

Исследование характера изменения оптических характеристик растительности под воздействием тяжелых металлов для разработки метода дистанционной диагностики загрязнения

А.В. Андреева¹, А.А. Бузников¹, С.В. Скрябин¹, А.А. Тимофеев¹,
Н.В. Алексеева-Попова², А.И. Беляева²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

197376 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5

Email: andreeva@acn.auroratv.ru, altimofeev@list.ru ;

²Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН

197376 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.2

Проведены полевые измерения спектров отражения индикаторных видов растительности. Установлены корреляционные связи спектральных параметров растений с загрязнением тяжелыми металлами. Проведен комплексный лабораторный опыт по изучению индивидуального и комбинированного воздействия тяжелых металлов на спектральные характеристики растений.

Введение

В течение нескольких лет наша научно-исследовательская группа проводит исследования по изучению влияния тяжелых металлов на оптические характеристики растений для разработки экспресс-метода дистанционной оценки загрязнения. Тяжелые металлы – наиболее распространенные и сильные поллютанты на территориях городов и вблизи производственных предприятий. Наличие тяжелых металлов в окружающей среде приводит к накоплению их растениями и к изменениям их спектральных характеристик, что может служить основой для разработки дистанционных методов его обнаружения [1, 2]. Металлы воздействуют на пигментный состав растений, что вызывает изменение оптических характеристик в видимом диапазоне спектра [3, 4, 5].

В 2005 году была проведена серия полевых экспериментов, по результатам которых выявлены индикаторные виды растительности Санкт-Петербурга: мать-и-мачеха, одуванчик и трава [6, 7]. Положительные результаты этих экспериментов стали основой для продолжения исследований в данном направлении. Летом 2006 года на тех же тестовых участках Санкт-Петербурга были проведены повторные опыты. Кроме того, нами была проведена серия лабораторных экспериментов для установления ПДК тяжелых металлов индикаторных видов растений и градации изменения спектральных характеристик в зависимости от уровня загрязнения.

Проведение полевых экспериментов и анализ полученных данных

Спектрометрирование проводилось в тех же районах Санкт-Петербурга, которые были выбраны в 2005г. Измерения проводились на тестовых участках в ясную погоду. На рис. 1-3 показаны районы измерений – Приморский, Петроградский и Кировский, а точками обозначены тестовые участки. Листья растений, собранные на тестовых участках, раскладывались на черной поверхности сплошным покровом размером 0,5Ч0,5 м². Спектрометрирование этих листьев проводилось полевым фотоэлектрическим спектрометром (ПФС) [2] на расстоянии 1,5 м. Собранные с участков образцы растений исследовались на содержание тяжелых металлов в Ботаническом институте им. В.Л. Комарова. Химический анализ проводился атомно-абсорбционным методом. Растения не подвергались предварительной очистке, чтобы учесть комплексное загрязнение и достоверно оценить экологическую обстановку. В табл. 1 представлены концентрации содержания тяжелых металлов в листьях мать-и-мачехи, одуванчика и травы в пределах исследуемых территорий (в мг/кг сухого вещества).

