

Научная статья
УДК 630.164
EDN WXEIQF
DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.10

Морфометрическая оценка развития деревьев сосны обыкновенной в зоне крайне высокой степени загрязнения лесов цезием-137

Ирина Владимировна Ромашкина¹
кандидат биологических наук

Наталья Владимировна Астраханцева²
кандидат биологических наук

Дмитрий Юрьевич Ромашкин³

Аннотация. Рассмотрены особенности формирования древесины ствола и индекс флуктуирующей асимметрии (ИФА) хвои 50-летних деревьев сосны обыкновенной, произрастающих в зоне крайне высокой степени радиоактивного загрязнения (>40 Ки/км²). Анализ средних приростов за период роста деревьев с 1962 по 2013 г. показал, что выбросы радиоактивных веществ в результате катастрофы на ЧАЭС в 1986 г. не оказали заметного влияния на развитие ксилемы исследованных деревьев, что может свидетельствовать об их меньшей чувствительности в результате пережитого более сильного стрессового воздействия климатических факторов 1968–1969 гг. Предполагаем, что это воздействие могло послужить причиной невысоких значений ИФА хвои сосны обыкновенной данной популяции.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, биологическая устойчивость лесов, анатомия ствола, сосна обыкновенная.

Для цитирования: Ромашкина И.В., Астраханцева Н.В., Ромашкин Д.Ю. Морфометрическая оценка развития деревьев сосны обыкновенной в зоне крайне высокой степени загрязнения лесов цезием-137. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация. 2024. № 2. С. 133–142. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.10. <https://elibrary.ru/wxeiqf>

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ведущий научный сотрудник (Пушкино, Московская область, Российская Федерация), info@roslesrad.ru

² Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», старший научный сотрудник (Красноярск, Российская Федерация), astr_nat@mail.ru

³ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, заведующий лабораторией радиационной экологии леса (Пушкино, Московская область, Российская Федерация), romashkin@roslesrad.ru

Original article

EDN WXEIQF

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.10

Morphometric Assessment of the Development of Scots Pine Trees in the Zone of Extremely High Degree of Forest Contamination with Cesium-137

Irina V. Romashkina¹

Candidate of Biological Sciences

Natalia V. Astrakhantseva²

Candidate of Biological Sciences

Dmitry Yu. Romashkin³

Abstract. The features of trunk wood formation and the index of fluctuating asymmetry (ELISA) of needles of 50-year-old Scots pine trees growing in an area with extremely high levels of radioactive contamination ($>40 \text{ Ki/km}^2$) are considered. An analysis of the average growth over the period of tree growth from 1962 to 2013 showed that the emissions of radioactive substances as a result of the Chernobyl disaster in 1986 did not have a noticeable effect on the development of the xylem of the studied trees, which may indicate their lower sensitivity as a result of the more severe stress of climatic factors of 1968–1969, we assume that this effect it could be the reason for the low values of the IFA of the needles of the common pine of this population.

Key words: radioactive contamination, biological stability of forests, trunk anatomy, scots pine.

For citation: Romashkina I., Astrakhantseva N., Romashkin D. Morphometric Assessment of the Development of Scots Pine Trees in the Zone of Extremely High Degree of Forest Contamination With Cesium-137 : Text : electronic // Forestry Information. 2024. № 2. P. 133–142. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.10. <https://elibrary.ru/wxeiqf>

¹ Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Leading Researcher (Pushkino, Moscow region, Russian Federation), info@roslesrad.ru

² Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Senior Researcher (Krasnoyarsk, Russian Federation), astr_nat@mail.ru

³ 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

Введение

Проблема радиоактивного загрязнения значительных площадей лесов в Российской Федерации (около 1,5 млн га) возникла в результате нескольких аварий и инцидентов на предприятиях ядерно-топливного цикла и катастрофы на Чернобыльской АЭС [1]. Наиболее загрязненными оказались леса Брянской обл., на территории которой представлены все зоны загрязнения, включая зону крайне высокой степени загрязнения лесов цезием-137 – свыше 40 Ки/км² [2, 3].

