

Решение задач экологической безопасности видеоспектральным методом

В. Н. Груздев¹, И. В. Дроздова², А. Ю. Кузнецов³, Б. В. Шилин¹

¹ *Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: bshilin@rambler.ru*

² *Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: idrozдова@binran.ru*

³ *Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики
Санкт-Петербург, 197101, Россия
E-mail: al.ur.kouznetsov@gmail.com*

Полевая видеоспектральная съёмка видимого-ближнего ИК-диапазона 0,4–0,9 мкм позволяет уверенно регистрировать с помощью видеоспектрометра, установленного на вращающейся платформе, «спектральные аномалии» растений, подвергшихся разовому неблагоприятному воздействию загрязнения тяжёлыми металлами (медь, свинец, никель, кадмий). Аномалии для различных видов растений и различных уровней загрязнения фиксируются в основном в ближнем ИК-диапазоне 0,7–0,9 мкм на ранних стадиях воздействия (от нескольких дней) задолго до возникновения у растений видимых морфологических изменений. Полевая видеоспектральная съёмка является быстрым эффективным методом исследования закономерностей формирования этих аномалий, их обнаружения и картографирования благодаря возможности получения в реальном масштабе времени спектральной информации (серий монохромных изображений и спектров уходящего излучения) больших площадей с фоновыми и тестовыми объектами. Значения «спектральных аномалий» и длительность их существования позволяют сделать вывод о возможности их регистрации и мониторинга аэрокосмическими видеоспектральными системами высокого спектрального и пространственного разрешения.

Ключевые слова: видеоспектральная съёмка, спектральные характеристики, стресс растительности

Одобрена к печати: 29.08.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-9-17

Введение

До настоящего времени фундаментальные исследования изменений спектральных характеристик выполнялись лабораторными, полевыми, авиационными и космическими спектро-радиометрами, позволяющими проводить измерения в пределах узкого поля зрения прибора (лабораторные и полевые — это фактически одиночные измерения) или вдоль профиля полёта носителя. В авиационном варианте можно судить о спектральных характеристиках достаточно протяжённых однородных поверхностей (моря, пустыни, сельскохозяйственные поля и т.п.), т.е. невозможно использовать подобные приборы для обнаружения и картографирования объектов по особенностям их спектральных характеристик. Для этого необходимы приборы, имеющие спектральное разрешение до 1 нм, мгновенный угол поля зрения 0,2–1,0 мрад и угол обзора не менее 0,5 рад (Алексеев и др., 2012). Таким образом, формируемая при видеоспектральной съёмке спектральная информация по площади — серия из сотен монохромных изображений и спектров отражённого излучения — в сотни и тысячи раз более «представительна» и достоверна по сравнению с данными спектро-радиометров и, что наиболее важно, позволяет объективно и в реальном масштабе времени сравнивать спектральные характеристики объектов конкретной фоноцелевой обстановки.

Как известно, спектральные характеристики растений зависят от большого количества факторов: фазы вегетации, особенностей микроклимата (погоды), различных стрессовых воздействий (засолённость, болезни, паразитарные насекомые, дефицит или избыток влаги, общее ухудшение условий жизнедеятельности, в том числе под влиянием загрязнений тяжёлыми металлами, и т. д.) (Сидько и др., 2009; Чапурский, 1986; *Imaging spectrometry...*, 2006). Стресс под влиянием тяжёлых металлов изучен достаточно хорошо (Кронберг, 1988; *Imaging spectrometry...*, 2006). В основном он выражается в изменении отражательной способности в видимом и ближнем ИК-диапазоне 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).

Цель настоящих исследований — обнаружение кратковременного разового воздействия тяжёлых металлов по изменению спектральных характеристик растений до появления у них видимых морфологических изменений и разработка рекомендаций по их обнаружению и картографированию видеоспектральным методом.

Постановка исследований

Постановка экспериментальных исследований включала дозированное загрязнение растительных объектов — трав и кустарников — хлористым натрием и солями тяжёлых металлов по возможности с начала вегетационного сезона с последующими периодическими видеоспектральными наблюдениями соответствующих фоноцелевых ситуаций на тестовых участках с целью выявления «спектральных аномалий», времени их появления и возможного исчезновения. Одновременно с этим отбирали пробы листьев древесных и надземных частей травянистых растений для определения содержания тяжёлых металлов. Исследования проводились в течение нескольких лет на тестовых площадках Ботанического института имени В. Л. Комарова РАН и в одном из садовых парков Санкт-Петербурга.

