

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДЕКСА ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ ДЛЯ БИОИНДИКАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕСОВ В ЗОНАХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Д.Ю. РОМАШКИН, *зав. лабораторией радиационной экологии ФБУ ВНИИЛМ⁽¹⁾*,
И.В. ЧУБУГИНА, *вед. науч. сотр. отдела радиационной экологии и пирологии леса ФБУ ВНИИЛМ, канд. биол. наук⁽¹⁾*,

А.И. РАДИН, *зав. лабораторией радиационного контроля ФБУ ВНИИЛМ⁽¹⁾*,

А.Н. РАЗДАЙВОДИН, *зав. отдела радиационной экологии и пирологии леса ФБУ ВНИИЛМ⁽¹⁾*

info@roslesrad.ru

⁽¹⁾ФБУ ВНИИЛМ, 141200, Московская обл., Пушкино, ул. Институтская, 15,

Проводилось изучение возможности использования индекса флуктуирующей асимметрии (ИФА) в качестве дополнительного критерия оценки биологической устойчивости лесных экосистем в зонах радиоактивного загрязнения Брянской области на примере березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Выявлено увеличение индекса флуктуирующей асимметрии листьев и хвои при возрастании содержания в них дозобразующего радионуклида (¹³⁷Cs). Для дифференцированной оценки влияния фактора радиоактивного загрязнения на биологическую устойчивость обследованных насаждений различного породного состава по ИФА была использована шкала значений функции желательности Харрингтона.

Ключевые слова: биоиндикация, флуктуирующая асимметрия, радиоактивное загрязнение лесов, береза повислая, сосна обыкновенная.

Радиоактивное загрязнение лесов европейской части Российской Федерации обусловлено катастрофой на Чернобыльской АЭС в 1986 г. [1]. Общая площадь лесов РФ, подвергшихся радиоактивному загрязнению, составила около 1,5 млн га. Наиболее загрязнены леса Брянской области, где представлены все зоны загрязнения почвы радиоцезием (¹³⁷Cs) – от 37 кБк/м² (1 Ки/км²) до 1480 кБк/м² (40 Ки/км²) и более.

Нарушение стабильности развития организма в условиях хронического облучения ионизирующими излучениями связано с накопленной дозой, которая, в свою очередь, определяется плотностью загрязнения почвы ¹³⁷Cs. В ряде исследований утверждается, что значимые эффекты должны проявляться при плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs 370 кБк/м² (10 Ки/км²) и более [2].

Отсутствие лесохозяйственных мероприятий в зонах радиоактивного загрязнения, а также непосредственное воздействие радиационных факторов на лесные растения привело к негативным изменениям состояния лесных экосистем в сторону снижения их биологической и, как следствие, противопожарной устойчивости. В связи с риском

возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с гибелью насаждений и опасностью радиоактивных лесных пожаров, оценка биологической и противопожарной устойчивости лесов в условиях ограниченного ведения лесного хозяйства на территориях зон отчуждения и отселения является важной задачей.

В настоящее время одним из наиболее используемых методов оценки состояния экосистем, включая их биологическую устойчивость, является биоиндикационный анализ, признанный достаточно объективным и воспроизводимым среди методов экологического мониторинга [3–5].

Для лесных экосистем решающее значение при биоиндикации имеет состояние видов-эдикаторов, которыми являются древесные растения [6]. При наличии отклонений в развитии древесного яруса лесных экосистем происходят изменения дендрометрических и биоиндикационных показателей. Однако таксационная характеристика древостоя и лесопатологическая оценка учитывают признаки нарушения древесного яруса, проявляющиеся уже на высоких стадиях дигрессии лесной среды. Для ранней диагностики и количественной оценки нарушений био-

Расположение участков, отобранных в Злынковском лесничестве для оценки флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы повислой и хвой сосны обыкновенной относительно зон радиоактивного загрязнения (ЗРЗ)
Location of the sites in forestry of Zlynka to assess the fluctuating asymmetry of birch leaf plate and Scots pine needles relatively contaminated areas

