

УДК 550.846; 550.40

ПЛУТОНИЙ В НЕКОТОРЫХ ТИПАХ ТРАВЯНИСТОЙ И КУСТАРНИЧКОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Черненко Е.В., Рихванов Л.П., Барановская Н.В.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: scain@rambler.ru

Проведен анализ динамики содержания ^{239}Pu и ^{238}Pu в чернике обыкновенной (*Vaccinium myrtillus*) и лабазнике вязолистном (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim) юга Западной Сибири. Установлены уровни активности изотопов плутония до 1945 года (доядерный период времени), в период ядерных испытаний в атмосфере и в современный период времени. Учитывалась различная техногенная нагрузка для различных регионов юга Западной Сибири. Установлены различные тенденции в накоплении изотопов плутония растительностью для Томской области, Республики Алтай, обусловленные наличием плутониевого производства в Томской области. Зафиксирован «пятнистый» (не повсеместный) характер выпадения плутония на поверхность и, соответственно, загрязнения растительности. По результатам измерения удельных активностей изотопов плутония в растительности отмечаются более высокие отношения $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, чем принято считать для почвы, донных отложений и воды.

Ключевые слова: плутоний, ^{239}Pu , ^{238}Pu , черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*), лабазник вязолистный (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim), Западная Сибирь, Республика Алтай, Томская область, ядерный техногенез

PLUTONIUM IN SEVERAL PLANT SPECIES SOUTH OF WESTERN SIBERIA

Chernenkaya E.V., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V.

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: scain@rambler.ru

The analysis of the dynamics of the content of ^{239}Pu and ^{238}Pu in blueberries (*Vaccinium myrtillus*) and meadowsweet (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim) south of Western Siberia. Established levels activity of plutonium isotopes before 1945 (pre-nuclear period of time), during the period of nuclear tests in the atmosphere and in the modern period. Take into account different technogenic load for different regions of the south of Western Siberia. Set different trends in the accumulation of plutonium isotopes in blueberries (*Vaccinium myrtillus*) for the Tomsk region and meadowsweet (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim) for the Altai Republic caused by the presence of plutonium production in the Tomsk region. Fixed «spotty» character of fallout plutonium to the surface and thus the pollution of plants. Analyses of the specific activities of plutonium isotopes in plants have higher ratio of $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, than is considered for soil, sediment and water. This requires further research.

Keywords: plutonium, ^{239}Pu , ^{238}Pu , blueberries (*Vaccinium myrtillus*), meadowsweet (*Filipendula Ulmaria* (L) Mahim), Western Siberia, Altai Republic, Tomsk region, the dynamics of nuclear technogenesis

Плутоний – это искусственный, созданный человеком радионуклид, который появился в 1940 г. и дал наряду с ^{235}U начало эре ядерного оружия [13]. Плутоний в окружающей среде является огромной экологической проблемой из-за наличия его долгоживущих изотопов в десятки тысяч лет (^{239}Pu , ^{240}Pu многие тысячи лет) и биологического периода полураспада, что делает его высоко радиотоксичным [11, 13].

Основными источниками поступления плутония в окружающую среду были испытания ядерного оружия в атмосфере в 1945–1970 гг., аварии на атомных станциях, деятельность предприятий ядерно-топливного цикла по переработке ядерного топлива, аварии спутников [8, 11].

На территории Сибири помимо глобальных выпадений плутония существуют еще и локальные источники его поступления в природные среды. Таковыми являлись Сибирский химический комбинат (СХК) и Горно-химический комбинат (ГХК), на ко-

торых осуществлялся практически полный цикл ядерных производств [3, 8, 15].

Общеизвестно, что растительность, как биоиндикатор, отражает поступление химических элементов в природную среду из почвы и атмосферы. Существует большое количество исследований как российских, так и зарубежных ученых по уровню накопления изотопов плутония в различных природных средах, в том числе в растительности [1, 5, 7, 9, 10, 14, 17, 18, 20]. В своем большинстве они показывают, что массовое накопление плутония происходит в период испытания ядерного оружия.

Цель исследования – изучить активность изотопов ^{239}Pu и ^{238}Pu в гербарных и современных сборах некоторых видов растительности юга Западной Сибири. Для территории юга Сибири информация по удельной активности изотопов плутония практически отсутствует. Это особенно актуально для территории Томской области, где с 1955 года работает завод

в составе Сибирского химического комбината по наработке оружейного плутония [8]. При этом существенный интерес представляет получение сравнительной информации по накоплению плутония в растительности в разных временных периодах ее сбора: доядерном (до 1945 г.), ядерном (1945–1963 гг.), современном (1964 – по настоящее время).

