

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ПО КОМПОНЕНТАМ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Лыу Вьет Хынг¹, О. Д. Маслов, М. В. Густова,
Чинь Тхи Тху Ми, Фунг Кхак Нам Хо

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Исследовано содержание микроэлементов в образцах почв и различных частях растений, произрастающих на этой почве (чайное дерево (*Camellia sinensis*), кукуруза (*Zea mays* L), овощная культура (*Sauropus androgynus*), трава ветивер (*Vetiveria zizanioides* (L.) Нэш)), отобранных на территории Вьетнама. Определено содержание 22 элементов с помощью рентгенофлуоресцентного (РФА), гамма-активационного (ГАА) и трекового методов анализа образцов на установках ЛЯР ОИЯИ. Изучено распределение микроэлементов в исследованных образцах.

Leaves, stem, and roots of two shrub types: tea (*Camellia sinensis*), sweet leaf (*Sauropus androgynus*) and two herb types: vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* L. Nash), maize (*Zea mays* L) and Thucuc soil where the plants growing, were collected to study. Contents of 22 elements in the samples were determined by three methods: XRFA (X-Ray Fluorescence Analysis), GAA (Gamma Activation Analysis), and tracking method to study distribution of these elements in plants and soil–plant relationship. The study was carried out at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, Dubna. Distribution of the elements in the soil–plant system was studied.

PACS: 87.53.-j

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие тяжелых металлов и радионуклидов в малых дозах на территориях с невысоким уровнем техногенного воздействия не сразу сказывается на состоянии почв и растительных насаждений, и в течение длительного времени внешних признаков техногенного влияния можно не обнаружить. Поэтому особый интерес вызывает изучение процессов миграции элементов-загрязнителей по всем компонентам растительных экосистем. На растения возложен широкий спектр биосферных функций в экогоризонте системы почва–растения и роль посредников между живыми и косными веществами биосферы. Изучение элементного состава почв и растений позволяет решать научно-исследовательские, производственные проблемы агрохимического и природоохранного значения. Способность растений аккумулировать из питающего субстрата микроэлементы в значительных количествах, чувствительность к изменениям условий среды позволяют рассматривать данный компонент экосистем как биоиндикатор [1].

¹E-mail: luuhung212@gmail.com

В предыдущей работе [2] было исследовано, что в корнях травы ветивер (*Vetiveria zizanioides*), произрастающей на территории Вьетнама, в значительной степени концентрируются тяжелые элементы, в том числе уран.

В данной работе анализировались образцы почв и различных частей растений, отобранных на территории Вьетнама, с целью изучения распределения в них микроэлементов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. В работе исследовались образец почвы и 14 образцов растений, отобранных осенью 2008 г. на территории провинции Тху Кук, Фу Тхо в центральном районе севера Вьетнама. Тип исследуемой почвы соответствует краснозему. Красноземы формируются в условиях промывания почв на породах, богатых железом, что обуславливает их яркую, красновато-оранжевую окраску. Средний химический состав данного типа почвы, согласно литературным данным, представлен в табл. 1 [3].

Таблица 1. Средний химический состав типичного краснозема

Потери при прокаливании (органическое вещество + CO ₂), %	Содержание оксидов в почве, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃
13,40	39,31	36,40	10,11	0,11	0,22	0,17	0,98	0,19

Образцы почвы отбирались в местах произрастания исследуемых растений на глубине 0–20 см. Затем все образцы были перемешаны и отобран усредненный образец почвы. Полученный образец был высушен при температуре 105 °С, измельчен и пропущен через сито с диаметром 1 мм.

Каждое отобранное растение было тщательно очищено от почвы, промыто дистиллированной водой, разделено на части (листья, стебель, корень) и высушено при 85 °С до стабильного веса. Полученный растительный материал измельчен до размера < 1 мм.

Для исследования были отобраны следующие образцы растительности:

— чай (*Camellia sinensis*) — корни, стебли, листья возрастом до 6 мес. и меньше 1 мес., общий возраст растения 3 года;

— кукуруза (*Zea mays* L) — возраст растения 6 мес.;

— овощная культура (*Sauropus androgynus*) — общий возраст растения 1 год, возраст листьев 6 мес.;

— трава ветивер (*Vetiveria zizanioides* (L.) Нэш) — возраст растения 1 год.

Методы анализа. Многоэлементный анализ образцов проводился с помощью рентгенофлюоресцентного (РФА), гамма-активационного (ГАА) и трекового методов анализа образцов на установках ЛЯР ОИЯИ.

