

Научная статья

УДК 630.4
DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.05

Оптимизация оценки биологической устойчивости радиоактивно загрязненных сосновых насаждений с использованием индекса флуктуирующей асимметрии хвои

Дмитрий Юрьевич Ромашкин¹**Сергей Анатольевич Родин²***доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН***Ирина Владимировна Ромашкина³***кандидат биологических наук***Андрей Николаевич Раздайковин⁴**

Аннотация. Предложен метод оценки биологической устойчивости сосновых насаждений в зонах радиоактивного загрязнения с использованием индекса флуктуирующей асимметрии (ИФА) на основе полуавтоматической обработки отсканированных изображений хвои. Он позволяет исключить ошибки, связанные с влиянием субъективного фактора, при получении актуальных данных по оценке нарушений развития древесных растений с целью своевременного проведения мероприятий по сохранению защитных функций и хозяйственной ценности древостоев. Рассмотрены аспекты и результаты биоиндикационной оценки нарушений стабильности развития сосны обыкновенной в условиях радиоактивного загрязнения с учетом недостатков метода. Оптимизированный метод оценки позволяет разрабатывать рекомендации по проведению специальных мероприятий, повышающих биологическую устойчивость радиоактивно загрязненных насаждений, с целью возвращения обследованных участков в хозяйственный оборот.

Ключевые слова: индекс флуктуирующей асимметрии, *Pinus sylvestris* L., радиоактивное загрязнение лесов, биологическая устойчивость насаждений

Для цитирования: Ромашкин Д.Ю., Родин С.А., Ромашкина И.В., Раздайковин А.Н. Оптимизация оценки биологической устойчивости радиоактивно загрязненных сосновых насаждений с использованием индекса флуктуирующей асимметрии хвои. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация. 2023. № 2. С. 66–74. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.05.

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, заведующий лабораторией радиационной экологии леса (Пушкино, Московская обл., Российская Федерация), romashkin@roslesrad.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, зам. директора по научной работе (Пушкино, Московская обл., Российская Федерация), info@vniilm.ru

³ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ведущий научный сотрудник (Пушкино, Московская обл., Российская Федерация), info@roslesrad.ru

⁴ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, заведующий отделом радиационной экологии и экотоксикологии леса (Пушкино, Московская обл., Российская Федерация), info@roslesrad.ru

Original article

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.05

Optimization of the Pine Plantations Biological Stability under Radioactive Contamination Using Index of Fluctuating Asymmetry of Needles

Dmitriy Y. Romashkin¹

Sergey A. Rodin²

Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences

Irina V. Romashkina³

Candidate of Biological Sciences

Andrey N. Razdaivodin⁴

Abstract. The article is devoted a method for assessing the biological stability of pine plantations using the fluctuating asymmetry index (IFA) with automatic processing of scanned images of needles. This method makes it possible to eliminate errors associated with the influence of the human factor in order to obtain up-to-date data on the assessment of disturbances in the development of woody plants for the purpose of early diagnosis of a decrease in the biological stability of forest ecosystems. Aspects of the bioindicative assessment of disturbances in the stability of plant development based on morphometric traits using the index of fluctuating asymmetry and criticism of this method are considered. The results of a bioindicative evaluation of disturbances in the developmental stability of Scots pine under conditions of radioactive contamination are presented, taking into account the shortcomings of the method. To eliminate system errors associated with the influence of the human factor, digital images of pine needles were processed in a semi-automatic mode. At the end of the article, recommendations are given for carrying out special measures that increase the biological stability of plantations in order to return the surveyed areas to economic circulation.

Key words: fluctuating asymmetry index, *Pinus sylvestris* L., radioactive contamination of forests, forest stands stability.

For citation: Romashkin D., Rodin S., Romashkina I., Razdaivodin A. Optimization of the Pine Plantations Biological Stability under Radioactive Contamination Using Index of Fluctuating Asymmetry of Needles. – Text : electronic // Forestry information. 2023. № 2. P. 66–74. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.05.