Высокие уровни загрязнения радионуклидами почвы в лесах приводят не только к обострению экологической ситуации (с точки зрения опасных дозовых нагрузок для человека), но и создают угрозу снижения устойчивости лесных экосистем за счет прямого воздействия ионизирующего излучения на растения и косвенного воздействия, связанного с ограничением лесохозяйственных мероприятий. Значительное превышение мощности дозы ионизирующего излучения над естественным радиационным фоном и повышенное содержание радионуклидов в почве, лесной подстилке и лесной растительности препятствуют применению традиционных технологий ведения лесного хозяйства, обеспечивающих биологическую устойчивость насаждений в этих лесах.

Для ранней диагностики негативных изменений устойчивости лесов в зонах крайне высокой степени загрязнения лесов цезием-137 с целью приведения лесных участков в радиационно-безопасное состояние, повышения их биологической и противопожарной устойчивости необходимо проводить комплексное радиационно-экологическое исследование древостоев и морфогенетическую оценку поколений основных лесообразующих пород.

Одним из биоиндикационных показателей для экспресс-оценки биологической устойчивости насаждений является флуктуирующая асимметрия [4–6].

В процессе исследований в зонах радиоактивного загрязнения Брянской обл. было установлено, что использование индексов флуктуирующей асимметрии (ИФА) позволяет выявлять признаки

изменения биологической устойчивости лесных экосистем на ранних стадиях её снижения [7]. При этом ИФА связан не столько с плотностью загрязнения почвы и мощностью эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД), сколько с содержанием цезия-137 в органах и тканях растений, и увеличивается при повышении в них удельного содержания радионуклидов [8].

В рамках данного исследования зависимость ИФА от удельной активности радионуклидов в структурных частях растения наблюдалась на всех обследованных участках березовых и сосновых насаждений, за исключением участка в Красногорском участковом лесничестве, расположенного в зоне загрязнения более 40 Ки/км². Несмотря на высокую плотность загрязнения почвы и достаточно высокий уровень содержания цезия-137 в ветвях и хвое, значения ИФА сосны обыкновенной для этого участка оказались ниже, чем на участке с меньшей плотностью загрязнения почвы и меньшей удельной активностью цезия-137 в органах растений. При этом у березы в данном древостое значение ИФА было самым высоким по сравнению с менее загрязненными насаждениями.

Цель работы – дополнительное морфометрическое и анатомическое исследование развития деревьев сосны обыкновенной в зоне крайне высокой степени загрязнения лесов цезием-137 по материалам ранее проведенной оценки биологической устойчивости насаждений в Брянской обл. [7].

Объекты и методы исследований

Участок, на котором проводилось исследование биологической устойчивости насаждения с использованием ИФА в 2013 г., представляет собой насаждение сосны обыкновенной с примесью березы повислой естественного происхождения. Тип лесорастительных условий – С₃, класс бонитета – IV, состав насаждения – 7СЗБ, рельеф участка равнинный. Объект исследования находится в западном районе Брянской обл., в Красногорском участковом лесничестве

Клинцовского лесничества (географические координаты N 53°01'; E 31°16') и относится к зоне крайне высокой степени загрязнения лесов цезием-137 – свыше 40 Ки/км².

Для определения параметров радиационной обстановки были отобраны пробы почвы, растительности и других компонентов лесного природного комплекса. Измерение удельной активности цезия-137 осуществляли на радиоспектрометрических установках по методикам выполнения измерений [9], аттестованным в соответствии с ГОСТ Р 8.563 «Государственная система обеспечения единства измерений» [10].

Первоначально в 2013 г. на участке проводили исследования биологической устойчивости насаждения методом определения ИФА основных лесобразующих пород. С этой целью были отобраны 10 модельных деревьев сосны со средними дендрометрическими характеристиками.

Оценка флуктуирующей асимметрии хвои проводилась по методике М.В. Козлова [11, 12]. С модельных деревьев были отобраны ветви второго года жизни с четырех сторон, ориентированных по разным сторонам света. Измеряемый признак – различие между длиной двух игл в паре – определяли под бинокулярной лупой с помощью окулярмикрометра. Длину хвои измеряли у всех пар хвои с каждой отобранной ветви. Индекс флуктуирующей асимметрии (ИФА) вычисляли по следующей формуле:

$$\text{ИФА} = 2 \times [\text{WL} - \text{WR}] / (\text{WL} + \text{WR}),$$

где:

WL – длина одной иглы в паре, мм;

WR – длина другой иглы в паре, мм.

