

УДК 539.1.047: 574.24: 582.475.4

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ХВОИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ СПУСТЯ 35 ЛЕТ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

© 2022 г. Е. С. Макаренко^{1,*}, М. А. Лыченкова¹, С. А. Гераськин¹,
А. Н. Переволоцкий¹, Т. В. Переволоцкая¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

*E-mail: makarenko_ek_obninsk@mail.ru

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 22.02.2022 г.

Принята к публикации 02.03.2022 г.

Спустя 35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС оценены морфометрические показатели хвои сосны обыкновенной, произрастающей на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в Гомельской области Республики Беларусь. Изучена изменчивость хвои по длине и массе, индексы флуктуирующей асимметрии, частота и степень поражения хвои некрозом на трех импактных и двух контрольных участках. Мощность амбиентного эквивалента дозы γ -излучения на высоте 1 м менялась на импактных участках от 0.25 до 9.85 мкЗв/ч. Длина и масса хвои, индексы флуктуирующей асимметрии в исследуемых популяциях имели значимые отличия от контрольных значений, но не демонстрировали связи с радиационным воздействием. Частота сильно пораженных некрозом хвоинок на большинстве радиоактивно загрязненных участков значимо выше обоих контролей. Таким образом, даже спустя 35 лет после аварии в популяциях сосны обыкновенной – одного из наиболее радиочувствительных видов растений – можно обнаружить морфологические изменения, связанные с радиационным воздействием.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, Чернобыльская авария, хроническое облучение, хвоя, некрозы, флуктуирующая асимметрия

DOI: 10.31857/S0869803122030067

Спустя десятилетия в научном сообществе отсутствует единое мнение о последствиях аварии на Чернобыльской АЭС для биоты [1], что делает актуальными тщательные исследования долгосрочных последствий для организмов, населяющих загрязненные районы. Чаще всего при изучении действия ионизирующего излучения (ИИ) на биологические объекты оценивают генетические эффекты, так как они наблюдаются в широком диапазоне доз – от малых до сублетальных – и имеют большое значение при оценке отдаленных последствий облучения. Так, из 55 исследований, проведенных на растениях как в полевых, так и в лабораторных условиях, в 53% оценивали повреждение и восстановление ДНК, а в 22% работ анализировали цитогенетические эффекты [2]. Работы по морфологии, оценке жизнеспособности семян составляли гораздо меньшую долю исследований – по 9%. Таким образом, существует явно недостаточно сведений о влиянии ИИ на морфологию растений. Ясное понимание эффектов хронического облучения на уровне фенотипа важно, потому что именно особь является основной единицей естественного отбора и, следовательно, основой долгосрочных экологически значимых эффектов.

Одним из показателей, позволяющих оценить изменения морфологических параметров, является флуктуирующая асимметрия (ФА), т.е. сумма ненаправленных отклонений от идеальной двусторонней симметрии. ФА изучали при хроническом радиационном воздействии после аварии на разных организмах, включая растения [3, 4], моллюсков [3], ракообразных [5, 6] и грызунов [7].

В настоящей работе объектом исследования выбрана сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). В Северной Евразии сосна является одним из основных лесообразующих видов, в существенной степени влияющих на жизнь других растений. Сосна радиочувствительна, а длительный период существования хвои позволяет накопить достаточно высокую поглощенную дозу ионизирующего излучения. Сосна включена Международной комиссией по радиологической защите в число референтных биологических видов, на которых базируется современная концепция радиационной защиты окружающей среды [8].

В сосновых насаждениях в отдаленный период после Чернобыльской аварии проведены комплексные исследования на разных уровнях организации растительного сообщества. Установлена повышенная цитогенетическая изменчивость,

