

УДК 539.1.047:582.475.4:574.24

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХВОИ КРАСНОЙ ЯПОНСКОЙ СОСНЫ В РАЙОНЕ АВАРИИ ФУКУСИМСКОЙ АЭС¹

© 2021 г. Е. С. Макаренко^а, *, С. А. Гераськин^а, В. И. Йощенко^б, М. А. Лыченкова^а

^аФГБНУ “Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии”,
Киевское шоссе, 109-й км, г. Обнинск, Калужская область, 249032 Россия

^бИнститут радиоактивности окружающей среды Фукусимского университета,
Канаягава, 1, Фукусима, 960-1296 Япония

*E-mail: makarenko_ek_obninsk@mail.ru

Поступила в редакцию 14.01.2020 г.

После доработки 04.03.2020 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Изучены морфометрические и морфологические параметры хвои красной японской сосны, произрастающей на радиоактивно загрязненных в результате аварии на Фукусимской АЭС территориях Японии. Сосна является уникальным, широко распространенным объектом исследования, который обладает разнообразными информативными и чувствительными тест-системами на разных уровнях организации. В данной работе в 2019 г. исследована изменчивость двухлетней хвои по массе и длине, оценены индексы флуктуирующей асимметрии, а также частота встречаемости некрозов и морфозов (треххвойные брахибласты) на четырех импактных и одном референтном участке. Мощность амбиентного эквивалента дозы изменялась на радиоактивно загрязненных участках от 3.4 ± 0.1 до 6.4 ± 0.4 мкЗв · ч⁻¹ (в контроле — 0.25 ± 0.05 мкЗв · ч⁻¹). Статистически значимой корреляции исследуемых показателей хвои с уровнем радиационного воздействия не обнаружено. Длина хвои значимо повышена только на одном импактном участке, а масса хвои — на большинстве участков, испытывающих радиационное воздействие. Индекс флуктуирующей асимметрии длины хвои на участке с наибольшей мощностью дозы значимо превышает контрольный уровень. Индекс флуктуирующей асимметрии массы хвои на всех импактных площадках значимо не отличался от контроля. Частота сильно пораженных некрозом хвоинок значимо выше на большинстве радиоактивно загрязненных участков. Обнаружены брахибласты с тремя хвоинками на всех исследуемых площадках, на большинстве импактных участков их частота выше, чем на контрольном участке. Таким образом, даже спустя 8 лет после аварии на Фукусимской АЭС часть значений морфологических и морфометрических показателей в популяциях красной японской сосны, произрастающих на радиоактивно загрязненных участках, статистически значимо превышает контрольный уровень.

Ключевые слова: красная японская сосна, хроническое облучение, хвоя, авария на Фукусимской АЭС.

DOI: 10.31857/S0024114821010071

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 для территорий, пострадавших в результате радиационных аварий на ПО “Маяк”, Чернобыльской и Фукусимской АЭС.

Данные о высокой радиочувствительности хвойных растений были получены еще в начале 60-х годов (Sparrow, Woodwell, 1962). В клетках хвойных растений очень крупные ядра, хромо-

сомные наборы содержат в несколько раз больше ДНК, чем у покрытосеменных растений (Козубов, Муратова, 1986). Большой размер генома сосны по сравнению с большинством других растений, достигающий 24.6 Гб (Ahuja, Neale, 2005), и большие интерфазные хромосомы объемом до 61.1 мкм³ (Conger et al., 1982) обусловили повышенную ее чувствительность к ионизирующему излучению (LD₅₀ 5–20 Гр) (Сарапульцев, Гераськин, 1993).

Сосна красная японская, или густоцветковая (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc) формирует монодоминантные леса, в значительной степени определяя структуру и функции лесной экосистемы. Она имеет широкий ареал произрастания в Япо-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (19-54-50003) и гранта JSPS в рамках двусторонней программы поддержки совместных проектов РФФИ-JSPS.

нии и важное хозяйственное значение, радиочувствительна (LD_{50} 6 Гр) (Sparrow et al., 1971). Сосна внесена в список референтных растений и животных, рекомендованных Международной комиссией по радиационной защите для проведения оценки и ограничения радиационного воздействия на окружающую среду в условиях хронического облучения (ICRP, 2008).

На территориях, загрязненных в результате аварий на Чернобыльской АЭС и на ПО «Маяк», эффекты радиационного воздействия на лесные экосистемы активно изучались преимущественно на примере сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). При облучении в высоких дозах наблюдали различные нарушения вегетативных органов: образование морфозов, угнетение прироста побегов, опадение хвои, изменение ее размеров, усиленное почкование на верхушках годовых побегов, изменение ультраструктуры хвои, подавление роста меристематических тканей, снижение прироста древесины по диаметру и т.д. (Козубов, 1996; Козубов, Таскаев, 2002; Федотов и др., 2006). В лесонасаждениях, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения в дозах от 0.5 до 1.0 Гр, наблюдали (Федотов и др., 2006) явление стимуляции, которое в 1986 г. проявилось в увеличении прироста годовых побегов. По другим показателям роста и развития насаждения сосны в этой зоне не отличались от контроля. На радиоактивно загрязненных после аварии на Фукусимской АЭС территориях у молодых деревьев ели (Watanabe et al., 2015) и красной японской сосны (Yoschenko et al., 2016) было обнаружено увеличение частоты подавления апикального доминирования, однако морфологические показатели хвои изучены не были. Таким образом, морфологические характеристики вегетативных органов хвойных растений из 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС исследованы достаточно подробно, в то время как о радиобиологических эффектах у растений с территорий, прилегающих к Фукусимской АЭС, информации явно недостаточно. Целью настоящей работы являлась оценка морфометрических показателей хвои красной японской сосны в условиях хронического радиационного воздействия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследование проводили на 4 экспериментальных участках, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Фукусимской АЭС. В качестве контроля был выбран участок на территории кампуса Фукусимского университета (рис. 1). Мощность амбиентного эквивалента дозы на высоте 1 м измеряли в мае 2019 г. сцинтилляционным дозиметром (PDR-111, Hitachi-Aloka Medical, Ltd.).

