

УДК 577.4: 577.391: 504.064: 539.16

СОДЕРЖАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В *PINUS SILVESTRIS* НА СЛЕДАХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ ПОСЛЕ ПЕРВОГО НАЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ИСПЫТАНИЯ НА СЕМИПАЛАТИНСКОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ

Ларионова Н.В., Иванова А.Р., Айдарханов А.О.

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе представлены результаты исследования содержания искусственных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  в сосновом бору на участке прохождения следа радиоактивных выпадений от первого ядерного испытания (29.08.49 г.), проведенного на Семипалатинском испытательном полигоне. Установлено, что максимальные значения удельной активности в почве характерны для радионуклидов  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , менее значимые – для  $^{90}\text{Sr}$  и в единичном случае –  $^{241}\text{Am}$ . В объектах растительного происхождения, представленных структурными элементами ствола сосны (*Pinus silvestris*), в большей степени накопились  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , при этом максимальные значения удельной активности зафиксированы в коре.

**Ключевые слова:** ленточный бор, Семипалатинский испытательный полигон (СИП), ядерные испытания, искусственные радионуклиды, цезий ( $^{137}\text{Cs}$ ), стронций ( $^{90}\text{Sr}$ ), америций ( $^{241}\text{Am}$ ), плутоний ( $^{239+240}\text{Pu}$ ), почва, сосна обыкновенная (*Pinus silvestris*).

**ВВЕДЕНИЕ**

Развитие атомной энергетики и промышленности, сопровождаемое рядом аварий, катастроф и испытанием ядерного оружия, привело к поступлению искусственных радионуклидов в окружающую среду и загрязнению большинства лесных экосистем. Так, площадь лесов, подвергшихся загрязнению в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС, в России составила 11,56 тыс. км<sup>2</sup>, Республике Беларусь – 16,85 тыс. км<sup>2</sup> и в Украине – 12,32 тыс. км<sup>2</sup>. В свою очередь, первое наземное ядерное испытание на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП), осуществленное 29 августа 1949 года при неблагоприятных условиях, привело к формированию радиоактивного следа на территории ленточного соснового бора и загрязнению территории общей площадью 8,705 тыс. км<sup>2</sup>.

В мировой практике накоплено достаточно большое количество информации по вопросам миграции искусственных радионуклидов в лесных экосистемах. Исследования по распределению радионуклидов в компонентах лесных экосистем проводили Алексахин Р.М., Куликов Н.В., Молчанова И.В. [1–3], многочисленные работы выполнены Тихомировым Ф.А. [4, 5]. Развитию теоретических и экспериментальных основ биогеохимии техногенных радионуклидов в лесных ландшафтах в 30-километровой зоне отселения Чернобыльской АЭС (Украина) и наиболее загрязненных регионах Российской Федерации (Брянская, Калужская, Тульская обл.) посвящены многолетние исследования Щеглова А.И. [6]. Ряд работ, посвященных радиоэкологии леса Беларуси, пострадавшего также в результате аварии на Чернобыльской АЭС, представлен Переволоцким А.Н. [7]. Отдельные исследования, включающие оценку распределения радионуклидов по глубине почвенного профиля, изучение содержания  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , и  $^{239+240}\text{Pu}$  в хвое, коре, травянистой растительности и

подстилке, проведены и для ленточного соснового бора, загрязненного вследствие испытаний на СИП [8].

Радиоэкологические исследования в зонах радиационных аварий, проведенные непосредственно после радиоактивных выпадений, показали, что основная часть выпавших на лес радионуклидов задерживается кронами древесных растений. Коэффициент задерживания радионуклидов древесным ярусом варьирует от 20 до 100% в зависимости от целого комплекса факторов: видового состава и проективного покрытия фитоценозов, климатических условий года и периода вегетации. Вторым растительным фильтром на пути радиоактивных выпадений является травянистая растительность, произрастающая под пологом леса. Ее задерживающая способность также зависит от целого ряда факторов (проективного покрытия, величины биомассы, строения поверхности листьев).

