

# Оценка экологического состояния окружающей среды по спектрам отражения индикаторных видов растительности

А.В. Андреева<sup>1</sup>, А.А. Бузников<sup>1</sup>, А.А. Тимофеев<sup>1</sup>, Н.В. Алексеева-Попова<sup>2</sup>, А.И. Беляева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
197376 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5  
E-mail: [andreeva@acn.aurora-tv.ru](mailto:andreeva@acn.aurora-tv.ru)

<sup>2</sup> Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН,  
197376 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.2

Проведены полевые и лабораторные измерения спектров отражения различных видов растительности. Выявлен индикаторный вид для оценки воздействия тяжелых металлов. Установлены корреляционные связи спектральных индексов с загрязнением (тяжелыми металлами). Проведена оценка экологического состояния трех районов Санкт-Петербурга.

## Введение

В настоящее время крупные города испытывают экологический кризис в связи с увеличением транспортного потока и интенсивной застройкой жилыми домами, крупными торговыми комплексами, различными производственными помещениями и бизнес центрами и т. п. Количество экологически чистых зон и парков отдыха как в городской черте, так и в прилегающих территориях становится все меньше и они приобретают все большую ценность. Поэтому возникает необходимость в экспрессных методах оценки экологического состояния различных территорий.

Наиболее распространенными и сильными поллютантами на вышеупомянутых территориях являются тяжелые металлы, поскольку загрязнения такого рода - прямое следствие человеческой деятельности, которая оказывает сильное воздействие на биосферу. Так, например, при загрязнении почвы солями тяжелых металлов (Hg, Zn, Cu, Co и др.) нередко наблюдается полное отмирание растительности. Наличие тяжелых металлов в окружающей среде приводит к накоплению их растениями и, как следствие, вызывает стресс растительности, выраженный в морфологических эффектах (задержка роста, уменьшение биомассы), и изменениях распределения видов в пределах определенных территорий. При этом наблюдаются изменения спектральных отражательных характеристик растительности. Это позволяет принять растительность в качестве индикаторов уровня загрязнения, что может служить основой для разработки дистанционных методов его обнаружения [1, 2]. Тяжелые металлы воздействуют на пигментный состав растений, что вызывает изменение оптических характеристик в видимом диапазоне спектра [3, 4, 5]. В связи с этим, основное внимание уделено изучению влияния тяжелых металлов на спектры отражения растительности в диапазоне 400-750 нм.

## Проведение эксперимента и анализ полученных данных

Измерения проводились на нескольких тестовых участках в ясную погоду. Спектрометрирование проводилось полевым фотоэлектрическим спектрометром (ПФС) [2] на расстоянии 1,3 м. Затем собирались образцы растений для проведения химического анализа (атомно-абсорбционным методом). Растения не подвергались предварительной очистке, чтобы учесть комплексное загрязнение и максимально правдоподобно оценить экологическую обстановку. В таблице 1 представлены концентрации содержания тяжелых металлов в листьях мать-и-мачехи и одуванчика в пределах исследуемых территорий (в мг/кг сухого вещества).

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в листьях мать-и-мачехи и одуванчика в пределах исследуемых территорий (в мг/кг сухого вещества)

Вид	Дата	Адрес	Обознач.	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
Мать-и-мачеха	13.09	Бот. Сад	Б	24,95	9,27	25,92	8,18	0,51	<0.01	2.84
	16.09	Юнтолово	Ю	8,09	7,54	33,53	4,7	0,63	0,30	1,74
	22.09	Ул. Турбинная	A1	139,02	2,24	19,91	5,45	0,93	0,56	4,12
	22.09	Ул. Белоусова	A2	148,35	2,88	26,19	7,4	1,11	0,56	6,52
Одуванчик	16.09	Юнтолово	Ю	28,0	29,46	31,80	5,73	<0.04	0,25	1,39
	13.09	Бот. Сад	Б	55,05	11,89	19,25	7,15	0,45	<0.01	2,05
	22.09	Ул. Белоусова	A2	180,57	17,29	63,33	10,07	1,30	0,59	12,41
	22.09	Ул. Турбинная	A1	159,82	16,84	47,46	8,10	0,77	0,41	6,34
	22.09	Ул. Севастопольская	A4	185,38	22,92	65,02	11,62	1,04	0,46	9.12
	22.09	Ул. Трефолева (завод Балтэлектро)	A3	269,62	26,78	65,99	14,43	1,34	0,47	7.88