Рентгенофлюоресцентный анализ. Рентгеновские спектры образцов измерялись с помощью стандартного спектрометра фирмы Canberra. Для возбуждения рентгеновского излучения использовались радиоизотопные источники ¹⁰⁹Cd ($E = 22,16$ кэВ, $T_{1/2} = 453$ сут) и ²⁴¹Am ($E = 59,6$ кэВ, $T_{1/2} = 458$ лет). Характеристическое рентгеновское излучение регистрировалось полупроводниковым Si(Li)-детектором с площадью

30 мм² и толщиной 3 мм, толщиной бериллиевого окна 25 мкм и с разрешением 145 эВ на линии 5,9 кэВ.

Для обработки спектров и расчета концентраций элементов в пробах было использовано программное обеспечение для рентгенофлуоресцентного анализа WinAxil Cambridge. В качестве эталонных образцов применялись стандартные образцы состава (СОС) МАГАТЭ и РФ (soil-5, ENO, СГ-1А, СП-1, IAEA-140, Mid-MA-M2/TM, pine-SRM1575a, СВМТ-01). Для оценки содержания в исследуемых пробах элементов, отсутствующих в эталонных образцах, была использована методика одновременного определения в насыщенном слое вещества всех элементов по единой стандартной кривой [4].

Инструментальный гамма-активационный анализ. Измельченные образцы почвы, растений и стандартов помещали в полиэтиленовые цилиндрические кассеты диаметром 35 мм и высотой 5 мм, закрытые с торцов лавсановой пленкой толщиной 6–10 мкм. В качестве эталонов использовали стандартные образцы СП-1 и эталон угля Ангрэн. Количество образцов при одном облучении составляло не более 12 штук.

Образцы и стандарты облучали одновременно гамма-квантами с энергией $E_\gamma = 24$ МэВ и током электронов, равным 15 мкА, в течение 2–5 ч на микротроне МТ-25 ЛЯР ОИЯИ. Распределение гамма-квантов по сборке определяли с использованием мониторов, изготовленных из медной фольги [5].

Гамма-спектрометрические измерения облученных образцов проводили с использованием детектора из сверхчистого Ge с разрешением 1,5 кэВ на линии 1,33 МэВ (⁶⁰Co). Погрешность измерений в зависимости от интенсивности гамма-линий определяемых радионуклидов составила 3–5 %.

Трековый анализ. Трековый анализ применяли для определения содержания урана. Измельченные образцы в смеси со спиртоклеевым раствором наносили на поверхность твердотельного детектора (ТТД), изготовленного из полиэтилентерефталата (лавсана) толщиной 175 мкм, и высушивали. Затем на рабочую поверхность помещали другой детектор и фиксировали. Сборку из нескольких образцов и эталона с известным содержанием урана облучали гамма-квантами с энергией $E_\gamma = 24$ МэВ и током электронов, равным 15 мкА, в течение 30 мин на микротроне МТ-25 ЛЯР ОИЯИ. После окончания облучения ТТД подвергали травлению в 6 М NaOH при $T = 60$ °С в течение 1 ч, что обеспечивало получение треков диаметром 5–6 мкм. Плотность треков подсчитывалась на оптическом микроскопе при увеличении 160–320х [6]. Содержание урана определяли методом сравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгеновские спектры образцов почвы и растений показаны на рис. 1, 2.

Результаты рентгенофлуоресцентного, гамма-активационного и трекового методов анализа представлены в табл. 2, 3.

Такие элементы, как К, Na, Mg, Ca, Fe, Zn, Se, Mn, относятся к биогенным элементам [7], т. е. жизненно важным для растения.

В листьях чая Са в 7–12 раз больше по сравнению с почвой, в овощной культуре — в 33 раза, К — в 2–2,5 раза, Mg — в 4 раза, а содержание тяжелых металлов на один-два порядка меньше.