Целью настоящего исследования являлось изучение содержания и рассмотрение распределения искусственных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  в кронах сосны обыкновенной (*Pinus silvestris*), произрастающей на территории прохождения следа от первого наземного ядерного испытания, произведенного на СИП в 1949 году.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для проведения полевых работ всего было заложено 3 исследовательские площадки, расположенные на участке прохождения следа от наземного ядерного испытания, в местах с предполагаемо повышенным уровнем радиоактивного загрязнения. Выбор площадок основывался на измерении радиационных параметров (плотности потока  $\beta$ -частиц и мощности эквивалентной дозы (МЭД)) [9].

Для оценки распределения искусственных радионуклидов в кронах основной лесообразующей породы – сосны обыкновенной (*Pinus silvestris*) в качестве

объектов исследования были выбраны пни деревьев возрастом более 60 лет. Отобранные пробы были представлены отдельными структурными элементами: кора, луб, древесина, сердцевина. Для сравнительного анализа с каждой площадки дополнительно отобраны смешанные пробы почвы (методом конверта на глубину 5 см).

Пробы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 50–60 °С. После удаления крупных камней и включений (корней растений) взвешивали на технических весах. Далее весь объем пробы тщательно перемешивали, порционно с помощью пестика истирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Затем методом квартования отбирали необходимые навески почвы для определения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и после получения данных гамма-спектрометрии отбирали навески для озонирования почвы и передачи на радиохимическое выделение анализ  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ .

Пробы структурных элементов ствола измельчали, высушивали до абсолютно сухого состояния при температуре 105 °С и размалывали на мельнице до однородной массы. Далее производили термическое концентрирование (обугливание, озонение) проб. Сухой остаток обугливали в муфельной печи или путем прокалывания на электроплитах, не допуская воспламенения образца, до получения остатка черного цвета. Далее пробы охлаждали, растирали и переносили в тигли для последующего озонения. Первоначальную температуру повышали до 200 °С в течении 50–60 минут, после чего устанавливали предельную температуру в муфельной печи: температура озонения

для дальнейшего определения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  составляла 400 °С,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  – до 500 °С. После озонения тигли с пробами охлаждались в эксикаторе. Готовую золу просеивали через сито для удаления не зольного остатка. Просеянную золу взвешивали и расчётным путём определяли коэффициент озонения.

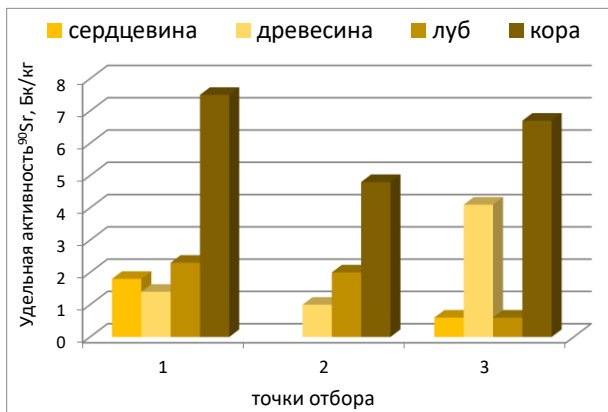
Анализы по измерению удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений проводились в соответствии с гостированными методическими указаниями на поверенной лабораторной аппаратуре [10, 11]. Определение удельной активности радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  проводилось на гамма-спектрометре Canberra GX-2020,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  определяли радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB 2900 TR и альфа-спектрометре Canberra (мод. 7401) соответственно. Погрешность измерения для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  не превышала 10–20 %, для  $^{90}\text{Sr}$  – 15–25 %,  $^{239+240}\text{Pu}$  – 30 %.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