Ниже представлена характеристика участков, на которых было выполнено исследование.

F – Fukushima University Campus – контрольный участок (37.682921 с.ш.; 140.456635 в.д.), представляет собой ступенчатый склон. Полнота насаждений – 0.7. Возраст деревьев – 5–10 лет. Красновато-желтая почва. Мощность дозы – 0.25 ± 0.05 мкЗв · ч⁻¹.

A – Akibadai (37.411508 с. ш.; 140.960887 в. д.). Участок представляет собой заброшенное рисовое поле. Полнота насаждений – 0.5. Средний возраст деревьев – 6 лет. Почва – андосоли. Мощность дозы – 3.4 ± 0.1 мкЗв · ч⁻¹.

T – Tsushima Farm (37.553270 с.ш.; 140.786833 в.д.). Заброшенное поле. Полнота насаждений – 1.0. Возраст большинства деревьев – 7 лет. Почва – андосоли. Мощность дозы – 3.5 ± 0.3 мкЗв · ч⁻¹.

S – Tsushima School (37.562330 с.ш.; 140.768256 в.д.). Бывшая спортивная площадка. Полнота насаждений – 0.5. Средний возраст деревьев – 5 лет. Мощность дозы – 3.7 ± 0.4 мкЗв · ч⁻¹.

O – Okuma Sports Center (37.411911 с. ш.; 140.994318 в. д.). Участок расположен около дороги. Полнота насаждений – 1.0. Средний возраст деревьев – 8 лет. Слаборазвитая почва. Мощность дозы достигала 6.4 ± 0.4 мкЗв · ч⁻¹.

Для анализа состояния хвои на участках F, A, T, S и O пробы отбирали в мае 2019 г. с 11, 9, 7, 11 и 11 деревьев, соответственно. С каждого дерева собирали по 30–60 пар двухлетних хвоинок. Хвою без признаков усыхания отбирали на высоте 1.5–2 м с разных сторон дерева и хранили в морозильной камере до проведения измерений. Оценивали морфометрические параметры (длина и масса хвои, индексы флуктуирующей асимметрии) и состояние хвои (частота морфозов, количество некротических образований). Парные хвоинки разделяли, длину определяли с точностью до 0.5 мм, массу подсушенных в сушильном шкафу хвоинок определяли с точностью до 0.1 мг на лабораторных аналитических весах Ohaus Adventurer Pro (Ohaus Corporation, Pine Brook, USA). Индекс ФА хвои по длине и массе хвоинок рассчитывали по формулам (Kozlov et al., 2002a). Классификацию некротических повреждений проводили по стандартной методике (Экологический мониторинг ..., 2005).

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.

