

МОРФОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Д.Ю. Ромашкин, И.В. Ромашкина, В.В. Калнин, А.А. Пророков, А.Д. Карпов

ФБУ ВНИИЛМ, 141200, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 15

info@roslesrad.ru, kalnin@vniilm.ru

Проводилось изучение возможности ранней индикации снижения биологической устойчивости лесных экосистем в условиях радиоактивного загрязнения цезием-137 на основе морфогенетической оценки состояния видов древесных растений — эдификаторов. Приведены результаты предварительной оценки биологической устойчивости лесных насаждений на стационарных участках сети радиационного мониторинга лесов, сделанной по стандартной методике, применяемой при осуществлении лесопатологического мониторинга. Рассмотрены основные причины снижения биологической устойчивости лесных насаждений в условиях радиоактивного загрязнения и специфические факторы, оказывающие влияние на этот процесс. Проведена морфогенетическая оценка биологической устойчивости лесных насаждений в условиях радиоактивного загрязнения на основе сравнения морфометрических параметров хвоинок сосны обыкновенной, листовых пластин березы повислой, отобранных в различных зонах загрязнения на лесных участках с чистыми по составу сосновыми насаждениями и смешанными сосново-березовыми. Выявлено, что в условиях радиоактивного загрязнения цезием-137 (Брянская область), при близких характеристиках лесорастительных условий участков, более высокой устойчивостью обладают смешанные насаждения по сравнению с чистыми по составу сосновыми древостоями. Обнаружено, что нарушения морфогенеза листовых пластинок и хвои увеличиваются с ростом плотности загрязнения почвы радионуклидами и удельной активности радионуклидов в структурных частях древесных растений. Использование морфогенетических методов оценки биологической устойчивости лесных насаждений в условиях радиоактивного загрязнения позволяет выявлять снижение биологической устойчивости на более ранних стадиях, чем традиционные методы, применяемые при лесопатологическом мониторинге лесов.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение лесов, биологическая устойчивость, морфогенетическая оценка устойчивости

Ссылка для цитирования: Ромашкин Д.Ю., Ромашкина И.В., Калнин В.В., Пророков А.А., Карпов А.Д. Морфогенетическая оценка биологической устойчивости лесных насаждений в условиях радиоактивного загрязнения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 2. С. 84–91. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-2-84-91

Крупнейшая в истории радиационная катастрофа на Чернобыльской АЭС в 1986 г. привела к загрязнению значительных территорий долгоживущими радионуклидами. В зонах радиоактивного загрязнения оказалось более 1 миллиона гектаров земель лесного фонда, расположенных в 15 субъектах Российской Федерации. Основным дозообразующим радионуклидом на загрязненных в результате Чернобыльской катастрофы территориях, после распада короткоживущих изотопов, остался цезий-137 [1].

Наличие фактора радиоактивного загрязнения природной среды нарушило сложившийся режим ведения лесного хозяйства, потребовало введения ограничений в осуществление использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов [2–5].

По данным радиационно-экологического мониторинга в загрязненных радионуклидами лесах снижение биологической и противопожарной устойчивости насаждений наблюдается от зон с низкой к зонам с высокой плотностью загрязнения почвы радионуклидами [6, 7].

В значительной степени это объясняется косвенным влиянием радиационного фактора. Ограничения хозяйственной деятельности на загрязненных радионуклидами территориях сократили

объемы проведения лесохозяйственных мероприятий в лесах [8]. Но, помимо косвенного воздействия, ионизирующее излучение может непосредственно нарушать стабильность генома древесных растений [9], а при определенных условиях радиационный фактор способен изменять генетическую структуру природных популяций [10–12].

Оценка биологической устойчивости лесов, загрязненных радионуклидами в результате радиационных аварий и катастроф, в условиях ограниченного ведения лесного хозяйства является важнейшей задачей лесного планирования и управления территориями в зонах радиоактивного загрязнения.

Применяемые в настоящее время в лесном хозяйстве методы оценки биологической устойчивости на основе шкалы категорий состояния деревьев и шкалы оценки биологической устойчивости насаждений [13, 14] дают результаты, фиксирующие свершившийся факт потери устойчивости лесными экосистемами. Такой подход оправдан в контексте назначения мер по ликвидации последствий события. Но точность и чувствительность этого метода недостаточны для проектирования профилактических защитных мероприятий в зонах радиоактивного загрязнения [15].

Цель работы

Задачей данной работы является поиск методов более точной оценки биологической устойчивости лесных экосистем на ранних стадиях ее снижения. В частности, использование для биоиндикационной оценки индекса флуктуирующей асимметрии, морфогенетического показателя стабильности развития и модификационной изменчивости.