В качестве объектов исследований 2013–2015 гг. (Бакина и др., 2016; Шилин, Груздев, 2016) были выбраны газон (злаки с примесью разнотравья), живая изгородь из барбариса Тунберга (*Berberis thunbergii* DC.), шпалеры кизильника блестящего (*Coloneaster lucidus* Schltdl.). На газоне были размечены флажками площадки размером 1×1 м — 16 площадок для дублирующих наблюдений (рис. 1), живая изгородь из барбариса и кизильника разбивалась на участки длиной 1 м.

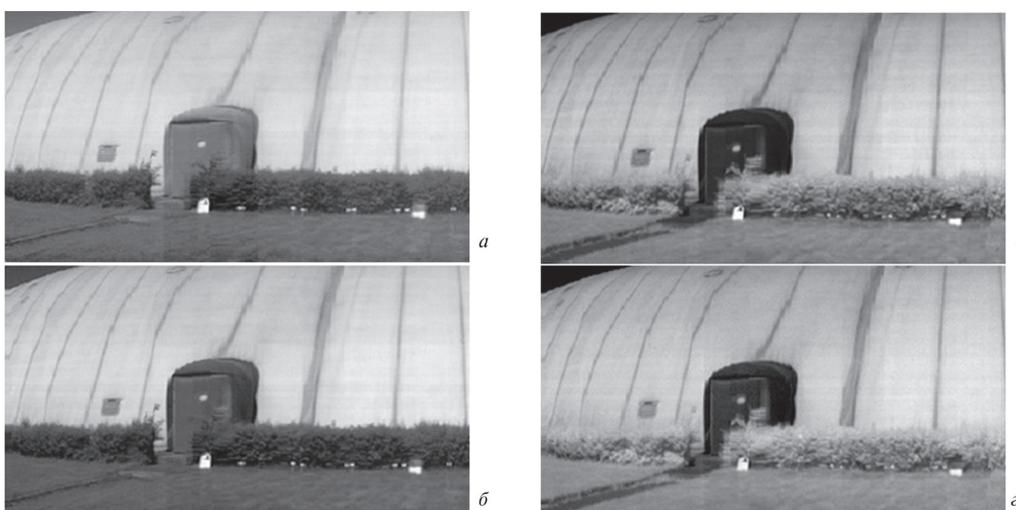


Рис. 1. Четыре монохромных изображения тестовой площадки с травянистой растительностью и кустами барбариса Тунберга для длин волн (нм): а — 530; б — 586; в — 734 и г — 737

В пределах образованных таким образом фоноцелевых панорам устанавливались яркостные эталоны (см. *рис. 1*) для расчётов коэффициентов спектральной яркости — КСЯ (Чапурский, 1986).

В качестве стрессоров были использованы растворы хлорида Na, сульфатов Cu и Cd, хлорида Ni или сульфата Ni, нитрата Pb. Стрессоры были внесены в количествах, обеспечивающих техногенную нагрузку, соответствующую одному, двум и трём значениям предельно допустимых концентраций (ПДК) по ГН 2.1.7.2041-06 (ГН 2.1.7.2041-06..., 2006). Выявлено изменение спектральных характеристик (спектров отражения, КСЯ) всех изученных видов растений, подвергшихся воздействию солей Na и тяжёлых металлов по сравнению с контрольными (фоновыми) растениями.

Исследования 2016 года

С мая по сентябрь 2016 г. исследовались реакции на загрязнение Cu и Pb на посадках барбариса Тунберга, а также Cd и Ni на посадках кизильника блестящего и Cd — у сирени венгерской (*Syringa josikaea* Jacq. fil.) и хосты ланцетолистной (*Hosta lancifolia* Tumb.). Были осуществлены посадки гречихи съедобной сорта «баллада» (*Fagopyrum esculenium* Motnch.) — два ряда участков размером по 1 м². В зону расположения её корневой системы вносили растворы сульфата Ni и сульфата Cd, обеспечивающие нагрузку тяжёлыми металлами на уровне 1, 2 и 3 ПДК соответственно. На этих объектах с мая по сентябрь была проведена видеоспектральная съёмка около четырёх десятков панорам и вычислено более сотни кривых спектральной яркости.