В качестве контрольного был подобран участок с аналогичными лесоводственными характеристиками насаждения и типом лесорастительных условий, расположенный в Суражском участковом лесничестве Клинцовского лесничества вне зон радиоактивного загрязнения (географические координаты N 53°10'; E 32°53'). На контрольном участке биологическую устойчивость, дендрометрические характеристики и

параметры радиационной обстановки определяли по аналогичным методикам.

Для дополнительного анатомического исследования параметров ствола сосны с каждого из модельных деревьев у основания ствола был взят керн с помощью возрастного бурава. Из материала керна были изготовлены препараты ксилемы для микроскопического и дендрохронологического исследования. Анатомические исследования проводили методом световой микроскопии с использованием микроскопа МБИ-3 при увеличении от $\times 100$ до $\times 1000$. На поперечном срезе каждого года в 10 радиальных рядах подсчитывали количество трахеид ранней и поздней древесины.

Данные и достоверность различий оценивали по стандартным методикам статистической обработки данных.

Результаты и обсуждение

Результаты радиационного обследования участка приведены в табл. 1.

По значениям плотности загрязнения почвы исследуемый участок относится к территории, подвергшейся наибольшему радиоактивному загрязнению (>40 Ки/км²) в Брянской обл. в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС.

Характеристика модельных деревьев представлена в табл. 2.

Всего было проведено измерение длины 3 193 пар хвои с 10 модельных деревьев, из них 2 110 пар оказались асимметричными.

Ранее в наших исследованиях было выявлено, что ИФА хвои сосны обыкновенной значительно возрастает при увеличении радиоактивного загрязнения участка [7]. На контрольном участке со значением МЭД 0,11 мЗв/ч значение ИФА хвои сосны обыкновенной составило $0,023 \pm 0,003$. На участках со значениями МЭД 0,35 и 0,74 мЗв/ч значения ИФА достигли $0,027 \pm 0,003$ и $0,054 \pm 0,007$ (отличия от контроля значимы с вероятностью $p \leq 0,05$) соответственно. При этом наблюдался эффект гигантизма хвои – длина хвои достигала $71,9 \pm 0,6$ и $74,7 \pm 0,6$ мм соответственно (отличия от значения контроля

ТАБЛИЦА 1. РАДИАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА И ПАРАМЕТРЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ЧАСТЕЙ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

№ МОДЕЛЬНОГО ДЕРЕВА	МЭД, мЗв/ч	Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	Удельная активность цезия-137, Бк/кг	
			в ветвях	в хвое
1	3,10	67,68	826	1 843
2	2,76	45,77	648	1 382
3	2,78	90,43	1 444	3 081
4	2,77	40,57	1 023	2 054
5	3,05	49,65	1 606	3 047
6	3,17	53,24	1 991	5 557
7	2,86	77,76	1 966	6 484
8	2,90	44,81	1 943	5 407
9	2,58	51,82	4 834	9 733
10	2,86	49,46	1 747	3 598
Среднее	2,88±0,06	57,12±5,4	1 803±390	4 219±862

ТАБЛИЦА 2. МОРФОМЕТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛЬНЫХ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

№ МОДЕЛЬНОГО ДЕРЕВА	Диаметр, см	Высота, м	Возраст, лет	Средняя длина хвои, мм		Доля асимметричных пар хвои, %	ИФА
				симметричных пар	асимметричных пар		
1	12	14	32	59,4	60,3	68	0,019
2	12	13	50	62,6	63,8	68	0,020
3	18	18	50	51,7	51,8	59	0,023
4	17	18	50	60,8	61,2	55	0,018
5	10	11	52	52,2	54,2	65	0,020
6	11	9	50	57,9	58,9	61	0,018
7	14	16	52	63,6	64,2	70	0,024
8	18	15	60	59,0	61,1	79	0,025
9	18	17	49	73,5	72,6	68	0,017
10	14	12	55	53,7	58,6	67	0,025
Среднее	14±1	14±1	50,0±2,4	59,4±2,1	60,7±1,9	66,0±2,2	0,021±0,001

65,1±0,1 мм в обоих случаях были значимы с вероятностью $p \leq 0,05$).