Материалы и методы исследования

Для того чтобы получить данные по материалам прошлых лет, было принято решение использовать гербарные материалы. Были отобраны образцы растений с 1901 по 1985 гг. в гербариях им. П.Н. Крылова «НИ Томского государственного университета» – 5 образцов, и Центрального Сибирского Ботанического сада СО РАН – 10 образцов. В точках сбора гербарного материала авторами были отобраны эти же виды растений в 2012 г. Всего на содержание плутония было проанализировано 17 образцов растительного материала, из них 4 пробы – черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*), 13 проб лабазник вязолистный (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim). Схема размещения проб показана на рис. 1.

Пробоподготовка к альфа-спектрометрическому анализу на содержание ^{239}Pu и ^{238}Pu проводится поэтапно, по многоступенчатым положениям утвержденных методик НСАМ № 406-ЯФ и НСАМ № 407-ЯФ с электролитическим осаждением изотопов плутония прибором Gwinstek GPC-3060 D на стальную подложку с заранее измеренным фоном. Методики утверждены Федеральным научным центром лабораторных исследований и сертификации минерального сырья ВИМС от 31.03.1999 г., центром метрологии ионизирующих излучений ГНМЦ ВНИИФТРИ Госстандарта РФ от 19.08.1999 г. После электроосаждения высушенная подложка помещается для анализа в ионизационную импульсную камеру альфа-спектрометра фирмы ORTEC. Обработка результатов производится в программе AlphaVision 5.3.

Для обеспечения внутреннего контроля измерения одной пробы проводилось 3 раза в разных камерах альфа-спектрометра. Внешний контроль качества измерений проведен лабораторией изотопных методов анализа ВИМС (г. Москва). Результаты показали удовлетворительную сходимость.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные данные по активности изотопов плутония представлены в табл. 1.

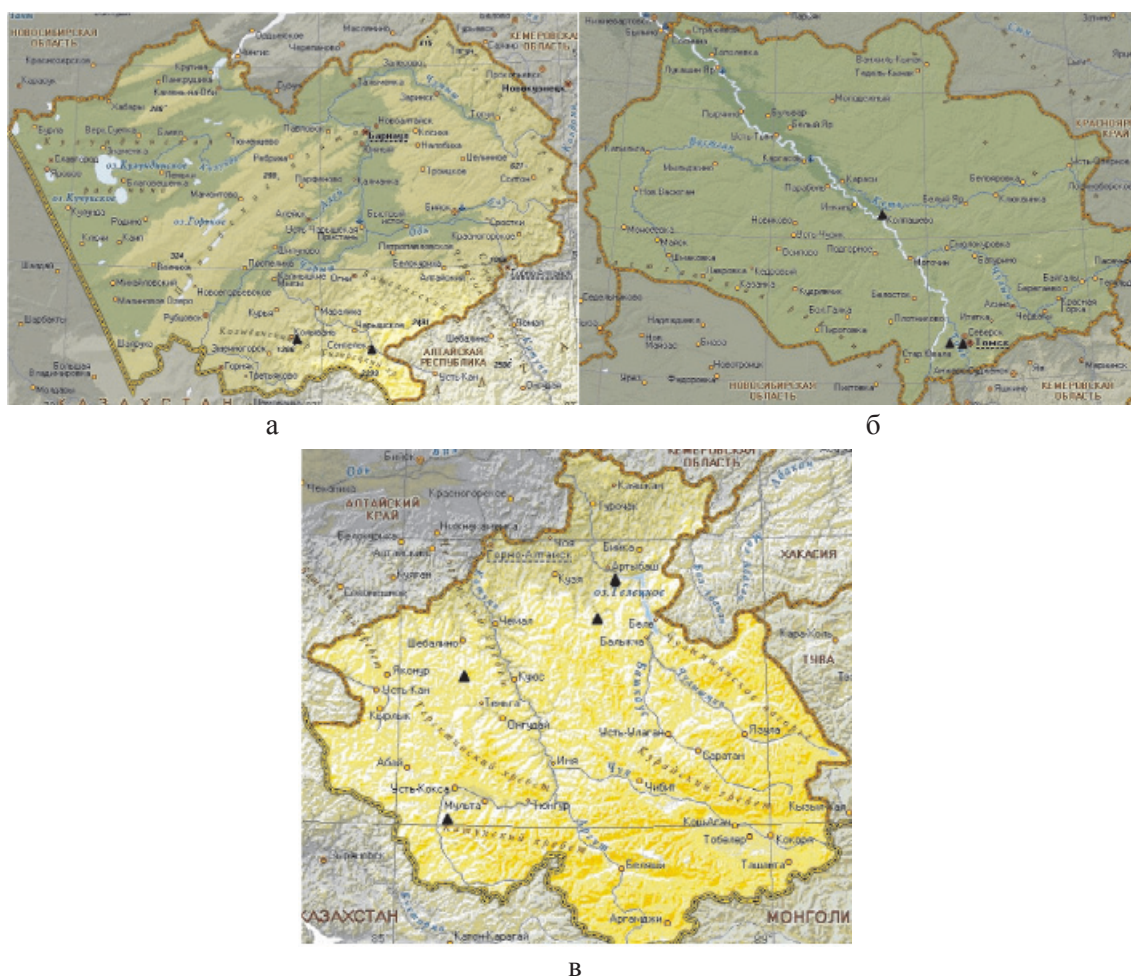


Рис. 1. Схема размещения проб гербарного и современного растительного материала для анализа: а – Республика Алтай; б – Томская область; в – Алтайский край

