

УДК 574.2:539.1.04

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ CS-137 В КОРЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

© 2023 г. А. Д. Карпов^{1,*}, И. Ю. Горбунов¹, В. В. Калнин¹,
А. Н. Раздайводин¹, А. И. Радин¹

Представлено академиком РАН С.А. Родиным

Поступило 19.05.2023 г.

После доработки 18.06.2023 г.

Принято к публикации 18.06.2023 г.

В работе исследовалось вертикальное распределение техногенного радионуклида Cs-137 в коре сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне радиоактивного загрязнения Брянской области. Ствол каждого дерева от комля до высоты 17 м был разделен на 10-сантиметровые поперечные отрезки. С каждого отреза кора вместе с лубом была отделена в отдельную пробу. Помимо Cs-137 в коре модельного дерева № 2 от комля до 6.5 м было измерено содержание природного радионуклида K-40. Измерение активности Cs-137 и K-40 в пробах проводилось гамма-спектрометрическим методом. Впервые установлено, что в коре исследуемых деревьев вертикальное распределение Cs-137 имеет колебательный характер с периодом — около одного метра. Распределение калия также имеет колебательный характер аналогично цезию, что согласуется со сходным механизмом поведения калия и цезия в древесных растениях. Коэффициент корреляции между величинами удельной активности Cs-137 в модельных деревьях № 1 и № 2 составил 0.80, а между Cs-137 и K-40 в модельном дереве № 2—0.45. Таким образом, Cs-137 может использоваться в качестве радиотрасера для оценки поступления и распределения химических элементов в тканях сосны обыкновенной. Обнаруженный колебательный характер вертикального распределения цезия и калия в коре сосны ранее не описан в доступной литературе.

Ключевые слова: техногенные радионуклиды, радиоактивное загрязнение леса, радиоцезий, сосна обыкновенная, кора

DOI: 10.31857/S2686738923600309, EDN: OYICZJ

В результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. значительные площади лесов Европейской части России подверглись радиоактивному загрязнению. Наиболее пострадавшими оказались леса юго-запада Брянской области [1–3]. В этих районах самым распространенным видом-лесообразователем является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). При изучении загрязнения древесных растений техногенными радионуклидами возникает вопрос об их вертикальном распределении в стволе дерева, что важно для интерпретации результатов мониторинга и понимания механизмов накопления радионуклидов в органах и тканях

растений. При радиационном контроле содержания техногенных радионуклидов в тканях ствола дерева, как правило, отбираются пробы коры и древесины на трех высотах: у основания ствола, его середине и у вершины. На основе этих данных результаты экстраполируются на весь ствол, предполагая отсутствие гетерогенности в вертикальном распределении радионуклидов [4–10]. Однако это предположение ранее не проверялось экспериментально. Для получения этой информации в нашей работе изучалась закономерность непрерывного вертикального распределения Cs-137 в коре сосны обыкновенной.

Результаты данной работы необходимы для понимания механизмов накопления радиоцезия в хвойных растениях, и могут быть использованы для совершенствования оценки радиоактивного загрязнения древесных растений.

¹ФБУ Всероссийский НИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства, г. Пушкино, Россия

*e-mail: karpov@vniilm.ru

e-mail: info@roslesrad.ru

Таблица 1. Параметры отбора модельных деревьев сосны обыкновенной

№ модельного дерева	Дата отбора	Координаты отбора	Высота дерева, м	Диаметр дерева у комля, см	Возраст дерева, лет	Cs-137 в почве, кБк/м ²
1	22.08.2015	N 52.5254° E 31.7780°	20	37	36	740 ± 162
2	26.06.2020	N 52.5252° E 31.7784°	25	41	41	920 ± 195

Для исследования было отобрано два модельных дерева на участке лесных культур в Злынковском лесничестве Брянской области, созданных за несколько лет до аварии на Чернобыльской АЭС (табл. 1). Модельные деревья подбирались таким образом, чтобы они совпадали со средними характеристиками лесотаксационного лесного насаждения. Возраст деревьев, определенный по годовым кольцам [11], составлял 36 лет и 41 год. Деревья спиливали у комля, валили на землю, разделяли на метровые отрезки и упаковывали в пленку, чтобы не допустить потери коры при транспортировке. После чего их доставляли в лабораторию для дальнейших этапов исследования. Для определения плотности загрязнения почвы радиоцезием в корнеобитаемой зоне деревьев под кроной каждого дерева отбирали пробы почвы в 8 точках на равном расстоянии друг от друга по окружности радиусом 2 м. Почва отбиралась с помощью почвенного пробоотборника в виде цилиндрической трубы диаметром 4 см и высотой 25 см [12]. При отборе лесная подстилка отделялась от остального слоя почвы и в дальнейшем эти пробы анализировались отдельно. На основе результатов измерения удельной активности рассчитывалась плотность загрязнения почвы радиоцезием в кБк/м².