¹ Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Head of the Laboratory of Radiation Ecology of the Forest (Pushkino, Moscow region, Russian Federation), romashkin@roslesrad.ru

² Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Deputy Director of Scientific Work (Pushkino, Moscow region, Russian Federation), info@vniilm.ru

³ Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Leading Researcher (Pushkino, Moscow region, Russian Federation), info@roslesrad.ru

⁴ Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Head of the Department of Radiation Ecology and Ecotoxicology of the Forest (Pushkino, Moscow region, Russian Federation), info@roslesrad.ru

Введение

При осуществлении радиоэкологического мониторинга в лесах Российской Федерации для определения воздействия радиоактивного загрязнения на лесные экосистемы большую роль играет комплексная оценка состояния лесных участков [1]. Актуальной задачей является ранняя диагностика снижения биологической устойчивости лесных экосистем с целью своевременного проведения мероприятий по сохранению защитных функций и хозяйственной ценности древостоев, снижению риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в лесах.

Изучение возможности ранней диагностики и количественной оценки нарушений биологической устойчивости лесных экосистем в условиях антропогенного воздействия проводится на основе измерения индекса флуктуирующей асимметрии (ИФА). Под флуктуирующей асимметрией (ФА) понимают ненаправленные отклонения различных морфологических структур от билатеральной симметрии, которой они в норме обладают [2].

Различные аспекты методологии оценки нарушений стабильности развития растений по показателю ИФА неоднократно подвергались критике в работах российских и зарубежных исследователей [3–6].

Эффективность оценки на основе ФА снижается в результате упрощения методик, недостаточной точности инструментальных измерений, влияния «эффекта наблюдателя» и высокой степени субъективизма. Авторы критических статей отмечают, что для получения корректных оценок ФА требуются высокая точность и возможность неоднократного повторения измерений каждого объекта, а также замеры «вслепую» [7].

Существующие методики оценки нарушения стабильности развития растений предусматривают усреднение получаемых результатов значений ИФА при статистической обработке данных, что обусловлено гипотезой о нормальном распределении значений индекса флуктуирующей асимметрии хвои в пределах конкретной выборки и особенностями расчета показателя

ИФА, не имеющего прямой статистической интерпретации.

Цель исследований – оптимизация метода измерения индекса флуктуирующей асимметрии хвои для оценки биологической устойчивости сосновых насаждений в зонах радиоактивного загрязнения Брянской обл. после аварии на Чернобыльской АЭС на основе полуавтоматического способа обработки результатов.

Материалы и методика исследований

Исследования нарушений стабильности развития древесных растений-эдификаторов лесного насаждения проводили на примере сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), в качестве стрессового фактора рассматривалось техногенное загрязнение почвы ^{137}Cs в результате катастрофы на ЧАЭС.

Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs определяет накопленную растением дозу, которая, в свою очередь, является фактором нарушения стабильности развития организма в условиях хронического воздействия ионизирующего излучения [8].

В качестве объектов исследований использованы модельные деревья сосны на 2-х лесных участках в разновозрастных смешанных насаждениях с участием березы повислой (*Betula pendula*) и сосны обыкновенной на территории зон радиоактивного загрязнения в Брянской обл. (табл. 1).

Отобранные участки представляют собой бывшие сельскохозяйственные земли, выведенные из оборота после катастрофы на ЧАЭС и заросшие лесной растительностью, с близкими лесоводственными и лесотаксационными характеристиками. Участки характеризуются одинаковым типом лесорастительных условий, сходным рельефом и экспозицией склона.

На каждом из исследуемых участков было подобрано по 10 модельных деревьев со средними таксационными показателями, без явных признаков снижения биологической устойчивости.

ТАБЛИЦА 1. РАСПОЛОЖЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧАСТКОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НАРУШЕНИЙ СТАБИЛЬНОСТИ РАЗВИТИЯ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

№ УЧАСТКА	ЛЕСНИЧЕСТВО	УЧАСТКОВОЕ ЛЕСНИЧЕСТВО	ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ		ТЛУ	ЗОНА ЗАГРЯЗНЕНИЯ, Ки/км ²
			с. ш.	в. д.		
1	Злынковское	Ур. Ленинский путь	N 52° 27'	E 31° 37'	C ₂	40 и более*
2	Злынковское	СПК Решительный	N 52° 38'	E 31° 38'	C ₂	40 и более

* 40 Ки/км² и более – зона крайне высокой степени загрязнения лесов ¹³⁷Cs.