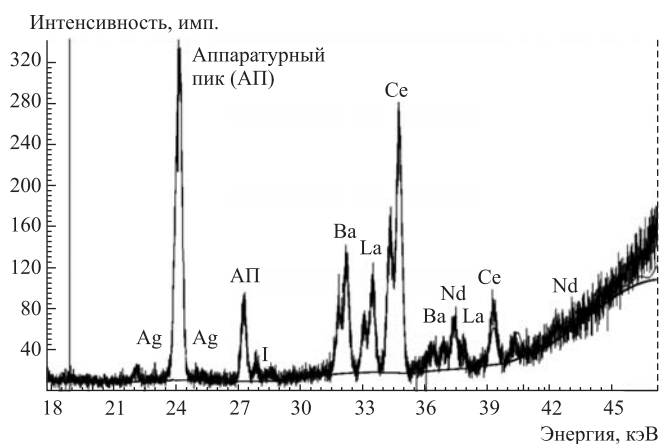


Рис. 1. Рентгеновский спектр образца почвы, измеренный с использованием источника возбуждения ^{241}Am

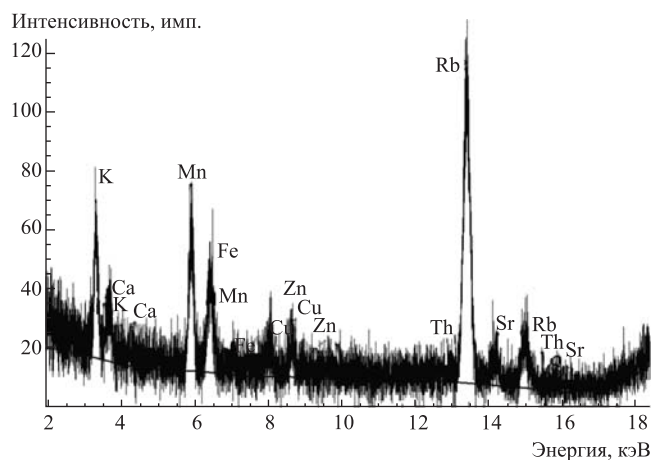


Рис. 2. Рентгеновский спектр образца листьев чая, измеренный с использованием источника возбуждения ^{109}Cd

Аккумуляция металлов в растениях и их органах происходит не одинаково. Одни металлы в зависимости от их природы и подвижности в большей степени сорбируются в листьях, другие — в корнях. Уран в траве ветивера концентрируется в основном в корнях, так, содержание его в корнях равняется 4,3 ppm, а в листьях — 0,9 ppm. В растениях кустарникового типа U обнаружен только в корнях. На рис.3 показано распределение микроэлементов в чайном дереве старше трех лет для листьев, растущих 6 мес. и менее 1 мес.

Из представленных данных видно, что

— содержание Fe в корнях растений больше, чем в других частях. Аккумуляция Fe в корнях травянистых растений (травы ветивера и кукурузы) больше, чем у кустарниковых растений (чая и овощной культуры *S. androgynus*);

Таблица 2. Содержание элементов в почве и в образцах растительности кустарникового типа, Тху Кук, Фун Тхо, Вьетнам

Элемент	Почва		Концентрация, ррп						Ошибки, %	Метод	
	Концентрация, ррп	Ошибки, %	Чай (<i>Camellia sinensis</i>)			Овощная культура (<i>S. androcarpus</i>)					
			Лист, 1 мес.	Лист, 6 мес.	Стебель	Корень	Лист	Стебель			Корень
Ag	2,30	15	0,07	0,05	0,06	0,07	≤0,05	≤0,05	≤0,05	10	РФА
Ba	270	10	40	80	100	30	110	130	50	10	РФА
Ca	2492	10	15359	24070	7423	2565	40728	7305	8747	10	ГАА
Ce	810,0	5	1,8	5,4	5,6	110	2,4	4,4	10,8	10	РФА
Cd	1,1	30	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,2	1,0	1,0	10	РФА
Cs	7,0	20	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,2	≤0,2	≤0,2	10	РФА
Cu	9	15	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	20	РФА
Fe	38000	15	270	200	260	1000	330	270	1200	15	РФА
K	10000	5	20200	14300	12000	6200	18500	20400	10500	5	РФА
Mg	1811	10	6953	3951	1553	625	6710	3700	3940	10	ГАА
Mn	180	10	460	650	360	130	188	530	95	10	РФА
La	260,0	10	0,7	3,0	4,0	34,0	1,8	2,8	3,5	15	РФА
Ni	23,2	10	11,6	37,6	≤0,1	≤0,1	≤0,1	7,1	≤0,1	10	ГАА
Pb	30,0	30	1,2	≤1,0	1,1	1,7	<1,0	1,4	1,2	50	РФА
Rb	60,0	7	63,0	40,0	32,0	21,0	9,3	12,2	8,2	7	РФА
Sn	8,0	10	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	≤0,2	0,3	0,25	30	РФА
Sr	21,0	10	7,0	14,0	21,0	9,0	20,3	19,5	12,4	10	РФА
Ti	7081	10	289	335	201	261	312	94	285	10	ГАА
Th	115,0	5	0,24	≤0,20	0,25	0,31	≤0,20	≤0,20	0,25	30	РФА
U	15,0	12	≤0,5	≤0,5	≤0,5	3,3	≤0,5	≤0,5	2,4	15	РФА
U	—	—	≤0,1	≤0,1	≤0,1	3,1	≤0,1	≤0,1	3,4	10	ГАА
Zn	44	15	30	15	40	38	160	700	700	15	РФА
Zr	1268,7	10	16,8	6,1	≤1,0	7,8	≤1,0	2,3	10,9	10	ГАА