Отбор каждого модельного дерева, его транспортировка в лабораторию, и последующее разделение — это трудоемкая процедура, которая требует много физических и временных ресурсов. Поэтому для данного исследования нами было отобрано только два модельных дерева: дерево № 1 — основное, дерево № 2 — подтверждение результатов в дереве № 1. Для получения первичной информации о вертикальном распределении радиоцезия, ствол каждого дерева от комля до высоты 17 м был разделен на поперечные отрезки высотой 10 см. С каждого отрезка была отделена кора вместе с лубом по всему периметру. Пробы коры были высушены при температуре 110°C, затем измельчены до однородного состояния при помощи лабораторных мельниц, и подготовлены счетные образцы для гамма-спектрометрического анализа. Было получено по 170 счетных образцов для

каждого дерева. В 65 пробах коры дерева № 2, на участке ствола от комля до высоты 6.5 м, помимо Cs-137, было измерено содержание природного радионуклида К-40. В отличие от Cs-137, у которого достоверный энергетический пик в гамма-спектре формировался в течение одного часа, пик энергии К-40 набирался не менее 24 ч. Поэтому удельная активность К-40 была измерена в меньшем числе счетных образцов.

Измерение удельной активности Cs-137 и К-40 в образцах проводили при помощи двух гамма-спектрометрических комплексов “Гамма-1П” (НПО “Аспект”, Россия) на основе полупроводниковых сверхчистых германиевых детекторов (BSI, Латвия), с использованием программного обеспечения SpectraLineBG (ООО “ЛСРМ”, Россия). Приборы калибровали с использованием паспортизированного объемного эталонного источника гамма-излучения следующего состава: Cs-137, Am-241, Ba-133, Eu-152, в соответствии с методикой измерения активности источников гамма-излучения [13]. Ошибка измерений активности Cs-137 в счетных образцах не превышала 10%, а К-40 — 20%. Значения удельной активности Cs-137 и К-40 в спектре каждого образца были значительно выше минимальной детектируемой активности этих радионуклидов, что свидетельствует о достоверности полученных результатов. Результаты измерения удельной активности радионуклидов в пробах приведены в единицах Бк/кг сухой массы, рассчитанной на дату отбора деревьев.

Вертикальное распределение удельной активности Cs-137 в коре стволов двух модельных деревьев представлено на рис. 1а. Изменение удельной активности вдоль ствола дерева имеет ярко выраженный колебательный характер. Используя метод спектрального анализа Фурье [14], был установлен период колебаний удельной активности радиоцезия по высотному профилю. Для каждого модельного дерева он составил один метр, что говорит об одинаковом характере распределения Cs-137 в коре модельных деревьев. Для оценки связи между распределением радионуклидов в коре двух деревьев использовался коэффициент