Материалы и методы

В качестве объектов исследований были подобраны лесные участки в зонах радиоактивного загрязнения цезием-137 в Брянской области, в наиболее пострадавшем от Чернобыльской катастрофы регионе. Для предварительной оценки биологической устойчивости лесов использованы стационарные участки радиационного мониторинга лесов (РМЛ). Для отработки методики оценки биологической устойчивости, основанной на морфогенетических показателях стабильности развития древесных растений — эдификаторов, были подобраны участки со сходными типами лесорастительных условий в чистых по породному составу хвойных насаждениях и смешанных, сосново-березовых, расположенных в различных зонах радиоактивного загрязнения лесов цезием-137.

Методика исследований

Предварительная оценка биологической устойчивости на стационарных участках сети РМЛ проводилась классическими методами, применяемыми при лесопатологических обследованиях [16] и таксации лесов [17]. На основе проведенной оценки выявлены признаки лесных насаждений, наиболее и наименее устойчивых в условиях радиоактивного загрязнения. С учетом результатов предварительной оценки подобраны дополнительные участки в чистых и смешанных насаждениях для отработки методов с использованием индекса флуктуирующей асимметрии (ИФА).

На подобранных участках определены координаты, проведены измерения мощности эквивалентной дозы (МЭД), отобраны пробы почвы для спектрометрических измерений, подобраны модельные деревья, с которых взяты листья (хвоя) для морфометрических измерений, а также структурные части деревьев для расчета удельной активности цезия-137, проведены дендрометрические измерения модельных деревьев.

Удельная активность радионуклидов в отобранных пробах определялась по методике измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения SpectraLine и полупроводниковых детекторов [18].

Морфогенетические показатели стабильности развития древесных растений — эдификаторов [19] определялись с использованием ИФА [20]. Для листьев березы повислой использована методика оценки качества среды [21, 22], для хвои сосны обыкновенной методика М.В. Козлова [23, 24].

Обработка отсканированных изображений листьев и хвои осуществлялась в полуавтоматическом режиме с использованием программы MapInfo 9.0 Pro [25]. Данные обработаны статистически по стандартным методикам [26, 27].

Результаты и обсуждение

Проведена оценка биологической устойчивости насаждений на лесных участках в зонах радиоактивного загрязнения цезием-137.

Для предварительной оценки были использованы принципы подразделения лесных участков в зонах радиоактивного загрязнения на классы биологической устойчивости (жизнеспособности), разработанные МГУЛ [13, 14].

Было отобрано 15 стационарных участков (СУ) сети радиационного мониторинга лесов в Брянской области, в различных зонах радиоактивного загрязнения, представляющих собой наиболее распространенные типы насаждений для данного региона.

На стационарных участках была проведена оценка биологической устойчивости насаждения. При этом определялись: параметры радиационной обстановки; состав насаждения; полнота, запас сухостоя и валежника; текущий и общий отпад; характер усыхания; наличие поврежденных насекомыми и болезнями; средневзвешенная категория состояния деревьев; состояние лесной среды; класс биологической устойчивости насаждения.

В результате проведенной оценки было выявлено, что в зонах загрязнения цезием-137 из 15 обследованных СУ на пяти лесных участках нарушена биологическая устойчивость (II класс), на одном лесном участке биологическая устойчивость утрачена (III класс). Участок с утраченной биологической устойчивостью имеет смешанный состав, но распад насаждения здесь произошел после интенсивного низового пожара.

Анализ данных предварительной оценки показывает, что наименее устойчивыми являются чистые по составу насаждения сосны, из групп возраста — приспевающие (насаждения естественного происхождения) или молодняки (лесные культуры). Стационарные участки со смешанными насаждениями (за исключением участка 8Ч, пройденного лесным пожаром) различных групп возраста имеют более высокие классы биологической устойчивости.

Т а б л и ц а 1

**Параметры и характеристики состояния насаждений
на стационарных участках сети РМЛ**

Parameters and characteristics of stand state in stationary sites of the radioactive forest monitoring network

Код участка	Плотность загрязнения ¹³⁷ Cs, кБк/м ²	Тип лесорастительных условий	Полнота	Средний возраст, лет	Состав насаждений	Общий отпад, %	Усыхание	Повреждения насекомыми и болезнями	Средневзвешенная категория состояния	Состояние лесной среды	Класс биологической устойчивости
1Ч	625,10	B2	0,50	80	10С	26	Групповое	Имеются	2,3	Не нарушена	II
2Ч	452,44	B2	0,63	70	4Б3Олч2Д1Ос	До 10	Единичное	Отсутствуют	До 1,5	Не нарушена	I
3Ч	381,34	B3	0,83	70	7С3Б	До 10	Единичное	Отсутствуют	До 1,5	Не нарушена	I
4Ч	355,17	B2	1,12	65	10С	До 10	Единичное	Отсутствуют	До 1,5	Не нарушена	I
5Ч	222,19	A2	0,96	90	10С+Б	До 10	Единичное	Отсутствуют	До 1,5	Не нарушена	I
6Ч	278,75	A3	1,14	80	10С+Б	До 10	Единичное	Отсутствуют	До 1,5	Не нарушена	I
7Ч	731,11	A2	0,50	90	10С	25	Групповое	Имеются	2,2	Нарушена	II
8Ч	269,17	B2	0,20	90	3Е3Ос2С1Д1Б	> 50	Куртинное	Очаг	> 4,5	Нарушена	III
9Ч	286,72	С3	0,82	65	9Б1Ос+Кл+Лп	8	Единичное	Отсутствуют	1,4	Не нарушена	I
10Ч	367,87	B2	0,60	95	5С4Б1Ос	7	Единичное	Отсутствуют	До 1,5	Не нарушена	I
11Ч	3113,40	B2	0,50	83	10С	28	Групповое	Имеются	2,3	Нарушена	II
12Ч	393,13	B2	0,89	70	5С3КЛО2В	8	Единичное	Отсутствуют	1,4	Не нарушена	I
13Ч	746,22	B2	0,63	40	9С1Б	9	Единичное	Отсутствуют	1,3	Не нарушена	I
14Ч	360,47	B2	0,70	27	10С	23	Групповое	Имеются	2,1	Нарушена	II
15Ч	276,11	B2	0,70	14	10С	25	Групповое	Имеются	2,3	Нарушена	II