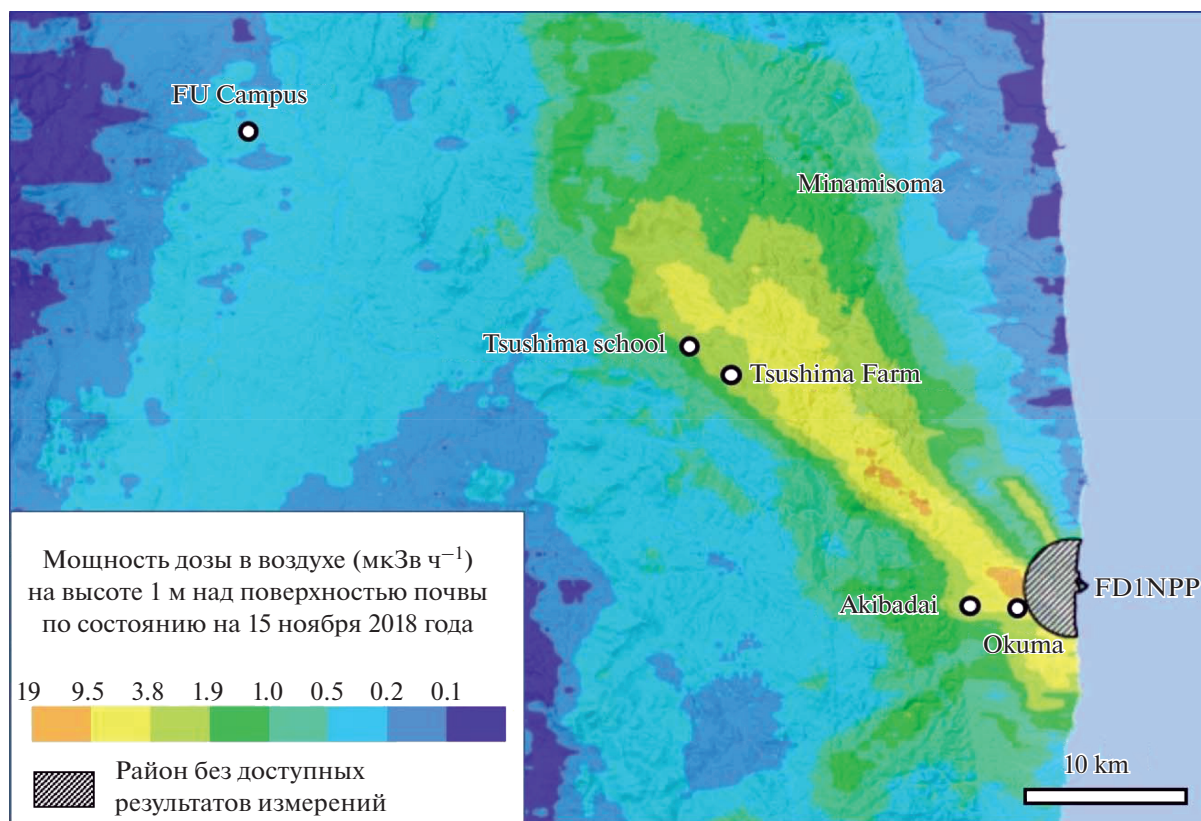


Рис. 1. Расположение экспериментальных участков и мощность дозы в воздухе на территории, радиоактивно загрязненной в результате аварии на Фукусимской АЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Масса и длина хвои. Представленные на рис. 2 результаты свидетельствуют о значимом увеличении массы хвои на участках А, Т, S по сравнению с контролем. Данные результаты являются предварительными. Возможно увеличение массы хвои является проявлением стимулирующего действия малых доз радиации. Также вероятно, что оно обусловлено индивидуальной изменчивостью деревьев или локальными условиями произрастания. Поэтому в 2020 г. будет проведено повторное исследование морфометрических показателей хвои с большим числом деревьев.

Стимулирующее действие облучения в дозах 0.7–1 Гр на сосну, в результате которого масса хвои увеличилась в 1.5 раза, было обнаружено Г.М. Козубовым с соавт. (1993). Также увеличенная относительно контроля масса хвои выявлена в условиях хронического радиационного воздействия на территории Брянской области, загрязненной радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС (Makarenko et al., 2016). Согласно работам Н.И. Гольцовой (1990), Г.М. Козубова и А.И. Таскаева (2007), 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. В целом увеличение сечения отдельных элементов шло параллельно с увеличением общей площади сечения хвои. Аналогичная картина наблюдалась и в отношении хвои ели. В 1987 г. у подавляющего большинства деревьев резко возросли все параметры хвои и на вегетативных побегах сформировалась крупная прямая и сильно изогнутая утолщенная хвоя.

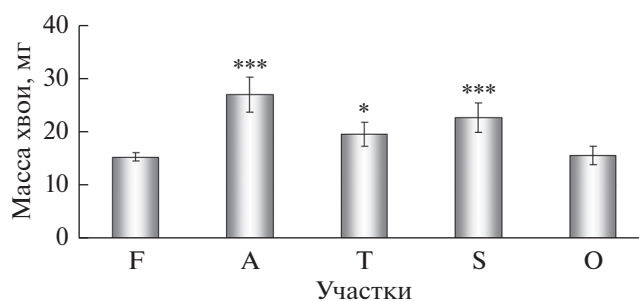


Рис. 2. Масса хвои красной японской сосны на исследуемых участках

* и *** — значимое отличие от контрольного участка, $p < 0.05$, $p < 0.001$.

Таблица 1. Длина хвои на исследуемых участках в зависимости от мощности дозы

Параметр	Участок				
	F	A	T	S	O
Мощность дозы, мкЗв · ч ⁻¹	0.25	3.4	3.5	3.7	6.4
Длина хвои, мм	79.0 ± 4.6	93.5 ± 6.3*	81.3 ± 6.4	83.0 ± 4.5	75.4 ± 4.8

* Значимое отличие от референтного участка, $p < 0.05$.

Таблица 2. Индекс флуктуирующей асимметрии по массе хвоинок на исследуемых участках в зависимости от мощности дозы

Параметр	Участок				
	F	A	T	S	O
Мощность дозы, мкЗв · ч ⁻¹	0.25	3.4	3.5	3.7	6.4
Индекс ФА по массе	0.041 ± 0.003	0.045 ± 0.003	0.043 ± 0.004	0.044 ± 0.003	0.045 ± 0.002

В 1987 г. наряду с общим увеличением параметров хвои ели наблюдали возрастание диаметров клеток эпидермы, гиподермы и мезофилла, причем наиболее интенсивное укрупнение гистологических элементов было отмечено у хвои с максимальными площадями сечения (которые превысили показатели доаварийного 1985 г.), т.е. абсолютные показатели, как правило, были пропорциональны общим морфометрическим показателям. Относительные (парциальные) объемы тканей оставались близкими к нормальной хвое. Некоторым исключением являлся относительный объем проводящего цилиндра, который достиг наибольших величин у сильно укороченной хвои в 1986 г. и у гигантской хвои — в 1987 г. В настоящей работе значимое ($p < 0.05$) увеличение длины хвои относительно контрольного участка (табл. 1) обнаружено только на участке А.

Флуктуирующая асимметрия (ФА). Данные о массе и длине парных хвоинок были использованы для оценки индексов ФА по массе и длине хвои и

изучения закономерностей их изменения в условиях хронического радиационного воздействия.

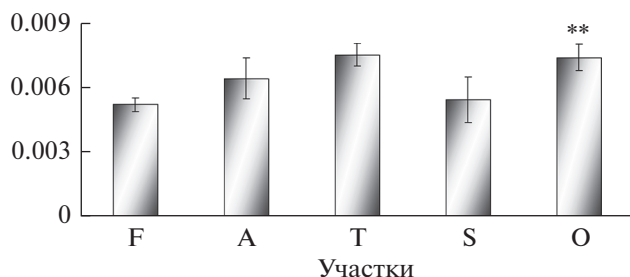
Индекс ФА по массе хвои хотя и превышает контрольный уровень во всех импактных популяциях, но не отличается от него значимо (табл. 2) и не имеет значимой зависимости от мощности амбиентного эквивалента дозы.