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

Вид	Дата	Адрес	Обознач.	Fe, мг/кг	Zn, мг/кг	Mn, мг/кг	Cu, мг/кг	Ni, мг/кг	Pb, мг/кг	Cd, мг/кг
Мать-и-мачеха	21.07	Юнтолово	Ю1	48,7	57	59,7	14,7	1,48	1,77	0,23
	21.07	Юнтолово, дальше от города	Ю2	56,8	36	18,6	10,7	0,87	1,6	0,67
	11.07	Бот. Сад у дороги	Б1	71	40,1	15,8	11,1	1	2,72	0,24
	11.07	Бот. Сад в центре	Б2	84,5	41,2	15,5	9,76	0,75	6,98	0,42
	13.07	ул. Трефолева (завод Балтэлектро)	А1	169	47,3	8,95	12,4	1,25	18	0,69
	13.07	ул. Белоусова 27	А2	216	75,5	20,2	10,2	1	7,07	0,85
	13.07	ул. Севастопольская	А3	200	82,3	15,1	17,2	1,5	5,92	0,69
	13.07	ул. Турбинная 24	А4	121	47,4	8,03	13,2	0,71	2,23	0,22
Одуванчик	21.07	Юнтолово	Ю1	31,8	37,1	44,3	9,46	0,56	1,8	0,17
	21.07	Юнтолово, дальше от города	Ю2	22,4	22,3	29,8	7,5	0,51	2,34	0,1
	11.07	Бот. Сад у дороги	Б1	64,3	45,4	20,1	11,7	0,99	2,83	0,24
	11.07	Бот. Сад в центре	Б2	54,5	23	10,6	11,9	0,79	2,41	0,19
	22.07	ул. Трефолева (завод Балтэлектро)	А1	85,7	35,5	13,1	12,4	0,56	7,16	0,3
	22.07	ул. Белоусова 27	А2	124	80,1	16,2	12,2	1,13	8,86	0,39
	22.07	ул. Севастопольская	А3	90,1	53,7	22,1	14,8	0,62	5,77	0,33
	01.07	ул. Турбинная 24	А4	73	69,4	19,4	12,5	0,76	3,89	0,18
Трава	09.07	Юнтолово	Ю1	66,5	27,2	91,9	3,87	0,5	1,49	0,12
	08.07	Юнтолово, дальше от города	Ю3	86,7	17,8	39,1	7,21	1,48	0,6	0,06
	11.07	Бот. Сад у дороги	Б1	111	13,7	19,3	7	0,89	2,45	0,06
	11.07	Бот. Сад в центре	Б2	99,2	17	21,4	8,49	1,35	2,29	0,06
	22.07	ул. Трефолева (завод Балтэлектро)	А1	134	36,1	8,51	10,6	0,63	8,52	0,23
	01.07	ул. Белоусова 27	А2	64,9	35,4	3,78	12,9	0,5	3,21	0,06
	22.07	ул. Севастопольская	А3	90,3	40,5	4,19	17,8	0,5	4,76	0,23
	01.07	ул. Турбинная 24	А4	67,5	58,9	15,7	12,2	0,5	2,46	0,06

Как и в предыдущем году, содержание тяжелых металлов в образцах растений Юнтолово - соответствует «фоновым». Наибольшее загрязнение (табл. 1) отмечено в Кировском районе рядом с заводами «Балтэлектро» и «Кировским».

Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 2–4.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции спектральных параметров с концентрацией тяжелых металлов в листьях *мать-и-мачехи*

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	-0,78	-0,79	-0,81	-0,83	-0,87	-0,79	-0,76	-0,82	-0,70	-0,66
C(Zn)	-0,32	-0,31	-0,35	-0,37	-0,56	-0,51	-0,39	-0,65	-0,52	-0,58
C(Mn)	0,69	0,71	0,67	0,65	0,43	0,45	0,70	0,28	0,36	0,12
C(Cu)	0,13	0,04	-0,03	-0,05	-0,25	-0,13	-0,22	-0,38	-0,27	-0,43
C(Ni)	0,13	0,16	0,11	0,09	-0,08	0,04	-0,06	-0,16	0,03	-0,17
C(Pb)	-0,62	-0,61	-0,60	-0,60	-0,51	-0,35	-0,62	-0,30	-0,18	-0,15
C(Cd)	-0,35	-0,32	-0,33	-0,35	-0,46	-0,19	-0,28	-0,39	-0,05	-0,32

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	-0,67	-0,50	-0,58	0,70	0,78	-0,65	0,71	0,20	0,57	0,26
C(Zn)	-0,53	-0,53	-0,49	0,22	0,31	-0,30	0,19	-0,07	0,50	0,58
C(Mn)	0,27	-0,10	0,20	-0,75	-0,74	0,43	-0,68	-0,44	-0,08	0,43
C(Cu)	-0,34	-0,32	-0,26	-0,06	0,06	-0,25	-0,04	-0,43	0,43	0,48
C(Ni)	-0,01	-0,15	0,06	-0,13	-0,12	0,02	-0,17	-0,21	0,13	0,36
C(Pb)	-0,12	0,03	-0,01	0,65	0,61	-0,45	0,66	0,38	0,15	-0,23
C(Cd)	-0,05	-0,29	0,03	0,26	0,28	-0,23	0,24	0,07	0,28	0,32