Параметры и характеристики состояния насаждений на обследованных стационарных участках представлены в табл. 1. Все исследованные участки с нарушенной и утраченной биологической устойчивостью находятся в зонах средней, высокой и крайне высокой степени загрязнения лесов радионуклидами цезия-137.

Статистически значимая зависимость устойчивости насаждений от параметров радиационной обстановки по данным предварительной оценки не наблюдалась в связи с грубостью применяемого метода оценки устойчивости. Критерии, используемые при оценке биологической устойчивости насаждений, применяемые при лесопатологических обследованиях, не позволяют выявить снижение устойчивости на ранних стадиях, когда внешние признаки ослабления деревьев не проявляются или проявлены в минимальной степени.

По результатам анализа данных предварительной оценки были определены параметры

модельных объектов полевых исследований по морфогенетической оценке биологической устойчивости. В качестве модельных объектов были выбраны лесные участки в сходных лесорастительных условиях с двумя типами насаждений:

1) чистые по породному составу сосняки естественного или искусственного происхождения, произрастающие на почвах с различными уровнями радиоактивного загрязнения цезием-137, как предположительно наименее устойчивый тип насаждений;

2) смешанные насаждения, в состав которых входят сосна и береза, произрастающие на почвах с различными уровнями радиоактивного загрязнения цезием-137, как предположительно наиболее устойчивый тип насаждений.

Все подобранные участки имеют I класс биологической устойчивости (устойчивые) по шкале оценки биологической устойчивости насаждений, применяемой при лесопатологическом мониторинге.

Т а б л и ц а 2

**Характеристика участков с усредненными данными
морфогенетической оценки насаждений**
Characteristics of sites with averaged data of stand morphogenetic value

№ участка	Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	Зона, Ки/км ²	Состав	Полнота	Удельная активность хвои (листьев), Бк/кг	ИФА хвои (листьев)
1	16,65 ± 1,48	1–5	10С	0,7	42,2 ± 14,7	0,023 ± 0,003
2	765,9 ± 51,8	5–15	10С	0,7	73,1 ± 30,5	0,027 ± 0,003
3	1154,4 ± 107,3	≥ 40	10С	0,8	547,9 ± 152,1	0,054 ± 0,007*
4	836,2 ± 22,2	15–40	3С3Кло2Б1Ос1Д	0,8	33,5 ± 9,8 (63,2 ± 23,2)	0,025 ± 0,002 (0,051 ± 0,001)
5	991,6 ± 107,3	≥ 40	5С3Б1Д1Ос+Олч	0,7	47,9 ± 9,4 (71,2 ± 26,7)	0,030 ± 0,002 (0,062 ± 0,002)

Примечание. * — отличия от контроля значимы с вероятностью $p \leq 0,05$.

Т а б л и ц а 3

**Функции желательности Харрингтона (*D*), рассчитанные с использованием ИФА
для участков чистых сосновых и смешанных насаждений**
Harrington desirability functions (*D*), calculated using IFA for sites
with monodominant pine and mixed stands

Участок / тип насаждения	Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	Средняя удельная активность хвои (листьев), кБк/кг	Значение <i>D</i>	Балл по интегральной шкале	Состояние экосистемы
1 / чистые сосновые	0,45	С – 42,2	0,70	4	Начальная фаза антропогенной трансформации
2 / чистые сосновые	20,7	С – 73,1	0,62	4	Начальная фаза антропогенной трансформации
3 / чистые сосновые	31,2	С – 547,9	0,11	1	Зона экологического бедствия
4 / смешанные	22,6	С – 33,5 Б – 63,2	0,60	4	Начальная фаза антропогенной трансформации
5 / смешанные	26,8	С – 47,9 Б – 71,2	0,52	3	Зона экологического кризиса

Примечание. С — сосна, Б — береза.