Таблица 1

Удельная активность ^{239}Pu и ^{238}Pu в чернике обыкновенной и в лабазнике вязолистном территории Томской области и Алтайского края и Республики Алтай

Место отбора	Материал, надземная часть	Год	Активность Pu-239, Бк/кг	Активность Pu-238, Бк/кг	Количество измерений, шт.
Томская область					
п. Тимирязево	черника	1933	< 0,02	< 0,02	3
		1947	< 0,02	< 0,02	3
		1962	0,29	0,47	3
		2012	0,15	0,06	3
д. Березкино	лабазник	1948	< 0,02	< 0,02	3
г. Колпашево		1912	< 0,02	< 0,02	3
Алтайский край и Республика Алтай					
Окрестности Колыванского завода	лабазник, надземная часть	1901	< 0,02	< 0,02	3
Усть-Канский район, Семинский хребет		1902	< 0,02	< 0,02	3
Усть-Коксинский район, Катунский хребет		1913	< 0,02	< 0,02	3
Оз. Телецкое		1948	< 0,02	< 0,02	3
Усть-Канский район, Семинский хребет		1951	0,61	0,17	3
Чарышский район, д. Сентелек		1955	< 0,02	< 0,02	3
Усть-Коксинский район, Катунский хребет		1956	0,27	0,72	3
Бассейн р. Уймень, долина р. Кележе		1961	< 0,02	< 0,02	3
Усть-Канский район, Семинский хребет		1984	< 0,02	< 0,02	3
Усть-Коксинский район, Катунский хребет		1985	< 0,02	< 0,02	3

Анализ этих материалов показывает, что в гербарных сборах всех видов растительности, отобранной в доядерный период, активность изотопов плутония находится на уровне ниже предела определения используемой методики (0,01–0,02 Бк/кг).

В период ядерных испытаний в атмосфере (50–60-е гг.), а в районе размещения предприятий ЯТЦ отмечаются более высокие уровни накопления изотопов плутония в рассмотренных типах растительности (рис. 2, 3).

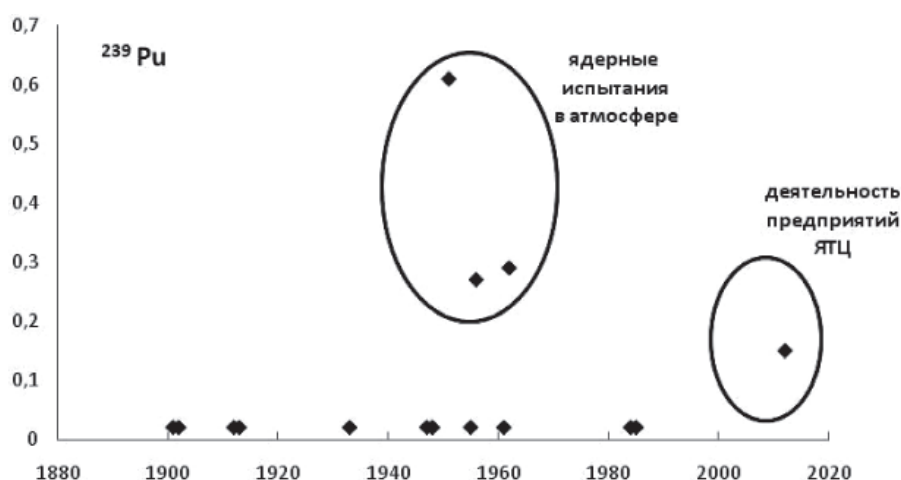


Рис. 2. Динамика удельной активности ^{239}Pu в составе черники (*Vaccinium myrtillus*) и лабазника (*Filipendula Ulmaria (L) Maxim*) территории юга Западной Сибири, Бк/кг сухого вещества



Рис. 3. Динамика удельной активности ^{238}Pu в составе черники (*Vaccinium myrtillus*) и лабазника (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim) территории юга Западной Сибири, Бк/кг сухого вещества

По техногенной радиационной нагрузке Томская область и Республика Алтай существенно различаются. На территории Республики Алтай отсутствуют производства, на которых используются материалы, содержащие плутоний [4, 8]. На современную радиационную обстановку в регионе в наибольшей степени оказывают влияние прошлые локальные выпадения долгоживущих радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239, 240}\text{Pu}$), поступивших при наземных и воздушных ядерных взрывах на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) в 1949–1962 гг. и на полигоне Лобнор в 1970–1980 гг. [4, 6, 9, 10]. Следует отметить, что выпадения имеют «пятнистый» характер и зависят от орографических и климатических особенностей региона [9].