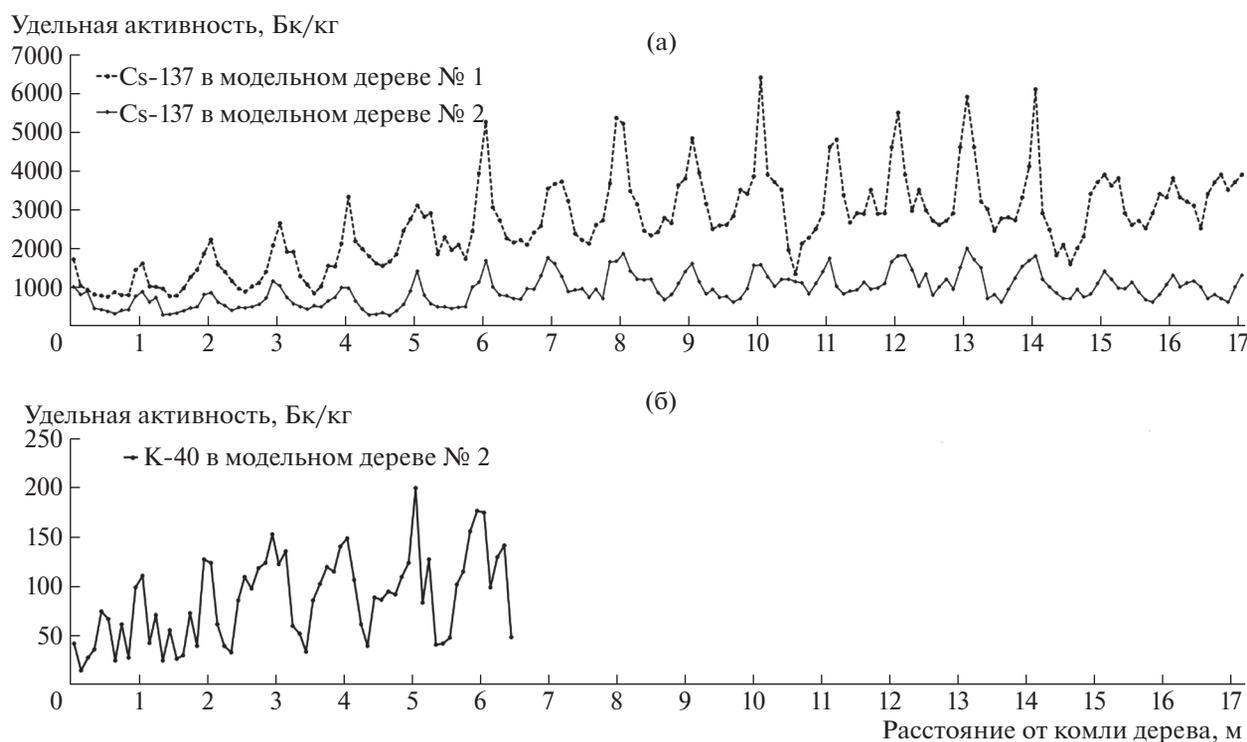


Рис. 1. Вертикальное распределение удельной активности Cs-137 в коре сосны обыкновенной в двух модельных деревьях (а) и K-40 (б) в модельном дереве № 2, Бк/кг сух. массы.

корреляции Пирсона. Для удельной активности Cs-137 в дереве № 1 и дереве № 2 коэффициент корреляции составил 0.80 ($n = 170$, $p < 0.05$).

Вертикальное распределение K-40 в коре модельного дерева № 2 также имело колебательный характер (рис. 1б). Период колебаний равен одному метру, что аналогично распределению Cs-137 (рис. 1а). Вертикальное распределение Cs-137 в коре ствола сосны, подобное распределению K-40, вероятно, обусловлено одинаковым механизмом их накопления, поскольку цезий и калий являются химическими аналогами [15–17]. Коэффициент корреляции удельной активности Cs-137 и K-40 в модельном дереве № 2 составил 0.45 ($n = 65$, $p < 0.05$).

Несмотря на то что оба дерева росли на одном участке, с примерно одинаковой плотностью загрязнения почвы Cs-137 (табл. 1), удельные активности радиоцезия в коре отличаются в несколько раз. Если в модельном дереве № 1 максимальное значение удельной активности Cs-137 достигает 6000 Бк/кг, то в модельном дереве № 2 оно не превышает 2000 Бк/кг. К сожалению, на данном этапе невозможно объяснить трехкратное отличие удельной активности Cs-137 в модельном дереве № 1 и № 2 при одинаковой плотности загрязнения почвы цезием в корнеобитаемой зоне

деревьев. Ответ на данный вопрос требует проведения дополнительных исследований.

В результате выполненной работы впервые показано, что вертикальное распределение Cs-137 в коре сосны обыкновенной имеет колебательный характер с периодом колебаний около одного метра. Полученный результат необходимо учитывать при отборе проб для оценки радиоактивного загрязнения древесных растений. Если среднее значение удельной активности Cs-137 в коре модельного дерева № 1 по 170 точкам составляет 2670 Бк/кг, то выборка по трем точкам (комель, середина и вершина) может давать значение среднего в диапазоне от 2000 до 3900 Бк/кг. Для модельного дерева № 2 среднее значение Cs- по 170 точкам составило 880 Бк/кг, а по трем точкам – от 440 до 1380 Бк/кг.

Также впервые было выявлено сходство характера вертикального распределения Cs-137 и радиоактивного изотопа, его химического аналога, K-40. Одинаковая периодичность и строгая монотонность вертикального распределения радиоцезия и калия могут свидетельствовать об одинаковом механизме поступления этих радионуклидов в ствол дерева. Поскольку калий, как биогенный элемент, поступает в растение из почвы, то можно предполагать также преобладание корневого поступления радиоцезия. Полученная

взаимосвязь калия и цезия соответствует литературным данным миграции радионуклидов в растительности [15–17].

Для оценки современного вклада первичных радиоактивных газо-аэрозольных выпадений из атмосферы на надземные части дерева в содержание Cs-137 в коре необходимо провести аналогичные исследования деревьев старшего возраста, сформировавших стволы в период до аварии на Чернобыльской АЭС.

Колебательный характер вертикального распределения Cs-137 в коре сосны обыкновенной может быть связан с циркадными ритмами, обусловленными как генетическими факторами, так и процессами сжатия ствола дерева днем и расширения его ночью.