Данные о биологической устойчивости в чистых сосновых насаждениях получены на трех лесных участках, которые были обследованы в 2015–2016 гг. в рамках работ по использованию ИФА для биоиндикационной оценки [25]. Для оценки биологической устойчивости в смешанных насаждениях были заложены 2 дополнительных участка в зоне загрязнения 15–40 Ки/км² и в зоне 40 и более Ки/км², в составе которых кроме сосны присутствуют береза и твердолиственные породы. Характеристики исследуемых лесных участков и усредненные данные морфогенетической оценки насаждений с использованием ИФА хвои сосны и листьев березы представлены в табл. 2.

Морфогенетическая оценка смешанных насаждений, произрастающих в зоне радиоактивного загрязнения цезием-137, производилась с применением интегральной оценки для комплексной биоиндикации состояния лесных экосистем [28], учитывающей несколько регистрируемых призна-

ков, в данном случае ИФА двух лесообразующих пород (сосна, береза).

Чтобы провести полный анализ по всей совокупности полученных данных, используя ИФА березы и сосны, была рассчитана функция желательности Харрингтона (*D*), которая представляет собой способ перевода множества значений ИФА в единую числовую шкалу [29]. Результаты оценки по интегральной шкале функции желательности Харрингтона представлены в табл. 3.

Данные по исследованным участкам показывают, что ИФА хвои сосны обыкновенной возрастает при увеличении радиоактивного загрязнения участка и положительно коррелирует с содержанием цезия-137 в органах и тканях растений ($R = +0,997$). Такая же зависимость между ИФА и удельной активностью цезия в листьях наблюдается и у березы повислой ($R = +0,996$). Полученные данные согласуются с полученными ранее результатами работ [25]. Кроме того, результаты

свидетельствуют о том, что ИФА хвоинок сосны на смешанных участках при близких значениях плотности загрязнения почвы цезием-137 меньше, т. е. деревья сосны в смешанных насаждениях имеют более высокую биологическую устойчивость, чем в чистых по составу сосняках. Средние значения ИФА листьев березы на двух участках смешанных насаждений также возрастают при увеличении содержания радионуклидов в почве и структурных частях деревьев, что согласуется с ранее полученными данными по ИФА березы [25].

Выводы

В результате проведенных исследований было выявлено, что индекс флуктуирующей асимметрии хвои сосны обыкновенной и листовой пластинки березы повислой возрастает при увеличении радиоактивного загрязнения участка цезием-137. При этом увеличение значения ИФА коррелирует с увеличением содержания радионуклидов в органах и тканях растений как в условиях чистых по породному составу сосняков, так и в смешанных насаждениях.

Выявлена прямая связь интегрального показателя D , рассчитываемого на основе полученных значений ИФА, и биологической устойчивости исследуемых участков. Таким образом, используя шкалу состояния лесных экосистем, основанную на функции желательности Харрингтона D , можно сделать выводы о биологической устойчивости насаждений, регистрируя изменение состояния на ранних стадиях ее снижения.

При сравнении лесных участков с близкими лесоводственными и таксационными параметрами, совпадающими типами лесорастительных условий, расположенными на территориях с различными уровнями загрязнения почвы радионуклидами, обнаружено, что при увеличении плотности загрязнения почвы и структурных частей деревьев цезием-137 биологическая устойчивость лесных насаждений снижается.

При сравнении лесных участков, покрытых чистыми насаждениями сосны и смешанными насаждениями с ее участием, с аналогичными лесорастительными условиями и одинаковой плотностью загрязнения почвы радионуклидом, смешанные насаждения являются более устойчивыми при радиоактивном загрязнении цезием-137, чем чистые монокультуры сосны.

Использование морфогенетических методов оценки биологической устойчивости лесных насаждений в условиях радиоактивного загрязнения на основе применения ИФА, а также рассчитанной с использованием ИФА интегральной шкалы значений функции желательности Харрингтона, позволяет выявлять снижение биологической

устойчивости на более ранних стадиях, чем традиционные методы, применяемые при лесопатологическом мониторинге лесов.

Работа выполнялась в рамках Государственного задания «Проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства».

