

УДК 581:502

О. Л. Воскресенская, А. В. Леухин, В. С. Воскресенский, А. Р. Сазонов
O. L. Voskresenskaya, A. V. Leukhin, V. S. Voskresenskiy, A. R. Sazonov

Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола
Mari State University, Yoshkar-Ola

НАКОПЛЕНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНАХ ТУИ ЗАПАДНОЙ,
ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

ACCUMULATION AND DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES IN THE BODIES OF THE AMERICAN
ARBORVITAE GROWING IN THE URBAN ENVIRONMENT

В статье отражены результаты исследований по содержанию и накоплению природных и техногенных радионуклидов в растениях туи западной (*T. occidentalis* L.), произрастающих в экологически разных районах г. Йошкар-Олы. Отмечено, что различные органы данного вида (хвоя, побеги, корни) характеризуются неодинаковым содержанием исследуемых радиоэлементов. У растений, произрастающих в загрязненных районах города, отмечается более высокое содержание естественных радионуклидов.

The paper presents the results of studies on the content and accumulation of natural and anthropogenic radionuclides in the American arborvitae (*T. occidentalis* L.), growing in environmentally different areas in Yoshkar-Ola. It is noted that the various organs of this type (needles, stems, roots), are characterized by unequal content of the studied radioelements. Plants growing in environmentally unfriendly areas of the city, are higher in natural radionuclides.

Ключевые слова: антропогенное загрязнение, туя западная, природные (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) и техногенные (^{137}Cs , ^{90}Sr) радионуклиды.

Key words: anthropogenic pollution, *Thuja occidentalis*, natural (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs , ^{90}Sr) radionuclides.

Сохранение биосферных функций городских экосистем и создание экологически благоприятной среды является одной из важнейших проблем современности. Особую ценность для городской среды представляют хвойные растения, обладающие высокой декоративностью, фитонцидностью и неприхотливостью к условиям произрастания. Среди них можно отметить тую западную, которая не только отличается высокими декоративными качествами, но и способна противостоять действию токсичных газов, устойчива к рекреационным нагрузкам, загазованности, запыленности и хорошо переносит обрезку. Туя западная (*T. occidentalis*) является одним из ценнейших растений в озеленении и достаточно широко используется в посадках г. Йошкар-Олы [2; 14].

Находящиеся в почве радионуклиды переходят в растения и включаются в биологический круговорот [11]. Во время своего развития деревья могут аккумулировать значительные количества радиоактивных веществ и представляют собой естественное депо радионуклидов. Для древесного яруса характерно увеличение содержания таких долгоживущих техногенных радионуклидов, как ^{137}Cs и ^{90}Sr [4; 10]. Механизм усвоения радионуклидов корнями растений сходен с поглощением основных питательных веществ — макро- и микроэлементов.

Исследования по изучению радиоактивности проводились в аккредитованной лаборатории «Висан» Марийского государственного университета. В работе

использовался компьютеризированный гамма-, бетта-спектрометрический комплекс (сцинтилляционный блок детектирования NaI) с программным обеспечением «Прогресс-2000» [8; 9].

В ходе работы изучалось накопление и распределение радионуклидов в древесных растениях туи западной (*T. occidentalis*), произраставших в различных по уровню загрязнения районах г. Йошкар-Олы: условно чистое местообитание (лесопарковая зона) — территория Парка им. 30-летия ВЛКСМ; среднезагрязненный район (селитебная зона) — зона в жилой части города (ул. Осипенко); загрязненный район (промышленная зона) — территория ОАО «ОКБ Кристалл». Экспериментальный материал был обработан статистически с помощью программ «STATISTICA».

Общие закономерности радиационного воздействия на растительные организмы подробно рассмотрены в фундаментальном издании Д. М. Гродзинского «Радиобиология растений» [5]. Однако, мало работ, связанных с проведением мониторинговых исследований по содержанию радионуклидов в растениях-интродуцентах, к которым относится туя западная. В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с аккумуляцией естественных (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) и искусственных (^{137}Cs , ^{90}Sr) радионуклидов у туи западной, произрастающей в антропогенно-измененной среде. При этом особое внимание уделяется специфике накопления радиоэлементов в отдельных органах (листьях, побегах и корнях), а также в организме в целом.