Аналогичная ситуация установлена нами и для лабазника вязолистного, отобранного в районах Семинского и Катунского хребтов (рис. 4 и 5).

Выявлено, что динамика содержания плутония в составе лабазника хорошо коррелирует со временем интенсивных ядерных испытаний в атмосфере на расположенном на сопредельной территории Семипалатинском испытательном полигоне. Поступление плутония в состав лабазника приходится на 1951 год для территории Семинского хребта и на 1956 год для территории Катунского хребта. В сборах лабазника 1902, 1913, 1984 и 1985 годов плутоний не обнаружен. Проанализированные нами пробы лабазника в районе оз. Телецкого (07.07.1961 г.) и в районе д. Сентелек Чарышского района (21.05.1955 г.) не показали наличия в них плутония, хотя в эти годы испытания на СИП проводились и следы ядерных взрывов были обнаружены на территории республики [4, 6, 9, 10]. Этот факт может свидетельствовать о «пятнистости» (неравномерности) выпадений плутония на поверхность земли.

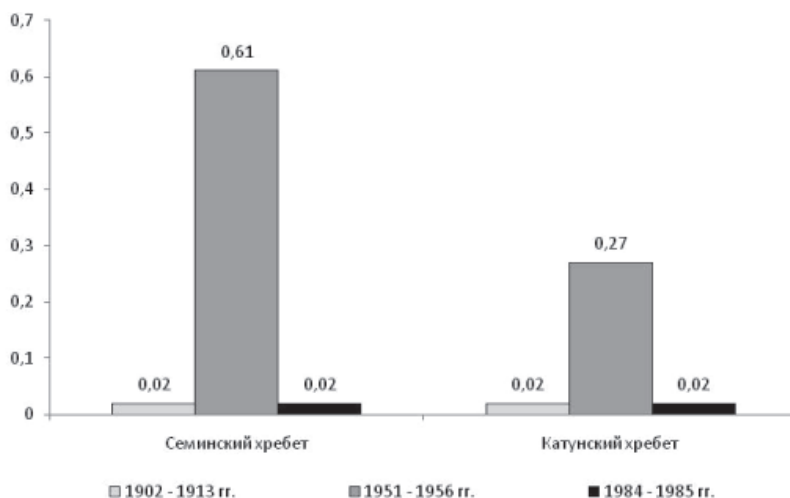


Рис. 4. Динамика содержания ^{239}Pu в составе лабазника (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim) с территории Семинского и Катунского хребтов Республики Алтай, Бк/кг сухого вещества

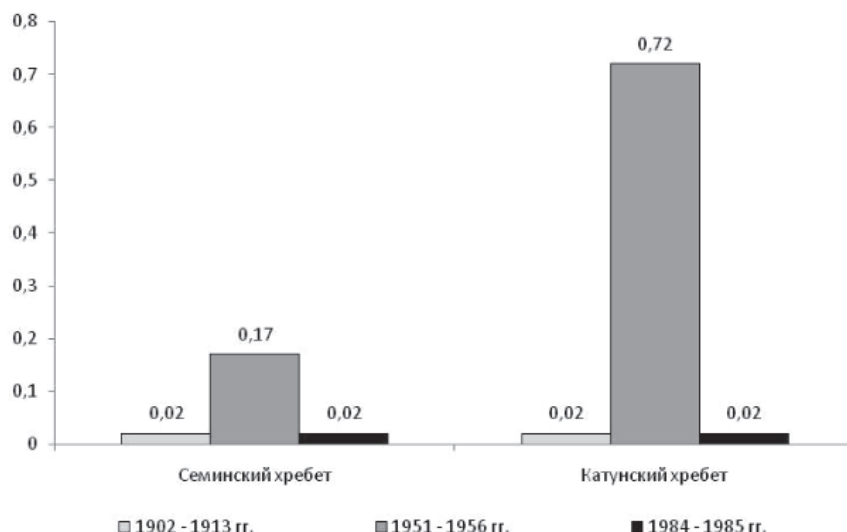


Рис. 5. Динамика содержания ^{238}Pu в составе лабазника (*Filipendula Ulmaria (L) Maxim*) с территории Семинского и Катунского хребтов Республики Алтай, Бк/кг сухого вещества

Кардинально иная ситуация в отношении уровня активности изотопов плутония в составе растительности наблюдается в Томской области (рис. 6). Это, на наш взгляд, обусловлено тем, что на данной территории функционирует с 1955 года плутониевое производство. Его присутствие в этом районе фиксируется во многих средах (почва, донные отложения, торф и др.) [1, 2, 3, 5, 8, 15].