Список литературы

- [1] 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. Москва; Минск: Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2009. 140 с.
- [2] Марадудин И.И., Ветров В.А., Ипатьев В.А. Воздействие аварии на Чернобыльской АЭС на лесное хозяйство загрязненных территорий Беларуси, России и Украины. Доклад группы экспертов для XIX Сессии ФАО/ЕЭК/МОТ. Минск: БГУ, 1992. 25 с.
- [3] Марадудин И.И., Панфилов А.В., Шубин В.А. Основы прикладной радиоэкологии леса. М.: ВНИИЛМ, 2001. 224 с.
- [4] Марадудин И.И., Жуков Е.А., Радин А.И., Раздайводин А.Н. Влияние биолого-лесоводственных факторов на миграцию цезия-137 в лесных экосистемах // Материалы Междунар. конф. «Чернобыль 20 лет спустя. Стратегия восстановления и устойчивого развития пострадавших регионов». Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2006. С. 240–241.
- [5] Шевчук В.Е., Скрыбин А.И. Оценка доз облучения населения при профессиональном и бытовом контакте с лесом. Минск: ИЛ АНБ, 1994. С. 118–122.
- [6] Раздайводин А.Н., Чубугина И.В., Ромашкин Д.Ю., Радин А.И., Пророков А.А., Чиркова Е.А. Оценка биологической устойчивости лесов в зонах радиоактивного загрязнения по флуктуирующей асимметрии хвои сосны обыкновенной // Современное состояние и перспективы охраны и защиты лесов в системе устойчивого развития. Материалы Международной научно-практической конф. Гомель: ИЛ НАН Республики Беларусь, 2013. С. 267–271.
- [7] Панфилов А.В., Панфилова Е.Н., Сидоров В.П. Радиочувствительность и санитарное состояние основных насаждений в зоне аварии на ЧАЭС // Тез. докл. I Междунар. конф. «Биологические и радиоэкологические последствия аварии на ЧАЭС» (Зеленый Мыс 10–18.09.1990). Москва, 1990. 19 с.
- [8] Марадудин И.И., Жуков Е.А., Раздайводин А.Н. Радиоэкологическое районирование лесов, загрязненных радионуклидами // Радиационная биология. Радиоэкология, 2009. Т. 49. № 4. С. 502–509.
- [9] Дубинин Н.П. Проблемы радиационной генетики. М.: Атомиздат, 1961. 468 с.
- [10] Дубинин Н.П., Кальченко В.А. Мутагенез и уровни радиации в местах обитания популяций // Известия АН СССР. Серия «Биология», 1984. № 5. С. 645–652.
- [11] Романовский М.Г. Формирование урожая семян сосны в норме и при мутагенном загрязнении. М.: Наука, 1997. 112 с.
- [12] Miciceta K. The use of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arnold as bioindicator species for environmental pollution // Cytogenetic studies of forest trees and shrub species. Zagreb, 1997, pp. 253–264.

- [13] Мозолевская Е.Г., Селиховкин А.В., Ижевский С.С. Лесная энтомология / под ред. Е.Г. Мозолевской. М.: Академия, 2010. 416 с.
- [14] Мозолевская Е.Г. Методы оценки влияния вредителей и болезней леса на состояние насаждений // Методы мониторинга вредителей и болезней леса. Справочник. Т. III: Болезни и вредители в лесах России / под ред. В.К. Тузова. М.: ФАЛХ МПР РФ, 2004. С. 95–108.
- [15] Жуков А.М. Динамика лесопатологического состояния древостоев на загрязненных радионуклидами территориях // Вопросы лесной радиоэкологии / под ред. А.И. Чилимова. М.: МГУЛ, 2000. С. 137–169.
- [16] Об утверждении порядка проведения лесопатологических обследований и формы акта лесопатологического обследования. Приказ Минприроды России от 16.09.2016 № 480 (ред. от 22.08.2017). Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45200. URL: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения 25.12.2017 г.).
- [17] Об утверждении Лесоустроительной инструкции. Приказ Рослесхоза от 12.12.2011 №516. Зарегистрировано в Минюсте РФ 06.03.2012 № 23413 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. № 23. 04.06.2012.
- [18] 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.
- [19] Захаров В.М., Яблоков А.В. Анализ морфологической изменчивости как метод оценки состояния природных популяций // Новые методы изучения почв, животных в радиоэкологических исследованиях. М.: Наука, 1985. С. 176–185.
- [20] Kozlov M.V., Wilsey B.J., Koricheva J., Haukioja E. Fluctuation asymmetry of birch leaves increases under pollution impact // *J. Appl. Ecology*, 1996, no. 33, pp. 1489–1495.
- [21] Захаров В.М. Здоровье среды: методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития: методическое пособие для заповедников. М.: Центр экологической политики России, 2000. 318 с.
- [22] Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). МПР РФ. Введ. 16.10.03. № 460-Р. М., 2003. 24 с.
- [23] Kozlov M.V. 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, pp. 365–370.
- [24] Kozlov M.V. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Ecological indicators*, 2002, vol. 1, pp. 271–277.
- [25] Ромашкин Д.Ю., Чубугина И.В., Радин А.И., Раздайводин А.Н. Использование индекса флуктуирующей асимметрии для биоиндикационной оценки биологической устойчивости лесов в зонах радиоактивного загрязнения // *Вестник МГУЛ–Лесной вестник*, 2016. № 5. С. 122–128.
- [26] Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1980. 293 с.
- [27] Плохинский Н.А. Биометрия. М.: МГУ, 1970. 367 с.
- [28] Научное обоснование методов комплексной биоиндикации состояния лесных генетических ресурсов при аэротехногенном радиоактивном загрязнении // Отчет о научно-исследовательской работе Государственного задания на осуществление научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ на 2016 год и на плановый период 2017 и 2018 годов / под ред. А.Н. Раздайводина. Пушкино: ФБУ ВНИИЛМ, 2016. 135 с.
- [29] Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // *Общество. Среда. Развитие*, 2009. № 4. С. 146–165.