Хвоя деревьев является часто используемым объектом радиологического мониторинга качества среды. Отбирая хвою деревьев для анализа необходимо знать о возможных различиях в концентрации элементов в ней в зависимости от возраста хвоинок, экологических особенностей произрастания деревьев и ряда других факторов [12].

Таблица 1 — Содержание ^{40}K в органах туи западной, Бк/кг

Объект исследования	Органы растений	Лесопарковая зона	Селитебная зона	Промышленная зона
Туя западная	хвоя	270,5±13,53	302,4±15,12	652,1±32,61
	побеги	320,2±16,01	480,2±24,70	711,2±35,56
	корни	303,7±15,18	320,4±16,02	673,2±33,66

Как видно из таблицы 1, содержание ^{40}K в органах туи западной характеризовалось достаточно высокими значениями и колебалось в пределах от 270,5 (хвоя, лесопарковая зона) до 711,2 Бк/кг (побеги, промышленная зона). При этом самые высокие показатели были у особей *T. occidentalis*, произраставших в промышленной зоне города. Следует обратить внимание на тот факт, что разные органы исследуемого вида, т. е. хвоя и корни, не имели статистически значимых отличий и характеризовались примерно одинаковым содержанием ^{40}K , что особенно четко видно в промышленной зоне города. Некоторая тенденция к увеличению содержания данного радионуклида отмечается у побегов туи западной.

Сравнивая изученные ранее нами виды хвойных растений [3], следует отметить, что содержание ^{40}K в *T. occidentalis* было значительно выше, особенно в лесопарковой и селитебной зонах города по сравнению с сосной обыкновенной, произрастающей в этих же районах исследования. При этом усредненные данные по содержанию радиоактивного калия у туи западной составили в: лесопарковой зоне — 300 Бк/кг, селитебной зоне — 367 Бк/кг и промышленной зоне — 678 Бк/кг. Возможно, что туя западная, как интродуцированный вид, т. е. вид, произрастающий вне своего природного ареала, имеет специфику в накоплении химических элементов, в том числе и радионуклидов. Как было показано нами ранее [2], содержание макроэлемента калия в хвое туи западной, произрастающей в различных районах г. Йошкар-Олы составило 0,5 мг/ %, а в почве — 1,46 мг/ %.

Хотя к настоящему времени накоплен весьма обширный фактический материал, касающийся поведения радионуклидов в различных экосистемах, тем не менее, расчет коэффициентов накопления в системе почва – корни и коэффициентов переноса по растению представляет собой не решенную по сей день задачу. Нами были рассчитаны коэффициенты накопления (Кн) и перемещения (Кп) радиоактивного калия в системе почва – растение. Коэффициент накопления определяется доступностью радионуклидов для корневого поступления (усвоения) из почвы и зависит от распределения радионуклида по профилю почвы

и от формы нахождения радионуклида в почве, особенно доли водорастворимых и обменных форм радионуклидов. Как показали результаты работы, для туи западной, произрастающей в различных районах города Йошкар-Олы, Кн изменялся в незначительных пределах (0,3–0,5). Это говорит о том, что уровень содержания ^{40}K в почве был выше, чем в корнях исследуемых растений. Таким образом, данный представитель древесной урбанофлоры (туя западная) не является активным накопителем радиоактивного калия.

Коэффициент перемещения характеризуется интенсивностью поступления радиоэлементов из корней в листья (хвою). При значениях Кп ниже 1, можно говорить о корневом пути поступления радиоэлементов в растения. При значениях больше 1, т. е. когда радиоэлементы накапливаются больше в хвое, чем в корнях, можно говорить об аэрогенном пути поступления элементов. В наших исследованиях Кп был чуть выше 1.

