

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХВОИ СОСНЫ В РАЙОНЕ АВАРИИ ФУКУСИМСКОЙ И ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Е.С. Макаренко¹, С.А. Гераськин¹, М.А. Лыченкова¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Россия

ВВЕДЕНИЕ

С начала XX в. и по настоящее время не утрачивают актуальность исследования влияния хронического действия ионизирующего излучения на природные популяции растений и животных, которые приобрели особое значение на территориях, пострадавших в результате радиационных аварий на ПО «Маяк», Чернобыльской и Фукусимской АЭС.

Большой размер генома сосны по сравнению с большинством других растений, достигающий 24.6 Гб (Ahuja, Neale, 2005) и большие интерфазные хромосомы объёмом до 61.1 мкм³ (Conger et al., 1982) обусловили повышенную её чувствительность к ионизирующему излучению (LD₅₀ 5–20 Гр) (Сарапульцев, Гераськин, 1993). Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – основной лесообразующий вид Северной Евразии, являющийся видом-эдикатором и ценной породой в лесоводстве. Сосна красная японская или густоцветковая (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc) формирует монодоминантные леса, в значительной степени определяя структуру и функции лесной экосистемы, имеет широкий ареал произрастания в Японии и важное хозяйственное значение. Сосна внесена в список референтных растений и животных, рекомендованных Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) для проведения оценки радиационного воздействия на окружающую среду в условиях хронического облучения (ICRP, 2008).

После аварии на Чернобыльской АЭС на облучённой сосне обыкновенной наблюдали различные нарушения вегетативных органов: образование морфозов, угнетение прироста побегов, опадение хвои, изменение её размеров, усиленное почкование на верхушках годовых побегов, «израстание почечных чешуй», изменение ультраструктуры хвои и т. д. (Козубов, Таскаев, 2002). На радиоактивно загрязнённых после аварии на АЭС Фукусима территориях у красной японской сосны (Yoschenko et al., 2016) было обнаружено увеличение частоты подавления апикального доминирования, однако морфологические показатели хвои не были изучены. Поэтому представляют интерес морфометрические параметры сосны, произрастающей в условиях реально встречающихся в современной биосфере уровней хронического облучения. Целью настоящей работы являлась оценка морфометрических показателей хвои сосны обыкновенной и японской красной сосны в условиях хронического радиационного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Радиационная обстановка на экспериментальных участках. Исследование проводили на сосне обыкновенной с 2 референтных и 4 импактных участков, расположенных приблизительно на 200–250 км северо-восточнее ЧАЭС, с 2011 по 2014 гг. на наиболее пострадавшей в Российской Федерации в результате аварии на Чернобыльской АЭС территории Брянской области. В 2016 г. измерения провели ещё на 3 участках, расположенных на расстоянии 12–45 км от ЧАЭС, в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике (ПГРЭЗ) в Гомельской области Республики Беларусь. В 2019 г. материал отобрали с красной японской сосны на 1 контрольном и 4 участках, загрязнённых радионуклидами в результате аварии на АЭС Фукусима из 30-км зоны.

Основным дозообразующим радионуклидом на изучаемых территориях Брянской и Гомельской областей является ¹³⁷Cs, удельные активности которого на наиболее загрязнённых участках достигают в почве 66 кБк/кг, а в шишках – 14 кБк/кг. Согласно проведённым в 2016 г. измерениям, средняя МЭД на радиоактивно загрязнённых участках меняется в пределах 35–360 мкР/ч. Расчетные значения годовой поглощённой дозы в кронах сосновых деревьев, полученные с помощью разработанной ранее дозиметрической модели (Спиридонов и др., 2008) в Брянской области достигают 39 мГр, а в Гомельской области – 129 мГр, на контрольных площадках – 0.03 и 0.23 мГр. На всей территории ПГРЭЗ присутствуют значимые уровни загрязнения долгоживущими радионуклидами ^{238,239,240,241}Pu, ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr.

Все участки характеризуются сходным древостоем. Содержание тяжёлых металлов в почвах всех площадок Брянской области не превышает ПДК, почва дерново-подзолистая супесчаная, гранулометрический состав одинаков (Гераськин и др., 2008). На экспериментальных участках ПГРЭЗ почва песчаная.

В префектуре (пр.) Фукусима мощность амбиентной дозы на высоте 1 м составила на контрольном участке 0.25 мкЗв/ч, а на радиоактивно загрязнённых участках 3.4–6.4 мкЗв/ч. Для расчёта годовой поглощённой дозы в кронах сосен оценили удельные активности ^{134}Cs и ^{137}Cs в хвое и ветвях. Годовая поглощённая доза на импактных площадках изменяется в пределах 31–57 мГр, на референтном участке 2.4 мГр.