Как видно из данных табл. 2, ни ИФА, ни длина хвои на исследуемом участке не демонстрируют наличие стрессового воздействия хронического ионизирующего излучения, несмотря на высокие значения плотности загрязнения почвы. Одновременно на данном участке для измерения ИФА были собраны листья березы повислой. Значения ИФА листовой пластинки

березы достигли $0,079 \pm 0,004$, тогда как на контрольном участке индекс составил $0,057 \pm 0,004$. Возраст деревьев березы повислой при этом не превышал 15 лет.

Поскольку радиочувствительность сосны значительно выше, чем березы, факт отсутствия у нее видимых результатов воздействия стрессового фактора по значению ИФА потребовал дополнительных исследований на основе других параметров развития деревьев.

В связи с этим нами был проанализирован средний прирост деревьев за 1962–2013 гг. (до момента первичного обследования на биологическую устойчивость по значениям ИФА). Результаты анализа показали (рис. 1), что деревья изначально характеризовались невысокими значениями прироста, что может быть обусловлено, с одной стороны – индивидуальными особенностями, с другой – воздействием локального стрессового фактора.

Первое может быть верно, если модельные деревья представляют собой выжившие в результате стрессовых воздействий медленнорастущие особи, а быстрорастущие деревья отпали из-за высокой повреждаемости. Если же древостой сохранился полностью или почти полностью, то он изначально был под воздействием сильного стрессового фактора. Деревья, испытывающие действие одного сильного стресса, могут быть менее чувствительны к другим факторам [13, 14].

В Брянской обл. после аварии на ЧАЭС в зонах крайне высокой степени загрязнения лесов воздействие радиационного фактора на деревья сосны обыкновенной без признаков ослабления, наоборот, приводит к их существенному дополнительному приросту в сравнении с древостоями,

не подвергавшимся радиоактивному загрязнению [15].

Максимум прироста наблюдался в 1966 г. (см. рис. 1), далее последовал его спад, продолжающийся несколько лет. На протяжении последующих двух десятилетий прирост незначительно варьировал в пределах среднего значения. Момент острой стадии Чернобыльской катастрофы (конец весны и начало лета 1986 г.) и последующее хроническое облучение деревьев радионуклидами не нашли отражения в динамике приростов, произошла их стабилизация. Более того, Чернобыльская авария пришлось на годы естественного снижения приростов. Из модельных особей только одно дерево (№ 8) с изначально низкими приростами оказалось сильно угнетенным: прирост 2012 г. – 3 трахеиды, 2013 г. – 2 клетки, прирост флоэмы упал ниже критического уровня – всего 3–4 клетки. Никаких аномалий в слое ксилемы 1986 г. и последующих лет не отмечено.

При этом у всех модельных деревьев в середине и конце 1968 г., а также в начале 1969 г. в слоях ксилемы зафиксированы сильные нарушения в строении трахеид: они искривлены, имеют признаки аномального деления, у многих очень толстые клеточные стенки (рис. 2).