Для спектральной оценки уровня загрязнений необходимо иметь «чистую кривую». В лабораторных условиях в этом качестве выступают контрольные (не загрязненные спектры), а в природе – «фоновый спектр». Это сложная задача, так как необходим тщательный подбор и комплексная оценка исследуемой «фоновой территории». По результатам геоботанического и геохимического анализа в качестве такой территории был выбран Юнтоловский заказник (Приморский район) (см. рис 1). В качестве исследуемых территорий были выбраны Ботанический сад (Петроградский район) (см. рис. 2) и несколько точек разной удаленности от завода Балтэлектро (Автово Кировский район) (см. рис. 3). На этих рисунках указаны границы исследованной территории и точками обозначены тестовые участки. Растения для наших экспериментов подбирались с учетом их повсеместного распространения в черте города. Таким образом, наш выбор остановился на одуванчике и мать-и-мачехе. Учитывался также и тот факт, что ранее подобных исследований с этими видами растительности не проводилось.

Уровни накопления металлов в травянистых видах растений отражают как воздушное, так и вторичное загрязнение почвенной пылью. Нужно отметить, что уровень накопления металлов в целом выше в листьях одуванчика, поскольку листья перед анализом не отмывали и учитывалось суммарное загрязнение, это объясняется как строением листа, так и расположением листьев одуванчика в приземном слое воздуха.



Следует отметить, что не разработана система ПДК для дикорастущих видов, а лишь для сельскохозяйственных культур и только для некоторых тяжелых металлов. Ее можно разработать на основании многолетнего мониторинга выбранных тестовых участков.

По результатам спектрального анализа было установлено, что отражательные свойства мать-и-мачехи более чувствительны к воздействию техногенной нагрузки, чем одуванчика. В видимом диапазоне спектра отражательная способность растительности определяется перераспределением ее пигментного состава. На основании физиолого-биохимических особенностей растений в видимом диапазоне, были выбраны и исследованы 20 спектральных индексов, учитывающих экстремумы и точки пересечения спектров поглощения основных пигментов:  $R_{435}/R_{500}$ ,  $R_{670}/R_{620}$ ,  $R_{670}/R_{500}$ ,  $R_{435}/R_{620}$ ,  $R_{435}/R_{670}$ ,  $R_{500}/R_{620}$ ,  $R_{435}/R_{585}$ ,  $R_{435}/R_{635}$ ,  $R_{500}/R_{450}$ ,  $R_{500}/R_{465}$ ,  $R_{550}/R_{485}$ ,  $R_{550}/R_{620}$ ,  $R_{435}/R_{735}$ ,  $R_{450}/R_{735}$ ,  $R_{465}/R_{735}$ ,  $R_{485}/R_{735}$ ,  $R_{435}/R_{685}$ ,  $R_{450}/R_{685}$ ,  $R_{465}/R_{685}$ ,  $R_{485}/R_{685}$  [3].

Результаты корреляционного анализа представлены в таблицах 2-3. Примеры регрессионных зависимостей для некоторых металлов представлены на рисунках 4-5.

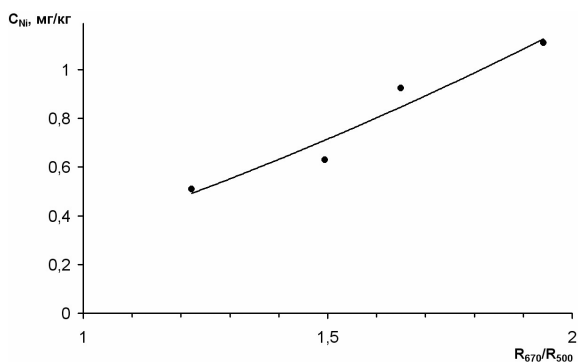


Рис. 4. Регрессионная зависимость спектрального индекса от содержания Ni в листьях мать-и-мачехи

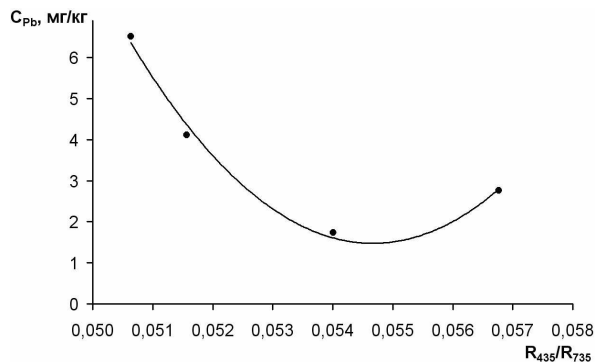


Рис. 5. Регрессионная зависимость спектрального индекса от содержания Pb в листьях мать-и-мачехи