Пример фрагмента 16-площадочной панорамы представлен на *рис. 1*. Из примерно двухсот возможных для видеоспектрометра монохромных изображений приведены четыре изображения центральной части панорамы — два до и два после «красного края» 700–710 нм спектральной кривой (Imaging spectrometry..., 2006). Видны стриженный газон (нижняя часть изображений), яркостные миры, шпалера кустов барбариса, светлая стена корта с железной дверью и идущая от неё гравийная дорожка. Сравнение двух пар изображений хорошо иллюстрирует известную инверсию спектральных контрастов «растительность — почвы или горные породы (гравийная дорожка)»: до «красного края» почвы светлее или близки по яркости к растительности, за «красным краем», напротив, светлее выглядит растительность благодаря её высокой отражательной способности в ближнем ИК-диапазоне 700–850 нм (Кронберг, 1988). На монохромных изображениях каналов 530 и 587 нм светлым выглядит бетонная площадка — порог у двери; яркость гравийной дорожки близка к яркости травы и выше, чем у кустов барбариса. На изображениях каналов 734 и 752 нм дорожка выглядит тёмной, светлыми или очень светлыми стали газон и кусты барбариса. Для 2016 г. из очень большого массива данных выбраны наиболее представительные (*рис. 2–7*, см. с. 12 — с. 13).

Барбарис Тунберга. Поливы растворами солей Cu и Ni проведены 17 мая, 21 июня и 14 июля, измерения — 1, 9 и 29 июня, отбор листьев для анализа на содержание металлов — 29 июня. Для участков с максимальными значениями 5 ПДК 1 июня отмечена чёткая положительная спектральная аномалия в ближней ИК-зоне 750–900 нм. 9 июня аномалия практически исчезает, только намечается тенденция к инверсии. 29 июня формируется отрицательная аномалия (см. *рис. 2*) при содержании меди (миллиграмм на килограмм сухой массы): на контрольной площадке — 6,01 и загрязнённой площадке — 43,8. Небольшие отрицательные аномалии наблюдаются для свинца, уровень которого в листьях барбариса составил: на контрольной площадке — 0,63, на загрязнённой — 12,1 мг/кг. Известно, что Pb по сравнению с Cu более прочно связан с почвенным поглощающим комплексом и мало доступен для растений.

Газон. Из-за частой стрижки и многочисленных дождей измерения удалось выполнить один раз 10 августа при поливе 14 июля. Для всех площадок с загрязнениями 1 ПДК и 2 ПДК выявлена чёткая отрицательная аномалия в ближней ИК-зоне.

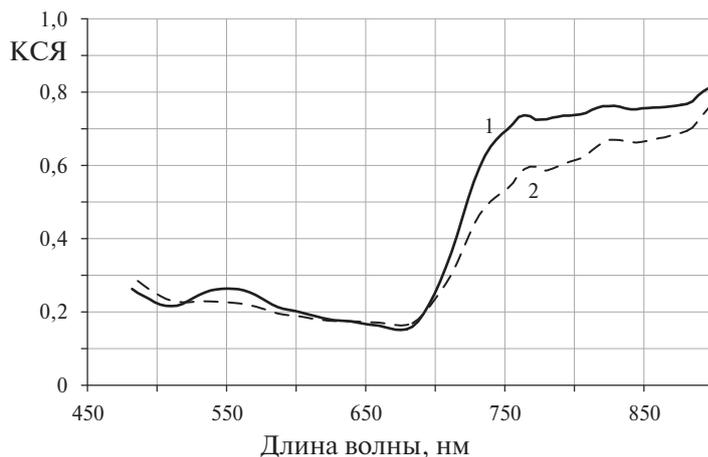


Рис. 2. КСЯ барбариса Тунберга. Измерения 29 июня 2016 г.:
1 — контрольная площадка; 2 — площадка, загрязнённая сульфатом меди