Оценка морфометрических показателей хвои. В России и Беларуси отбор двухлетней хвои проводили с 14–16 деревьев на каждом участке по 20–40 пар хвоинок с дерева. В Японии отбирали хвою с 7–11 деревьев на каждом участке по 30–60 пар двухлетних хвоинок с дерева. Оценивали следующие морфометрические показатели хвои: длина, масса, индекс флуктуирующей асимметрии (ФА). Длину хвои измеряли с точностью до 0.5 мм. Подсушенную хвою взвешивали на лабораторных аналитических весах с точностью до 0.1 мг. Индекс ФА хвои по длине и массе хвоинок рассчитывали по формулам (Kozlov et al., 2002).

Данные были проверены по критерию Диксона и критерию Граббса на наличие выбросов, которые исключены из дальнейшего рассмотрения. Для определения значимости различий между средними значениями использовали *U*-тест Манна-Уитни в программе Statistica 8.0. На рисунках представлены средние значения и стандартные ошибки среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Масса и длина хвои. Представленные в таблице 1 результаты свидетельствуют о значимом увеличении по сравнению с контролем массы хвои на большинстве радиоактивно загрязнённых участков.

Таблица 1. Масса хвои обыкновенной и японской красной сосны на изучаемых популяциях в зависимости от годовой поглощённой дозы (D-sum), мГр

Регион	Брянская обл.		Пр. Фукусима	Брянская обл.				Пр. Фукусима				Гомельская обл.		
Год/D-sum	0.03 (1)	0.23 (2)	2.4 (3)	10	19	33	39	31	35	44	57	19	102	129
2011	24.6	29.2°		26.7	30.5 ^{oo}	27.2	26.4							
2013	18.2	21.4°		26.8 ^{oo}	23.0 ^{oo}	25.5 ^{ooo*}	22.4°							
2014	22.9	23.3		28.2	25.8	27.1	24.6							
2016	21.1	24.6		28.4 ^{ooo}	19.6*	30.3 ^{ooo}	24.1					21.4	25.6 ^{oo}	23.2
2019			15,3					27.0 ^{***}	22.7 ^{***}	19.6*	15.6			
°, °° и °°° – значимые отличия от контроля 1, $p < 0.05$; $p < 0.01$ и $p < 0.001$; * – значимые отличия от контроля 2, $p < 0.05$ * и *** – значимое отличие от контрольного участка 3, $p < 0.05$, $p < 0.001$														

Значимой корреляции массы хвоинок от параметров радиационной обстановки (содержания радионуклидов в почве и шишках, мощности экспозиционной дозы, поглощённой дозы) не выявлено.

Анализ полученных данных по длине хвои показал, что на наименее загрязнённых участках наблюдаются статистически значимые колебания данного показателя по сравнению с контрольным уровнем (рис. 1). Видимо, в связи с низкой радиационной нагрузкой на растения данных участков, преобладает влияние иных факторов.

На японской красной сосне увеличение длины хвои относительно контрольного участка обнаружено только на наименее радиоактивно загрязнённом участке (рис. 2).

Обнаружена статистически значимая корреляция: в 2016 г. длина хвои сосны обыкновенной уменьшалась с увеличением поглощённой дозы от β -излучающих радионуклидов ($r = -0.68$, $p = 0.043$) и удельной активности ^{90}Sr в шишках ($r = -0.70$, $p = 0.036$).

Стимулирующее действие облучения в дозах 0.7–1 Гр на сосну, в результате которого масса хвои увеличилась в 1.5 раза было обнаружено Козубовым с соавт. (1993). Согласно работе Козубова и Таскаева (2002), увеличение размеров хвои связано с тем, что в хвое сосны увеличивается диаметр смоляных каналов, в 1.5–2 раза возрастает площадь поперечного сечения эпидермы и гиподермы, а также площадь сечения проводящего цилиндра.