Результаты оценки индекса флуктуирующей асимметрии по длине хвои красной японской сосны, произрастающей на радиоактивно загрязненной территории, представлены на рис. 3. На площадке О с максимальным уровнем радиоактивного загрязнения индекс ФА по длине значимо превышает контрольный уровень ($p < 0.01$).

Метод оценки флуктуирующей асимметрии на сосне обыкновенной для определения воздействия техногенного загрязнения был впервые применен относительно недавно — в 1999 г. (Kozlov, Niemela, 1999). Исследователями было установлено увеличение асимметрии длины хвои сосны по мере приближения к комбинату Североникель (основными поллютантами являлись никель, медь и их производные, а также сульфаты). Аналогичный эффект был отмечен в работе (Василевская, Тумарова, 2005) возле Ковдорского горно-обогательного комбината и близ медно-никелевого завода в Финляндии (Kozlov et al., 2002b). Действие промышленного загрязнения на морфометрические показатели хвои сосны обыкновенной изучали многие ученые, но действие как острого, так и хронического облучения на флуктуирующую асимметрию хвои красной японской сосны до сих пор остается малоизученным.

Исследования асимметрии в условиях радиационного воздействия было проведено на разных видах растений. Значимая корреляция между

Индекс ФА по длине хвои

**Рис. 3.** Индекс флуктуирующей асимметрии по длине хвои.

** — значимое отличие от референтного участка, $p < 0.01$.

флуктуирующей асимметрией листьев и плотностью загрязнения ^{137}Cs наблюдалась для трех видов растений: робинии ложноакациевой (*Robinia pseudoacacia* L.), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) и ромашки продырявленной (*Matricaria perforata* Merat) (Møller, 1998). Рядом с Чернобыльской зоной отчуждения все три вида продемонстрировали уровень нестабильности развития в три-четыре раза выше, чем в незагрязненных районах вдали от Чернобыльской АЭС. 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). Индекс ФА листьев лапчатки кустарниковой (*Potentilla fruticosa* L.) с контрастных по уровню радиоактивного загрязнения участков Восточно-Уральского радиоактивного следа увеличивался с уровнем радиоактивного загрязнения вне зависимости от периода вегетации и года наблюдения (Храмова и др., 2019). Хроническое воздействие ионизирующего излучения (при мощности поглощенной дозы на поверхности почвы $4.74 \text{ мкГр} \cdot \text{ч}^{-1}$) привело к увеличению интегрального индекса ФА листьев березы повислой (на 30%) и содержания в них хлорофилла *a* (на 50%) и хлорофилла *b* (на 83%) (Иванов и др., 2015).

Как было замечено (Молотковский Г., Молотковский Ю., 1961), обычно бо́льшая сторона листа (слева или справа от жилки) характеризуется бо́льшим содержанием хлорофилла, аскорбиновой кислоты и бо́льшей активностью каталазы и пероксидазы. Таким образом, морфологическое выражение асимметричности имеет подтверждение в физиолого-биохимических процессах.

На хвое сосны обыкновенной был выявлен повышенный индекс флуктуирующей асимметрии по длине на протяжении трех из четырех лет исследования на наиболее радиоактивно загрязненных участках Брянской области (Makarenko et al., 2017b). Однако согласно другим исследованиям (Kashparova et al., 2018), не было обнаружено зависимости ФА хвои сосны обыкновенной и листьев березы (*Betula pendula* Roth) от уровня радиационного воздействия в ближней зоне Чернобыльской АЭС при мощности дозы от 0.1 до $40 \text{ мкГр} \cdot \text{ч}^{-1}$. Таким образом, согласно нашим данным, индекс ФА, определяемый по разнице длин парных хвоинок, является более чувствительным индикатором хронического радиационного воздействия, чем индекс ФА по массе хвоинок.

Некрозы хвои. При изучении частоты встречаемости некротических пятен на хвое выделяли:

Частота хвои с некрозами, %

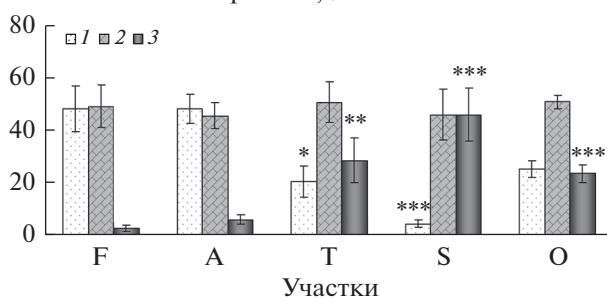


Рис. 4. Частота поражения некрозами хвои японской красной сосны на исследуемых участках

*, ** и *** — значимые отличия от контроля, $p < 0.05$; $p < 0.01$ и $p < 0.001$

1 — здоровая, %; 2 — частично поврежденная, %; 3 — сильно поврежденная, %.

1) абсолютно здоровую хвою; 2) с несколькими маленькими пятнами; 3) с большим количеством пятен. Частота здоровых хвоинок на загрязненных участках Т и S значимо ниже, чем в контрольной популяции (рис. 4). Одновременно выявлено значимое увеличение частоты сильно поврежденных некрозом хвоинок на участках Т, S и О относительно контрольного участка F.