Так как распределение Cs-137 и K-40 в коре сосны имеет высокий показатель корреляции, Cs-137 можно использовать в качестве радиотрасера для изучения потоков вещества в тканях сосны обыкновенной. Результаты выполненной работы могут стать основой для изучения фундаментальных механизмов, описывающих поступление и распределение минеральных веществ в тканях древесных растений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.А. Сулимова за помощь в отборе модельных деревьев.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Государственный контракт № 0373100032220000023 от 12.05.2020 г. по проведению совместных мероприятий комплексного радиозэкологического мониторинга территорий России, подвергшихся радиоактивному загрязнению в рамках Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, утвержденной постановлением Советом Министров Союзного государства от 29 августа 2019 № 8.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии известных им конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Марченко Т.А., Радин А.И., Раздайковин А.Н.* // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13. № 2. С. 6–18.
2. *Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Романович И.К.* // Радиационная биология. Радиозэкология. 2016. Т. 56. № 3. С. 322–335.

3. *Спирidonov С.И., Алексахин Р.М., Фесенко С.В.* // Радиационная биология. Радиозэкология. 2007. Т. 47. № 2. С. 196–203.
4. *Переволоцкий А.Н., Булавик И.М., Переволоцкая Т.В.* // Радиационная биология. Радиозэкология. 2007. Т. 4. С. 463–470.
5. *Мамихин С.В., Манахов Д.В., Щеглов А.И.* // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2014. Т. 54. № 1. С. 72–76.
6. *Holiaka D., Yoschenko V., Levchuka S., Kashparov V.* // J. Environ. Radioactivity. 2020. V. 222. 106319.
7. *Мельник Н.А., Кизеев А.Н.* // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9. № 3. С. 429–433.
8. *Белов А.А.* // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 1. С. 24–30.
9. *Soukhova N.V., Fesenko S.V., Klein D., Spiridonov S.I.* // J. Environ. Radioactivity. 2003 V. 65, I. 1. P. 19–28.
10. *Cosma C., Iurian A., Incze R.* // J. Environ. Radioactivity. 2016. V. 153 P. 126–133.
11. *Румянцев Д.Е., Черкашев А.В.* Методические подходы для определения возраста деревьев // Принципы экологии. 2020. № 4 (38). С. 104–117.
12. *Белов А.А., Раздайковин А.Н., Жарников С.А.* Устройство для отбора проб почвы // Патент на полезную модель № 178182 от 26.06.2017 г.
13. Активность радионуклидов в счетных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения “SpectraLine”. Свидетельство об аттестации № 43151.4Б207/01.00294-2010 от 28.02.2014 г.
14. *Бурева Н.Н.* Многомерный статистический анализ с использованием ППП “STATISTICA”. // Учебно-методический материал по программе повышения квалификации “Применение программных средств в научных исследованиях и преподавании математики и механики”. Нижний Новгород, 2007, 112 с.
15. *Рогачевский А.А.* // Сельское хозяйство - проблемы и перспективы. Сборник научных трудов. Гродно, 2019. С. 123–128.
16. *Гуревич П.А., Чаговец А.С., Сазонов А.Б.* // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 9. С. 75–77.
17. *Гончаров Е.А., Пигалин Д.И.* // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2013. № 4 (20). С. 76–87.

OSCILLATORY PATTERN OF DISTRIBUTION CS-137 IN THE BARK OF SCOTCH PINE

A. D. Karpov^{a,#}, I. Yu. Gorbunov^a, V. V. Kalnin^a, A. N. Razdayvodin^a, and A. I. Radin^a

^a*Russian Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry, Pushkino, Moscow region, Russian Federation*

[#]*e-mail: karpov@vniilm.ru*

e-mail: info@roslesrad.ru

Presented by Academician of the RAS S.A. Rodin

The paper studies the vertical distribution of Cs-137 trees in the bark of two model trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), selected in the zone of radioactive contamination of the Bryansk region. Each tree was divided into 10 centimeter bars from a length of up to 17 meters, after which the bark along with the bast was separated from each bar into a separate sample. In addition to Cs-137, the content of natural radionuclide K-40 was measured in the bark of model tree No.2 from a comline to 6.5 meters. Measurement of specific activity of technogenic radionuclide Cs-137 and natural radionuclide K-40 by gamma-spectrometric method. For the first time, it was found that in the bark of the studied trees, the vertical distribution of Cs-137 has a wave-like character and can be represented as harmonic oscillations with a period of 1 m. The distribution of potassium also has an oscillatory character similar to caesium, which is consistent with a similar mechanism of behavior of potassium and caesium in woody plants. The correlation coefficient between the values of specific activity of Cs-137 in model trees No.1 and No.2 was 0.80, and between Cs-137 and K-40 in model tree No. 2 was 0.45. Thus, Cs-137 can be used as a radiotracer to assess the intake and distribution of chemical elements in the tissues of scots pine. The found oscillatory nature of the vertical distribution of caesium and potassium in the pine bark has no analogues in the world literature.

Keywords: radionuclides, radioactive contamination of forest, radiocaesium, scotch pine, bark, distribution of radionuclides, vertical distribution