Сведения об авторах

Ромашкин Дмитрий Юрьевич — зав. лабораторией радиационной экологии ФБУ ВНИИЛМ, info@roslesrad.ru

Ромашкина Ирина Владимировна — канд. биол. наук, вед. науч. сотр. отдела радиационной экологии и экотоксикологии леса ФБУ ВНИИЛМ, info@roslesrad.ru

Калнин Вадим Викторович — канд. биол. наук, профессор Российской академии естествознания, заместитель начальника отдела информационных технологий, заведующий сектором анализа данных ФБУ ВНИИЛМ, kalnin@vniilm.ru

Пророков Андрей Алексеевич — зав. лабораторией химико-аналитических исследований ФБУ ВНИИЛМ, info@roslesrad.ru

Карпов Антон Дмитриевич — науч. сотр. отдела радиационной экологии и экотоксикологии леса ФБУ ВНИИЛМ, info@roslesrad.ru

Поступила в редакцию 20.12.2018.

Принята к публикации 24.01.2019.

MORPHOGENETIC EVALUATION OF BIOLOGICAL TOLERANCE OF FOREST STANDS UNDER THE CONDITIONS OF RADIOACTIVE CONTAMINATION

D.Yu. Romashkin, I.V. Romashkina, V.V. Kalnin, A.A. Prorokov, A.D. Karpov

VNIILM, 15, Institutskaya st., 141200, Pushkino, Moscow Region, Russia

info@roslesrad.ru, kalnin@vniilm.ru

The authors studied the possibility of early indication of decrease in biological tolerance of forest ecosystems under the conditions of radioactive contamination by cesium-137 based on morphogenetic evaluation of status of edificatory tree species. The results of preliminary evaluation of biological tolerance of forest stands on stationary sites of radiation monitoring network are represented being obtained using the standard forest pathology methods. Basic reasons of decrease in biological tolerance of forest stands under the conditions of radioactive contamination are examined, as well as specific factors influencing the process. The morphogenetic evaluation under the conditions of radioactive contamination is conducted using the comparison of morphometric parameters of pine (*Pinus sylvestris*) needles and birch (*Betula pendula*) leaves collected in different zones of contamination from forest sites with monodominant pine and mixed pine-birch stands. Mixed stands were shown to possess higher tolerance as compared to monodominant pine ones under the conditions of radioactive contamination by cesium-137 (Bryansk region) at similar characteristics of site conditions. Dysfunctions of morphogenesis of leaves and needles proved to increase with progressing soil contamination density and relative activity of radionuclides in structural parts of trees. The use of morphogenetic methods of evaluation of biological tolerance of forest stands under the conditions of radioactive contamination makes it possible to reveal the decrease in biological tolerance at earlier stages as compared to traditional methods used in forest pathological monitoring.

Keywords: forest radioactive contamination, biological tolerance, morphogenetic evaluation of tolerance

Suggested citation: Romashkin D.Yu., Romashkina I.V., Kalnin V.V., Prorokov A.A., Karpov A.D. *Morfogeneticheskaya otsenka biologicheskoy ustoychivosti lesnykh nasazhdeniy v usloviyakh radioaktivnogo zagryazneniya* [Morphogenetic evaluation of biological tolerance of forest stands under the conditions of radioactive contamination]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 84–91. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-2-84-91