Развитие некрозов не является специфической реакцией на радиационное воздействие. Исследователи отмечали увеличение частоты встречаемости точечных и концевых некрозов хвоинок сосны обыкновенной, произрастающей в условиях повышенного техногенного загрязнения (Хан, 2000; Неверова, Колмогорова, 2002). Действие природных стрессовых факторов, таких как дефицит питания, инвазии насекомых, поражение патогенами (грибы, бактерии, вирусы), экстремальные погодные условия и др., может являться причиной появления видимых повреждений листовых органов. Тем не менее сходный эффект повышения частоты сильно пораженной некрозом хвои на наиболее радиоактивно загрязненных участках наблюдался в Брянской области, загрязненной радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС (Makarenko et al., 2017a). Поэтому можно полагать, что и в настоящей работе именно радиационный фактор оказывает влияние на формирование сильно поврежденной некрозом хвои красной японской сосны. Причем действие излучения может быть как прямым (частичное поражение хвои), так и косвенным (ослабление иммунитета растений).

Нарушения морфогенеза. Многохвойные брахибласты, содержащие по 3–5 и более хвоинок в одном пучке, встречались и у потомков сосен из 10-километровой зоны Чернобыльской АЭС, испытывавших острое облучение в высоких дозах

Таблица 3. Число и доля брахибласт с тремя хвоинками на исследуемых участках в зависимости от мощности дозы

Параметр	Участок				
	F	A	T	S	O
Мощность дозы, мкЗв · ч ⁻¹	0.25	3.4	3.5	3.7	6.4
Число брахибласт, шт	1	2	4	2	1
Доля брахибласт, %	0.17	0.44	1.08	0.35	0.16

(Игонина и др., 2012), и у деревьев, длительное время произрастающих на территориях с низким уровнем радиоактивного загрязнения (Драган и др., 2006). В нашем исследовании были обнаружены только треххвойные брахибласты, частота которых изменяется на импактных участках в пределах от 0.16 до 1.08%, тогда как на референтном участке она составляет 0.17% (табл. 3). В работе К. Boratynska и А. Boratynski (2006) для большинства исследованных видов рода *Pinus* частота встречаемости треххвойных брахибласт в природных условиях невысока и составляет 0–0.2%. Таким образом, частота данного морфоза у красной японской сосны на одном из радиоактивно загрязненных участков префектуры Фукусима на порядок превышает естественный уровень встречаемости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучавшаяся в данной работе красная японская сосна произрастает на радиоактивно загрязненных территориях и испытывает дозовые нагрузки 0.25–6.4 мкЗв · ч⁻¹. Этот диапазон доз хронического облучения представляет особый интерес с точки зрения обоснования предельно допустимых уровней радиационного воздействия на живую природу. По оценкам международного проекта ERICA годовая доза около 100 мГр может рассматриваться как предел безопасного уровня хронического облучения для всех групп организмов, составляющих обобщенную наземную экосистему (Environmental risk ..., 2003). При установлении этих пределов оценивалось действие ионизирующего излучения на продолжительность жизни и репродуктивную способность составляющих популяции организмов. Однако рекомендации относительно дозовых нагрузок, не вызывающих негативных изменений морфологических, физиологических и генетических показателей в природных популяциях, в настоящее время отсутствуют.

В данной работе показано, что при хроническом облучении до 6.4 мкЗв · ч⁻¹ у красной японской сосны выявлен ряд морфологических изме-

нений. Обнаружено увеличение длины хвои на участке А, массы хвои — на большинстве участков. На площадке с максимальным уровнем радиоактивного загрязнения увеличен индекс флуктуирующей асимметрии длины хвои, характеризующий нарушение стабильности развития. Выявлена повышенная частота сильно пораженных некрозом хвоинок на большинстве радиоактивно загрязненных участков. Также обнаружено, что частота треххвойных брахибласт на одном из радиоактивно загрязненных участков на порядок превышает спонтанный уровень данного морфоза. Все это служит подтверждением того, что мощность дозы около 6 мкЗв · ч⁻¹ может рассматриваться как “пограничный” уровень безопасного воздействия на хвойные растения. Используемые подходы представляются перспективными для оценки и мониторинга состояния природных популяций, а также для оценки качества среды в условиях радиоактивного загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Василевская Н.В., Тумарова Ю.М. Оценка стабильности развития популяций *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения (Мурманская область) // Труды Карельского НЦ РАН. Серия Б. Биогеография Карелии. 2005. Вып. 7. С. 21–25.
- Гольцова Н.И. Влияние радиоактивного загрязнения на структурные особенности сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. (ЧАЭС) // Чернобыль-90: Докл. 1-й междунар. конф. “Биологические и радиэкологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской АЭС”. (Зеленый Мыс, 10–18 сентября 1990 г.). Зеленый мыс: Ротапринт, 1990. Т. 1. С. 74–89.
- 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.
- Драган Г.И., Драган Н.В., Левон Ф.М. Перспективы использования сосны обыкновенной как биоиндикатора на территории с низким уровнем радиоактивного загрязнения // Матер. Междунар. науч. конф. “Сахаровские чтения 2006 года: экологические проблемы XXI в.”. (Минск, 18–19 мая 2006 г.). Мн.: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2006. С. 206–208.
- Иванов В.П., Иванов Ю.В., Марченко С.И., Кузнецов В.В. Использование индексов флуктуирующей асимметрии листа березы повислой для диагностики состояния фитоценозов в условиях техногенного загрязнения // Физиология растений. 2015. Т. 62. № 3. С. 368–377.
- Игонина Е.В., Федотов И.С., Короткевич А.Ю., Рубанович А.В. Морфологические аномалии у потомков облученных сосен (*Pinus sylvestris* L.) из чернобыльских популяций // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 1. С. 90–102.
- Козубов Г.М. Радиобиологические исследования лесных древесных растений в районе аварии на Черно-

