спектральных аномалий при кратковременном антропогенном воздействии аэрокосмическими видеоспектральными системами высокого спектрального и пространственного разрешения.

Работа проведена при поддержке РФФИ (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 тяжёлыми металлами // Региональная экология. 2016. № 1(43). С. 81–89.
3. Бузников А. А., Тимофеев А. А. Региональный экологический мониторинг: метод и аппаратно-программный комплекс для дистанционной оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжёлыми металлами // Региональная экология. 2010. № 3(29). С. 7–8.
4. Виноградов Б. В. Экологическая интерпретация аэрокосмических измерений геофизических эффектов антропогенных воздействий: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. М., 1983. 411 с.
5. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. 2006.
6. Григорьева О. В., Кузнецов А. Ю., Чапурский Л. И. Метод создания карт состояния сельскохозяйственных культур и выбора информативных спектральных каналов для их мониторинга // Материалы Всерос. научной конф. (с международным участием) «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 128–133.
7. Григорьева О. В., Дроздова И. В., Шилин Б. В. Обнаружение ранних стадий стресса растительности видеоспектральными и спектральными методами // Материалы 5-й Всерос. научной конф. «Проблемы военнопприкладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2018. С. 625–629.

8. 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. № 1. С. 8–17.
9. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований: пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
10. Сидько А. Ф., Пугачева И. Ю., Шевырнов А. П. Исследование динамики спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур в период вегетации на территории Красноярского края // Журн. сиб. федер. ун-та. 2009. Т. 2. № 1. С. 100–111. (Сер.: «Техника и технологии»)
11. Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжёлые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2014. 194 с.
12. Уфимцева М. Д., Терехина Н. В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. СПб.: Наука, 2005. 339 с.
13. Чанурский Л. И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. М.: Изд-во МО СССР, 1986. 160 с.
14. Dash J., Curran P. J. MTCI: The MERIS Terrestrial Chlorophyll Index // ENVISAT Symp. Proc. Austria, Salzburg, 2004.
15. Datt B. Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves // Intern. J. Remote Sensing. 1999. V. 20. P. 2741–2759.
16. Imaging spectrometry / eds. Van der Meer F. D., de Long S. M. Springer, 2006. 403 p.

Experimental substantiation of the capabilities of videospectral remote indication of short-term vegetation stress

O. V. Grigorieva¹, I. V. Drozdova², B. V. Shilin³

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

² *Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg 197376, Russia
E-mail: alyssum7@gmail.ru*

³ *Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS, Saint Petersburg 197198, Russia
E-mail: bshilin@rambler.ru*

In the paper, we show the results of a stationary laboratory research on the changes in the spectral reflectance of plants under a short-term exposure of their root system and leaf surface to heavy metals (copper, zinc, nickel). It was confirmed that some spectral anomalies appear in the near-infrared range of 700–900 nm. The anomaly is formed in a short period of 1–2 days, when a leaf surface is contaminated and a little later — when a substrate is watered. The paper considers the phenomenon of spectral anomaly inversion for all metals. It gives positive and negative spectral anomalies of contaminated plants in comparison to control plants. We analyzed the mechanism of changes in spectral characteristics of plants under the influence of heavy metals in terms of their physiological state, vegetation phase and species. It is shown that the detected changes can be represented as a dose-effect curve expressed through Richards' function. In accordance with the spectral characteristics of plants, we calculated some special indices of chlorophyll content, confirming our conclusions about metal solution influence on leaf pigments. The amplitude of the spectral anomalies and the duration of their existence indicate the possibility of their detection and mapping by aerospace videospectral systems of high spatial and spectral resolution before the appearance of visible morphological changes in plants.