Для определения морфометрических показателей стабильности развития сосны обыкновенной отбор проб проводили по методике М.В. Козлова [9].

С полученных проб побегов сосны предшествующего года в гербарно-сухом состоянии отбирали пары хвоинок, которые были отсканированы на планшетном сканере с разрешением 600 dpi (рис. 1). С каждого побега – не менее 20 пар хвоинок. Полученные изображения обрабатывали с использованием ImageJ – многофункциональной программы с открытым исходным кодом, сочетающей в себе анализатор и обработчик графических изображений широкого спектра форматов.

После этого определяли координаты точек контура изображения, по которым вычисляли морфометрические параметры каждой хвоинки. При сравнении левой и правой хвоинки в паре в качестве морфометрических параметров использовали периметр и площадь изображения хвоинки, а также длину осевой линии (рис. 2).

Помимо морфометрических параметров хвои, была измерена удельная активность ¹³⁷Cs в хвое и мелких ветвях каждого модельного дерева и определена плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs в корнеобитаемой зоне. Измерения проводили на радиоспектрометре Гамма-1П с детектором на основе особо чистого германия [10]. Статистическая обработка результатов измерений осуществлялась по стандартным методикам [11, 12].

Для возможности сравнения показателей нарушения стабильности развития, полученных в различных условиях (например, при разной плотности загрязнения почв радионуклидами), индикация состояния биологической

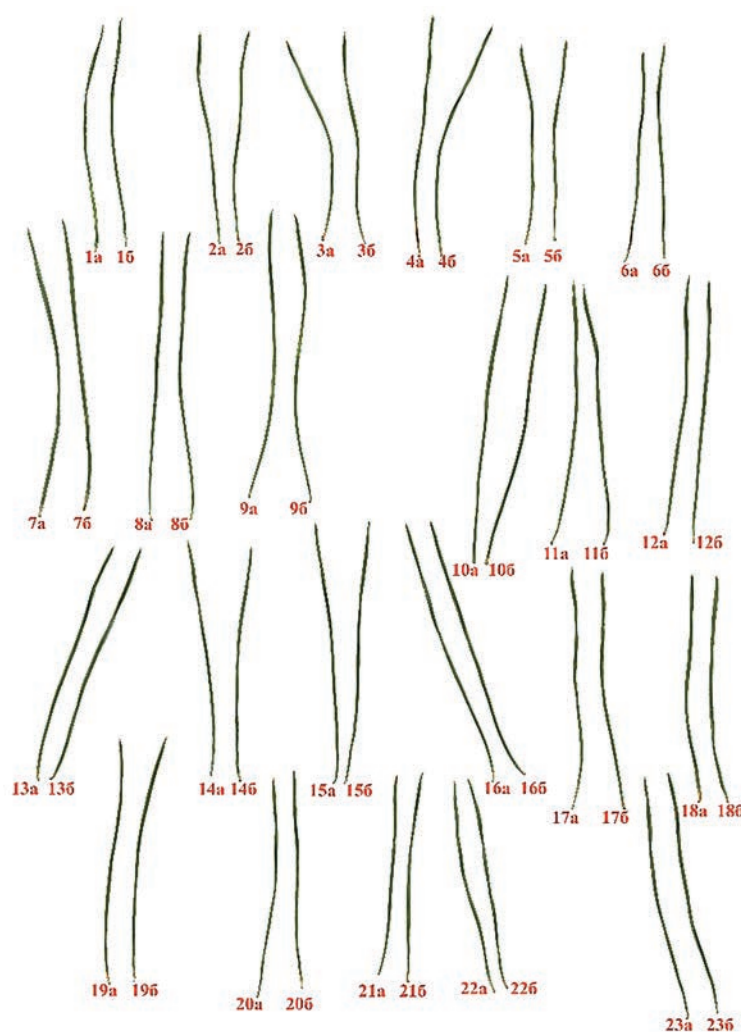


Рис. 1. Отсканированные изображения пар хвоинок с одного побега, подготовленные для дальнейшей графической обработки

устойчивости насаждений требует перевода численных значений показателя в качественные градации шкалы «норма – патология». Такой подход количественного ранжирования разнородных частных критериев может содержать ошибки