Таблица 3. Коэффициенты корреляции спектральных параметров с концентрацией тяжелых металлов в листьях *одуванчика*

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	-0,27	-0,19	-0,16	-0,18	-0,22	-0,54	-0,22	-0,27	-0,51	-0,21
C(Zn)	0,18	0,31	0,37	0,37	0,37	-0,11	0,28	0,35	-0,13	0,37
C(Mn)	0,66	0,60	0,56	0,56	0,57	0,73	0,45	0,49	0,58	0,41
C(Cu)	-0,62	-0,62	-0,57	-0,57	-0,53	-0,85	-0,52	-0,47	-0,76	-0,43
C(Ni)	-0,23	0,11	0,14	0,14	0,08	0,02	0,01	0,11	0,23	0,23
C(Pb)	-0,08	-0,10	-0,09	-0,13	-0,18	-0,46	-0,16	-0,30	-0,53	-0,27
C(Cd)	-0,33	-0,27	-0,28	-0,30	-0,37	-0,51	-0,39	-0,45	-0,48	-0,38

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	-0,43	-0,26	-0,48	0,19	0,04	-0,01	0,13	0,08	0,15	0,31
C(Zn)	-0,15	0,33	-0,24	-0,31	-0,40	0,49	-0,29	0,55	-0,42	-0,02
C(Mn)	0,44	0,45	0,46	-0,59	-0,51	0,28	-0,53	0,00	-0,32	-0,12
C(Cu)	-0,67	-0,40	-0,65	0,55	0,55	-0,36	0,59	0,05	0,34	-0,08
C(Ni)	0,35	0,16	0,28	0,09	-0,11	0,58	-0,36	0,29	-0,43	0,24
C(Pb)	-0,47	-0,33	-0,53	0,06	-0,11	-0,12	0,11	-0,07	0,30	0,45
C(Cd)	-0,36	-0,42	-0,39	0,31	0,12	-0,15	0,15	-0,16	0,32	0,45

Таблица 4. Коэффициенты корреляции спектральных параметров с концентрацией тяжелых металлов в листьях травы

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	0,28	0,18	0,26	0,28	0,26	0,19	0,41	0,02	0,16	-0,07
C(Zn)	0,34	0,68	0,75	0,76	0,62	0,46	0,49	0,63	0,52	0,61
C(Mn)	0,10	0,24	0,30	0,31	0,41	-0,35	-0,22	0,14	-0,44	0,13
C(Cu)	0,50	0,45	0,43	0,41	0,31	0,43	0,72	0,36	0,39	0,29
C(Ni)	-0,17	-0,43	-0,50	-0,50	-0,42	0,09	-0,07	-0,51	0,07	-0,63
C(Pb)	0,29	-0,01	-0,06	-0,08	-0,13	-0,02	0,38	-0,10	-0,07	-0,12
C(Cd)	0,05	-0,08	-0,07	-0,08	-0,15	-0,27	0,07	-0,31	-0,27	-0,29

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	0,11	-0,16	0,03	-0,33	-0,32	0,06	0,08	0,21	-0,01	-0,16
C(Zn)	0,48	0,54	0,39	-0,52	-0,58	0,65	-0,58	0,51	-0,50	0,02
C(Mn)	-0,54	0,28	-0,44	0,06	0,23	0,30	-0,18	0,36	-0,47	-0,49
C(Cu)	0,33	0,12	0,17	-0,62	-0,69	0,06	-0,18	0,00	0,00	0,04
C(Ni)	0,03	-0,59	0,13	0,21	0,54	-0,55	0,54	-0,46	0,51	-0,02
C(Pb)	-0,08	-0,28	-0,23	-0,34	-0,54	-0,33	0,11	-0,32	0,46	0,25
C(Cd)	-0,24	-0,39	-0,33	-0,08	-0,32	-0,10	0,03	-0,06	0,26	0,34

Для каждого вида растений определен свой набор спектральных параметров, наиболее информативных для дистанционной оценки содержания тяжелых металлов. Для достоверности полученных результатов необходим анализ многолетних исследований. Поэтому работа в данном направлении будет продолжена и в 2007г.