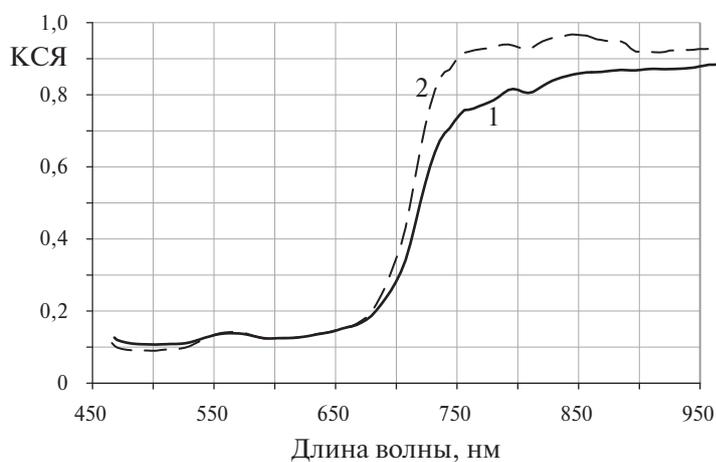


Рис. 3. КСЯ сирени венгерской. Измерения 19 сентября 2016 г.:
1 — контрольная площадка; 2 — площадка, загрязнённая сульфатом кадмия

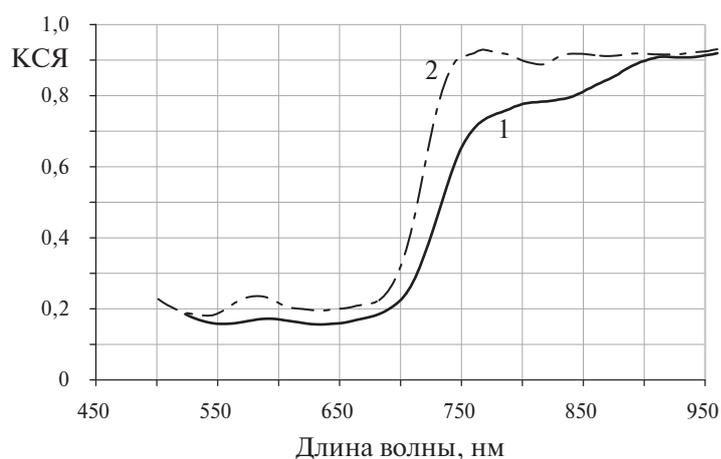


Рис. 4. КСЯ хосты ланцетолистой. Измерения 26 июля 2016 г.:
1 — контрольная площадка; 2 — площадка, загрязнённая сульфатом кадмия

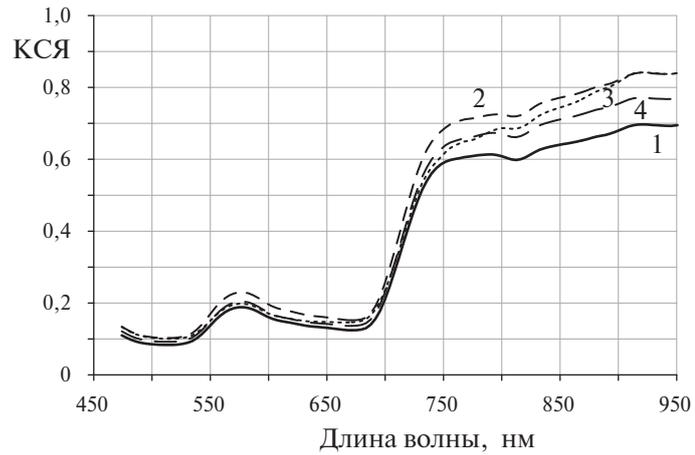


Рис. 5. КСЯ гречихи. Измерения 9 июля 2016 г.: 1 — контрольная площадка; 2–4 — площадки, загрязнённые сульфатом кадмия

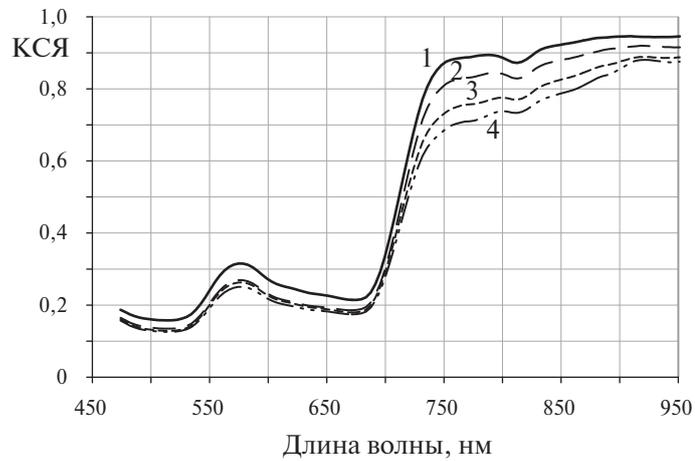


Рис. 6. КСЯ гречихи. Измерения 19 июля 2016 г.: 1 — контрольная площадка; 2–4 — площадки, загрязнённые сульфатом кадмия