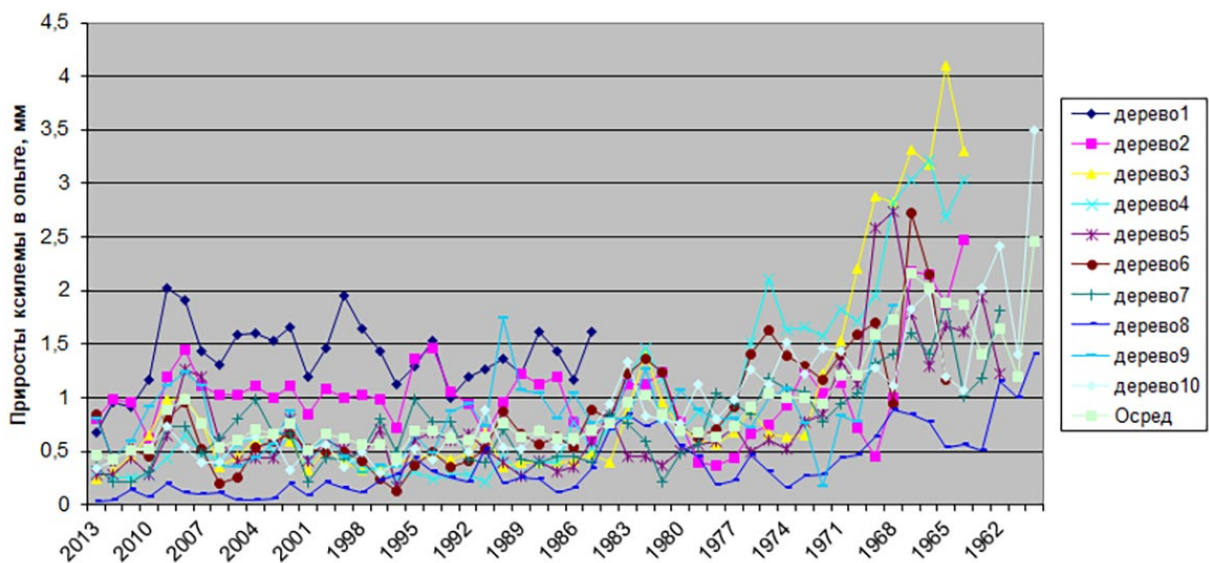


Рис. 1. РЕТРОСПЕКТИВА ИЗМЕНЕНИЙ ПРИРОСТОВ КСИЛЕМЫ В СТВОЛАХ МОДЕЛЬНЫХ ДЕРЕВЬЕВ ЗА ПЕРИОД РОСТА ДО 2013 Г.

После стрессового воздействия 1968 г. у всех деревьев наблюдается значительное снижение приростов, продолжающееся несколько лет. Слой ксилемы 1968 г. стал более узким по сравнению со слоем 1967 г. Этот спад наложился на возрастное снижение приростов, и впоследствии они не достигают уровня 1966 г. После 1969 г. аномалий в строении ксилемы не наблюдается, хотя до 1968 г., когда приросты были больше, встречалось повреждение ксилемы заморозками.

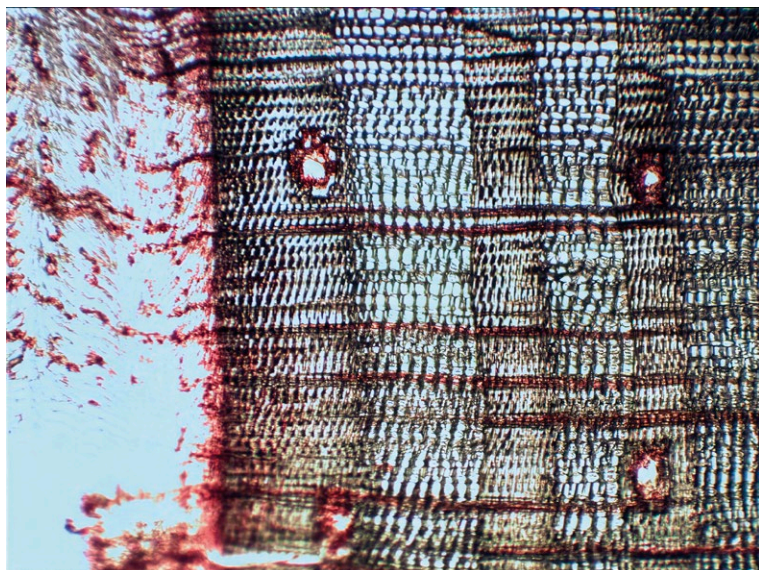
Обнаруженная аномалия развития ксилемы 1968–1969 гг. не похожа на обычное повреждение заморозками или засухой (обычная засуха приводит к формированию трахеид позднего типа, без аномалий) [13].

В 1968 г. по всей территории России наблюдалась необычайно сильная и длительная засуха. Обычно засуха охватывает отдельные регионы, однако в этот раз она отмечалась на территории как европейской, так и азиатской части России и продолжалась с апреля по июнь. По интенсивности эта засуха была близка к катастрофической засухе 1946 г.