Таблица 2. Коэффициенты корреляции мать-и-мачехи

Тяжелые Металлы	Спектральные индексы									
	$R_{435}/R_{500}$	$R_{435}/R_{585}$	$R_{435}/R_{620}$	$R_{435}/R_{635}$	$R_{435}/R_{670}$	$R_{435}/R_{735}$	$R_{450}/R_{485}$	$R_{450}/R_{685}$	$R_{450}/R_{735}$	$R_{465}/R_{685}$
Fe	-0,24	0,46	-0,19	-0,39	<b>-0,76</b>	<b>-0,88</b>	<b>0,69</b>	<b>-0,70</b>	-0,46	<b>-0,68</b>
Mn	0,12	-0,43	0,17	0,37	<b>0,74</b>	<b>0,89</b>	<b>-0,64</b>	<b>0,67</b>	0,59	<b>0,66</b>
Zn	-0,41	<b>-0,95</b>	-0,63	-0,45	0,00	0,24	0,10	-0,10	0,62	-0,13
Cu	-0,34	0,56	0,31	0,33	0,20	0,29	-0,07	0,19	0,54	0,23
Ni	-0,48	0,15	-0,51	<b>-0,68</b>	<b>-0,93</b>	<b>-0,96</b>	<b>0,89</b>	<b>-0,90</b>	-0,27	<b>-0,88</b>
Cd	-0,25	-0,01	-0,52	<b>-0,69</b>	<b>-0,90</b>	<b>-0,99</b>	<b>0,80</b>	<b>-0,86</b>	-0,52	<b>-0,86</b>
Pb	-0,60	0,36	-0,35	-0,49	<b>-0,77</b>	<b>-0,76</b>	<b>0,79</b>	<b>-0,74</b>	-0,01	<b>-0,72</b>

Тяжелые Металлы	Спектральные индексы									
	$R_{465}/R_{735}$	$R_{485}/R_{685}$	$R_{485}/R_{735}$	$R_{500}/R_{450}$	$R_{500}/R_{465}$	$R_{500}/R_{620}$	$R_{550}/R_{485}$	$R_{550}/R_{620}$	$R_{670}/R_{500}$	$R_{670}/R_{620}$
Fe	-0,53	<b>-0,70</b>	<b>-0,73</b>	-0,63	<b>-0,69</b>	-0,15	-0,63	<b>-0,70</b>	<b>0,83</b>	<b>0,97</b>
Mn	<b>0,66</b>	<b>0,67</b>	<b>0,83</b>	0,59	0,56	0,17	0,51	0,61	<b>-0,81</b>	<b>-0,94</b>
Zn	0,50	-0,10	0,54	-0,18	0,30	-0,63	0,62	-0,02	-0,11	-0,47

<b>Cu</b>	<b>0,64</b>	0,20	0,54	0,10	-0,63	0,59	<b>-0,82</b>	-0,18	-0,13	0,08
<b>Ni</b>	-0,41	<b>-0,90</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,85</b>	<b>-0,73</b>	-0,45	-0,52	<b>-0,87</b>	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>
<b>Cd</b>	<b>-0,67</b>	<b>-0,86</b>	<b>-0,84</b>	<b>-0,78</b>	-0,41	-0,58	-0,17	<b>-0,69</b>	<b>0,92</b>	<b>0,88</b>
<b>Pb</b>	-0,09	<b>-0,74</b>	-0,35	<b>-0,75</b>	<b>-0,94</b>	-0,17	<b>-0,82</b>	<b>-0,88</b>	<b>0,83</b>	<b>0,94</b>