№ участка	Лесничество	Участковое лесничество, урочище	Географические координаты		ЗРЗ, Ки/км²
Береза повислая					
1	Злынковское	Злынковское	N 52°22'	E 31°39'	1–5
2	Злынковское	Новозыбковское	N 52°39'	E 31°35'	40 и более
3	Клинцовское	Красногорское	N 53°01'	E 31°16'	40 и более
Сосна обыкновенная					
4	Злынковское	СПК им. Щорса	N 52° 11'	E 31°43'	1–5
5	Злынковское	Ур. Ленинский путь	N 52° 27'	E 31° 37'	40 и более
6	Злынковское	СПК Решительный	N 52° 38'	E 31° 38'	40 и более

логической устойчивости лесных экосистем в условиях антропогенной нагрузки разной степени широко используется определение величины флуктуирующей асимметрии.

Под флуктуирующей асимметрией понимаются ненаправленные различия между сторонами различных морфологических структур, в норме обладающих билатеральной симметрией [7].

Изучение применимости индекса флуктуирующей асимметрии (ИФА) для оценки биологической устойчивости лесных экосистем в зонах радиоактивного загрязнения Брянской области проводилось на примере березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Работа выполнялась в 2013–2014 гг.

Для исследования было отобрано 6 участков в различных зонах радиоактивного загрязнения (табл. 1) с одинаковыми типами лесорастительных условий (C₂), сходными характеристиками рельефа и экспозицией склона. Участки представляют собой бывшие сельскохозяйственные земли, выведенные из хозяйственного оборота и заросшие лесной растительностью с близкими лесотаксационными характеристиками (для каждого из видов – породным составом, бонитетом и возрастом насаждений).

Оценку флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы проводили по методике оценки качества среды [8]. На каждом участке было отобрано по 10 близко растущих здоровых модельных деревьев одного возрас-

та. С каждого дерева срезали по 4 крупных ветви, ориентированных по сторонам света из нижней части кроны, расположенных на одной высоте от земли. Листья примерно одного, среднего для данного вида, размера, без повреждений отбирались только с укороченных побегов.

С каждой ветви отбирали по 10 листьев, раскладывали по бумажным конвертам, маркировали, далее обработка производилась в лабораторных условиях. Остальную часть листьев и побегов со срезанных веток отбирали для определения удельной активности ¹³⁷Cs в структурных частях древесного растения.

Измерения параметров асимметрии листовой пластинки проводились в полуавтоматическом режиме после сканирования маркированных листьев с использованием прецизионного планшетного сканера HP SJ 5470с и обработки растрового изображения в ГИС-программе MapInfo 9.0 Pro.

Расчет интегрального показателя флуктуирующей асимметрии проводили с использованием алгоритма нормированной разности

$$\bar{A}_i = \frac{1}{mn} \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n \frac{(L_{ij} - R_{ij})}{(L_{ij} + R_{ij})},$$

где m – количество измеряемых параметров,
 n – количество обработанных листьев,
 L – измерение j -параметра с левой стороны i -листа,
 R – измерение j -параметра с правой стороны i -листа.

ИФА и параметры радиационной обстановки на участках, отобранных в Злынковском лесничестве для оценки флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы повислой

IFA and parameters of radiation situation at the sites in forestry of Zlynka for assess the fluctuating asymmetry of birch leaf plate

№ участка	МЭД мЗв/ч	Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	УА ветвей, Бк/кг	УА листьев, Бк/кг	Коэффициенты перехода в системе почва-листья	ИФА
1	0,26	158±11	21,4±3,4	46,4±8,2	0,29±0,04	0,057±0,004
2	0,62	673±63*	18,5±3,8	48,1±5,1	0,08±0,02	0,056±0,003
3	3,34	2801±183*	3519±729*	11920±2319*	4,37±0,87	0,079±0,004

Примечание: * – отличия значимы от контроля с вероятностью $p \leq 0,99$

Оценка флуктуирующей асимметрии хвои сосны обыкновенной проводилась по методике М.В. Козлова [15, 16]. Исследовалось по 10 пар хвои, собранных с каждой из 4 ветвей с 10 модельных деревьев.