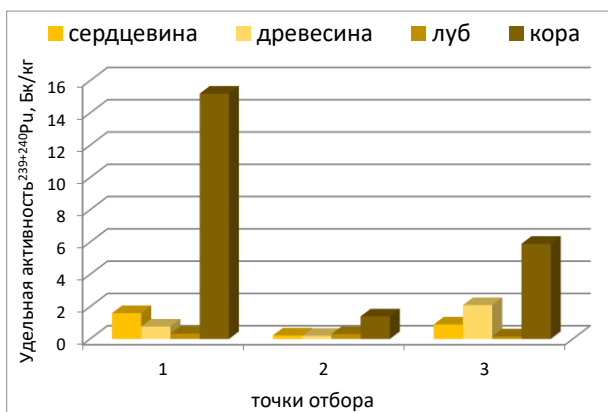
Результаты лабораторных исследований подтвердили, что уровень радиоактивного загрязнения площадок, выбранных для проведения исследований, является повышенным. Наибольшие значения удельной активности в почве отмечаются для радионуклидов  $^{239+240}\text{Pu}$  ( $74 \pm 8$  Бк/кг) и  $^{137}\text{Cs}$  ( $28 \pm 6$  Бк/кг), сравнительно меньшие для  $^{90}\text{Sr}$  ( $7,8 \pm 1,2$  Бк/кг), содержание  $^{241}\text{Am}$  – не превышает  $1,2 \pm 0,3$  Бк/кг. Данные по содержанию радионуклидов  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  в структурных элементах ствола сосны (*Pinus silvestris*) представлены в таблице.

Таблица 1. Содержание радионуклидов  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  в почве и отдельных структурных элементах ствола сосны (*Pinus silvestris*)

| Точки отбора | Объект исследования | Удельная активность радионуклидов, Бк/кг |                   |                  |                       |
|--------------|---------------------|--|-------------------|------------------|-----------------------|
|              |                     | $^{241}\text{Am}$                        | $^{137}\text{Cs}$ | $^{90}\text{Sr}$ | $^{239+240}\text{Pu}$ |
| 1            | кора                | < 0,7                                    | $6,4 \pm 0,6$     | $7,5 \pm 1,1$    | $15 \pm 2$            |
|              | луб                 | < 1,1                                    | < 0,4             | $2,3 \pm 0,5$    | $0,33 \pm 0,09$       |
|              | древесина           | < 0,3                                    | < 0,2             | $1,4 \pm 0,3$    | $0,77 \pm 0,14$       |
|              | сердцевина          | < 0,7                                    | < 0,3             | $1,8 \pm 0,3$    | $1,6 \pm 0,2$         |
|              | почва               | $1,2 \pm 0,3$                            | $28 \pm 6$        | $1,8 \pm 0,3$    | $47 \pm 6$            |
| 2            | кора                | < 1,4                                    | < 0,8             | $4,8 \pm 0,7$    | $1,4 \pm 0,2$         |
|              | луб                 | < 1,2                                    | < 0,7             | $2,0 \pm 0,4$    | $0,3 \pm 0,1$         |
|              | древесина           | < 10                                     | < 2               | $1,0 \pm 0,2$    | $0,2 \pm 0,1$         |
|              | сердцевина          | < 1,6                                    | < 0,5             | < 0,7            | $0,22 \pm 0,06$       |
|              | почва               | < 0,3                                    | $9,0 \pm 1,8$     | < 1,2            | $74 \pm 8$            |
| 3            | кора                | < 0,6                                    | $1,4 \pm 0,1$     | $6,7 \pm 1,0$    | $5,9 \pm 0,9$         |
|              | луб                 | < 0,3                                    | $0,3 \pm 0,1$     | $0,6 \pm 0,1$    | $0,16 \pm 0,02$       |
|              | древесина           | < 1,5                                    | $2,7 \pm 0,2$     | $4,1 \pm 0,6$    | $2,1 \pm 0,3$         |
|              | сердцевина          | < 1                                      | < 0,2             | < 0,6            | $0,9 \pm 0,1$         |
|              | почва               | < 0,4                                    | $10 \pm 2$        | $7,8 \pm 1,2$    | $13 \pm 3$            |



а)



б)

Рисунок. Распределение радионуклидов <sup>90</sup>Sr (а) и <sup>239+240</sup>Pu (б) в структурных элементах ствола сосны (*Pinus silvestris*)