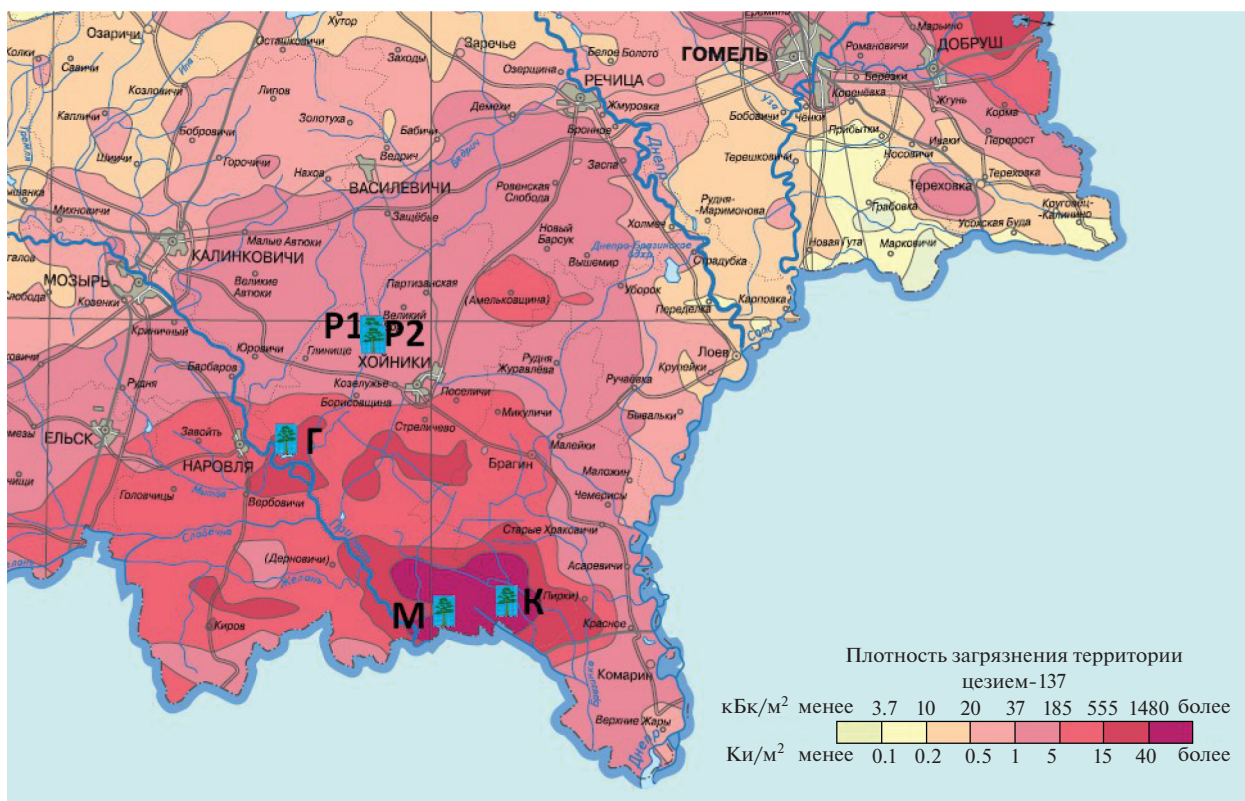


Рис. 1. Схема расположения экспериментальных участков. Плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs в 2016 г. [15].
Примечание. P1, P2 – контрольные участки около бывшего населенного пункта (бнп) Руденька, Г – бнп Гнездинка, М – бнп Масаны, К – бнп Кулажин.

Fig. 1. The map representing experimental plots location. Pollution of ¹³⁷Cs in 2016 (Atlas ..., 2009).

Note: R 1, R 2 – control sites near the former settlement (fs) Rudenka, G – fs Gnezdinka, M – fs Masany, K – fs Kulazhin.

статистически значимо связанная с уровнями радиационной нагрузки [9], и показано, что хроническое радиационное воздействие способно нарушать присущие природным популяциям закономерности саморазвития [10]. На основе исследования шести кодоминантных (изоферменты) и доминантных (AFLP) генетических маркеров установлено, что общая частота мутаций в изоферментных локусах увеличивается с ростом годовой поглощенной дозы, а также изменена генетическая структура популяций, произрастающих в условиях хронического облучения [11–13]. Показано, что популяции сосны обыкновенной, произрастающие в районах с высоким содержанием радионуклидов в почве, развиваются в условиях оксидативного стресса и характеризуются модуляцией уровня низкомолекулярных антиоксидантов [11], повышенным уровнем метилированных цитозинов по сравнению с контрольными популяциями [12]. Транскриптомный анализ тканей *P. sylvestris* выявил, что адаптивные реакции в ответ на хроническое облучение включают в себя модуляцию концентраций АФК и ионного баланса, а также контроль клеточных повреждений за счет усиления экспрессии генов,

кодирующих гистоны и белки теплового шока [14]. Показано, что регистрируемый в изучаемых популяциях в течение многих лет повышенный уровень мутагенеза не сказывается на репродуктивной способности сосен, а качество семян в хронически облучаемых популяциях в значительной степени определяется погодными условиями [15].