Изучение содержания другого природного радионуклида ^{226}Ra в древесных растениях показало (табл. 2), что у туи западной не отмечается значительных отличий по содержанию радия в различных органах растений. Однако по мере усиления уровня загрязнения среды содержание ^{226}Ra у туи западной увеличивалось. Так, в лесопарковой зоне содержание данного элемента было около 85, в селитебной зоне — 90 и в промышленной зоне — 108 Бк/кг. Следовательно, в промышленной зоне города отмечались более высокие показатели по содержанию ^{226}Ra у *T. occidentalis*.

Таблица 2 — Содержание ^{226}Ra и ^{232}Th в органах туи западной, Бк/кг

Список видов	Органы растений	Лесопарковая зона		Селитебная зона		Промышленная зона	
		^{226}Ra	^{232}Th	^{226}Ra	^{232}Th	^{226}Ra	^{232}Th
Туя западная	хвоя	72,7±3,7	63,3±3,5	87,3±4,1	71,8±3,9	101,3±5,3	83,2±4,1
	побеги	87,5±4,4	73,5±4,7	92,7±4,8	87,3±4,4	115,6±6,2	87,3±4,7
	корни	81,1±4,5	65,3±3,8	89,3±4,1	84,5±4,6	107,8±5,1	78,4±3,2

Наиболее высокое содержание радиоактивного тория было характерно для побегов туи западной, на 15–20 % больше чем в хвое и корнях (табл. 2). Сравнивая различные районы города, следует отметить, что количество ^{232}Th у туи западной в промышленном районе г. Йошкар-Олы было достоверно выше, чем у растений лесопарковой зоны (в среднем на 30 %).

Известно, что растения легко поглощают растворимые соединения ^{232}Th . Для тория установлен «пороговый эффект», видовые и географические различия в накоплении. Среднее содержание ^{232}Th в надземной массе растений составляет 8,13±1,54 Бк/кг. Относительно высокое содержание тория обнаружено в березе круглолистной (*Betula rotundifolia*) — 50 Бк/кг, иве арктической (*Salix rhamnifolia*) — 40 Бк/кг [6].

Таким образом, содержание и накопление природных радионуклидов в древесных растениях имеет оп-

ределенные закономерности, которые в основном соответствуют физиологическим механизмам поступления и накопления других химических элементов в растениях.

В настоящее время в связи с развитием атомной промышленности, испытаниями ядерного оружия и радиационными авариями значительная часть нашей планеты в той или иной степени загрязнена радионуклидами. Выпавшие в результате локальных эмиссий или глобальных переносов радионуклиды, пройдя ряд физико-химических трансформаций, становятся неотъемлемой техногенной составляющей практически всех ландшафтов, в том числе и урбоэкосистем [13].

Древесные фитоценозы аккумулируют радионуклиды в больших количествах, по сравнению с другими природными биоценозами. Для многолетних растений загрязнение может продолжаться несколько лет. Основной процесс поступления искусственных радионуклидов в наземную часть растений — поглощение и удержание аэрозолей сухих и мокрых выпадений. Техногенные радионуклиды — это радионуклиды, появившиеся в объектах среды обитания в результате радиационных аварий прошлых лет, поступающие в почвы, грунты и грунтовые воды. Из техногенных радионуклидов нами были изучены цезий-137 и стронций-90.

Цезий-137 — один из основных дозобразующих радионуклидов среди продуктов деления в глобальных радиоактивных выпадениях. Он обуславливает около 40 % всей ожидаемой эффективной эквивалентной дозы облучения населения земного шара, формируемой всеми радионуклидами. Радиоактивные изотопы цезия относятся к группе радионуклидов, интенсивно поступающих в растения и в значительной степени накапливающихся в них. Накопление ^{137}Cs растениями зависит от типа и свойств почв и изменяется в среднем в 20–30 раз.