В проанализированных образцах черники, отобранных в районе п. Тимирязево близ г. Томска, присутствие плутония устанавливается не только в ядерный период (сбор 1962 года), но и в современных сборах 2012 года.

Таким образом, устанавливается, что для растительности Республики Алтай и Томской

области наблюдаются принципиально различные тенденции в накоплении плутония. В районе, где содержание плутония обусловлено только глобальными выпадениями, содержание плутония в растительности устанавливается только в растительных сборах ядерного периода (1945–1963 гг.), а в районе, где функционирует предприятие ЯТЦ, содержание плутония в растительности фиксируется и в современном периоде времени (рис. 7).

При изучении плутония в природных средах обращается внимание на соотношение его изотопов, например, ^{238}Pu к ^{239}Pu , что позволяет установить вероятный источник его поступления [11, 16].

Отношение $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ в составе черники обыкновенной и лабазника вязолистного показано в табл. 2 и рис. 8.

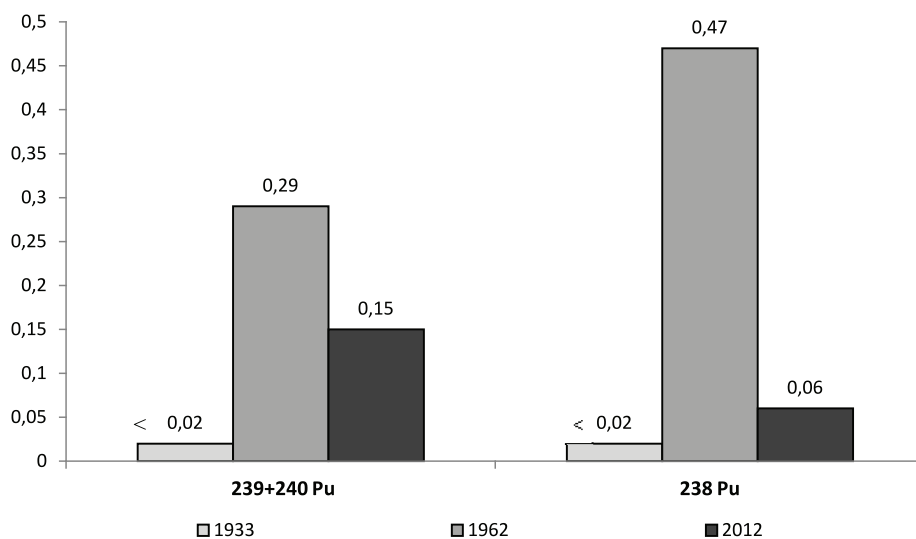


Рис. 6. Динамика содержания ^{239}Pu и ^{238}Pu в составе черники (*Vaccinium myrtillus*), собранной в районе п. Тимирязево Томской области в разные годы, Бк/кг сухого вещества

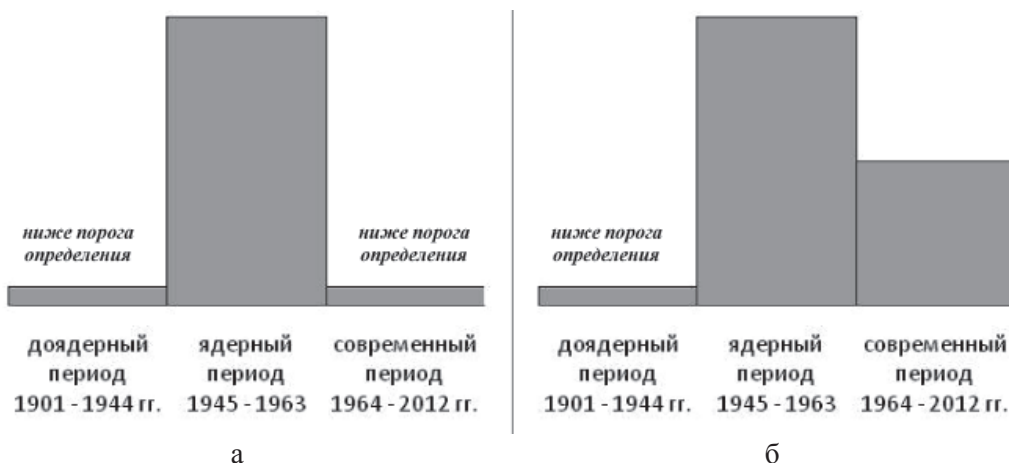


Рис. 7. Обобщенная сравнительная диаграмма поступления плутония в растительность в районах с отсутствием ядерных производств (а) и в районе с предприятием ядерно-топливного цикла (б)