Широкий спектр морфологических изменений (отмирание побегов и хвои, различные морфозы) был обнаружен в первые годы после аварии [16], однако спустя десятилетия подобных исследований проведено недостаточно. Поэтому целью данной работы было изучение морфометрических показателей хвои сосны обыкновенной, произрастающей в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике (ПГРЭЗ), в отдаленный период после аварии на ЧАЭС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Импактные участки были выбраны на территории ПГРЭЗ в Хойникском и Брагинском районах Гомельской области республики Беларусь (рис. 1). Контрольные участки расположены вне заповедника, на расстоянии около 70 км от ЧАЭС.

Таблица 1. Данные о радиационной обстановке на изучаемых участках
Table 1. Data on the radiation situation at the studied sites

Участки	Географические координаты	Мощность амбиентного эквивалента дозы на высоте 1 м, мкЗв/ч	Удельная активность ¹³⁷ Cs в хвое 2-летн., Бк/кг
Руд 1	51°58'45.7" с.ш. 29°53'41.93" в.д.	0.10 ± 0.004	495 ± 103
Руд 2	51°58'41.3" с.ш. 29°53'46.86" в.д.	0.10 ± 0.005	320 ± 48
Гнез	51°38'58.09" с.ш. 29°48'25.96" в.д.	0.25 ± 0.001	2537 ± 278
Мас	51°30'27.86" с.ш. 30°1'49.3" в.д.	2.67 ± 0.05	21070 ± 950
Кул	51°33'16.88" с.ш. 30°13'36.48" в.д.	9.85 ± 0.34	58950 ± 1970

Географические координаты и параметры радиационной обстановки в 2021 г. представлены в табл. 1.

Почва исследуемых участков — дерново-подзолистая, физико-химические характеристики сходны. Состав насаждений 10С, тип леса и условий произрастания — сосняк мшистый (А₂), бонитет I-II. Модельные деревья II класса возраста.

Двухлетнюю хвою отбирали в конце июня 2021 г. с 11 деревьев на каждом участке. На 50 парах хвоинок с дерева оценивали следующие морфометрические показатели хвои: длина, масса, индекс флуктуирующей асимметрии длины и массы. Длину хвои измеряли линейкой с точностью до 0.5 мм. Далее хвою подсушивали 14 мин в сушильном шкафу с доведением температуры до 125°C. Взвешивание проводили на лабораторных аналитических весах марки Ohaus Adventurer Pro (Ohaus Corporation, Pine Brook, США) с точностью до 0.1 мг. Индекс ФА по длине и массе хвоинок рас-

считывали согласно методике [18]. Степень поражения хвои некрозом оценивали по методике [19].

При статистической обработке данные были проверены на наличие выбросов, которые исключены из дальнейшего анализа. Результаты представлены как средние значения и стандартные ошибки среднего. Все расчеты, включая корреляционный анализ, проводили в программном обеспечении Microsoft Office Excel 2003. Для определения значимости отличия от контроля использовали *U*-критерий Манна-Уитни в Statistica 8.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Длина и масса хвои. Согласно полученным данным (рис. 2), длина хвои сосны обыкновенной с наиболее радиоактивно загрязненного участка Кулажин значительно выше обеих контролей. Выявлена положительная корреляция между длиной хвоинок и мощностью амбиентного эквивалента

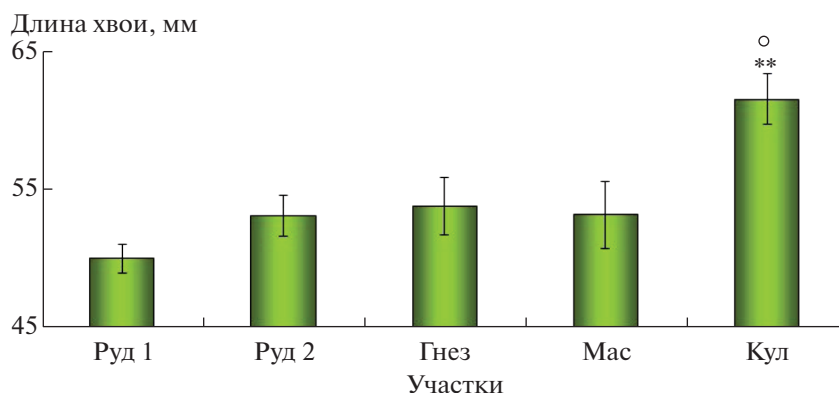


Рис. 2. Зависимость длины хвои сосны обыкновенной от участка.