Индекс флуктуирующей асимметрии (ИФА) вычисляется по формуле

$$\text{ИФА} = 2 \cdot |WL - WR| / (WL + WR),$$

где WL – длина одной иглы в паре;

WR – длина другой иглы в паре.

Измерение удельной активности ^{137}Cs в почве и растительных образцах проводили на радиоспектрометрических установках по действующим методикам выполнения измерений [9].

Данные обрабатывались статистически, достоверность различий оценивалась стандартными методиками статистической обработки данных.

Несмотря на значительную разницу в параметрах радиационной обстановки (в частности, различие в плотности загрязнения почвы) на участках 1 и 2, не было обнаружено значимых различий ИФА. Как видно из табл. 2, значения удельной активности (УА) ^{137}Cs в побегах и листьях, отобранных на этих участках, также имеют минимальные отличия. Причиной близких значений ИФА для двух участков может являться одинаковое воздействие радиационного фактора на растения.

Кроме того, коэффициент перехода радионуклидов в системе почва – лесная растительность на участке 2 необычно низкий. Варьирование коэффициента перехода в радиоэкологическом районе зоны хвойно-широколиственных лесов, загрязненных ^{137}Cs ,

может достигать в зависимости от почвенных условий кратности от 2 до 20 раз [10]. В данном случае низкий коэффициент перехода может быть связан с тем, что насаждение создано на сельскохозяйственных землях, где после аварии на ЧАЭС проводились активные защитные агротехнические мероприятия для предотвращения поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию. Данное предположение косвенно подтверждается тем, что содержание калия-40 в почве участка 2 ($384,9 \pm 37,5$ Бк/кг) значимо выше ($p \leq 0,999$) по сравнению с участком 1 ($178,4 \pm 17,7$ Бк/кг). Соединения калия, находящиеся в почве в достаточном количестве, действительно могут снижать поступление близкого к нему по химическим свойствам ^{137}Cs в растения. Кроме того, сам факт повышенного содержания калия в почве может свидетельствовать о том, что на данном участке применялись и другие агротехнические контрмеры по снижению поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию растениеводства.

Значения ИФА листовой пластинки березы повислой с третьего участка в 1,5 раза превышают ИФА с двух других изученных участков при значительном превышении показателей удельной активности радионуклидов в органах и тканях изученных деревьев.

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что ИФА березы повислой связан не столько с плотностью загрязнения почвы и МЭД, сколько с содержанием ^{137}Cs в органах и тканях растений и увеличивается при повышении в них удельного содержания радионуклидов. При этом

ИФА и параметры радиационной обстановки на участках, отобранных в Злынковском лесничестве для оценки флуктуирующей асимметрии хвои сосны обыкновенной
IFA and parameters of radiation situation at the sites in forestry
of Zlynka for assess the fluctuating asymmetry of Scots pine needles

№ участка	МЭД мЗв/ч	ПЗП, кБк/м ²	УА шишки ¹³⁷ Cs, Бк/кг	УА хвои ¹³⁷ Cs, Бк/кг	Длина хвои, мм	ИФА
4	0,11	16,65±1,48	1,8±1,1	42,2 ± 14,7	65,1±0,6	0,023±0,003
5	0,35	765,9±51,8*	55,7±20,6*	73,1 ± 30,5*	71,9±0,6*	0,027±0,003
6	0,74	1154,4±107,3*	437,2±114,3*	547,9 ± 152,1*	74,7±0,6*	0,054±0,007*