Таблица 2

Отношение $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ в составе черники (*Vaccinium myrtillus*) и лабазника вязолистного (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim)

Материал \ Год	Отношение $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$			
	Республика Алтай		Томская область	
	Семинский хребет	Катунский хребет	п. Тимирязево	
	1951	1956	1962	2012
<i>Vaccinium myrtillus</i>	–	–	1,62	0,4
<i>Filipendula Ulmaria</i> (L) Maxim	0,28	2,67	–	–

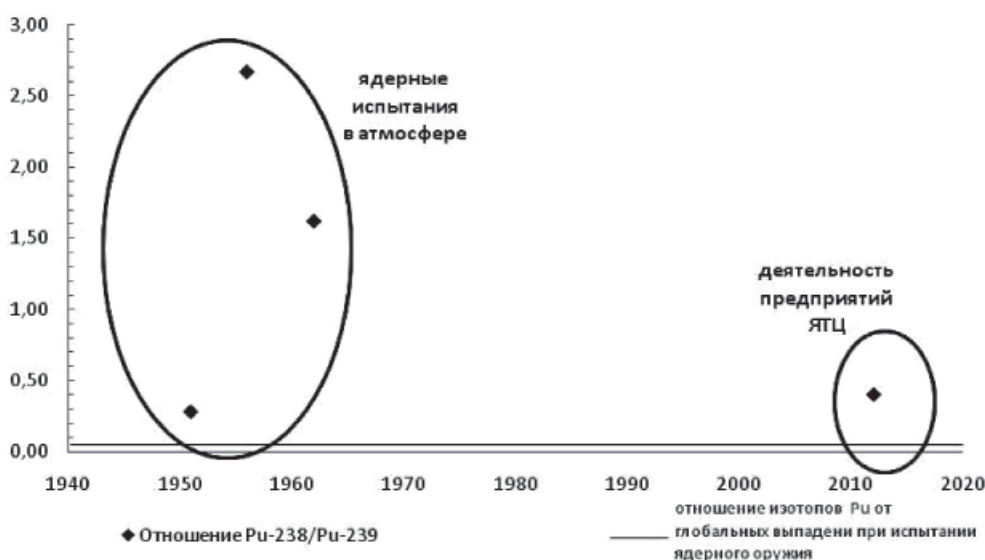


Рис. 8. Отношение $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ в составе черники (*Vaccinium myrtillus*) и лабазника вязолистного (*Filipendula Ulmaria* (L) Maxim)

В сборах растительности отмечаются более высокие отношения $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ (от 0,28 до 2,67), чем принято считать для глобальных выпадений от испытания ядерного

оружия в атмосфере. Общепринятая величина отношения $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ изменяется от 0,02 до 0,04 и установлена для почв, донных отложений, льда и воды (Wan, Druffel, Peter

и мн. др.). Такая величина отношения изотопов обусловлена глобальными выпадениями плутония, поступившего в окружающую среду при испытании ядерного оружия в атмосфере [16].

Наблюдаемые нами высокие отношения $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ можно объяснить, на наш взгляд, более высокой подвижностью ^{238}Pu по отношению к ^{239}Pu в живом веществе. Так, в работе W.R. Schell на основе повышенных отношений ^{238}Pu и ^{239}Pu сделано заключение о преимущественной подвижности ^{238}Pu [19]. Такой вывод обусловил появление гипотезы о быстром истощении вещества с высокой удельной активностью ^{238}Pu , что и служит причиной повышенной растворимости. В опытах по выращиванию растений на гидропонных растворах, содержащих плутоний, было доказано, что растения могут эффективно накапливать растворимый плутоний [14]. К тому же в работе польских ученых показано, что у ^{238}Pu фактор передачи (коэффициент биологического поглощения) в живом веществе значительно выше, чем у ^{239}Pu [20].

Выводы

Выполненные исследования по удельной активности изотопов плутония в кустарничковой (черника обыкновенная) и травянистой (лабазник вязолистный) растительности юга Западной Сибири показали:

1. Измеряемо значимые активности ^{239}Pu и ^{238}Pu обнаруживаются в гербарных сборах растительности, отобранных в период с 1945 по 1963 год на всех характеризуемых территориях, тогда как в период доядерного техногенеза (до 1945 года) они не обнаруживаются на детектируемом уровне измерения.

2. В современный временной период изотопы Pu обнаруживаются только в Томском регионе на уровне 0,15 Бк/кг ^{239}Pu и 0,06 Бк/кг ^{238}Pu , что с высокой долей вероятности объясняется функционированием в этой местности плутониевых производств на Сибирском химическом комбинате.