** Значимое отличие от контрольного участка Руд 1, $p < 0.01$; ° — значимое отличие от контроля Руд 2, $p < 0.05$.

Fig. 2. Needle length in relation to the study plots.

** Significant difference from Rud 1, $p < 0.01$; ° — significant difference from Rud 2, $p < 0.05$.

Таблица 2. Масса хвои на исследуемых участках
Table 2. Needles weight at the study plots

Параметр	Участки				
	Руд 1	Руд 2	Гнез	Мас	Кул
Масса хвои, мг	11.5 ± 0.5	15.8 ± 0.8*	12.4 ± 1.0	11.8 ± 0.8	13.6 ± 0.8

* Значимое отличие от контрольного участка Руд 1, $p < 0.05$.

дозы на высоте 1 м ($r = 0.93$; $p < 0.05$), удельной активностью ^{137}Cs в хвое 2-го года ($r = 0.92$; $p < 0.05$).

На референтном участке Руд 2 масса двухлетней хвои значимо выше контрольного уровня Руд 1 (табл. 2). Зависимость этого показателя от мощности амбиентного эквивалента дозы ($r = 0.07$) и удельной активностью ^{137}Cs в хвое 2-го года ($r = 0.23$) отсутствует.

Флуктуирующая асимметрия. Данные о длине и массе парных хвоинок были использованы для оценки индексов ФА по длине и массе хвои и изучения закономерностей их изменения в условиях хронического радиационного воздействия. Индекс ФА по длине хвои на участке Масаны значимо превышает контрольный уровень Руд 2 (рис. 3). Корреляционный анализ не выявил зависимости данного параметра от мощности амбиентного эквивалента дозы ($r = 0.30$) и удельной активности ^{137}Cs в хвое 2-го года ($r = 0.35$).

Индекс ФА, рассчитанный по массе парных хвоинок представлен в табл. 3 и не имеет значимых отличий от контрольных значений. Обнаружена положительная корреляция между данным показателем и мощностью амбиентного эквивалента дозы ($r = 0.89$; $p < 0.05$) и удельной активностью ^{137}Cs в хвое 2-го года ($r = 0.92$; $p < 0.05$).

Нарушение морфогенеза, определяемое по наличию брахибласт с тремя хвоинками, было обнаружено только на участке Гнездинка в единствен-

ном экземпляре. Поэтому данных для каких-либо заключений о таких нарушениях развития недостаточно.

Некрозы хвои. При изучении частоты встречаемости некротических пятен на хвое выделяли три степени поражения, частота которых представлена на рис. 4.

Частота здоровой хвои значимо ниже на всех радиоактивно загрязненных участках и контрольном участке Руд 2. Корреляционный анализ выявил не значимую отрицательную корреляцию здоровой хвои с мощностью амбиентного эквивалента дозы ($r = -0.50$; $p > 0.05$) и удельной активностью ^{137}Cs в хвое 2-го года ($r = -0.55$; $p > 0.05$).

ОБСУЖДЕНИЕ

При высоких уровнях промышленных выбросов [20] или радионуклидного загрязнения [21] наблюдается угнетение ростовых процессов, характеризующееся снижением длины хвои, линейного прироста побегов, массы хвои и др. Г.М. Козубовым и соавт. [22] было обнаружено стимулирующее действие облучения в дозах 0.7–1.0 Гр на сосну, выразившееся в увеличении массы хвои в 1.5 раза. Таким образом, эффекты хронического воздействия на морфологические характеристики не всегда однозначны. Полученные в данной работе результаты по оценке длины хвои согласуются с полученными нами ранее [23]. В 2016 г. длина хвои была значимо больше на