Keywords: reflectance, spectral anomaly, videospectral survey, heavy metals

Accepted: 27.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-78-88

References

1. Alekseev A. A., Shilin B. V., Shilin I. B., Opyt polevykh videospektral'nykh issledovaniy (Operational Experience of The Imaging Spectrometer Using in Fieldwork), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 89–94.
2. Bakina L. G., Gruzdev V. N., Drozdova I. V., Shilin B. V., Distsionnoe obnaruzhenie stressa rastitel'nosti na rannikh stadiyakh vozdviizhiya tyazhelymi metallami (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.
3. Buznikov A. A., Timofeev A. A., Regional'nyi ekologicheskii monitoring: metod i apparatno-programmnyi kompleks dlya distantsionnoi otsenki zagryazneniya indikatornykh vidov rastitel'nosti tyazhelymi metallami (Regional Ecological Monitoring: Method and Hardware/Software Complex for Distant Estimation of Pollution to Which Heavy Metals Expose Indicator Species of Vegetation), *Regional'naya ekologiya*, 2010, No. 3(29), pp. 7–8.
4. Vinogradov B. V., *Ekologicheskaya interpretatsiya aerokosmicheskikh izmerenii geofizicheskikh effektov antropogennykh vozdviizhiy. Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* (Ecological Interpretation of Aerospace Measurements of Geophysical Effects of Anthropogenic Impacts. Problems of Ecological Monitoring and Modeling of Ecosystems), Moscow, 1983, 411 p.
5. GN 2.1.7.2041-06 (Health standard), Moscow: Federal'nyi tsentr gigeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2006.
6. Grigorieva O. V., Kuznetsov A. Yu., Chapurskii L. I., Metod sozdaniya kart sostoyaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur i vybora informativnykh spektral'nykh kanalov dlya ikh monitoringa (Method of Creating Maps of Agricultural Crops and The Choice of Informative Spectral Channels for Their Monitoring), *Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v sel'skom khozyaistve* (Application of Remote Sensing of The Earth in Agriculture), Proc. All-Russia Science Conf., Saint Petersburg: FGBNU AFI, 2015, pp. 128–133.
7. Grigorieva O. V., Drozdova I. V., Shilin B. V., Obnaruzhenie rannikh stadii stressa rastitel'nosti videospektral'nymi i spektral'nymi metodami (Detection of Early Stages of Vegetation Stress Using Hyperspectrometer and Spectroradiometer), *Problemy voennoprikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy* (Problems of Military Applied Geophysics and Control of The Environment), Proc. 5nd All-Russia Science Conf., Saint Petersburg: Mozhaisky MAA, 2018, pp. 625–629.
8. Gruzdev V. N., Drozdova I. V., Kuznetsov A. Yu., Shilin B. V., Reshenie zadach ekologicheskoi bezopasnosti videospektral'nykh metodom (Solving the Problems of Environmental Safety by Videospectral Method), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 9–17.
9. Kronberg P., *Distsionnoe izuchenie Zemli: Osnovy i metody distantsionnykh issledovaniy* (Remote Study of the Earth: the Basics and Methods of Remote Sensing), Moscow: Mir, 1988, 343 p.
10. Sidko A. F., Pugacheva I. Yu., Shevyrnogov A. P., Issledovanie dinamiki spektral'noi yarkosti posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v period vegetatsii na territorii Krasnoyarskogo kraia (Investigation of the Spectral Brightness Dynamics of Agricultural Crops during Vegetation Period at the Krasnoyarsk Territory), *Zhurnal sibirskogo federal'nogo universiteta*. 2009, Vol. 2, No. 1, pp. 100–111, Seriya: "Tekhnika i tekhnologii".
11. Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V., *Tyazhelye metally i rasteniya* (Heavy metals and plants), Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2014, 194 p.
12. Ufimtseva M. D., Terekhina N. V., *Fitoindikatsiya ekologicheskogo sostoyaniya urbogeosistem Sankt-Peterburga* (Phytoindication of Ecological State of Urban Geosystems in Saint Petersburg), Saint Petersburg: Nauka, 2005, 339 p.
13. Chapurskii L. I., *Otrazhatel'nye svoystva prirodnkh ob'ektov v diapazone 400–2500 nm* (Reflective Properties of Natural Objects in the Range of 400–2500 nm), Moscow: Izd. MO SSSR, 1986, 160 p.
14. Dash J., Curran P. J., MTCI: The MERIS Terrestrial Chlorophyll Index, *ENVISAT Symp. Proc.*, Austra, Salzburg, 2004.
15. Datt B., Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves, *Intern. J. Remote Sensing*, 1999, Vol. 20, pp. 2741–2759.
16. *Imaging spectrometry*, Van der Meer F. D., de Long S. M. (eds.), Springer, 2006, 403 p.