Проведение лабораторных экспериментов и анализ полученных данных

Летом 2006 года был поставлен многоступенчатый лабораторный опыт с саженцами огурцов для отслеживания динамики изменения пигментного состава от степени и длительности воздействия растворов солей тяжелых металлов. В течение нескольких дней огурцы подвергались воздействию тяжелых металлов, которые впитывались растениями из растворов солей через корневую систему. Опыт состоял из двух этапов. На первом этапе огурцы высаживались на 8 разных растворов:

- Ni – $2 \cdot 10^{-5}$ моль/л ; Ni – $3 \cdot 10^{-5}$ моль/л ;
- Zn – $3 \cdot 10^{-4}$ моль/л ; Zn – $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л ;
- Cu – $2 \cdot 10^{-5}$ моль/л ; Cu – $3 \cdot 10^{-5}$ моль/л ;
- Cd – $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л ; Cd – $2 \cdot 10^{-4}$ моль/л .

Спектрометрирование образцов и взятие проб для химического анализа проводилось с интервалом в 2 дня. Были составлены две комбинации из металлов с аналогичным характером воздействия на спектральные характеристики листьев: Ni+Zn и Cd+Cu.

Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 5-7. Следует отметить, что ни один значимый для Cu и Cd в комбинации Cu+Cd спектральный параметр не совпадает со значимыми для Ni и Zn в комбинации Ni+Zn параметрами, что означает различное влияние этих комбинаций на спектральные характеристики листьев. Все значимые спектральные параметры для Ni в комбинации Ni+Zn совпадают с параметрами для Zn, что означает схожее влияние обоих металлов на спектральные характеристики листьев. В комбинации Cu+Cd параметры для Cu также совпадают с Cd, который оказывает большее влияние на растения.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции спектральных параметров с концентрацией тяжелых металлов в листьях огурцов, выращенных на растворе Cu+Cd

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	0,06	0,11	0,07	0,04	-0,56	-0,85	-0,20	-0,70	-0,88	-0,74
C(Zn)	0,52	0,32	0,40	0,42	0,39	0,09	0,65	0,36	0,02	0,36
C(Mn)	0,35	0,19	0,24	0,23	-0,12	-0,40	0,32	-0,19	-0,46	-0,21
C(Cu)	0,54	0,37	0,45	0,47	0,33	-0,06	0,63	0,28	-0,13	0,26
C(Ni)										
C(Cd)	0,63	0,46	0,53	0,56	0,70	0,43	0,79	0,68	0,36	0,68

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	-0,90	-0,82	-0,92	-0,13	-0,45	0,13	-0,02	0,39	0,79	0,89
C(Zn)	-0,02	0,23	-0,10	-0,38	-0,28	0,27	0,61	0,72	-0,26	-0,11
C(Mn)	-0,49	-0,34	-0,55	-0,29	-0,43	0,13	0,51	0,67	0,33	0,43
C(Cu)	-0,18	0,13	-0,26	-0,41	-0,34	0,37	0,57	0,84	-0,18	0,03
C(Ni)										
C(Cd)	0,31	0,57	0,23	-0,47	-0,25	0,38	0,40	0,60	-0,58	-0,41

Таблица 6. Коэффициенты корреляции спектральных параметров с концентрацией тяжелых металлов в листьях контрольных огурцов

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	0,13	0,27	0,33	0,34	0,34	0,55	0,19	0,43	0,65	0,40
C(Zn)	-0,76	-0,67	-0,63	-0,62	-0,58	-0,20	-0,62	-0,46	-0,03	-0,49
C(Mn)	-0,07	0,11	0,15	0,16	0,14	0,40	0,06	0,25	0,50	0,23
C(Cu)	0,48	0,61	0,65	0,66	0,67	0,82	0,57	0,75	0,86	0,73
C(Ni)										
C(Cd)										