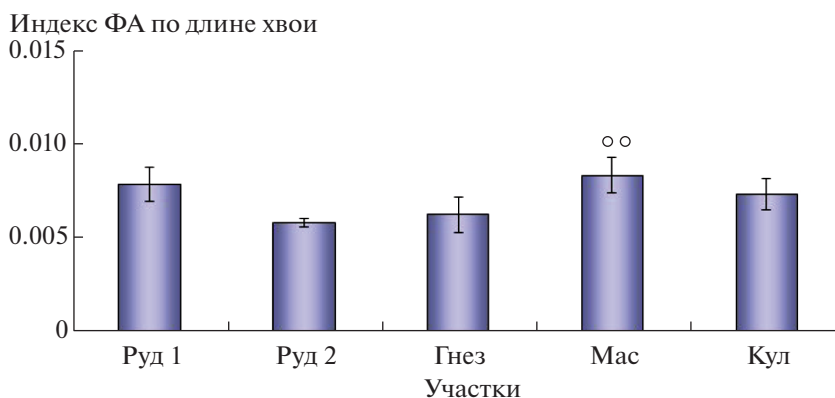


Рис. 3. Зависимость индекса ФА длины хвои от участка.
°° Значимое отличие от контрольного участка Руд 2, $p < 0.01$.

Fig. 3. FA index estimated from needle length measurements in relation to the study plots.
°° Significant difference from Rud 2, $p < 0.01$.

Таблица 3. Индекс ФА по массе хвои на исследуемых участках
Table 3. Needles weight FA indices at the study plots

Параметр	Участки				
	Руд 1	Руд 2	Гнез	Мас	Кул
Индекс ФА по массе	0.052 ± 0.003	0.053 ± 0.004	0.052 ± 0.004	0.056 ± 0.004	0.057 ± 0.003

участке Кулажин, чем на участке Масаны ($p < 0.003$). А в результатах 2021 г. длина хвои на участке Кулажин также значительно превышает данный показатель на площадке Масаны ($p < 0.004$), что свидетельствует о воспроизводимости результатов, хотя они были получены на других деревьях. Однако в 2016 г. в качестве референтных были использованы популяции из Брянской области приблизительно в 200 км от импактных участков, тогда как в 2021 г. расстояние между референтными и наиболее удаленными импактными участками составляло около 50 км. Таким образом, вероятны некоторые различия как в почвенных характеристиках, так и в природно-климатических условиях, которые повлияли на то, что разница длины хвои между контрольными популяциями в разные годы составила 13 мм. Поэтому, несмотря на то что обнаружено значимое уменьшение длины хвои на радиоактивно загрязненных территориях относительно референтных участков [23] и увеличение длины хвои в исследовании 2021 г., сделать однозначный вывод о влиянии хронического радиационного воздействия на размеры хвои не представляется возможным в том числе из-за разных контрольных уровней.

За 4 года исследования воздействия радиоактивного загрязнения в районе аварии Чернобыльской АЭС на массу хвои сосны обыкновенной только в 2013 г. было обнаружено значимое превышение уровня контрольного участка для

всех импактных популяций [24]. В остальные годы, как и в 2021 г., устойчивой связи с уровнем радиационного воздействия обнаружено не было.

Значимое повышение индекса ФА по длине хвои сосны на импактных участках встречалось ранее как в районе Чернобыльской, так и Фукусимской аварии [24, 25]. Однако, как и в данной работе, увеличение ФА обнаружено не на всех радиоактивно загрязненных участках. В настоящее время в районе аварии ЧАЭС при диапазоне внешней (0.1–40 мкГр/ч) и внутренней (0.1–273 мкГр/ч) мощности поглощенной дозы не обнаружены изменения флуктуирующей асимметрии листьев березы и хвои сосны обыкновенной [4]. Вероятно, исследуемые уровни радиоактивного загрязнения недостаточны для индуцирования устойчивого морфологического эффекта или это связано с особенностями самого метода. Согласно работе [2], где исследовали четыре поколения *Arabidopsis thaliana* при хроническом радиационном воздействии ^{137}Cs , значимые различия с контролем по вертикальной асимметрии были обнаружены только в 50% случаев.