- быльской АЭС // Труды Коми НЦ УрО РАН. 1996. Т. 2. № 145. С. 4–18.
- Козубов Г.М., Муратова Е.Н. Современные голосеменные (морфолого-систематический обзор и кариология). Л.: Наука, 1986. 192 с.
- Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы. М.: НПЦ “Дизайн. Информация. Картография”, 2002. 256 с.
- Козубов Г.М., Таскаев А.И. Особенности морфогенеза и ростовых процессов у хвойных растений в районе аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47. № 2. С. 204–223.
- Козубов Г.М., Патов А.П., Кузин Е.А. Биометрические исследования вегетативных побегов сосны и ели при хроническом облучении // Труды Коми НЦ УрО РАН. 1993. № 127. С. 105–117.
- Молотковский Г.Х., Молотковский Ю.Г. Асимметрия, диссимметрия и полярность развития растений // Ботанический журн. 1961. Т. 46. № 4. С. 469–487.
- Неверова О.А., Колмогорова Н.И. К вопросу об устойчивости сосны обыкновенной в условиях урбанизированной среды // Материалы междунар. конф. “Антропогенное воздействие на лесные экосистемы”. (Барнаул, 18–19 апреля 2002 г.). Барнаул: Алтайск. гос. университета, 2002. С. 62–64.
- Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А. Генетические основы радиорезистентности и эволюция. М.: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.
- Федотов И.С., Кальченко В.А., Игонина Е.В., Рубанович А.В. Радиационно-генетические последствия облучения популяции сосны обыкновенной в зоне аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2006. Т. 46. № 3. С. 268–278.
- Хан Л.В. Морфологические изменения хвои сосны обыкновенной в условиях городской среды // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. информ. матер. междунар. науч.-техн. конф. “Лес-2000”. Брянск: РИО БГИТА, 2000. Вып. 1. С. 91–92.
- Храмова Е.П., Луговская А.Ю., Тарасов О.В. Оценка возможности использования *Potentilla fruticosa* L. (Rosaceae, Magnoliopsida) для биоиндикации состояния природной среды на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Поволжский экологический журн. 2019. № 1. С. 90–105.
- Экологический мониторинг: Учебно-методич. пособие / Под ред. Ашихминой Т.Я. М.: Академический проект, 2005. 416 с.
- Ahuja M.R., Neale D.B. Evolution of genome size in conifers // *Silvae Genetica*. 2005. V. 54. P. 126–137.
- Boratynska K., Boratynski A. Occurrence of three-needle dwarf shoots on European species of the genus *Pinus* (Pinaceae) // *Plant Biosystems*. 2006. V. 140. № 1. P. 21–26.
- 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 & Experimental Botany*. 1982. V. 22. P. 57–74.
- Environmental risk from ionizing contaminants: assessment and management. Developed under EU 6th Framework Program. Contract No // ERICA. FI6R-CT-2004-508847. www.ERICA-project.org. 2003.
- ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. *Annals of the ICRP*. 2008. V. 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 // *J. Environmental Radioactivity*. 2018. V. 211. 105731.
- Kozlov M.V., Niemela P. Difference in needle length — a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Water, Air & Soil Pollution*. 1999. V. 116. P. 365–370.
- Kozlov M.V., Niemela P., Junttila J. Needle fluctuating asymmetry is a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Ecological Indicators*. 2002a. V. 1. P. 271–277.
- Kozlov M.V., Niemela P., Malkonen E. Effects of compensatory fertilization on pollution-induced stress in Scots pine // *Water, Air & Soil Pollution*. 2002b. V. 134. P. 307–318.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A. Study of needle morphometric indices in Scots pine in the remote period after the Chernobyl accident // *Radioprotection*. 2016. V. 51. P. 19–23.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A. Morphometric indices of Scots pine needle under chronic radiation exposure // *Contemporary Problems of Ecology*. 2017a. V. 10. № 7. P. 761–769.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A. Morphometric measurements of Scots pine needles from radioactively contaminated area // In: XIII International Youth Scientific and Practical Conference “Future of atomic energy — Atom-Future 2017”, KnE Engineering. 2017b. P. 8–13.
- Møller A.P. Developmental instability of plants and radiation from Chernobyl // *Oikos*. 1998. V. 81. № 3. P. 444–448.
- Sparrow A.H., Woodwell G.M. Prediction of the sensitivity of plants to chronic gamma irradiation // *Radiation Botany*. 1962. V. 2. P. 9–26.
- Sparrow A.H., Schwemmer S.S., Bottino P.J. The effects of external gamma radiation from radioactive fallout on plants with special reference to crop production // *Radiation Botany*. 1971. V. 11. P. 85–118.
- Watanabe Y., Ichikawa S., Kubota M., Hoshino J., Kubota Y., Maruyama K., Fuma S., Kawaguchi I., Yoschenko V.I., Yoshida S. Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. 13232.
- 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.

Morphological Characteristics of Japanese Red Pine Needles from the Areas of the Accident at the Fukushima NPP

E. S. Makarenko^{1,*}, S. A. Geras'kin¹, V. I. Yoschenko², and M. A. Lychenkova¹

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Kievskoe shosse, 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032 Russian Federation

²Institute of Environmental Radioactivity of the Fukushima University, Kanayagawa, Fukushima City, Fukushima Prefecture 960-1296, Japan

*E-mail: makarenko_ek_obninsk@mail.ru

The morphometric and morphological parameters of needles of Japanese red pine growing on the territories radioactively contaminated as a result of the accident at the Fukushima nuclear power plant were studied. Pine is a unique, widespread subject of research, which has a variety of informative and sensitive test systems at different levels of its organization. In 2019, the variability in weight and length was studied in two-year-old needles, the indices of fluctuating asymmetry were estimated, as well as the frequency of occurrence of necrosis and morphoses (three-needle brachyblasts) on four impact plots and one reference plot. The ambient dose equivalent rate varied at the radioactively contaminated areas from 3.4 ± 0.1 to $6.4 \pm 0.4 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ (in control – $0.25 \pm 0.05 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$). No statistically significant correlation of the studied parameters of needles with the level of radiation exposure was found. The length of needles was significantly increased only at one impact plot, and the weights of needles – at the most plots that were exposed to radiation. The index of the fluctuating asymmetry by needle length at the plot with the highest dose significantly exceeded the control level. The index of the fluctuating asymmetry by needles weight at all impact plots did not differ significantly from the control. The frequency of needles severely affected by necrosis was significantly higher at most radioactively contaminated areas. Brachyblasts with three needles were found at all the study plots; at the most impact plots, their frequency was higher than at the control plot. Thus, even 8 years after the accident, some of the values of morphological and morphometric parameters in the populations in red Japanese pine growing on radioactively contaminated areas are significantly higher than the control level.