Примечание: * – отличия от контроля значимы с вероятностью $P \leq 0,99$

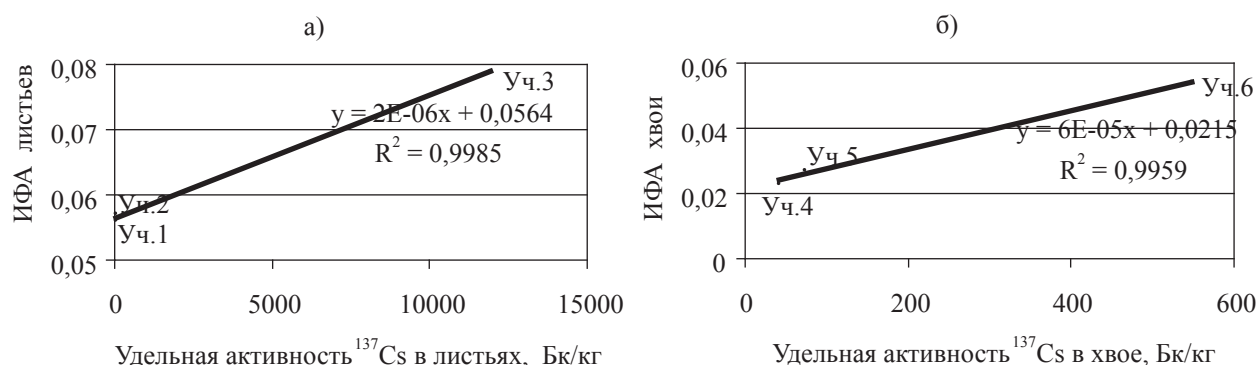


Рис. 1. Зависимость значений ИФА от удельной активности листьев (а) и хвои (б) обследованных деревьев

Fig. 1. The dependence of index of fluctuating asymmetry on the radionuclide content (¹³⁷Cs) in leaves (a) and needles (b) of studied trees

коэффициенты корреляции показали сильную положительную связь между удельной активностью ¹³⁷Cs в листьях и побегах березы и ИФА листовой пластинки (+0,997 в обоих случаях).

Оценка ИФА проводилась по шкале отклонений состояния организма от условий нормы по величине интегрального показателя стабильности развития, разработанной для березы повислой [8]: 1 балл – условная норма (ИФА до 0,040), а 5 баллов – критическое состояние (ИФА более 0,054). Полученные значения интегрального показателя стабильности развития попадают в диапазон критических, значительно отличаясь от условной нормы.

Хвойные породы реагируют на антропогенное загрязнение воздуха более остро по сравнению с листовыми растениями. При наличии в исследуемых районах хвойных, в особенности на территориях с более низкими уровнями радиоактивного загрязне-

ния, оценку загрязнения территории возможно дополнить измерениями ИФА двухлетней хвои [11].

Как и в случае с березой повислой, нами было обнаружено, что ИФА хвои сосны обыкновенной в значительной степени и положительно коррелирует с содержанием ¹³⁷Cs в органах и тканях растений (коэффициенты корреляции +0,997) и значимо возрастает при увеличении радиоактивного загрязнения участка (табл. 3).

Как для березы повислой, так и для сосны обыкновенной полученные данные свидетельствуют о значимой зависимости между уровнем радиоактивного загрязнения, выражающегося в накоплении ¹³⁷Cs органами растений (удельная активность ¹³⁷Cs в листьях и хвое), и индексом флуктуирующей асимметрии листьев и хвои (рис. 1).

С целью формализации и возможности сравнения полученных количественных результатов биоиндикационного анализа ис-

Функции желательности Харрингтона (D), рассчитанные с использованием ИФА для участков березы повислой и сосны обыкновенной
Harrington's function D based on the IFA estimates for the sites of birch and Scots pine

Участок	ПЗП, кБк/м ²	D	Балл по интегральной шкале	Состояние экосистемы
Береза повислая				
1	158	0,59	3	сильно неравновесное состояние
2	673	0,62	4	начальная фаза антропогенной трансформации
3	2801	0,27	2	состояние антропогенной дигрессии
4	17	0,72	4	начальная фаза антропогенной трансформации
5	766	0,62	4	начальная фаза антропогенной трансформации
6	1154	0,11	1	зона экологического бедствия

Шкала значений D для оценки состояния обследованных участков



Значения функции желательности Харрингтона (D)

Рис. 2. Применение шкалы значений функции желательности Харрингтона (D) для оценки состояния обследованных участков

Fig. 2. The application of the values scale based on the Harrington's function D for estimation of studied sites

пользовали частную аналитическую функцию желательности Харрингтона F_{ij} [12].