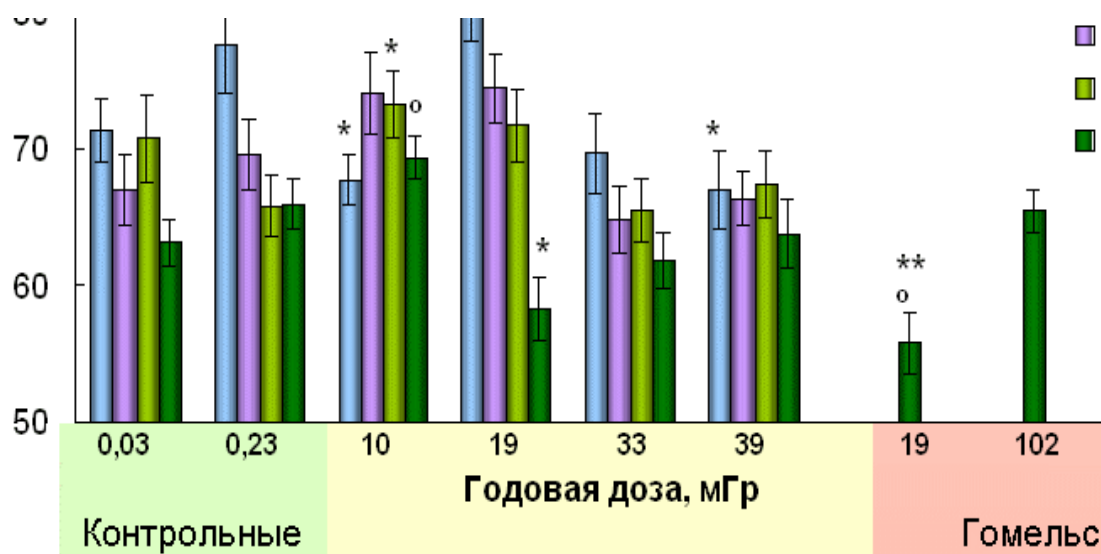


Рисунок 1. Длина хвои сосны обыкновенной в изучаемых популяциях
 ° – значимые отличия от контроля 1, $p < 0.05$; * и ** – значимые отличия от контроля 2, $p < 0.05$ и $p < 0.01$

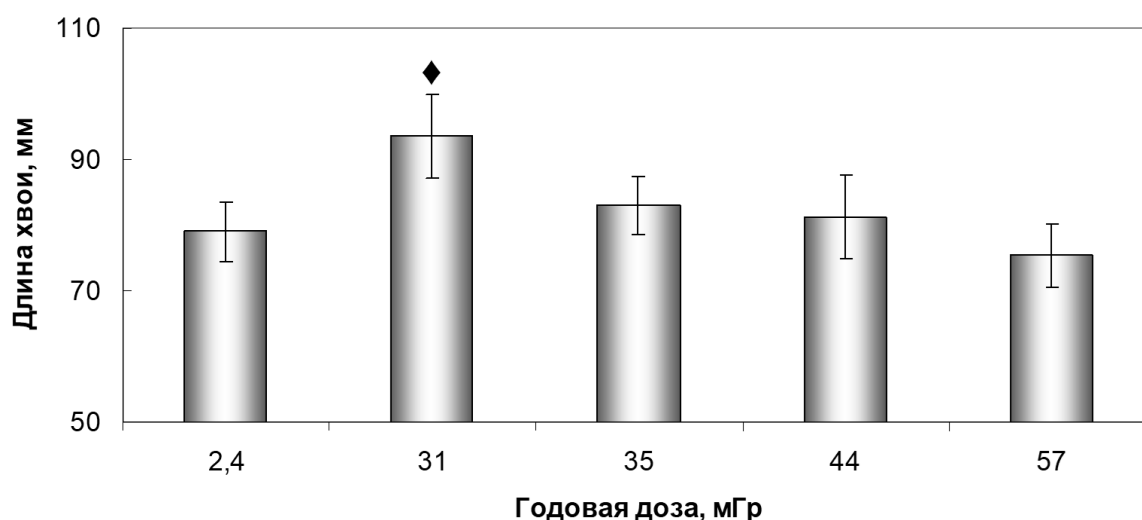


Рисунок 2. Длина хвои японской красной сосны на исследуемых участках в зависимости от годовой поглощённой дозы
 ◆ – значимое отличие от референтного участка, $p < 0.05$

Флуктуирующая асимметрия (ФА). Данные о массе и длине парных хвоинок были использованы для оценки индексов флуктуирующей асимметрии по массе и длине хвои и изучения закономерностей их изменения в условиях хронического радиационного воздействия.

Индекс флуктуирующей асимметрии по массе хвои во все годы исследования не отличается значимо от контроля, и не имеет значимой корреляции от показателей радиационного воздействия.

На хвое сосны обыкновенной был выявлен повышенный индекс флуктуирующей асимметрии по длине на протяжении 2-х и 3-х из 4-х лет исследования на наиболее радиоактивно загрязнённых участках Брянской области. Индекс ФА по длине хвои в 2011 и 2013 гг. статистически значимо возрастает вместе со многими показателями радиационного воздействия (удельной активностью ^{137}Cs в почве и шишках, мощностью экспозиционной дозы, поглощённой дозой β -излучения).