3. Отношение изотопов ^{238}Pu к ^{239}Pu для растительности юга Западной Сибири колеблется от 0,3 до 2,7 в материале гербарных сборов, характеризующих ядерный временной период. В Томском районе в современный период этот показатель составляет 0,4. Эти показатели значительно выше, чем показатели этого отношения, взятые за характеристику глобальных аэрозольных выпадений от испытания ядерного оружия в атмосфере около 0,02–0,04 при изучении почв, донных отложений, льда, воды.

Это, как нам представляется, обусловлено спецификой миграции и накопления ^{238}Pu в живом веществе.

Авторы выражают благодарность сотрудникам «НИ Томского государственного университета»: заведующей гербарием им. П.Н. Крылова, д.б.н., профессору кафедры ботаники И.И. Гуреевой; д.б.н., профессору кафедры экологического менеджмента М.В. Олоновой; старшему лаборанту гербария им. П.Н. Крылова Н.В. Курбатской; а также сотрудникам Центрального сибирского ботанического сада СО РАН старшему научному сотруднику к.б.н. И.Г. Боярских и научному сотруднику С.А. Красниковой за помощь в организации отбора проб гербарного материала.

Список литературы

1. Архангельская Т.А. Ретроспективная оценка радиологической ситуации по результатам исследования годовых колец срезов деревьев: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2004.
2. Агурова В.П. Плутоний в почвах Красноярского края: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Красноярск, 2001.
3. Берчук В.Ю., Рихванов Л.П., Готье-Ляфай Ф. Уровни накопления и характер распределения лантаноидов и трансурановых элементов в вертикальном разрезе пойменных почв протоки Чернильшиково р. Томи // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 170–178
4. Кац В.Е., Патрин А.А. Изучение последствий ядерных испытаний и антропогенного загрязнения окружающей среды на территории республики: Отчет о НИР. – Майма: ГП «Алтай-Гео», 1993.
5. Межибор А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2009.
6. Мешков Н.А., Вальцева Е.А., Аветисов Г.М. и др. Медико-социальные последствия ядерных испытаний: монография. – М.: Воентехиниздат, 2003. – 398 с.
7. Молчанова И.В., Михайловская Л.Н., Позолотина В.Н. и др. Техногенные радионуклиды в почвах восточно-уральского радиоактивного следа и их накопление растениями различных таксономических групп // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2014. – т. 54, № 1. – С. 77–84.
8. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
9. Рихванов Л.П., Робертус Ю.В. Некоторые особенности радиоактивного загрязнения территории Горного Алтая // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: матер. IV Межд. конфер. – Томск: «Тандем-Арт», 2004. – С.769–771.
10. Робертус Ю.В. Радиоэкологическая обстановка на территории Республики Алтай // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: матер. IV Межд. конфер. – Томск, 2013. – С. 456–460.
11. Трансурановые элементы в окружающей среде: пер. с англ. / под ред. У.С. Хэнсона. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 344 с.
12. Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В. и др. Особенности радиационной обстановки на Урале. – Екатеринбург, 2004.
13. Эмсли Дж. Элементы: пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 256 с.

14. Delaney M.S., Francis C.W. The relative uptake of Pu (IV) and Pu (VI) oxidation states from water by bushbeans / Health Phys. – 1978. – 34. – P. 492–494.

15. Gauthier-Lafaye F., Pourcelot L., Eikenberg J et. al. Radioisotop contaminations from releases from the Tomsk-Seversk nuclear facility (Siberia, Russia // J. Environ. Radioactiv. – 2007. – Vol. 98. – P. 301–314.

16. Hardy E.P., Krey P.W., Volchok H.L. Global inventory and distribution of fallout plutonium / Nature 241. – 1973. – C. 444–445.

17. Outola L. Effect of industrial pollution on the behaviour of ^{239,240}Pu, ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs in forest ecosystems: academic dissertation. – Helsinki, 2002. – 46 c.

18. Reimann C., Koller F., Frengstad B. Comparison of the element composition in several plant species and their substrate from a 1 500 000-km² area in Northern Europe // The Science of the Total Environment 278 (2001). – C. 87–112.

19. Schell W.R., Lowman F.G., Marshall R.P. «Geochemistry of transuranic elements at Bikini atoll» / Transuranic elements in the environment (Hanson W.C., Ed.), Rep. DOE/TIC-22800, Technical information centre, US Department of Energy, Oak Ridge, TN, 1980.

20. Skwarzec B., Boryło A., Prucnal M. и др. Accumulation of Uranium (²³⁴U and ²³⁸U) and Plutonium (²³⁹+²⁴⁰Pu) in Cervid Tissues and Organs / Polish J. of Environ. Stud. – 2010. – Vol. 19, № 4. – C. 771–778.