Функции желательности снимают трудности в интерпретации получаемых данных для целей экологического нормирования и представляют собой способ перевода натуральных значений в единую безразмерную числовую шкалу с фиксированными границами. Для дифференцированной оценки состояния природных экосистем по значениям интегральной функции желательности была использована пятибалльная шкала, при этом каждому интервалу функции разработаны определенные уровни выраженности свойств объектов измерений [13].

Для интегрированной оценки ИФА, полученных нами по листовой пластинке березы повислой и хвое сосны обыкновенной, произрастающих в разных радиоэкологических условиях, рассчитывали функции желательности. В качестве минимума значений ИФА применяли данные из литературных источников [7, 14] и полученные нами ранее значения ИФА для данных видов, произрастающих в сходных экологических условиях европейской части Российской Федерации при отсутствии аэротехногенного загрязнения. В качестве максимума были взяты ИФА, по нашим данным, из самых загрязненных радионуклидами районов (для сосны – 0,060, для березы – 0,100). Таким образом были

рассчитаны значения D для всех изученных участков (табл. 4).

На основании анализа шкалы состояний изученных участков можно сделать следующие выводы:

1. Береза более устойчива к радиационному воздействию, чем сосна. Даже при меньших значениях плотности загрязнения почвы ^{137}Cs участки с деревьями сосны находятся в худшем экологическом состоянии, чем участки с деревьями березы.

2. Даже при относительно низком (1154 кБк/м^2) значении уровня загрязнения почвы ^{137}Cs состояние лесных участков можно определить как «зону экологического бедствия».

Построенная таким образом шкала значений D показывает зависимость экологического состояния исследуемых участков от уровней аэротехногенного загрязнения, выражающегося в накоплении поллютанта органами растений и может быть использована далее при оценке состояния биологической устойчивости насаждений (рис. 2).

В целом, анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что индекс флуктуирующей асимметрии возможно использовать в качестве дополнительного критерия оценки биологической устойчивости лесов в зонах радиоактивного загрязнения.

Библиографический список

1. Чернобыльская катастрофа. Итоги и проблемы ее последствий в России 1986–2001. Российский национальный доклад. – Москва, 2001. – 48 с.
2. Гераськин, С.А. Изучение радиобиологических эффектов в популяциях сосны обыкновенной на подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС территории России / Гераськин С.А. [и др.] // Тр. регионального конкурса научных проектов фундаментальных научных исследований. – Вып. 17. – Калуга, 2012. – С. 220–229.
3. Николаевский, В.С. Биомониторинг, его значение и роль в системе экологического мониторинга и охране окружающей среды // Методологические и философские проблемы биологии. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделен. – 1981. – С. 341–354.
4. Биоиндикация: теория, методы, приложения / под ред. Г.С. Розенберга. – Тольятти: Интер-Волга, 1994. – 266 с.
5. Афанасьев, Ю.А. Мониторинг и методы контроля окружающей среды. Учеб. пособие в 2 ч / Ю. А. Афанасьев [и др.] – М.: МНЭПУ.– 1998. – 338 с.
6. Иванов, А.И. Использование методов биоиндикации для оценки состояния лесных экосистем / А.И. Иванов, Т.А. Дунаева, О.В. Скобанева // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. – 2011. – № 25. – С. 571–574.
7. Захаров, В.М. Здоровье среды: методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития: методическое пособие для заповедников / В.М. Захаров [и др.]. – М.: Центр экологической политики России, 2000. – 318 с.
8. 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.
9. Методика измерений активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс». – Менделеево, 2003. – 29 с.
10. Марадудин, И.И. Радиоэкологическое районирование лесов, загрязненных радионуклидами / Марадудин И.И. [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология – М., Наука, 2009. – Т. 49. – С. 502–509
11. Василевская, Н.В. Оценка стабильности развития популяций *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения (Мурманская область) / Н.В. Василевская, Ю.М. Тумарова // Биогеография Карелии. Труды Карельского научного центра РАН. – Вып. 7. – Петрозаводск, 2005. – С. 21–25.
12. Воробейчик, Е.Л. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем / Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. – 280 с.
13. Экологическое нормирование на примере радиоактивного и химического загрязнения экосистем // Методы биоиндикации окружающей среды в районах АЭС / Д.А. Кривоуцкий [и др.]. – М.: Наука, 1988. – С. 4–16.
14. Макаренко Е.С. Оценка биологических эффектов у второго послеаварийного поколения сосны обыкновенной по морфологическим показателям хвои / Макаренко Е.С., Телюева А.В., Удалова А.А. // VII Съезд по радиационным исследованиям (радиоэкология, радиобиология, радиационная безопасность): Тез. докл. Москва, РУДН, 2014. – С.291.
15. Kozlov M.V., Niemela P. 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. – P. 365–370.
16. Kozlov M.V., Niemela P. Junttila J. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // Ecological indicators. – 2002. – V. 1. – P. 271–277.