Индекс флуктуирующей асимметрии по длине хвои красной японской сосны значимо превышает контрольный уровень ($p < 0.01$) на площадке с максимальным уровнем радиоактивного загрязнения.

Исследования асимметрии в условиях радиационного воздействия было проведено на разных видах растений. Статистически значимое увеличение индекса флуктуирующей асимметрии у растений клевера было обнаружено на участке промплощадки пункта временного хранения радиоактивных отходов Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами, где мощность экспозиционной дозы в 50–60 раз превышала естественный радиационный фон (Горшкова и др., 2014). Хроническое воздействие ионизирующего излучения (при мощности поглощённой дозы на поверхности почвы 4.74 мкГр/ч) привело к увеличению интегрального индекса ФА листьев берёзы повислой (на 30 %) и содержания в них хлорофилла *a* (на 50 %) и хлорофилла *b* (на 83 %) (Иванов и др., 2015).

Как в работе (Kashparova et al., 2018), где не было обнаружено зависимости ФА хвои сосны обыкновенной и листьев берёзы (*Betula pendula* Roth) от показателей радиоактивного загрязнения в ближней зоне Чернобыльской АЭС, в нашей работе данный эффект не воспроизводился каждый год. Тем не менее, индекс ФА по длине хвоинок является более чувствительным индикатором состояния популяций в условиях хронического радиационного воздействия, чем индекс ФА по их массе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показано, что при хроническом облучении до 130 мГр/год у сосны обыкновенной и красной японской сосны выявлены морфометрические изменения. Обнаружены колебания длины хвои и увеличение массы хвои на большинстве импактных участков. На площадках с максимальным уровнем радиоактивного загрязнения увеличен индекс флуктуирующей асимметрии длины хвои. Данные параметры могут быть использованы для оценки и мониторинга состояния популяций в условиях радиоактивного загрязнения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19–54–50003 и гранта JSPS в рамках двусторонней программы поддержки совместных проектов РФФИ-JSPS.

ЛИТЕРАТУРА

- Гераськин С.А., Дикарева, А.А. Удалова, Спиридонов С.И., Дикарев В.Г. Цитогенетические эффекты в популяциях сосны обыкновенной из районов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. № 5. С. 584–595.
- Горшкова Т.А., Удалова А.А., Гераськин С.А., Киселев С.М., Ахромеев С.В. Биоиндикация состояния природной среды в районе расположения Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 4. С. 130–139.
- Иванов В.П., Иванов Ю.В., Марченко С.И., Кузнецов В.В. Использование индексов флуктуирующей асимметрии листа берёзы повислой для диагностики состояния фитоценозов в условиях техногенного загрязнения // Физиология растений. 2015. Т. 62. № 3. С. 368–377.
- Козубов Г.М., Патов А.П., Кузин Е.А. Биометрические исследования вегетативных побегов сосны и ели при хроническом облучении // Труды Коми научного центра УрО РАН. 1993. С. 105–117.
- Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы. М.: НПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2002. 256 с.
- Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А. Генетические основы радиорезистентности и эволюция. М.: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.
- Спиридонов С.И., С.В. Фесенко, С.А. Гераськин, Соломатин В.М., Карпенко Е.И. Оценка доз облучения древесных растений в отдалённый период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. № 4. С. 432–438.
- Ahuja M.R., Neale D.B. Evolution of genome size in conifers // *Silvae Genetica*. 2005. V. 54. P. 126–137.
- Conger A.D., Sparrow A.H., Schwemmer S.S., Klug E.E. Relation of nuclear volume and radiosensitivity to ploidy level (haploid to 22-ploid) in higherplants and a yeast // *Environmental and Experimental Botany*. 1982. V. 22. P. 57–74.
- ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. *Annals of the ICRP*. 2008. Vol. 38. P. 1–242.
- Kashparova E.A., Levchuk S., Morozova V., Kashparov V. A dose rate causes no fluctuating asymmetry indexes changes in silver birch (*Betula pendula* (L.) Roth.) leaves and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles in the Chernobyl Exclusion Zone // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. 105731.
- Kozlov M.V., Niemela P., Junttila J. Needle fluctuating asymmetry is a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Ecological Indicators*. 2002. V. 1. P. 271–277.
- Yoschenko V.I., Nanba K., Yoshida S., Watanabe Y., Takase T., Sato N., Keitoku K. Morphological abnormalities in Japanese red pine (*Pinus densiflora*) at the territories contaminated as a result of the accident at Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant // *J. Environmental Radioactivity*. 2016. V. 165. P. 60–67.