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	0,65	0,46	0,72	-0,11	0,04	0,35	-0,13	0,34	-0,22	-0,20
C(Zn)	-0,01	-0,43	0,17	0,79	0,88	-0,61	0,70	-0,64	0,63	0,09
C(Mn)	0,52	0,27	0,59	0,13	0,24	0,19	-0,09	0,11	0,02	0,04
C(Cu)	0,86	0,77	0,86	-0,41	-0,27	0,66	-0,48	0,60	-0,55	-0,35
C(Ni)										
C(Cd)										

Таблица 7. Коэффициенты корреляции спектральных параметров с концентрацией тяжелых металлов в листьях огурцов, выращенных на растворе Ni+Zn

Концентрация	Спектральный параметр									
	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)
C(Fe)	-0,28	-0,35	-0,27	-0,26	-0,51	-0,80	-0,06	-0,54	-0,77	-0,55
C(Zn)	0,07	0,05	-0,04	-0,05	0,23	0,65	-0,17	0,32	0,65	0,36
C(Mn)	-0,66	-0,66	-0,60	-0,59	-0,64	-0,55	-0,43	-0,53	-0,49	-0,50

<i>C(Cu)</i>	-0,57	-0,42	-0,36	-0,35	-0,43	-0,45	-0,23	-0,33	-0,38	-0,29
<i>C(Ni)</i>	0,01	0,08	-0,01	-0,02	0,29	0,73	-0,18	0,38	0,72	0,42
<i>C(Cd)</i>										

Концентрация	Спектральный параметр									
	<i>R(465)/R(735)</i>	<i>R(485)/R(685)</i>	<i>R(485)/R(735)</i>	<i>R(500)/R(450)</i>	<i>R(500)/R(465)</i>	<i>R(500)/R(620)</i>	<i>R(550)/R(485)</i>	<i>R(550)/R(620)</i>	<i>R(670)/R(500)</i>	<i>R(670)/R(620)</i>
<i>C(Fe)</i>	-0,78	-0,59	-0,79	-0,05	-0,15	-0,19	0,72	0,26	0,51	0,78
<i>C(Zn)</i>	0,68	0,40	0,70	0,13	0,10	-0,14	-0,64	-0,55	-0,25	-0,69
<i>C(Mn)</i>	-0,45	-0,49	-0,43	0,31	0,14	-0,42	0,54	-0,19	0,44	0,43
<i>C(Cu)</i>	-0,36	-0,30	-0,35	0,20	0,07	-0,11	0,38	0,06	0,23	0,42
<i>C(Ni)</i>	0,76	0,48	0,78	0,22	0,23	-0,04	-0,67	-0,52	-0,36	-0,77
<i>C(Cd)</i>										

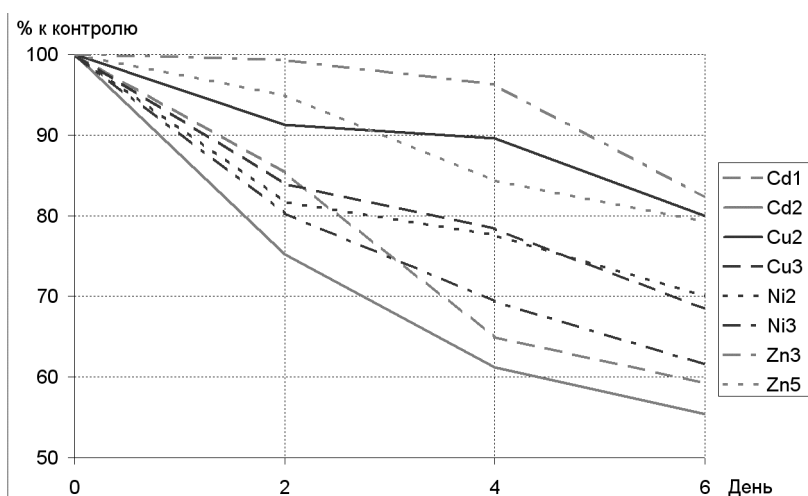


Рис. 4. Изменение содержания хлорофилла-а в листьях огурцов на протяжении первого этапа лабораторного опыта