References

- [1] *Atlas sovremennykh i prognoznykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoy AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya – Belarus')* [The Atlas of recent and predictable aspects of consequences of Chernobyl accident on polluted territories of Russia and Belarus (ARPA Russia — Belarus)]. Ed. Yu.A. Izrael', I.M. Bogdevich. Moscow; Minsk: Fond «Infosfera» – NIA-Priroda, 2009, 140 p.
- [2] Maradudin I.I., Vetrov V.A., Ipat'ev V.A. *Vozdeystvie avarii na Chernobyl'skoy AES na lesnoe khozyaystvo zagryaznennykh territoriy Belarusi, Rossii i Ukrainy. Doklad gruppy ekspertov dlya XIX Sessii FAO/EEK/MOT* [The impact of the Chernobyl nuclear power plant accident on forestry in the contaminated areas of Belarus, Russia and Ukraine]. Minsk: BGU, 1992, 25 p.
- [3] Maradudin I.I., Panfilov A.V., Shubin V.A. *Osnovy prikladnoy radioekologii lesa* [Fundamentals of applied forest radioecology]. Moscow: VNIILM, 2001, 224 p.
- [4] Maradudin I.I., Zhukov E.A., Radin A.I., Razdayvodin A.N. *Vliyanie biologo-lesovodstvennykh faktorov na migratsiyu tseziya-137 v lesnykh ekosistemakh* [The influence of biological-silvicultural factors on the migration of cesium-137 in forest ecosystems]. *Materialy Mezhdunar. konf. «Chernobyl' 20 let spustya. Strategiya vosstanovleniya i ustoychivogo razvitiya postradavshikh regionov»*. Gomel': Institut radiologii, 2006, pp. 240–241.
- [5] Shevchuk V.E., Skryabin A.I. *Otsenka doz oblucheniya naseleniya pri professional'nom i bytovom kontakte s lesom* [Assessment of radiation doses on the population in professional and domestic contact with the forest]. Minsk: IL ANB, 1994, pp. 118–122.
- [6] Razdayvodin A.N., Chubugina I.V., Romashkin D.Yu., Radin A.I., Prorokov A.A., Chirkova E.A. *Otsenka biologicheskoy ustoychivosti lesov v zonakh radioaktivnogo zagryazneniya po fluktuiruyushchey asimmetrii khvoi sosny obyknovlenno* [Estimation of the forests biological stability by pine needles fluctuating asymmetry growing in the zones of radioactive contamination]. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy okhrany i zashchity lesov v sisteme ustoychivogo razvitiya*. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konf. Gomel'*: IL NAN Respubliki Belarus', 2013, pp. 267–271.
- [7] Panfilov A.V., Panfilova E.N., Sidorov V.P. *Radiochuvstvitel'nost' i sanitarnoe sostoyanie sosnovykh nasazhdeniy v zone avarii na ChAES* [Radio sensitivity and sanitary state of pine plantations in the Chernobyl accident zone]. *Tez. dokl. I Mezhdunar. Konf. «Biologicheskie i radioekologicheskie posledstviya avarii na ChAES» (Zelenyy Mys 10–18.09.1990)*. Moscow, 1990. 19 p.
- [8] Maradudin I.I., Zhukov E.A., Razdayvodin A.N. *Radioekologicheskoe rayonirovanie lesov, zagryaznennykh radionuklidami* [Radioecological division of the russian forests contaminated by radionuclides]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2009, t. 49, no. 4, pp. 502–509.
- [9] Dubinin N.P. *Problemy radiatsionnoy genetiki* [Problems of radiation genetics]. Moscow: Atomizdat, 1961, 468 p.
- [10] Dubinin N.P., Kal'chenko V.A. *Mutagenez i urovni radiatsii v mestakh obitaniya populyatsiy* [Mutagenesis and radiation levels in habitats of populations]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. «Biologiya»*, 1984, no. 5, pp. 645–652.
- [11] Romanovskiy M.G. *Formirovanie urozhaya semyan sosny v norme i pri mutagennom zagryaznenii* [Formation of pine seed yield in normal and mutagenic pollution]. Moscow: Nauka, 1997, 112 p.
- [12] Micieta K. The use of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arnold as bioindicator species for environmental pollution. *Cytogenetic studies of forest trees and shrub species*. Zagreb, 1997, pp. 253–264.