Таблица 3. Содержание элементов в почве и в образцах однолетних травянистых растений, Тху Кук, Фу Тхо, Вьетнам

Элемент	Почва		Концентрация, ррп						Ошибки, %	Метод	
	Концентрация, ррп	Ошибки, %	Ветивер (<i>Vetiveria zizanioides</i>)		Кукуруза (<i>Zea mays L.</i>)		Корень				
			Лист, 1 мес.	Лист, 1 мес.	Лист	Корень		Стебель			Стебель
Ag	2,30	15	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,05	10	РФА
Ba	270	10	9	14	11	8	19	3	19	10	РФА
Ca	2492	10	2100	1684	1825	1336	5435	1011	935	10	ГАА
Ce	810,0	5	1,40	1,50	5,30	1,50	1,75	1,20	4,20	10	РФА
Cd	1,1	30	≤1,0	≤1,0	≤1,0	≤1,0	≤1,0	≤1,0	≤1,0	10	РФА
Cs	7,2	20	≤0,2	≤0,2	≤0,2	≤0,2	≤0,2	≤0,2	≤0,2	20	РФА
Cu	9	15	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	20	РФА
Fe	38000	15	1500	800	9000	1600	350	130	2500	15	РФА
K	10000	5	18500	17500	8000	22000	14130	14610	7500	5	РФА
Mg	1811	10	1797	1140	1721	1228	7760	1621	845	10	ГАА
Mn	180,0	10	44,0	71,0	77,0	38,0	69,2	43,2	68,0	10	РФА
La	260,0	10	0,7	0,5	0,7	0,4	0,6	0,3	0,9	15	РФА
Ni	23,2	10	≤0,1	≤0,1	19,9	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	ГАА
Pb	30	30	≤1	≤11	≤11	≤11	≤11	≤11	≤11	50	РФА
Rb	60,0	7	11,2	11,2	5,4	14,2	13,0	14,7	12,9	7	РФА
Sn	8,0	10	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	30	РФА
Sr	21,0	10	3,6	4,7	3,7	4,1	5,1	2,8	4,0	10	РФА
Ti	7081	10	118	133	1151	95	256	99	571	10	ГАА
Th	115,0	5	0,24	≤0,20	0,31	0,25	≤0,10	≤0,10	0,18	30	РФА
U	15	12	≤0,5	≤0,5	2,0	≤0,5	≤0,5	≤0,5	3,2	15	РФА
U	—	—	0,9	0,7	4,3	0,8	—	—	—	—	Трековый
Zn	44	15	40	30	51	38	13	29	27	15	РФА
Zr	1268,7	10	≤1,0	≤1,0	60,2	≤1,0	≤1,0	≤1,0	39,2	10	ГАА

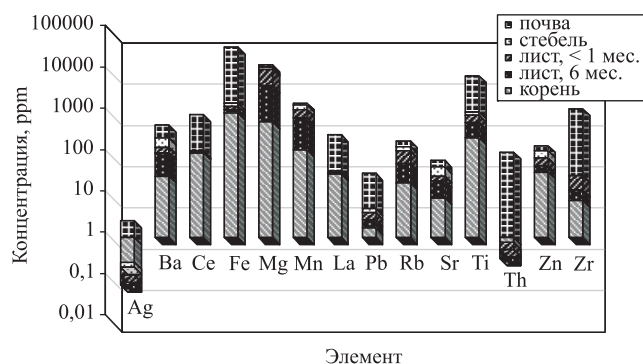


Рис. 3. Распределение микроэлементов в чайном дереве старше 3 лет для листьев, растущих 6 мес. и менее 1 мес.