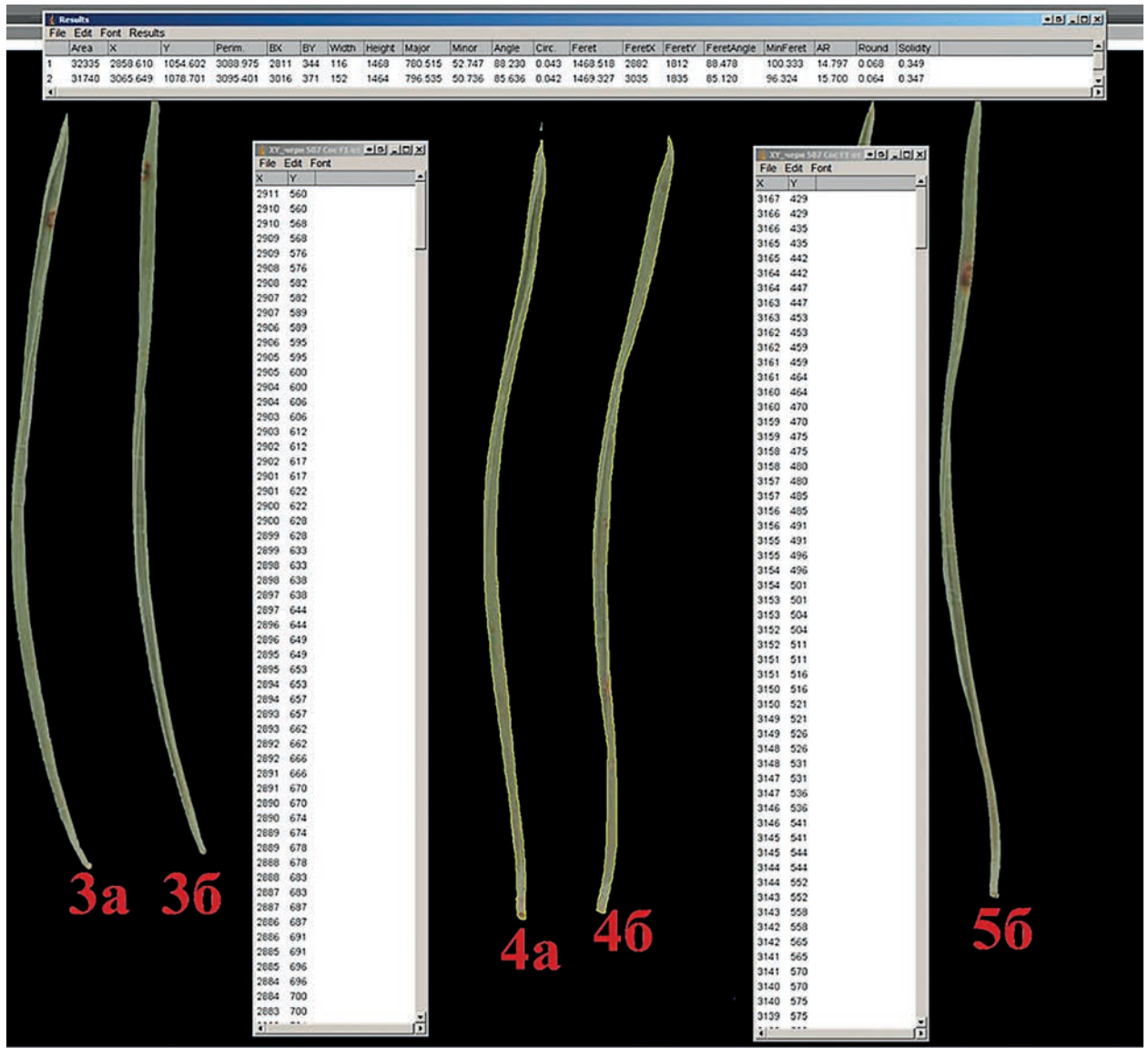


Рис. 2. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ХВОИ В ПРОГРАММЕ [IMAGE] С ОКОНТУРИВАНИЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

экспертной оценки, которые устраняют путем жесткой формализации [13].