Keywords: Japanese red pine, chronic irradiation, needles, Fukushima accident.

Acknowledgements: This study was funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (19-54-50003) and Japan Society for Promotion of Science (JSPS) (JPJSBP120194806) within the frame-work of the JSPS–RFBR Research Cooperative Program.

REFERENCES

- Ahuja M.R., Neale D.B., Evolution of genome size in conifers, *Silvae Genetica*, 2005, Vol. 54, pp. 126–137.
- Ashikhmina T.Y., *Ekologicheskii monitoring* (Environmental monitoring), M.: Akademicheskii proekt, 2005, 413 p.
- Boratyńska K., Boratyński A., Occurrence of three-needle dwarf shoots on European species of the genus *Pinus* (Pinaceae), *Plant biosystems – an International journal dealing with all aspects of plant biology*, 2006, Vol. 140, No. 1, pp. 21–26.
- 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 & Experimental Botany*, 1982, Vol. 22, pp. 57–74.
- Dragan G.I., Dragan N.V., Levon F.M., Perspektivy ispol'zovaniya sosny obyknovЕННОI kak bioindikatora na territorii s nizkim urovnem radioaktivnogo zagryazneniya (Perspective of the Scots pine as a biological indicator in areas of low extent of radioactive pollution), *Sakharov readings 2006: environmental problems of the 21 century*, Proc. Conf., Minsk, 18–19 May 2006, Minsk: Izd-vo MGEU imeni A.D. Sakharova, 2006, pp. 206–208.
- Environmental risk from ionizing contaminants: assessment and management. Developed under EU 6th Framework Program. Contract No // ERICA. FI6R-CT-2004-508847. www.ERICA-project.org. 2003.
- Fedotov I.S., Kal'chenko V.A., Igonina E.V., Rubanovich A.V., Radiatsionno-geneticheskie posledstviya oblucheniya populyatsii sosny obyknovЕННОI v zone avarii na ChAES (Radiation and genetic consequences of ionizing irradiation on population of *Pinus sylvestris* L. within the zone of the Chernobyl NPP), *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2006, Vol. 46, No. 3, pp. 268–278.
- Gol'tsova N.I., Vliyanie radioaktivnogo zagryazneniya na strukturnye osobennosti sosny obyknovЕННОI *Pinus sylvestris* L. (ChAES) (Influence of radioactive contamination on the structural features of *Pinus sylvestris* L. (Chernobyl)), *Chernobyl'-90, Biological and radioecological aspects of the consequences of the accident at the Chernobyl Atomic Electric Power Station*, Proc. of 1st International Conf., Zelenyi Mys, September 10–18, 1990, Zelenyi Mys: Rotaprint, 1990, Vol. 1, pp. 74–89.
- Gorshkova T.A., Udalova A.A., Geras'kin S.A., Kiselev S.M., Akhromeev S.V., Bioindikatsiya sostoyaniya prirodnoi sredy v raione raspolozheniya Dal'nevostochnogo tsentra po obrashcheniyu s radioaktivnymi otkhodami (Bioindication of the environment in the vicinity of the Far-Eastern center for radioactive waste treatment), *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2014, Vol. 4, pp. 130–139.
- Igonina E.V., Fedotov I.S., Korotkevich A.Y., Rubanovich A.V., Morfologicheskie anomalii u potomkov obluchennykh sosen (*Pinus sylvestris* L.) iz chernobyl'skikh populyatsii (Morphological abnormalities among the offspring of irradiated pines (*Pinus sylvestris* L.) from Chernobyl populations), *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2012, Vol. 52, No. 1, pp. 90–102.