Результаты исследования индекса ФА по массе хвои с отсутствием значимых отличий от контроля согласуются с полученными ранее данными для сосны обыкновенной и красной японской сосны, произрастающими в условиях хронического радиационного воздействия [23, 25]. Положительная корреляция данного показателя с

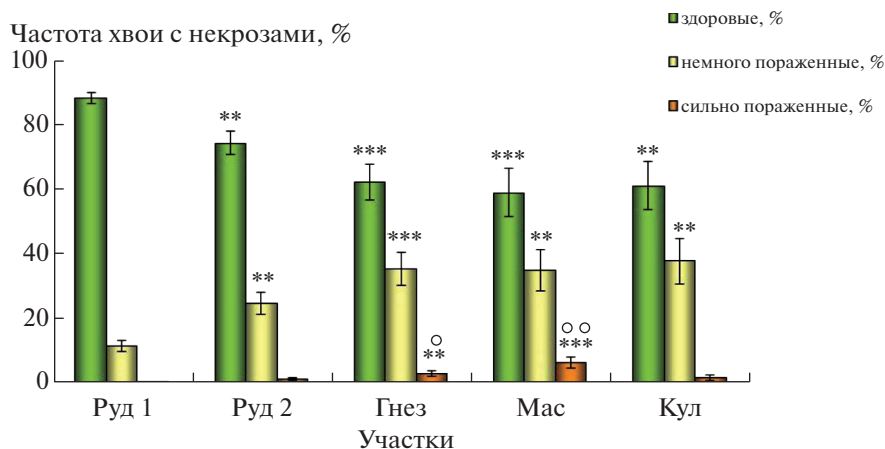


Рис. 4. Частота поражения некрозами хвои сосны обыкновенной на исследуемых участках.

** и *** – значимые отличия от контроля Руд 1, $p < 0.01$ и $p < 0.001$; ° и °° – значимые отличия от контроля Руд 2, $p < 0.05$ и $p < 0.01$.

Fig. 4. Frequency of needles with necrotic damage depending on the study plots.

** , *** – significant difference from Rud 1, $p < 0.01$, $p < 0.001$; °, °° – significant difference from Rud 2, $p < 0.05$, $p < 0.01$.

мощностью амбиентного эквивалента дозы и удельной активностью ^{137}Cs в хвое, видимо, требует дополнительного подтверждения. Sandner and Matthies [26] указывают, что флуктуирующая асимметрия является плохим показателем стресса из-за слабых корреляций у *Silene vulgaris* (Moench), поскольку даже после воздействия семи разных методов обработки стрессом (включая засуху и токсичность металлов) корреляции были слабыми. Наиболее сильные корреляции были обнаружены только при воздействии стресса высокой интенсивности, и поэтому для хронического стресса с низкой дозой ионизирующего излучения это, возможно, не было наиболее подходящим показателем. Тем не менее Sandner и Matthies не измеряли асимметрию после облучения, поэтому данный метод нельзя полностью отвергать как вариант исследования.

Аналогично работе [23], частота здоровой хвои в 2021 г. отрицательно коррелирует с уровнем радиационного воздействия, а пораженной некрозом – положительно. Некроз хвои был отмечен на соснах, получивших дозы 15–20 Гр после аварии на ЧАЭС [27]. В такой хвое были обнаружены черные включения и потемнение цитоплазмы в клетках гипо- и эндодермы и трансфузионной ткани, различные виды повреждения мезофилла, а местами и разрушение клеток мезофилла.