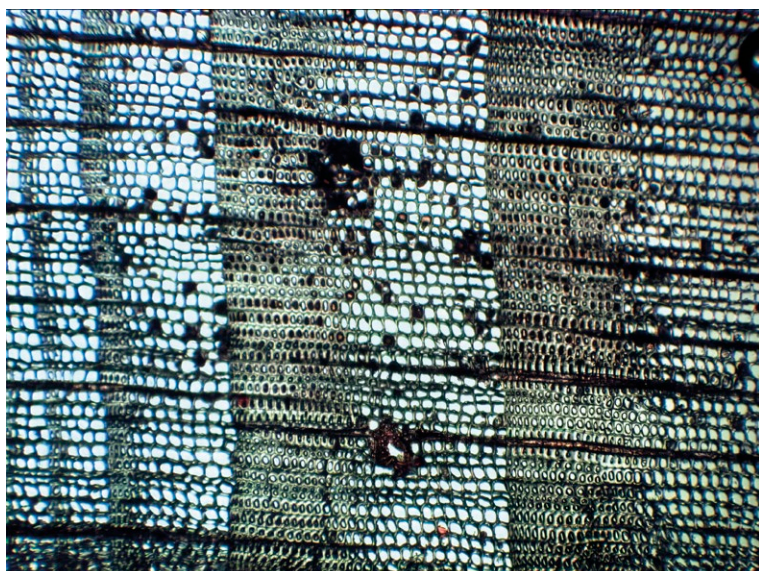
Зима 1968/69 г. оказалась чрезвычайно суровой, с сильными ветрами и пыльными бурями, охватившими практически всю европейскую часть России и Среднюю Азию. За 2 мес в различных регионах европейской части России было по 15–20 дней с пыльными бурями [16]. Жестокие ураганы сменялись сильными морозами на протяжении всех трех зимних месяцев [16].

Вероятно, необычное сочетание стрессовых факторов в 1968–1969 гг. вызвало такой сильный сдвиг метаболизма в уже ослабленном насаждении, что концентрация веществ в камбиальной зоне и слабодифференцированных трахеидах изменилась кардинально.

Подобное тератогенное воздействие могут оказывать низкомолекулярные углеводы, образующиеся при гидролизе крахмала и распаде различных гликозидов (гидролиз крахмала – защитная реакция при засухе) [17]. Известно, что избыток сахарозы приводит к узорчатости древесины у карельской березы [18]. Камбий ушел в покой неподготовленным, при этом подвергся действию сильных морозов, поэтому в начале слоя ксилемы



А)



Б)

РИС. 2. НАРУШЕНИЯ В СТРОЕНИИ ТРАХЕИД НА ПРЕПАРАТАХ ДВУХ МОДЕЛЬНЫХ ДЕРЕВЬЕВ: ИСКРИВЛЕНИЕ, АНОМАЛЬНОЕ ДЕЛЕНИЕ, ТОЛСТЫЕ КЛЕТОЧНЫЕ СТЕНКИ В СЕРЕДИНЕ И КОНЦЕ СЛОЯ 1968 г. И В НАЧАЛЕ СЛОЯ КСИЛЕМЫ 1969 г. : А) – ДЕРЕВО № 5, Б) – ДЕРЕВО № 10

1969 г. вновь видны аномалии. Этот двойной удар заметно истощил пул запасных веществ, что и отразилось на дальнейших приростах.

Таким образом, с 1969 по 2013 г. у исследованных деревьев ксилема была без аномалий, относительно однородная, слои узкие. Воздействие Чернобыльской катастрофы почти не фиксируется, вероятно, из-за лимитирующего действия других стрессов.

Выводы

На основании проведенного анатомического исследования развития ксилемы ствола сосны обыкновенной в условиях хронического воздействия ионизирующего излучения были сделаны следующие выводы:

1. По результатам исследований ксилемы годичных слоев 1968–1969 гг. установлено, что деревья сосны обыкновенной на исследуемом участке в этот период испытывали сильное стрессовое воздействие, обусловленное, скорее всего, уникальным сочетанием климатических факторов (длительная засуха с последующей суровой зимой).