В 1963 г. С. Харрингтоном был разработан подход к формализации субъективных неопределенностей в многокритериальных задачах на основе функции желательности [14]. В данном исследовании использование функции желательности Харрингтона реализовано путем указания наиболее предпочтительного значения параметра на основе эмпирической функции его распределения.

Оценку биологической устойчивости насаждений на лесных участках в зонах радиоактивного загрязнения ¹³⁷Cs проводили с использованием

основанной на обобщенной функции желательности Харрингтона D [14] шкалы состояния лесных экосистем, которая была разработана для условий Брянской обл. [15].

Результаты и обсуждение

Полученные в результате статистической обработки данные о плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (ПЗП), удельной активности ¹³⁷Cs в хвое сосны (УА), а также средние показатели асимметрии приведены в табл. 2.

Полученные данные подтверждают результаты измерений предыдущих лет о влиянии уровней удельной активности структурных частей древесных растений (в данном случае хвои сосны) на значение ИФА. Поскольку ИФА является интегральным показателем нарушений морфогенетического развития органов растения, его увеличение характеризует тенденцию снижения биологической устойчивости отдельных деревьев и насаждения в целом.

Интегральная оценка биологической устойчивости насаждений по шкале, разработанной для Брянской обл., показала следующее. Согласно значениям усредненного интегрального показателя D (табл. 3), несмотря на достаточно высокие плотность загрязнения и показатели ИФА, насаждения на исследуемых участках находятся в начальной фазе снижения биологической устойчивости, лесная среда практически не нарушена. Такая ситуация объясняется тем, что для Брянской обл. характерен широкий разброс показателей ИФА из-за наличия различных зон по уровню радиоактивного загрязнения [15].

Таким образом, на основании проведенной оценки прогноз изменения состояния биологической устойчивости данного насаждения является благоприятным. Для поэтапного возвращения в хозяйственное использование

обследованного лесного участка комплекс мероприятий по повышению его биологической устойчивости на данном уровне деградации лесной среды не обязателен. С учетом значения интегрального показателя D функции желательности Харрингтона, соответствующего начальной фазе снижения биологической устойчивости, необходима организация мониторинга состояния древостоев.

Заключение

Проведенные исследования нарушений стабильности развития сосны обыкновенной в условиях радиоактивного загрязнения ¹³⁷Cs в Брянской обл. на основе определения ИФА показали, что для корректной оценки необходимо соблюдать определенные условия при использовании этого метода. В частности, при отборе материала и получении первичных данных необходимо максимально унифицировать и автоматизировать процессы подготовки и обработки хвои для исключения воздействия на результат оценки субъективного фактора.

В соответствии с данным условием, в настоящей работе морфометрический анализ проводили с использованием отсканированных изображений хвои, а измерения – в полуавтоматическом

Таблица 2. Результаты радиометрического обследования участков и измерений ИФА полуавтоматическим методом обработки данных

№ участка	ПЗП, кБк/м ²	УА хвои, Бк/кг	ИФА1 площадь	ИФА2 периметр	ИФА3 длина осевой линии
1	2797,5±307,0	291,5±29,3	0,060±0,005	0,016±0,001	0,008±0,001
2	4528,4±483,8	754,3±59,6	0,127±0,010	0,031±0,002	0,015±0,001

Примечание: ПЗП – плотность загрязнения почвы; УА – удельная активность; ИФА – индекс флуктуирующей асимметрии.

Таблица 3. Средние значения ИФА и значения интегрального показателя D функции желательности Харрингтона по исследуемым участкам

№	ИФА среднее	Значение D	Оценка состояния экосистемы	Определение состояния экосистемы
1	0,028±0,002	0,890	D от 0,80 до 1,00 (5 баллов)	Зона относительного экологического благополучия
2	0,058±0,005	0,738		

режиме после определения координат контура хвои с помощью программы ImageJ без участия человека.

Способ обработки данных путем морфометрического анализа отсканированных изображений хвои в значительной степени снижает недостатки метода интегральной оценки состояния природных экосистем на основе ИФА. Оптимизация метода, предложенная авторами данного исследования, позволяет собрать большой массив данных, которые невозможно оценить при использовании обычного метода измерения ИФА, такие как площадь и периметр хвои. Слепой метод обработки данных без участия человека

нивелирует последствия погрешностей обработки материала вручную.