- Ivanov V.P., Ivanov Yu.V., Marchenko S.I., Kuznetsov V.V., Ispol'zovanie indeksov flukturniruyushchei assimetrii lista berezy povisloi dlya diagnostiki sostoyaniya fitotsenozov v usloviyakh tekhnogennoy zagryazneniya (Application of fluctuating asymmetry indexes of silver birch leaves for diagnostics of plant communities under technogenic pollution), *Fiziologiya rastenii*, 2015, Vol. 62, No. 3, pp. 368–377.
- 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, *J. Environmental Radioactivity*, 2018, Vol. 211, 105731.
- Khan L.B., Morfologicheskie izmeneniya khvoi sosny obyknovnoy v usloviyakh gorodskoi sredy (Morphological changes in Scots pine needles in the urban environment), "Forest-2000", *Actual problems of the forestry complex*, Proc. of International Science and Technology Conf., Bryansk: RIO BGITA, Vol. 1, pp. 91–92.
- Khramova E.P., Lugovskaya A.Y., Tarasov O.V., Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya *Potentilla fruticosa* L. (*Rosaceae*, *Magnoliopsida*) dlya bioindikatsii sostoyaniya prirodnoi sredy na territorii Vostochno-Ural'skogo radioaktivnogo sleda (Assessment of possible use of *Potentilla fruticosa* L. (*Rosaceae*, *Magnoliopsida*) for bioindication of the natural environment status in the area of the Eastern Ural radioactive trace), *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2019, No. 1, pp. 90–105.
- Kozlov M.V., Niemelä P., Difference in needle length – a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*), *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, Vol. 116, No. 1, pp. 365–370.
- Kozlov M.V., Niemelä P., Junttila J., Needle fluctuating asymmetry is a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*), *Ecological Indicators*, 2002a, Vol. 1, No. 4, pp. 271–277.
- Kozlov M.V., Niemela P., Malkonen E., Effects of compensatory fertilization on pollution-induced stress in Scots pine, *Water, Air & Soil Pollution*, 2002, Vol. 134, pp. 307–318.
- Kozubov G.M., Muratova E.N., *Sovremennye golosemennnye (morfologo-sistematicheskii obzor i kariologiya)* (Modern gymnosperms (morphological-systematic review and karyology)), Leningrad: Nauka, 1986, 192 p.
- Kozubov G.M., Patov A.P., Kuzin E.A., Biometricheskie issledovaniya vegetativnykh pobegov sosny i eli pri khronicheskom obluchenii (Biometric studies of vegetative shoots of pine and spruce under chronic exposition), In: *Trudy Komi NTs UrO RAN* (Proceedings of Komi research center, Uralian branch of the Russian academy of sciences), 1993, Vol. 130, pp. 105–117.
- Kozubov G.M., Radiobiologicheskie issledovaniya lesnykh drevesnykh rastenii v raione avarii na Chernobyl'skoi AES (Radiobiological studies of forest woody plants in the area of the accident at the Chernobyl Atomic Electric Power Station), *Trudy Komi NTs UrO RAN*, 1996, Vol. 2, No. 145, pp. 4–18.
- Kozubov G.M., Taskaev A.I., Osobennosti morfogeneza i rostovykh protsessov u khvoinykh rastenii v raione avarii na ChAES (The features of morphogenesis and growth processes of conifers in the Chernobyl nuclear accident zone), *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2007, Vol. 47, No. 2, pp. 204–223.
- Kozubov G.M., Taskaev A.I., *Radiobiologicheskie issledovaniya khvoinykh v raione Chernobyl'skoi katastrofy (1986–2001 gg.)* (Radiobiology investigations of conifers in region of the Chernobyl disaster (1986–2001)), Moscow: Dizain. Informatsiya. Kartografiya, 2002, 271 p.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A., Morphometric indices of Scots pine needle under chronic radiation exposure, *Contemporary Problems of Ecology*, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 761–769.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A., Morphometric measurements of Scots pine needles from radioactively contaminated area, "Future of atomic energy – Atom-Future 2017", Proc. XIII International Youth Scientific and Practical Conf., KnE Engineering, pp. 8–13.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A., Study of needle morphometric indices in Scots pine in the remote period after the Chernobyl accident, *Radioprotection*, 2016, Vol. 51, No. 1, pp. 19–23.
- Møller A.P., Developmental instability of plants and radiation from Chernobyl, *Oikos*, 1998, Vol. 81, No. 3, pp. 444–448.
- Molotkovskii G.K., Molotkovskii Y.G., Asimmetriya, dissimmetriya i polyarnost' razvitiya rastenii (Assimmetry, dissymmetry and polarity of plant development), *Botanicheskii zhurnal*, 1961, Vol. 46, No. 4, pp. 469–487.
- Neverova O.A., Kolmogorova N.I., K voprosu ob ustoichivosti sosny obyknovnoy v usloviyakh urbanizirovannoi sredy (To the question of the stability of Scots pine in an urbanized environment), *Anthropogenic impact on forest ecosystems*, Proc. of International Conf., Barnaul, April 18–19, 2002, Barnaul: Altaisk. gos. universiteta, 2002, pp. 62–64.
- Pentreath R.J., Larsson C.-M., Higley K.A., Brechignac F., Doi M., Pröhl G., Johnston A., Real A., Sakai K., Strand P., ICRP publication 108 – Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants, *Annals of the ICRP*, 2008, Vol. 38, No. 4–6, pp. 1–242.
- Sarapul'tsev B.I., Geras'kin S.A., *Geneticheskie osnovy radiorezistentnosti i evolyutsiya* (The genetic basis of radioreistance and evolution), Moscow: Energoatomizdat, 1993, 208 p.
- Sparrow A.H., Schwemmer S.S., Bottino P.J., The effects of external gamma radiation from radioactive fallout on plants with special reference to crop production, *Radiation Botany*, 1971, Vol. 11, pp. 85–118.
- Sparrow A.H., Woodwell G.M., Prediction on the sensitivity of plants to chronic gamma irradiation, *Radiation Botany*, 1962, Vol. 2, No. 1, pp. 9–26.
- Vasilevskaya N.V., Tumarova Y.M., Otsenka stabil'nosti razvitiya populyatsii *Pinus sylvestris* L. v usloviyakh aerotekhnogennoy zagryazneniya (Murmanskaya oblast') (Assessment of the development stability of *Pinus sylvestris* L. populations under conditions of airborne industrial pollution (Murmansk region)), *Trudy Karel'skogo NTs RAN. Seriya B. Biogeografiya Karelii*, 2005, Vol. 7, pp. 21–25.
- Watanabe Y., Ichikawa S., Kubota M., Hoshino J., Kubota Y., Maruyama K., Fuma S., Kawaguchi I., Yoschenko V.I., Yoshida S., Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Scientific Reports*, 2015, Vol. 5, 13232.
- 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, *Journal Environmental Radioactivity*, 2016, Vol. 165, pp. 60–67.