Изучение *T. occidentalis*, произрастающих в г. Йошкар-Оле (табл. 3), показало, что в органах туи западной отмечается достаточно высокое содержание ^{137}Cs ; это особенно хорошо заметно в побегах исследуемого вида (до 50,7 Бк/кг).

Таблица 3 — Содержание техногенных радионуклидов в органах туи западной, Бк/кг

Объект исследования	Органы растений	Лесопарковая зона		Селитебная зона		Промышленная зона	
		^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
Туя западная	хвоя	32,5±1,5	23,7±1,1	32,2±1,6	25,9±1,3	33,2±1,6	32,5±1,5
	побеги	45,6±2,2	31,2±1,5	47,5±2,3	33,9±1,6	50,7±2,5	35,2±1,7
	корни	41,3±2,1	24,3±1,2	37,2±1,8	26,5±1,3	34,1±1,7	39,3±1,9

Одной из возможностей уточнить механизмы поступления радионуклидов в растения и получить бо-

лее надежную информацию может служить привлечение материалов по биологическому круговороту радионуклидов и расчет коэффициентов накопления и перемещения. Поскольку важнейшими компонентами наземных экосистем являются почва и растительный покров, перераспределение радиоцезия между ними является процессом, определяющим скорость круговорота ^{137}Cs в экосистеме в целом. Как показали результаты нашей работы, коэффициенты накопления (Кн) у туи западной, произрастающей в условиях городской среды, в основном были выше единицы (1,8–2,2). Следовательно, через корневые системы в наземную часть древесных растений в наибольших количествах поступал ^{137}Cs и вносил основной вклад в удельную радиоактивность туи западной.

Значительная часть ^{90}Sr в выпадениях (до 85 %) находится в катионной форме и способна к быстрому обмену с окружающей средой. Этим и объясняется его значительное распространение в окружающей среде. Стронций-90 является одним из наиболее важных для радиэкологии радионуклидов [1].

Оценивая содержание ^{90}Sr у туи западной (табл. 3), произрастающих в урбоэкосистемах, следует отметить, что имеется тенденция увеличения содержания данного радионуклида в органах растений, произрастающих в более загрязненных районах. У *T. occidentalis* более высокое содержание ^{90}Sr наблюдалось в побегах. Различия в поступлении и содержании радиоактивных изотопов стронция могут быть обусловлены биологическими особенностями вида. Стронций-90 может длительно (многие годы) оставаться в обменной форме, в связи с этим хорошо усваивается растениями.

Известно, что время, в течение которого выпавший на крону радионуклид становится доступным для корней дерева, в лиственных лесах меньше, чем в хвойных. Так, 50 % выпавшего ^{90}Sr будет доступно для корневого усвоения в березовом лесу через 4–5 лет, а в сосновом — через 8–9 лет, что связано со скоростью самоочищения крон и минерализации подстилки. Накопление этого радионуклида в наземной части ели в 6–7 раз выше, чем у сосны, так как корни ели имеют поверхностное расположение в наиболее загрязненном слое почв. Наибольшее количество радионуклидов концентрируется в листьях, затем в хвое, коре, ветвях. Наименьшее количество накапливается в древесине. Среди основных радионуклидов легче всего поступает в наземную часть древесной растительности ^{90}Sr . Коэффициент накопления для ^{137}Cs на порядок ниже. Кратность различия в содержании радионуклидов в древесине не превышает 2, наибольшее содержание ^{137}Cs отмечено в древесине березы, наименьшее — в древесине сосны.

В результате изучения круговорота радионуклидов в природно-растительных комплексах показано [8], что наибольшей удельной радиоактивностью обладает нижний ярус фитоценоза (мхи, лишайники, грибы), затем идут травянистые виды, кустарнички, подлесок

и подрост. Наименьшая удельная радиоактивность характерна для древесного (верхнего) яруса фитоценоза. Это связано с особенностями биологии и строения растений. В большем количестве радионуклиды накапливаются в тех органах и тканях растений, в которых происходит интенсивный обмен веществ и относительно высокий процент белка. В одревесневших органах и тканях, играющих проводящую роль, радионуклиды накапливаются в меньших количествах.