USING OF FLUCTUATING ASYMMETRY INDEX TO ESTIMATE BIOLOGICAL SUSTAINABILITY OF FORESTS IN THE CONTAMINATED AREAS

Romashkin D.Yu., Laboratory of Radioactive Forest Ecology, VNIILM⁽¹⁾; **Chubugina I.V.**, Department of Forest Radiation Ecology, VNIILM, Ph.D. (Biol.)⁽¹⁾; **Razdayvodin A.N.**, Department of Forest Radiation Ecology, VNIILM⁽¹⁾; **Radin A.I.**, Laboratory of Radiation Control, VNIILM⁽¹⁾

info@roslesrad.ru

⁽¹⁾ All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM), Institutskaya st., 15, 141200, Pushkino, Moscow reg., Russia

Using of fluctuating asymmetry index (IFA) as additional bioindicating criterion to estimate biological sustainability of forests under radioactive pollution was carried out. Increased of IFA of birch (*Betula pendula* Roth.) leaves and pine (*Pinus sylvestris* L.) needles is significantly linked with increased of dose-related radionuclide content (¹³⁷Cs). FA demonstrated very likely genome instability even in such radoresistance species, as *Betula pendula* Roth. Integral bioindicator *D* of ecosystem condition based on the IFA estimates and the Harrington's function demonstrated direct correlation of condition of forest trees from levels of radioactive pollution and can be used further in estimation of forest biological stability.

Keywords: bioindication, fluctuating asymmetry, forests under radioactive pollution, *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L.