Результаты данного эксперимента на сосне обыкновенной не продемонстрировали значимых морфологических эффектов в хронически облучаемых популяциях, но выявили некоторые изменения длины, ФА длины хвои, поражения ее некрозом. Поэтому необходимы дальнейшие исследования для уточнения возможных биологических последствий аварии на ЧАЭС в отдаленный период.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-16-00004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beresford N.A., Fesenko S., Konoplev A. et al. Thirty years after the Chernobyl accident: what lessons have we learnt? // J. Environ. Radioact. 2016. V. 157. P. 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.003>
2. Caplin N.M. Developmental, morphological and physiological effects of chronic low doses of ionizing radiation on plants on earth and in space: A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. 2019. 254 p.
3. Yavnyuk A.A., Efremova N.N., Protsenko O.N. et al. Fluctuating asymmetry of zebra mussel (*Dreissena polymorpha* Pall.) and floating pondweed (*Potamogeton natans* L.) in water bodies within the Chernobyl accident Exclusion Zone // Radioprot. 2009. V. 44. № 5. P. 475–479. <https://doi.org/10.1051/radiopro/20095088>
4. Kashparova E., Levchuk S., Morozova V. et al. 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 // J. Environ. Radioact. 2020. V. 211. P. 105731. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.05.015>
5. Fuller N., Smith J.T., Nagorskaya L.L. et al. Does Chernobyl-derived radiation impact the developmental stability of *Asellus aquaticus* 30 years on? // Sci. Total Environ. 2017. V. 576. P. 242–250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.097>
6. Fuller N., Smith J.T., Takase T. et al. Radiocaesium accumulation and fluctuating asymmetry in the Japanese mitten crab, *Eriocheir japonica*, along a gradient of radionuclide contamination at Fukushima // Environ. Pollut. 2022. V. 292. P. 118479. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118479>
7. Oleksyk T.K., Novak J.M., Purdue J.R. et al. High levels of fluctuating asymmetry in populations of *Apodemus flavicollis* from the most contaminated areas in Chernobyl // J. Environ. Radioact. 2004. V. 73. № 1. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2003.07.001>
8. ICRP. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants // Ann. ICRP. 2008. V. 38. № 4–6. P. 1–242.
9. Geras'kin S., Oudalova A., Dikareva N. et al. Effects of radioactive contamination on Scots pines in the remote period after the Chernobyl accident // Ecotoxicol. 2011. V. 20. P. 1195–1208. <https://doi.org/10.1007/s10646-011-0664-7>
10. Geras'kin S., Oudalova A., Kuzmenkov A. et al. Chronic radiation exposure modifies temporal dynamics of cytogenetic but not reproductive indicators in Scots pine populations // Environ. Pollut. 2018. V. 239. P. 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.058>
11. Volkova P., Geras'kin S., Kazakova E. Radiation exposure in the remote period after the Chernobyl accident caused oxidative stress and genetic effects in Scots pine populations // Scientific Rep. 2017. V. 7. P. 43009. <https://doi.org/10.1038/srep43009>
12. Volkova P.Y., Geras'kin S.A., Horemans N. et al. Chronic radiation exposure as an ecological factor: hypermethylation and genetic differentiation in irradiated Scots pine populations // Environ. Pollut. 2018. V. 232. P. 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.123>
13. Kazakova E.A., Volkova P.Yu., Geras'kin S.A. Analysis of Changes in the Genetic Structure of Chronically Irradiated Scots Pine Populations // Rus. J. Genetics: Appl. Res. 2018. V. 8. № 2. P. 124–134. <https://doi.org/10.1134/S2079059718020065>
14. Duarte G.T., Volkova P.Yu., Geras'kin S.A. The response profile to chronic radiation exposure based on the transcriptome analysis of Scots pine from Chernobyl affected zone // Environ. Pollut. 2019. V. 250. P. 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.064>
15. Geras'kin S., Vasiliyev D., Makarenko E. et al. Influence of long-term chronic exposure and weather conditions on Scots pine populations // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. V. 24. P. 11240–11253. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8692-3>
16. Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы. М.: НПЦ “Дизайн. Информация.