References

1. Arhangel'skaja T.A. Retrospektivnaja ocenka radiojeko-logicheckoj situacii po rezul'tatam issledovanija godovyh kolec srezov derev'ev: avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk. Tomsk, 2004.

2. Aturova V.P. Plutonij v pochvah Krasnojarskogo kraja: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Krasnojarsk, 2001.

3. Berchuk V.Ju., Rihvanov L.P., Got'e-Ljafaj F. Urovni nakoplenija i harakter raspredelenija lantanoidov i transuranovyh jelementov v vertikal'nom razreze pojmennyh pochv protoki Chernil'shnikov r. Tomi // Izzvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2012. T. 320. no. 1. pp. 170–178

4. Kac V.E., Patrin A.A. Izuchenie posledstvij jadernyh ispytanj i antropogennogo zagryznenija okruzhajushhej sredy na territorii respublik: Otchet o NIR. Majma: GP «Altaj-Geo», 1993.

5. Mezhibor A.M. Jekogeohimija jelementov-primesej v verhovyh torfah Tomskoj oblasti: avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk. Tomsk, 2009.

6. Meshkov N.A., Val'ceva E.A., Avetisov G.M. i dr. Mediko-social'nye posledstvija jadernyh ispytanj: Monografija. M.: Voentehinzdat, 2003. 398 p.

7. Molchanova I.V., Mihajlovskaja L.N., Pozolotina V.N. i dr. Tehnogennye radionuklidy v pochvah vostochno-ural'skogo radioaktivnogo sleda i ih nakoplenie rastenijami razlichnyh taksonomicheskikh grupp // Radiacionnaja biologija. Radiojekologija. 2014. t. 54, no. 1. pp. 77–84.

8. Rihvanov L.P. Obshhie i regional'nye problemy radiojeko-logii. Tomsk: Izd-vo TPU, 1997. 384 p.

9. Rihvanov L.P., Robertus Ju.V. Nekotorye osobennosti radioaktivnogo zagryznenija territorii Gornogo Altaja // Radio-

aktivnost' i radioaktivnye jelementy v srede obitanija cheloveka: mater. IV Mezhd. konfer. Tomsk: «Tandem-Art», 2004. pp.769–771.

10. Robertus Ju.V. Radiojeko-logicheskaja obstanovka na territorii Respubliki Altaj // Radioaktivnost' i radioaktivnye jelementy v srede obitanija cheloveka: mater. IV Mezhd. konfer. Tomsk, 2013. pp. 456–460.

11. Transuranovyje jelementy v okruzhajushhej srede: per. s angl. / pod red. U.S. Hjensona. M.: Jenergoatomizdat, 1985. 344 p.

12. Utkin V.I., Chebotina M.Ja., Evstignejev A.V. i dr. Osobennosti radiacionnoj obstanovke na Urale. Ekaterinburg, 2004.

13. Jemsi Dzh. Jelementy: per. s angl. M.: Mir, 1993. 256 p.

14. Delaney M.S., Francis C.W. The relative uptake of Pu (IV) and Pu (VI) oxidation states from water by bushbeans / Health Phys. 1978. 34. pp. 492–494.

15. Gauthier-Lafaye F., Pourcelot L., Eikenberg J et. al. Radioisotop contaminations from releases from the Tomsk-Seversk nuclear facility (Siberia, Russia // J. Environ. Radioactiv. 2007. Vol. 98. pp. 301–314.

16. Hardy E.P., Krey P.W., Volchok H.L. Global inventory and distribution of fallout plutonium / Nature 241. 1973. pp. 444–445.

17. Outola L. Effect of industrial pollution on the behaviour of ^{239,240}Pu, ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs in forest ecosystems: academic dissertation. Helsinki, 2002. 46 p.

18. Reimann C., Koller F., Frengstad B. Comparison of the element composition in several plant species and their substrate from a 1 500 000-km² area in Northern Europe // The Science of the Total Environment 278 (2001). pp. 87–112.

19. Schell W.R., Lowman F.G., Marshall R.P. «Geochemistry of transuranic elements at Bikini atoll» / Transuranic elements in the environment (Hanson W.C., Ed.), Rep. DOE/TIC-22800, Technical information centre, US Department of Energy, Oak Ridge, TN, 1980.

20. Skwarzec V., Boryło A., Prucnal M. i dr. Accumulation of Uranium (²³⁴U and ²³⁸U) and Plutonium (²³⁹+²⁴⁰Pu) in Cervid Tissues and Organs / Polish J. of Environ. Stud. 2010. Vol. 19, no. 4. pp. 771–778.

Рецензенты:

Язиков Е.Г., д.г.-м.н., профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

Адам А.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой экологического менеджмента Биологического института, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Работа поступила в редакцию 02.03.2015.