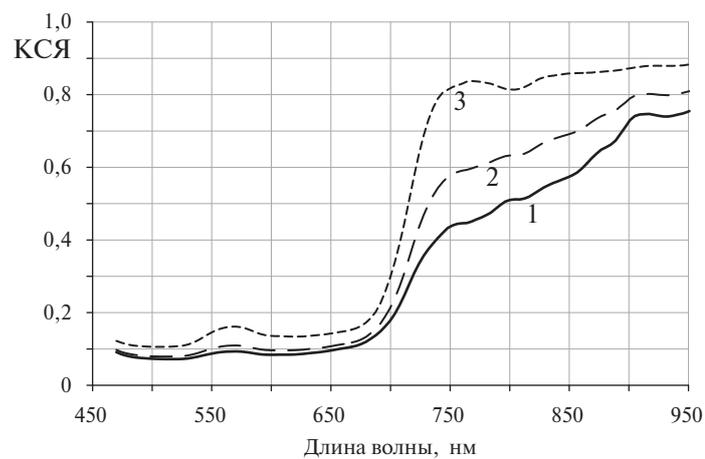


Рис. 7. КСЯ кизильника. Измерения 31 августа 2016 г.: 1 — контрольная площадка; 2, 3 — площадки, загрязнённые сульфатом кадмия

Для **сирени венгерской** полив проведён 17 августа, отбор проб листьев для анализа химических элементов — 25 августа и 7 сентября, измерения — 29 августа, 13 и 19 сентября. Содержание кадмия, при фоновом значении 0,07 мг/кг 25 августа, составило на загрязнённых участках 0,65 мг/кг 25 августа и 0,23 мг/кг 7 сентября. Через неделю после полива, когда содержание металла почти в десять раз превысило фоновое, возникла чёткая спектральная аномалия — понижение КСЯ в ближней ИК-зоне. Примерно через четыре недели (см. *рис. 3*), когда содержание металла только в три раза выше фонового, аномалия начинается с расхождения «красного края» и становится чётко видна в ближней ИК-зоне (750–900 нм), но происходит её инверсия — аномалия положительная и сохраняется ещё неделю.

Во второй половине вегетационного сезона 2016 г. был проведён эксперимент для **хосты ланцетолистной** в условиях оранжереи Ботанического института. Листья хосты имеют большое проективное покрытие и очень удобны для измерений. Растение выращивалось в горшках объёмом примерно 10 л при постоянных температурных условиях и освещённости. Посадка растений хосты выполнена 21 июня, полив экспериментальных растений раствором сернокислого кадмия в концентрации 50 мкм — 15 июля.

Всего на хосте было проведено восемь измерений — как контрольных (без внесения кадмия), так и экспериментальных.

Через несколько дней после полива, 19 июля, формируется чёткая положительная спектральная аномалия в ближнем ИК-диапазоне и слабая — в зелёной зоне. Через десять дней после полива, 26 июля, характер аномалии практически не меняется (см. *рис. 4*). Содержание металла в листьях контрольных растений в этот день составило 0,38 мг/кг и 1,48 мг/кг — в листьях экспериментальных растений хосты.

2 августа аномалия в ближнем ИК-диапазоне не изменилась, но исчезла аномалия в зелёной зоне.

24 августа значения КСЯ фона и экспериментальных растений формируют чёткую аномалию, подобную предыдущим в ближнем ИК-диапазоне.

При всех вышеописанных экспериментах никаких видимых морфологических изменений листьев хосты ланцетолистной не наблюдалось.

Интересные результаты получены для растений **гречихи съедобной**. Посев семян гречихи был проведён 10 июня. Было выполнено четыре цикла измерений: первое — 29 июня, на стадии бутонизации, далее — 1, 9 и 19 июля до стадии бурения семян. Первые два цикла измерений для кадмия не выявили заметных различий спектральных характеристик контрольных и загрязнённых участков. Далее, 9 июля, для всех значений ПДК кадмия для обеих повторностей опыта отмечается отчётливая положительная аномалия в ближней ИК-зоне (см. *рис. 5*). Для 19 июля выявлена такая же чёткая, но отрицательная аномалия для обоих рядов (см. *рис. 6*). Для различных значений ПДК кадмия кривые близки, хотя различия содержания в листьях существенны (в мг/кг): контроль — 0,12 и 0,27; 1 ПДК Cd — 9,60 и 8,24; 2 ПДК Cd — 11,4 и 20,4; 3 ПДК Cd — 20,5 и 22,3.