— содержание Ba и Ca в растениях кустарникового типа больше, чем в травянистых растениях;

— у травянистых однолетних растений Zr обнаружен только в корневой системе;

— хотя почва на территории провинции Тху Кук содержит относительно высокие концентрации различных металлов, таких как Ce, Fe, La, Th, U, Zr [2], однако большая часть этих элементов обнаружена лишь в корнях растений, а в других частях растений (листьях чая и овощной культуре *S. androgynus*) они находятся на уровне ПДК и ниже;

— в образцах чайного дерева наблюдалось повышенное по сравнению с другими изученными растительными образцами содержание элемента серебра, который необходим для нормального функционирования всех органов и повышения иммунзащитной реакции человека [8];

— аккумуляция Zn в овощной культуре *S. androgynus* больше в 10 и более раз по сравнению с другими растениями, изученными нами и другими авторами [9, 10]. Овощная культура *Sauropus androgynus*, популярная в традиционной кухне Юго-Восточной Азии, содержит разные необходимые человеку биологические вещества [11, 12] и микроэлементы (Cu, Fe, Mg, Zn), но повышенная аккумуляция в ней Zn (по нашим данным) и алкалоида папаверина [11] требует ограничивать ежедневный объем потребления ее в пищу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано распределение микроэлементов в чайном дереве (*Camellia sinensis*), кукурузе (*Zea Mays* L), овощной культуре (*Sauropus androgynus*) и траве ветивер (*Vetiveria zizanioides* (L.) Нэш). С помощью рентгенофлуоресцентного, гамма-активационного и трекового методов анализа на установках ЛЯР ОИЯИ в исследованных растительных образцах определено содержание 22 элементов.

Аккумуляция Zn в овощной культуре *S. androgynus* в 16 раз больше, чем в почве, на которой произрастало растение, при этом аккумуляция Zn в данной культуре значительно больше по сравнению с многими растениями, изученными нами и другими авторами [8, 9], что дает возможность использовать данное растение как биоиндикатор на загрязнение почвы цинком, а также применять его в качестве естественного очистителя почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щеглова А. И., Цветновой О. Б. Грибы — биоиндикаторы техногенного загрязнения // Природа. 2002. № 11. С. 39–46.
2. *Luu Viet Hung et al.* Uranium Uptake of *Vetiveria zizaniodes* Nash. JINR Commun. E18-2010-71. Dubna, 2010. 10 p.
3. *Виноградов А. П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1950. 279 с.
4. *Маслов О. Д., Густова М. В.* Многокомпонентный инструментальный гамма-активационный анализ почв и других объектов окружающей среды на токсичные и сопутствующие элементы. Стандарт предприятия СТП 105-2004. Дубна: ОИЯИ, 2004. 15 с.
5. *Маслов О. Д., Густова М. В., Молоканова Л. Г.* Многокомпонентный инструментальный рентгенофлюоресцентный анализ почв и других объектов окружающей среды на токсичные и сопутствующие элементы. Стандарт предприятия СТП 104-2002. Дубна: ОИЯИ, 2002. 15 с.
6. *Гангский Ю. П., Марков В. Н., Перельгин В. П.* Регистрация и спектрометрия осколков деления. М., 1981. С. 150–156.
7. *Бгатов А. В.* Биогенная классификация химических элементов // Философия науки. 1999. № 2(6).
8. Применение препаратов серебра в медицине: <http://www.medelectronics.ru/statji/lechser/3gl.shtml>
9. *Aksoy A., Sahun U.* Robinia Pseudo-acacia L. as a Possible Biomonitor of Heavy Metal Pollution in Kayseri // Turk. J. Bot. 2000. V. 24. P. 279–284.
10. *Gabriella M., Attila A.* Phytoremediation Study: Factors Influencing Heavy Metal Uptake of Plants // Acta Biologica Szegediensis. 2005. V. 49(1–2). P. 69–70; <http://www.sci.u-szeged.hu/ABS/2005/Acta%20HP/4969.pdf>
11. *Andarwulana N. et al.* Flavonoid Content and Antioxidant Activity of Vegetables from Indonesia // Food Chemistry. 2010. V. 121(4,15). P. 1231–1235.
12. *Padmavathi P., Prabhakara M.* Nutritive Value of *Sauropus androgynus* Leaves // Plant Food for Human Nutrition. Kluwer Acad. Publ., 1990. V. 40. P. 107–113; <http://www.springerlink.com/content/u816v28773017917/fulltext.pdf>

Получено 21 сентября 2010 г.