References

1. *Chernobyl'skaya katastrofa. Itogi i problemy ee posledstviy v Rossii 1986-2001* [The Chernobyl accident. Results and problems of its consequences in Russia]. Rossiyskiy nacional'nyy doklad. Moskva, 2001. 48 p.
2. Geras'kin S.A. *Izuchenie radiobiologicheskikh effektov v populyatsiyah sosny obyknovennoy na podvergsheysya radioaktivnomu zagryazneniyu v rezul'tate avarii na ChAeS territorii Rossii* [The study of radiobiological effects in populations of Scots pine on contaminated areas as a result of the Chernobyl accident in Russia]. Trudy regional'nogo konkursa nauchnykh proektov fundamental'nykh nauchnykh issledovaniy. V. 17. Kaluga, 2012. pp. 220-229.
3. Nikolaevskiy B.C. *Biomonitoring, ego znachenie i rol' v sisteme ekologicheskogo monitoringa i ohrane okruzhayushhey sredy* [Monitoring, its importance and role in the system of environmental monitoring and environmental protection]. Metodologicheskie i filosofskie problemy biologii. Novosibirsk: Nauka. Sib. otdelen. 1981. pp. 341-354.
4. *Bioindikatsiya: teoriya, metody, prilozheniya* [Bioindication: theory, methods, and applications]. Tol'yatti: Inter-Volga, 1994. 266 p.
5. Afanas'ev Yu.A. *Monitoring i metody kontrolya okruzhayushhey sredy* [Monitoring and control methods of the environment]. Moscow: MNYePU. 1998. 338 p.
6. Ivanov A.I., Dunaeva T.A., Skobaneva O.V. *Ispol'zovanie metodov bioindikatsii dlya ocenki sostoyaniya lesnykh ekosistem* [The use of bio-indication for the assessment of forest ecosystems]. Izvestiya PGPU im. V.G. Belinskogo. 2011. № 25. pp. 571-574.
7. Zaharov V.M. *Zdorov'e sredy: metodika ocenki* [Environmental Health: assessment methodology]. Ocenka sostoyaniya prirodnkh populyatsiy po stabil'nosti razvitiya: metodicheskoe posobie dlya zapovednikov. Moscow: Centr ekologicheskoy politiki Rossii, 2000. 318 p.
8. *Metodicheskie rekomendatsii po vypolneniyu ocenki kachestva sredy po sostoyaniyu zhivyykh sushhestv (ocenka stabil'nosti razvitiya zhivyykh organizmov po urovnyu asimmetrii morfologicheskikh struktur)* [Methodic recommendations for the implementation of quality assessment environment as living beings (evaluation of stability of living organisms on the level of asymmetry of morphological structures)]. MPR RF; Vved. 16.10.03. № 460-R. Moscow, 2003. 24 p.
9. *Metodika izmereniy aktivnosti radionuklidov v schyotnykh obraztsakh na scintillyatsionnom gamma-spektrometre s ispol'zovaniem programmnoy obespecheniya «Progress»* [Methodology activity measurements of radionuclides in samples of countable scintillation gamma spectrometer using the software «Progress»]. Mendeleevo, 2003. 29 p.
10. Maradudin I.I. *Radioekologicheskoe rayonirovanie lesov, zagryaznennykh radionuklidami* [Radioecological zoning forests contaminated by radionuclides]. Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. Moscow, Nauka, 2009. V. 49, pp. 502-509.
11. Vasilevskaya N.V., Tumarova Yu.M. *Ocenka stabil'nosti razvitiya populyatsiy Pinus sylvestris L. v usloviyakh ayerotehnogennogo zagryazneniya (Murmanskaya oblast')* [Stability Assessment of *Pinus sylvestris* L. populations in conditions of environmental contamination (Murmansk region)]. Biogeografiya Karelii. Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. V. 7. Petrozavodsk, 2005. pp. 21-25.
12. Vorobeychik E.L., O.F. Sadykov, M.G. Farafontov *Ekologicheskoe normirovanie tehnogennykh zagryazneniy nazemnykh ekosistem* [Ecological standardization of technogenic pollution of terrestrial ecosystems]. Ekaterinburg: Nauka, 1994. 280 p.
13. Krivoluckiy D.A. *Ekologicheskoe normirovanie na primere radioaktivnogo i himicheskogo zagryazneniya ekosistem* [Ecological standardization by the example of radioactive and chemical contamination of ecosystems]. Metody bioindikatsii okruzhayushhey sredy v rayonah AYeS. Moscow: Nauka, 1988. pp. 4-16.
14. Makarenko E.S., Telyueva A.V., Udalova A.A. *Ocenka biologicheskikh effektov u vtorogo posleavariynogo pokoleniya sosny obyknovennoy po morfologicheskim pokazatelyam hvoi* [Evaluation of the biological effects of the second-generation disaster Scots pine needles by the morphological parameters]. VII S#ezd po radiatsionnym issledovaniyam (radioekologiya, radiobiologiya, radiatsionnaya bezopasnost'): Tez. dokl. Moskva, RUDN, 2014. p. 291.
15. Kozlov M.V., Niemela P. 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.
16. Kozlov M.V., Niemela P., Yunttila Y. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*). Ecological indicators. 2002. V. 1. pp. 271-277.