Таким образом, оптимизированный метод оценки устойчивости насаждений, наряду со стандартными лесопатологическими исследованиями, позволяет успешно осуществлять экологический мониторинг состояния лесных экосистем на ранних стадиях повреждения. На основе проведенной оценки даются рекомендации по целесообразности проведения специальных мероприятий, повышающих биологическую устойчивость насаждений, загрязненных Cs^{137} , перед вводом обследованных участков в хозяйственный оборот.

Список источников

1. Белов, А.А. К вопросу об организации государственного радиоэкологического мониторинга в лесах, загрязненных радионуклидами. – Текст : электронный / А.А. Белов, А.Н. Раздайводин, А.И. Радин // Лесохозяйственная информация. – 2020. – № 1. – С. 57–68. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.06
2. Захаров, В.М. Онтогенез и популяция (стабильность развития и популяционная изменчивость) / В.М. Захаров // Экология. – 2001. – № 3. – С. 177–191.
3. Makarenko, E.S. Morphometric indices of Scots pine need les under chronic exposure to radiation / E.S. Makarenko, A.A. Oudalova, S.A. Geras'kin // Contemp. Probl. Ecol. – 2017. – 10. – P. 761–769.
4. A dose rate causes no fluctuating asymmetry indexes changes in silver birch (*Betula pendula* (L.) Roath.) leaves and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles in the Chernobyl Exclusion Zone. – Текст : электронный / E. Kashparova, S. Levchuk, V. Morozova, V.J. Kashparov // Environ. Radioact. – 2020. – 211: 105731. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.05.015. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.05.015>.
5. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress and fitness in stickleback: a review of the literature and examination of cranial structures / D.L. Lajus, P.V. Golovin, A.O. Yurtseva, T.S. Ivanova, A.S. Dorgham, M.V. Ivanov // Evol. Ecol. Res. – 2019. – 20: 83-106.
6. Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of *Betula pendula* Roth.leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of the multi-factor negative impact. – Текст : электронный / E. Shadrina, N. Turmukhametova, V. Soldatova, Y. Vol'pert, I. Korotchenko, G. Pervyshina // Symmetry. – 2020. – 12: 1317. DOI:10.3390/sym12081317. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/sym12081317>
7. Application of fluctuating asymmetry indexes of silver birch leaves for diagnostics of plant communities under technogenic pollution. – Текст : электронный / V.P. Ivanov, Y.V. Ivanov, S.I. Marchenko, V.V. Kuznetsov // Russ. J. Plant Physiol. – 2015. – 62. – P. 340–348. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1134/S1021443715030085>.
8. Изучение радиобиологических эффектов в популяциях сосны обыкновенной на подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС территории России / С.А. Гераськин [и др.] // Тр. регионального конкурса научных проектов фундаментальных научных исследований. – Вып. 17. – Калуга, 2012. – С. 220–229.
9. Kozlov, M.V. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) / M.V. Kozlov, P. Niemela, J. Juntila // Ecological indicators. – 2002. – V. 1. – P. 271–277.
10. 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.
11. Боровиков, В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов : 2-е изд. / В. Боровиков. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 688 с.
12. Лакин, Г.Ф. Биометрия : учеб. пособие для биол. спец. вузов ; 4-е изд., перераб. и доп. / Г.Ф. Лакин. – Москва : Высшая школа, 1990. – 352 с.
13. Беднова, О.В. Использование функции желательности Харрингтона для оптимизации многокритериальной оценки состояния лесных экосистем в условиях урбанизированной территории / О.В. Беднова // Лесной вестник. – 2011. – № 7. – С. 35–41.
14. Harrington, E.C. Desirability function and its application / E.C. Harrington // Industrial Quality Control. – 1965. – V. 21 – № 10. – P. 49.
15. 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 // Лесной вестник. – 2019. – № 2. – С. 84–89. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-2-84-91.