Воздушная и почвенная среда в городе резко отличается от естественных условий, вследствие чего нарушается обмен веществ, снижается прирост, ухудшаются декоративность и сокращается период жизни деревьев. По этой причине закономерности роста, характерные для природных экосистем, отличаются от характерных для роста городских насаждений. Урбоэкосистемы — очень эффективные аккумуляторы атмосферной радиоактивности и переносчики радионуклидов через древесную растительность (крона, листья, ствол, корни и др.). Данные экосистемы характеризуются высокой задерживающей (аккумулирующей) способностью при аэральном радиоактивном загрязнении и медленным самоочищением наземной части растительного яруса.

В результате проведенных нами исследований впервые было показано распределение радиоактивных элементов в органах хвойных растений (на примере туи западной), произрастающих в антропогенно-измененной среде (г. Йошкар-Ола). Следует отметить, что хвойные деревья (туя западная) отличаются от лиственных деревьев более высокой радиочувствительностью.

Содержание радионуклидов в растениях зависит от целого ряда факторов. Основными являются: концентрация и формы нахождения радионуклидов в корнеобитаемом слое почвы; геохимические особенности радионуклидов и присутствие близких по химическим свойствам элементов; видовые особенности растений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко И. Я., Василенко О. И. Стронций радиоактивный // Энергия. — 2002. — № 4. — 236 с.
2. Воскресенская О. Л., Сарбаева Е. В. Эколого-физиологические адаптации туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в городских условиях: монография / Мар. гос. ун-т. — Йошкар-Ола, 2006. — 130 с.
3. Воскресенский В. С., Воскресенская О. Л. Влияние факторов городской среды на функциональное состояние древесных растений: монография / Мар. гос. ун-т. — Йошкар-Ола, 2011. — 195 с.
4. Воскресенский В. С. Изучение содержания радионуклидов в почвах городских и природных территорий // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер. «Экология и безопасность жизнедеятельности» / РУДН. — 2008. — № 3. — С. 12–19.
5. Гродзинский, Д. М. Радиобиология растений. — Киев: Наукова Думка, 1989. — 300 с.
6. Егорова И. А., Кислицина Ю. В., Пузанов А. В. Особенности накопления радионуклидов в растениях Северо-Западного Алтая // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. — 2009. — № 11 (61). — С. 32–39.
7. Куликов Н. В., Молчанова И. В. Радиоэкология почвенно-растительного покрова. — Свердловск: Ин-т экологии растений и животных, 1990. — 170 с.
8. Леухин А. В., Ситников Г. А., Сазонов Р. А., Андреев А. М. Исследование содержания радионуклидов в объектах окружающей среды методом гамма- и бетаспектрометрии // Вопросы экологии, региональный аспект: материалы постоянно действующей Всерос. междисциплинарной науч. конф. с междунар. участием. — М.; Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. — Ч. 2. — С. 139–141.
9. Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс». — М.: ГП ВНИИФТРИ, 1996. — 38 с.
10. Романов Е. М., Малюта О. В., Гончаров Е. А. Оценка качества ресурсов лесопользования на радиационно-загрязненных территориях // Лесное хозяйство. — 2006. — № 4. — С. 28–30.
11. Ситников Г. А., Леухин В. А., Сазонов А. Р. Радиоэкологическое изучение территории Республики Марий Эл // Вестн. Марийского гос. ун-та. — Йошкар-Ола, 2007. — № 1(2). — С. 118–121.
12. Черненко Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. — М.: Наука, 2002. — 191 с.
13. Черных Н. А., Сидоренко С. Н. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере: монография. — М.: Изд-во РУДН, 2003. — 430 с.
14. Экология города Йошкар-Олы: научное издание / Мар. гос. ун-т; отв. ред. О. Л. Воскресенская. — Йошкар-Ола, 2007. — 300 с.: ил.