- [13] Mozolevskaya E.G., Selikhovkin A.V., Izhevskiy S.S. *Lesnaya entomologiya* [Forest Entomology]. Ed. E.G. Mozolevskaya. Moscow: Akademiya, 2010, 416 p.
- [14] Mozolevskaya E.G. *Metody otsenki vliyaniya vreditel'ey i bolezney lesa na sostoyanie nasazhdeniy* [Methods of the impact of pests and forest diseases estimation on the state of stands]. Metody monitoringa vreditel'ey i bolezney lesa. Spravochnik, t. III: Bolezni i vrediteli v lesakh Rossii. Ed. V.K. Tuzov. Moscow: FALKH MPR RF, 2004, pp. 95–108.
- [15] Zhukov A.M. *Dinamika lesopatologicheskogo sostoyaniya drevostoev na zagryaznennykh radionuklidami territoriyakh* [Dynamics of the forest stands forest-pathological status in the contaminated areas by radionuclides]. Voprosy lesnoy radioekologii. Ed. A.I. Chilimov. Moscow: MSFU, 2000, pp. 137–169.
- [16] *Ob utverzhdenii poryadka provedeniya lesopatologicheskikh obsledovaniy i formy akta lesopatologicheskogo obsledovaniya. Prikaz Minprirody Rossii ot 16.09.2016 № 480 (red. ot 22.08.2017). Zaregistrirvano v Minyuste Rossii 13.01.2017 № 45200* [On approval of the procedure for carrying out forest pathological surveys and the form of an act of forest pathology surveys. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia of September 16, 2016 no. 480 (as amended on August 22, 2017). Registered in the Ministry of Justice of Russia January 13, 2017 no. 45200. Available at: <http://www.pravo.gov.ru> (accessed 25.12.2017).
- [17] *Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noy instruksii. Prikaz Rosleskhoza ot 12.12.2011 № 516. Zaregistrirvano v Minyuste RF 06.03.2012 № 23413* [On approval of the Forest Instruction. Order of the Rosleskhoz of 12.12.2011 no. 516. Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on 06.03.2012 no. 23413]. Byulleten' normativnykh aktov federal'nykh organov ispolnitel'noy vlasti, no. 23, 04.06.2012.
- [18] *Aktivnost' radionuklidov v schetnykh obratzakh. Metodika izmereniy na gamma-spektrmetrakh s ispol'zovaniem programmnoy obespecheniya SpectraLine* [The activity of radionuclides in the counting samples. Metodika izmereniy na gamma-spektrmetrakh s ispol'zovaniem programmnoy obespecheniya SpectraLine]. Svidetel'stvo ob attestatsii [Certificate of Attestation] no. 43151.4B207/01.00294-2010 of 28.02.2014.
- [19] Zakharov V.M., Yablokov A.V. *Analiz morfologicheskoy izmenchivosti kak metod otsenki sostoyaniya prirodnykh populyatsiy* [Analysis of morphological variability as a method for the state of natural populations estimation]. Novye metody izucheniya pochv, zhivotnykh v radioekolog, issledovaniyakh. Moscow: Nauka, 1985, pp. 176–185.
- [20] Kozlov M.V., Wilsey B.J., Koricheva J., Haukioja E. Fluctuation asymmetry of birch leaves increases under pollution impact. *J. Appl. Ecology*, 1996, no. 33, pp. 1489–1495.
- [21] Zakharov V.M. *Zdorov'e srede: metodika otsenki. Otsenka sostoyaniya prirodnykh populyatsiy po stabil'nosti razvitiya: metodicheskoe posobie dlya zapovednikov* [Environmental health: estimation methodology. The state of natural populations estimation for the stability of development: a methodological guide for reserves]. Moscow: Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii, 2000, 318 p.
- [22] *Metodicheskie rekomendatsii po vypolneniyu otsenki kachestva srede po sostoyaniyu zhivykh sushchestv (otsenka stabil'nosti razvitiya zhivykh organizmov po urovnyu asimmetrii morfologicheskikh struktur)* [Methodical recommendations for the quality of the environment estimation according to the state of living beings (estimation of the living organisms stability development by the level of morphological structures asymmetry)]. MPR RF; Vved. 16.10.03, no. 460-R. Moscow, 2003, 24 p.
- [23] Kozlov M.V. Difference in needle length – a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, v. 116, pp. 365–370.
- [24] Kozlov M.V. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Ecological indicators*, 2002, vol. 1, pp. 271–277.
- [25] Romashkin D.Yu., Chubugina I.V., Radin A.I., Razdayvodin A.N. *Ispol'zovanie indeksa fluktuiruyushchey asimmetrii dlya bioindikatsionnoy otsenki biologicheskoy ustoychivosti lesov v zonakh radioaktivnogo zagryazneniya* [Using of the fluctuating asymmetry index to estimate the biological sustainability of forests in the contaminated areas]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2016, no. 5, pp. 122–128.
- [26] Lakin G.F. *Biometriya* [Biometry]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 293 p.
- [27] Plokhinskiy N.A. *Biometriya* [Biometry]. Moscow: MGU, 1970, 367 p.
- [28] *Nauchnoe obosnovanie metodov kompleksnoy bioindikatsii sostoyaniya lesnykh geneticheskikh resursov pri aerotekhnogenom radioaktivnom zagryaznenii* [Scientific background of the integrated bioindication methods of the forest genetic resources state under the aerotechnogenic radioactive contamination]. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote gosudarstvennogo zadaniya na osushchestvlenie nauchno-issledovatel'skikh, opytно-konstruktorskikh i tekhnologicheskikh rabot na 2016 god i na planovyy period 2017 i 2018 godov / pod red. A.N. Razdayvodin. Pushkino: VNIILM, 2016, 135 p.
- [29] Dmitriev V.V. *Opredelenie integral'nogo pokazatelya sostoyaniya prirodnogo ob'ekta kak slozhnoy sistemy* [Determination of the natural object state integral indicator as a complex system]. Obshchestvo. Sreda. Razvitie, 2009, no. 4, pp. 146–165.

Authors' information

Romashkin Dmitry Yuryevich — head of the laboratory of radiation ecology VNIILM, info@roslesrad.ru

Romashkina Irina Vladimirovna — Cand. Sci. (Biological), leading researcher of the Department of radiation ecology and forest ecotoxicology VNIILM, info@roslesrad.ru

Kalnin Vadim Viktorovich — Cand. Sci. (Biological), professor of the Russian Academy of natural history, deputy head of information technology Department VNIILM, head of the Sector of data analysis VNIILM, kalnin@vniilm.ru

Prorokov Andrei Alekseevich — head of laboratory of chemical and analytical research VNIILM, info@roslesrad.ru

Karpov Anton Dmitrievich — research fellow of the Department of radiation ecology and forest ecotoxicology VNIILM, info@roslesrad.ru

Received 20.12.2018.

Accepted for publication 24.01.2019..