Содержание радионуклидов <sup>241</sup>Am в растительных образцах, как видно из приведенной таблицы, оказалось ниже предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения. Значения удельной активности <sup>137</sup>Cs также в большинстве случаев количественно не установлены, лишь на площадке П-3 варьирует от  $0,3 \pm 0,1$  Бк/кг до  $2,7 \pm 0,2$  Бк/кг, а на площадке П-1 достигает в коре  $6,4 \pm 0,6$  Бк/кг. Стабильно количественно во всех пробах уста-

новлено содержание радионуклидов <sup>90</sup>Sr (от  $0,6 \pm 0,1$  Бк/кг до  $7,5 \pm 1,1$  Бк/кг) и <sup>239+240</sup>Pu (от  $0,16 \pm 0,02$  Бк/кг до  $15 \pm 2$  Бк/кг). Характер распределения <sup>90</sup>Sr и <sup>239+240</sup>Pu представлен на гистограммах (см. рисунок).

Как показано на приведенных гистограммах, максимальное содержание обоих радионуклидов отмечается в коре. Таким образом, можно предположить, что загрязнение исследуемых деревьев произошло в момент прохождения следа. Дальнейшее вторичное загрязнение посредством накопления радионуклидов из почвы внесло менее существенный вклад, однако также имеет место быть, что доказывают количественные значения, установленные в более глубоко расположенных структурных элементах.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований, повышенное содержание в почве на территории следа от первого наземного ядерного испытания установлено для всех исследуемых радионуклидов (<sup>241</sup>Am, <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr и <sup>239+240</sup>Pu). Более высокие значения удельной активности отмечаются для <sup>239+240</sup>Pu и <sup>137</sup>Cs, менее значимые – для <sup>90</sup>Sr и в единичном случае – <sup>241</sup>Am. В объектах растительного происхождения, представленных структурными элементами ствол сосны (*Pinus silvestris*), в большей степени накопились <sup>239+240</sup>Pu и <sup>90</sup>Sr. При этом максимальные значения удельной активности радионуклидов, установленные в коре, могут указывать на то, что загрязнение исследуемых деревьев произошло в момент прохождения следа. В целом, анализ содержания радионуклидов в сосне (*Pinus silvestris*) не обнаружил превышения предельно-допустимых уровней радиоактивного загрязнения [12], которые ограничивают возможности ее заготовки и переработки как продукции строительного назначения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках научного гранта AP05130568 «Исследование перераспределения радионуклидов в лесных экосистемах в отдаленный период после ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексахин Р.М., Нарышкин М.А. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1977. 144 с.
2. Куликов Н.В., Молчанова И.В. Континентальная радиоэкология. М.: Наука, 1975. 184 с.
3. Куликов Н.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Радиоэкология почвенно-растительного покрова. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 172 с.
4. Тихомиров Ф.А. Распределение и миграция радионуклидов в лесах ВУРС при радиоактивных выпадениях // Экологические последствия аварии на Южном Урале. М.: Наука, 1993. С. 21–39.
5. Тихомиров Ф.А., Алексахин Р.М., Федоров Е.А. Миграция радионуклидов в лесах и действие ионизирующих излучений на лесные насаждения // Peaceful uses of atomic energy. Vienna: IAEA, 1972. Vol. 11. P. 675–684.
6. A.I. Shcheglov, O.B. Tsvetnova, and A.L. Klyashtorin Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems. – Nauka, Moscow, 2001. – 235 p.
7. Переволоцкий А.Н. Радиационно-экологическая обстановка в лесных биогеоценозах: динамика, факторы, прогноз (на примере региона аварии Чернобыльской АЭС): Обнинск, 2013. – 30 с.
8. Стрельчук Ю.Г. Радиационная обстановка на территории сосновых боров Прииртышья / Ю.Г. Стрельчук, В.С. Осинцев, Р.Ю. Магашева // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра

Республики Казахстан за 20011–2012 гг.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Т.1. – Вып. 4. – Павлодар: Дом печати, 2013. – С. 221–248. - ISBN 978-601-7112-74-5.