Для никеля, как и в предыдущем случае, аномалии 29 июня и 1 июля невелики. Для 9 июля отмечается чёткая положительная аномалия для всех уровней загрязнения, а 19 июля произошла инверсия контрастов. Сравнивая имеющиеся результаты анализа содержания никеля в листьях гречихи 1 и 12 июля для обоих рядов (в мг/кг: контроль — 0,96–0,85 и 1,04–1,20; 1 ПДК Ni — 8,99–13,0 и 9,73–7,53; 2 ПДК Ni — 22,1–17,1 и 17,6–11,1; 3 ПДК Ni — 29,7–18,1 и 17,1–9,37), можно отметить общее понижение содержания металла и возможное его влияние на возникновение инверсии.

Наблюдаемый неоднократно факт инверсии спектральных контрастов заслуживает пристального внимания и дополнительных исследований, так как, несомненно, связан с влиянием тяжёлых металлов на многочисленные структурно-функциональные изменения в фотосинтетическом аппарате растений. Вероятно, что невысокие концентрации тяжёлых металлов вначале оказывают стимулирующее действие на развитие растений, что находит выражение в появлении положительной аномалии. Однако затем постепенно накапливающиеся структурно-функциональные нарушения растительного организма, вызванные влиянием

тяжёлых металлов, начинают существенно сказываться на отражательной способности, что и приводит к возникновению инверсии: аномалия сменяется на отрицательную.

Кусты **кизильника** оказались достаточно сложным объектом для проведения измерений из-за наличия на них неравномерной тени от соседних деревьев. Тем не менее кондиционные результаты были получены 17, 24 и 31 августа. Их анализ, а также данные по содержанию металлов 2 августа (в мг/кг: Ni контроль — 0,36; 2 ПДК Ni — 4,14; Cd контроль — 0,12; 2 ПДК Cd — 2,45) показывают, что в верхние листья высоких кустов металлы поступают медленно и аномалия возникает только в конце августа после двух поливов загрязнителем 15 июня и 12 июля (см. *рис. 7*).

По материалам проведённых многократных видеоспектральных съёмок большого количества объектов прослеживается реакция растительности на воздействие солями тяжёлых металлов, проявленная в изменении спектров отражения и кривых спектральной яркости. С одной стороны, это может быть связано с различными фазами вегетации, что подтверждается изменениями во времени и по спектру значений КСЯ фоновых и загрязнённых площадок. С другой — с изменениями внешних условий, в первую очередь облачности и выпадением осадков. 2016 г. был наиболее дождливым за весь период четырёхлетних видеоспектральных наблюдений, обильные осадки отмечались между соседними по времени измерениями.

Заключение

В результате исследований установлено:

1. Влияние на растения солей Na и тяжёлых металлов Ni, Cu, Cd, Pb в концентрации 1–3 ПДК на ранних стадиях воздействия существенно сказывается на изменениях спектров отражения и коэффициента спектральной яркости. Это может служить ранним и важнейшим индикатором стресса растений до появления у них морфологических изменений, а также значительных загрязнений почвенного покрова. В кратчайшие сроки — через несколько дней после разового воздействия — соответствующие аномалии возникают у травянистой растительности, через неделю и более — у кустарниковой. Сохраняются аномалии до двух месяцев.
2. Наибольшее значение для индикации стресса тяжёлых металлов на ранних стадиях антропогенного воздействия имеет ближняя ИК-зона 700–900 нм.
3. Для диагностических целей следует использовать весь диапазон спектральной чувствительности 400–900 нм, а не ограничиваться, как это было принято до настоящего времени, выбором «оптимальных» спектральных интервалов.
4. Полевая видеоспектральная съёмка высокого пространственного и спектрального разрешения является быстрым эффективным методом исследования, обнаружения и картографирования подобных закономерностей благодаря возможности получения спектральной информации (серий монохромных изображений и спектров уходящего излучения) больших площадей с фоновыми и тестовыми объектами. Значения «спектральных аномалий» и длительность их существования позволяют сделать вывод о возможности их регистрации и мониторинга 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 тяжелыми 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 тяжелыми металлами // Региональная экология. 2010. № 3(29). С. 7–8.
4. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. 2006.
5. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований: пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
6. Сидько А. Ф., Пугачева И. Ю., Шевырногов А. П. Исследование динамики спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур в период вегетации на территории Красноярского края // Журн. Сибирского федерального ун-та. Серия: техника и технологии. 2009. Т. 2. № 1. С. 100–111.
7. Чапурский Л. И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. М.: Изд-во МО СССР, 1986. 160 с.
8. Шилин Б. В., Груздев В. Н. Летные и полевые исследования видеоспектрометра для малого космического аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. № 2. С. 224–232.
9. Imaging spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications / eds. van der Meer F. D., de Long S. M. Springer, 2006. 403 p.