- Картография”, 2002. 256 с. [Kozubov G.M., Taskaev A.I. Radiobiologicheskie issledovanija hvoynih v rajone Chernobyl'skoj katastrofy. M.: NPC “Dizajn. Informacija. Kartografija”, 2002. 256 p. (In Russ.)]
17. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь) / Под ред. Ю.А. Израэля, И.М. Богдевича. М.: Фонд “Инфосфера” – НИА-Природа; Минск: Белкартография, 2009. 140 с. [Atlas sovremennyh i prognoznyh aspektov posledstvij аварии na Chernobyl'skoj AJeS na postradavshih territorijah Rossii i Belarusi (ASPA Rossija-Belarus') / Pod red. Ju.A. Izrajelja, I.M. Bogdevicha. Moskva: Fond “Infosfera” – NIA-Priroda; Minsk: Belkarografija; 2009. 140 p. (In Russ.)]
 18. 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.
 19. Экологический мониторинг: Учеб.-метод. пособие / Под ред. Т.Я. Ашихминой. М.: Академический проект, 2005. 416 с. [Jekologicheskij monitoring: Ucheb.-metod. posobie / Pod red. T.Ja. Ashihminoj. M.: Akademicheskij projekt; 2005. 416 p. (In Russ.)]
 20. Афанасьева Л.В., Кашин В.К., Пleshанов А.С. и др. Элементный состав хвои и морфологические параметры сосны обыкновенной в условиях атмосферного промышленного загрязнения в западном Забайкалье // Хвойные бореальные зоны. 2004. Вып. 2. С. 112–119. [Afanas'eva L.V., Kashin V.K., Pleshanov A.S. i dr. Jelementnyj sostav hvoi i morfologicheskije parametry sosny obyknovnoj v uslovijah atmosfernogo promyshlennogo zagrijaznenija v zapadnom Zabajkal'e // Hvoynye boreal'nye zony. 2004. V. 2. P. 112–119. (In Russ.)]
 21. Федотов И.С., Кальченко В.А., Игонина Е.В. и др. Радиационно-генетические последствия облучения популяции сосны обыкновенной в зоне аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2006. Т. 46. № 3. С. 268–278. [Fedotov I.S., Kal'chenko V.A., Igonina E.V. et al. Radiation and genetic consequences of ionizing irradiation on population of *Pinus sylvestris* L. within the zone of the Chernobyl NPP // Radiation biology. Radioecology. 2006. V. 46. № 3. P. 268–278. (In Russ.)]
 22. Козубов Г.М., Патов А.П., Кузин Е.А. Биометрические исследования вегетативных побегов сосны и ели при хроническом облучении // Тр. Коми научного центра УрО РАН. 1993. С. 105–117. [Kozubov G.M., Patov A.P., Kuzin E.A. Biometricheskie issledovanija vegetativnyh pobegov sosny i eli pri hronicheskom obluchenii // Trudy Komi nauchnogo centra UrO RAN. 1993. P. 105–117. (In Russ.)]
 23. Макаренко Е.С. Исследование морфологических параметров и генетического полиморфизма в природных популяциях сосны обыкновенной в условиях хронического радиационного воздействия: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2018. 26 с. [Makarenko E.S. Issledovanie morfologicheskikh parametrov i geneticheskogo polimorfizma v prirodnyh populjacijah sosny obyknovnoj v uslovijah hronicheskogo radiacionnogo vozdejstvija. [dissertation] Obninsk; 2018. 26 p. (In Russ.)]
 24. Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A. Morphometric Measurements of Scots Pine Needles from Radioactively Contaminated Area // XIII International Youth Scientific and Practical Conference “FUTURE OF ATOMIC ENERGY – AtomFuture 2017”, KnE Engineering. 2017. P. 8–13. <https://doi.org/10.18502/keg.v3i3.1601>.
 25. Geras'kin S., Yoschenko V., Bitarishvili S. et al. Multifaceted effects of chronic radiation exposure in Japanese red pines from Fukushima prefecture // Sci. Total Environ. 2021. V. 763. P. 142946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142946>
 26. Sandner T.M., Matthies D. Fluctuating asymmetry of leaves is a poor indicator of environmental stress and genetic stress by inbreeding in *Silene vulgaris* // Ecological Indicators. 2017. V. 79. P. 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.030>
 27. Goltsova N., Abaturov Y., Abaturov A. et al. Chernobyl radionuclide accident: Effects on the shoot structure of *Pinus sylvestris* // Ann. Bot. Fennici. 1991. V. 28. № 1. P. 1–13.

Morphometric Indicators of Pine Needles 35 Years after the Chernobyl Accident

E. S. Makarenko^{a, #}, M. A. Lychenkova^a, S. A. Geras'kin^a,
A. N. Perevolotsky^a, and T. V. Perevolotskaya^a

^aRussian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

[#]E-mail: makarenko_ek_obninsk@mail.ru

35 years after the accident at the Chernobyl nuclear power plant, morphometric indicators of the needles of Scots pine growing on the territory of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve in the Gomel' region of Belarus were evaluated. In 2021, the variability of needles in length and weight, the indices of fluctuating asymmetry, the frequency and degree of damage to needles by necrosis at three impact and two control plots were studied. The power of the equivalent ambient dose of gamma radiation was from 0.25 to 9.85 mSv/h at a height of 1 m at the impact plots. The length and weight of needles, the indices of fluctuating asymmetry in the studied populations had significant differences from the control values, but were not of a systemic nature. The frequency of needles heavily damaged by necrosis in the most radioactively contaminated sites is significantly higher, than both controls. Thus, even 35 years after the accident, some morphological changes can be detected in the populations of Scots pine, one of the most radiosensitive plant species, which, however, are already few.

Keywords: Scots pine, Chernobyl accident, chronic irradiation, needles, necrosis, fluctuating asymmetry