References

1. Belov, A.A. K voprosu ob organizacii gosudarstvennogo radioekologicheskogo monitoringa v lesah, zagryaznennyh radionuklidami. – Tekst : elektronnyj / A.A. Belov, A.N. Razdajvodin, A.I. Radin // Lesohozyajstvennaya informaciya. – 2020. – № 1. – S. 57–68. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.06
2. Zaharov, V.M. Ontogenez i populyaciya (stabil'nost' razvitiya i populyacionnaya izmenchivost') / V.M. Zaharov // Ekologiya. – 2001. – № 3. – S. 177–191.
3. Makarenko, E.S. Morphometric indices of Scots pine need les under chronic exposure to radiation / E.S. Makarenko, A.A. Oudalova, S.A. Geras'kin // Contemp. Probl. Ecol. – 2017. – 10. – P. 761–769.
4. A dose rate causes no fluctuating asymmetry indexes changes in silver birch (*Betula pendula* (L.) Roath.) leaves and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles in the Chernobyl Exclusion Zone. – Tekst : elektronnyj / E. Kashparova, S. Levchuk, V. Morozova, V.J. Kashparov // Environ. Radioact. – 2020. – 211: 105731. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.05.015. – Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.05.015>.
5. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress and fitness in stickleback: a review of the literature and examination of cranial structures / D.L. Lajus, P.V. Golovin, A.O. Yurtseva, T.S. Ivanova, A.S. Dorgham, M.V. Ivanov // Evol. Ecol. Res. – 2019. – 20: 83-106.
6. Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of *Betula pendula* Roth. leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of the multi-factor negative impact. – Tekst : elektronnyj / E. Shadrina, N. Turmukhametova, V. Soldatova, Y. Vol'pert, I. Korotchenko, G. Pervyshina // Symmetry. – 2020. – 12: 1317. DOI:10.3390/sym12081317. – Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.3390/sym12081317>
7. Application of fluctuating asymmetry indexes of silver birch leaves for diagnostics of plant communities under technogenic pollution. – Tekst : elektronnyj / V.P. Ivanov, Y.V. Ivanov, S.I. Marchenko, V.V. Kuznetsov // Russ. J. Plant Physiol. – 2015. – 62. – P. 340–348. – Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.1134/S1021443715030085>.
8. Izuchenie radiobiologicheskikh effektov v populyაციyah sosny obyknovennoj na podvergshejsya radioaktivnomu zagryazneniyu v rezul'tate avarii na CHAES territorii Rossii / S.A. Geras'kin [i dr.] // Tr. regional'nogo konkursa nauchnyh proektov fundamental'nyh nauchnyh issledovanij. – Vyp. 17. – Kaluga, 2012. – S. 220–229.
9. Kozlov, M.V. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) / M.V. Kozlov, P. Niemela, J. Junttila // Ecological indicators. – 2002. – V. 1. – P. 271–277.
10. Aktivnost' radionuklidov v schetnyh obrazcah. Metodika izmerenij na gamma-spektrometrah s ispol'zovaniem programmogo obespecheniya «SpectraLine». Svidetel'stvo ob attestacii № 43151.4B207/01.00294-2010 ot 28.02.2014 g.
11. Borovikov, V. STATISTICA. Iskustvo analiza dannyh na komp'yutere: Dlya professionalov : 2-e izd. / V. Borovikov. – Sankt-Peterburg : Piter, 2003. – 688 s.
12. Lakin, G.F. Biometriya : ucheb. posobie dlya biol. spec. vuzov ; 4-e izd., pererab. i dop. / G.F. Lakin. – Moskva : Vysshaya shkola, 1990. – 352 s.
13. Bednova, O.V. Ispol'zovanie funkcii zhelatel'nosti Harringtona dlya optimizacii mnogokriterial'noj ocenki sostoyaniya lesnyh ekosistem v usloviyah urbanizirovannoj territorii / O.V. Bednova // Lesnoj vestnik. – 2011. – № 7. – S. 35–41.
14. Harrington, E.C. Desirability function and its application / E.C. Harrington // Industrial Quality Control. – 1965. – V. 21 – № 10. – P. 49.
15. Morfogeneticheskaya ocenka biologicheskoy ustojchivosti lesnyh nasazhdenij v usloviyah radioaktivnogo zagryazneniya / D.Yu. Romashkin, I.V. Romashkina, V.V. Kalnin, A.A. Prorokov, A.D. Karpov // Lesnoj vestnik. – 2019. – № 2. – S. 84–89. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-2-84-91.