Solving the problems of environmental safety by video spectral method

V. N. Gruzdev¹, I. V. Drozdova², A. U. Kouznetsov³, B. V. Shilin¹

¹ *Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS, St. Petersburg 197110, Russia*
E-mail: bshilin@rambler.ru

² *Komarov Botanical Institute RAS, St. Petersburg 197376, Russia*
E-mail: idrozdova@binran.ru

³ *Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, St. Petersburg 197101, Russia*
E-mail: al.ur.kouznetsov@gmail.com

The field-based video spectral survey of the visible-near infrared range 0.4–0.9 μm makes it possible to confidently record “spectral anomalies” of plants exposed to a single adverse effect of contamination with heavy metals (copper, lead, nickel, cadmium) using a video spectrometer mounted on a rotating platform. Anomalies for different plant species and different pollution levels are fixed mainly in the near-IR range of 0.7–0.9 μm in the early stages of exposure (from several days) long before the appearance of apparent morphological changes in plants. Field video spectral survey is a fast and effective method of studying the patterns of formation of these anomalies, their detection and mapping due to the possibility of obtaining in real time spectral information (series of monochrome images and outgoing radiation spectra) of large areas with background and test objects. The values of “spectral anomalies” and the duration of their existence make it possible to conclude that they can be registered and monitored by aerospace video spectral systems of high spectral and spatial resolution.

Keywords: video spectral survey, spectral characteristics, vegetation stress

Accepted: 29.08.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-9-17

References

1. Alekseev A. A., Shilin B. V., Shilin I. B., Opyt polevykh videospektral'nykh issledovaniy (Operational experience of 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., Distantionnoe obnaruzhenie stressa rastitel'nosti na rannikh stadiyakh vozdeistviya tyazhelymi metallami (Remote detection of stress of vegetation at early stages of anthropogenous influence by 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 distantionnoi otsenki zagryazneniya indikatornykh vidov rastitel'nosti tyazhelymi metallami (Regional environmental monitoring: a method and hardware and software complex for remote assessment of pollution of indicator vegetation species with heavy metals), *Regional'naya ekologiya*, 2010, No. 3 (29), pp. 7–8.
4. *GN 2.1.7.2041-06* (Russian Federation Hygienic Norm), 2006.
5. Kronberg P., *Distantionnoe izuchenie Zemli: Osnovy i metody distantionnykh issledovaniy* (Remote study of the Earth: Basics and methods of distance studies), Moscow: Mir, 1988, 343 p.
6. Sid'ko A. F., Pugacheva I. Yu., Shevyrnogov A. P., Issledovanie dinamiki spektral'noi yarkosti posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v period vegetatsii na territorii Krasnoyarskogo kraya (Investigation of the spectral brightness dynamics of agricultural crops during vegetation period at the Krasnoyarsk territory), *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2009, Vol. 2, No. 1, pp. 100–111.
7. Chapurskii L. I., *Otrazhatel'nye svoystva prirodnykh ob'ektov v diapazone 400–2500 nm* (The reflective properties of natural objects in the range of 400–2500 nm), Moscow: Izdatel'stvo MO SSSR, 1986, 160 p.
8. Shilin B. V., Gruzdev V. N., Letnye i polevye issledovaniya videospektrometra dlya malogo kosmicheskogo apparata (On-board and field research of the imaging spectrometer for a small spacecraft), *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 2, pp. 224–232.
9. *Imaging spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications*, Springer, 2006, 403 p.