9. Методика измерения гамма-фона территорий и помещений: утвердил Зам. Главного государственного санитарного врача Республики Казахстан М.Б. Спатаев, 25.08.1997. Алматы, 1997. 1 с.
10. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре МИ 2143-91: МИ 5.06.001.98 РК. Алматы, 1998. 18 с.
11. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях): Алматы, 2010. 25 с.
12. Временные допустимые уровни содержания радионуклидов в объектах контроля Минсельхоза РК, не вошедших в перечень Минздрава Республики, 22.02.94.

### СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫНДАҒЫ БІРІНШІ ЖЕРҮСТІ ЯДРОЛЫҚ СЫНАҚТАН КЕЙІН ПАЙДА БОЛҒАН РАДИОАКТИВТІ ТҮСУЛЕРДІҢ ІЗДЕРІНДЕГІ *PINUS SILVESTRIS*-ТЕ ЖАСАНДЫ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ҚҰРАМЫ

Н.В. Ларионова, А.Р. Иванова, А.О. Айдарханов

*ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан*

Жұмыс барысында, Семей сынақ полигонында өткізілген бірінші ядролық сынақтан кейінгі (29.08.49ж.) радиоактивті түсу іздері өтетін телімдегі қарағайлы орманда  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239-240}\text{Pu}$  жасанды радионуклидтерінің құрамын зерттеу нәтижелері келтірілген. Топырақтағы тиесілі белсенділіктің максималды мәні –  $^{239+240}\text{Pu}$  және  $^{137}\text{Cs}$  үшін, ал төмен мәні –  $^{90}\text{Sr}$  және жалғызілік жағдайда –  $^{241}\text{Am}$  радионуклидтері үшін тән. Құрылымдық элементтер түрінде келтірілген шығу тегі өсімдік тектестер нысаны қарағай діңінде (*Pinus silvestris*)  $^{239+240}\text{Pu}$  мен  $^{90}\text{Sr}$  жоғары дәрежеде жинақталған, сонымен бірге тиесілі белсенділіктің максималды мәні қабығында да анықталды.

**Кілт сөздер:** қарағайлы тізбек, Семей сынақ полигоны (ССП), ядролық сынақтар, жасанды радионуклидтер, цезий ( $^{137}\text{Cs}$ ), стронций ( $^{90}\text{Sr}$ ), америций ( $^{241}\text{Am}$ ), плутоний ( $^{239+240}\text{Pu}$ ), топырақ, кәдімгі қарағай (*Pinus silvestris*).

### CONCENTRATION OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN *PINUS SILVESTRIS* AT THE PLUMES OF RADIOACTIVE FALLOUTS RESULTED FROM THE FIRST SURFACE NUCLEAR TEST AT SEMIPALATINSK TEST SITE

N.V. Larionova, A.R. Ivanova, A.O. Aidarkhanov

*Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The work provides results of research of concentrations of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239-240}\text{Pu}$  artificial radionuclides in pine forest at the part of the radioactive fallouts plume of the first nuclear test (29.08.49), conducted at Semipalatinsk Test Site. The maximum specific activity values in soil were found to be typical for  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{137}\text{Cs}$ , lower values were found for  $^{90}\text{Sr}$  and in single case it was registered for  $^{241}\text{Am}$ . In the phylogenous objects, represented by structural elements of pine (*Pinus silvestris*) trunk, mainly  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{90}\text{Sr}$  was accumulated, at that the maximum values were registered in the cortex.

**Keywords:** pine forest, Semipalatinsk Test Site (STS), nuclear tests, artificial radionuclides, cesium ( $^{137}\text{Cs}$ ), strontium ( $^{90}\text{Sr}$ ), americium ( $^{241}\text{Am}$ ), plutonium ( $^{239+240}\text{Pu}$ ), soil, common pine (*Pinus silvestris*).