Таблица 3. Коэффициенты корреляции одуванчика

<i>Тяжелые Металлы</i>	<i>Спектральные индексы</i>									
	$R_{435}/R_{500}$	$R_{435}/R_{585}$	$R_{435}/R_{620}$	$R_{435}/R_{635}$	$R_{435}/R_{670}$	$R_{435}/R_{735}$	$R_{450}/R_{485}$	$R_{450}/R_{685}$	$R_{450}/R_{735}$	$R_{465}/R_{685}$
<b>Fe</b>	-0,30	0,03	-0,05	-0,05	-0,06	0,25	-0,02	0,27	0,41	0,37
<b>Mn</b>	-0,11	-0,27	-0,28	-0,31	-0,51	-0,01	-0,07	-0,38	0,05	-0,45
<b>Zn</b>	-0,27	-0,11	-0,10	-0,08	-0,11	-0,04	0,01	0,16	0,15	0,20
<b>Cu</b>	-0,58	-0,26	-0,37	-0,37	-0,37	0,10	-0,34	-0,05	0,22	0,07
<b>Ni</b>	-0,39	-0,11	-0,13	-0,10	-0,01	-0,01	-0,09	0,25	0,16	0,37
<b>Cd</b>	0,00	0,05	0,13	0,17	0,15	-0,08	0,30	0,36	0,14	0,35
<b>Pb</b>	-0,24	-0,10	-0,03	0,03	0,11	-0,24	0,06	0,30	-0,05	0,35
<i>Тяжелые Металлы</i>	<i>Спектральные индексы</i>									
	$R_{465}/R_{735}$	$R_{485}/R_{685}$	$R_{485}/R_{735}$	$R_{500}/R_{450}$	$R_{500}/R_{465}$	$R_{500}/R_{620}$	$R_{550}/R_{485}$	$R_{550}/R_{620}$	$R_{670}/R_{500}$	$R_{670}/R_{620}$
<b>Fe</b>	0,50	0,43	0,53	-0,05	-0,16	0,24	<b>-0,77</b>	<b>-0,74</b>	-0,07	0,10
<b>Mn</b>	0,09	-0,52	0,13	-0,02	-0,03	-0,44	0,01	-0,41	<b>0,71</b>	<b>0,72</b>
<b>Zn</b>	0,18	0,23	0,19	-0,08	-0,14	0,11	-0,59	-0,60	0,05	0,17
<b>Cu</b>	0,40	0,15	0,51	0,26	0,15	-0,08	-0,56	<b>-0,88</b>	0,18	0,24
<b>Ni</b>	0,24	0,46	0,28	0,03	-0,05	0,20	-0,61	-0,58	-0,23	-0,16
<b>Cd</b>	0,06	0,36	0,00	-0,37	-0,40	0,27	-0,57	-0,31	-0,15	-0,01
<b>Pb</b>	-0,07	0,41	-0,08	-0,11	-0,14	0,23	-0,47	-0,30	-0,29	-0,25

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что только мать-и-мачеха является индикаторным видом для экспресс-оценки загрязнения природной среды тяжелыми металлами по спектрам отражения, а одуванчик остается весьма информативным только для химических методов.

### Заключение

Были проведены экспериментальные исследования трех районов Санкт-Петербурга (Приморского, Петроградского и Кировского). Установлено, что территория Юнтоловского заказника (Приморский район) – экологически чистая, Ботанический сад (Петроградский район) – средняя степень загрязнения, но в пределах допустимого, а территория, прилегающая к заводу Балтэлектро по некоторым тяжелым металлам близка к критическому уровню загрязнения.

Установлено, что для химических методов оценки данные растения являются информативными, но для спектрального метода одуванчик не подходит в силу устойчивости оптических свойств к воздействию тяжелых металлов. Отражательные свойства мать-и-мачехи чувствительны к воздействию тяжелых металлов, что говорит об индикаторных свойствах данного представителя растительности при разработке экспресс-метода оценки экологической обстановки. Установлены корреляции с рядом информативных параметров, что позволило нам определить не только наличие загрязнения, но и его характер.

Данные исследования могут быть положены в основу метода быстрой оценки экологической обстановки, который позволит оценить наличие загрязнения и, при необходимости, сообщить об этом в соответствующие службы для своевременного принятия необходимых мер. Разработанные на основе

данного метода «экологические карты» могут быть размещены в информационных службах города, в комитете по строительству и т. п. для выбора наиболее подходящих территорий при размещении тех или иных объектов.

### Литература

1. *Артамонов В. И.* Растения и чистота природной среды // М.: Наука, 1986. 86 с.
2. *Бузников А.А., Леус В.И., Леус Н.Б.* Полевой фотоэлектрический спектрометр // Известия ГЭТУ, 1995. Вып. 481. С. 3–7.
3. *Андреева А.В., Бузников А.А.* Экспресс-оценка экологического состояния окружающей среды с помощью спектров отражения растительности // Известия ГЭТУ, 2005. №1. С. 43-51.
4. *Чимитдоржиев Т.Н., Ефременко В.В.* Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем // Исследование земли из космоса, 1998. № 3. С. 49–54.
5. *Сагалович В.Н., Фальков Э.Я., Царева Т.И.* Оптимальное оценивание содержания хлорофилла в листьях и растительном покрове по гиперспектральным вегетационным индексам // Исследование земли из космоса, 2002. № 6. С. 81–84.
6. Минприроды России // М., 1992.