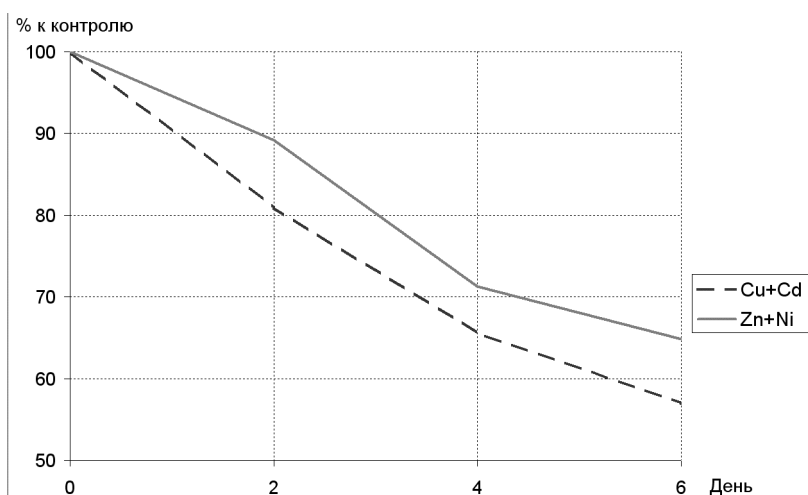


Рис. 5. Изменение содержания хлорофилла-а в листьях огурцов на протяжении второго этапа лабораторного опыта

В лабораторном опыте контролировалось не только содержание тяжелых металлов, но и пигментный состав листьев – содержание хлорофилла-*a*, хлорофилла-*b*, каротиноидов. На рис. 4-5 показана динамика изменения содержания хлорофилла-*a* на первом и втором этапах опыта. По графикам видно, что содержание хлорофилла в листьях уменьшалось в процессе эксперимента одновременно с ухудшением состояния растений. Воздействие комбинации тяжелых металлов Cu+Cd оказывает более сильное влияние и быстрее вызывает стресс растений.

Заключение

Продолжено экспериментальное исследование трех районов Санкт-Петербурга (Приморского, Петроградского и Кировского). Получены новые данные о спектральных свойствах индикаторных видов растений, необходимые для статистически обоснованного установления наиболее устойчивых информативных спектральных параметров для дистанционной оценки уровня содержания тяжелых металлов в листьях.

Проведен комплексный лабораторный опыт в контролируемых условиях по изучению индивидуального воздействия тяжелых металлов и их комбинаций. Выделены металлы, оказывающие схожее воздействие на спектральные характеристики листьев. Изучена динамика пигментного состава листьев растений.

Подробное изучение изменений спектральных характеристик индикаторных видов растений под воздействием загрязнения тяжелыми металлами позволит разработать метод бесконтактной дистанционной диагностики характера и степени этого загрязнения. Возможность применения метода в городских условиях позволит оперативно оценивать экологическое состояние районов города и своевременно реагировать на возникающие изменения.

Благодарность

Авторы выражают благодарность правительству Санкт-Петербурга за оказанную материальную поддержку для проведения исследований в форме грантов для молодых кандидатов наук и для студентов и аспирантов.

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. Андреева А.В., Бузников А.А., Тимофеев А.А., Скрябин С.В. «Спектральные исследования техногенной нагрузки на растительность мегаполисов» // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006, Выпуск 1. С. 31-38.
7. Андреева А.В., Бузников А.А., Тимофеев А.А., Алексеева-Попова Н.В., Беляева А.И. «Оценка экологического состояния окружающей среды по спектрам отражения индикаторных видов растительности» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. 2006, Том II, Выпуск 3. С. 265-270.