2. Сильный стресс 1968–1969 гг. привел к снижению приростов, угнетению растений и стабилизации приростов на низком уровне.

3. Воздействие выбросов радиоактивных веществ в результате катастрофы на ЧАЭС в 1986 г. не оказало заметного воздействия на развитие ксилемы исследованных деревьев по причине их меньшей чувствительности к новым стрессовым факторам после пережитого мощного стресса.

4. Низкие показатели ИФА хвои сосны обыкновенной на исследуемом участке в условиях высоких уровней загрязнения радионуклидами почвы и компонентов растений может объясняться отсутствием реакции на радиационный фактор у деревьев, переживших стресс 1968–1969 гг.

Список источников

1. Российский национальный доклад: 35 лет Чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986–2021 / А.А. Финогенов, В.А. Ткачев, А.М. Локшин [и др.]. – Москва : Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2021. – 104 с.
2. Марадудин, И.И. Основы прикладной радиоэкологии леса / И.И. Марадудин, А.В. Панфилов, В.А. Шубин. – Москва : ВНИИЛМ, 2001. – 224 с.
3. Об утверждении Особенности осуществления профилактических и реабилитационных мероприятий в зонах радиоактивного загрязнения лесов. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 08.06.2017 № 283. Зарегистрирован в Минюсте России 18.08.2017 (регистрационный № 47860).
4. Захаров, В.М. Здоровье среды: методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития : методическое пособие для заповедников / В.М. Захаров. – Москва : Центр экологической политики России, 2000. – 318 с.
5. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур) / МПР России; Введ. 16.10.03. № 460-Р. – Москва, 2003. – 24 с.
6. Боголюбов, А.С. Оценка экологического состояния леса по асимметрии листьев / А.С. Боголюбов. – Москва : Экосистема, 2002. – 10 с.
7. Использование индекса флуктуирующей асимметрии для биоиндикационной оценки биологической устойчивости лесов в зонах радиоактивного загрязнения / Д.Ю. Ромашкин, И.В. Чубугина, А.И. Радин, А.Н. Раздайковин // Лесной вестник. – 2016. – № 5. – С. 122–128.
8. Оптимизация оценки биологической устойчивости радиоактивно загрязненных сосновых насаждений с использованием индекса флуктуирующей асимметрии хвои. – Текст : электронный / Д.Ю. Ромашкин, С.А. Родин, И.В. Ромашкина, А.Н. Раздайковин // Лесохозяйственная информация. – 2023. – № 2. – С. 66–74. DOI 10.24419/LNI.2304-3083.2023.2.05.
9. Методика измерения активности радионуклидов в счётных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «ПРОГРЕСС». – Москва : ГП «ВНИИФТРИ», 2016.
10. ГОСТ Р 8.563. Государственная система обеспечения единства измерений. – Москва, 2011. – 16 с.
11. Kozlov, M.V. Difference in needle length – a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) / M.V. Kozlov, P. Niemela // Water, Air and Soil Pollution. – 1999. – V. 116. – P. 365–370.
12. Kozlov, M.V. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) / M.V. Kozlov, P. Niemela, J. Junttila // Ecological indicators. – 2002. – V. 1. – P. 271–277.
13. Плаксина, И.В., Влияние густоты посадки на ксилогенез и метаболизм сосны обыкновенной и лиственницы сибирской / И.В. Плаксина, Н.Е. Судачкова, А.И. Бузыкин // Лесоведение. – 2003. – № 4. – С. 47–53.
14. Судачкова, Н.Е. Влияние стрессовых воздействий на ксилогенез сосны обыкновенной в условиях Сибири / Н.Е. Судачкова // Лесоведение. – 2007. – № 6. – С. 101–106. – EDN HGLMON.
15. Белов, А.А. Регрессионное моделирование динамики радиального прироста сосны обыкновенной в загрязненных радионуклидами насаждениях Брянской области / А.А. Белов // Лесоведение. – 2017. – № 1. – С. 17–23.
16. Разуваев, В.Н. Погода и климат в России в XX веке. Россия в окружающем мире: 2001 : Аналитический ежегодник / В.Н. Разуваев. – Москва : МНЭПУ, 2001. – С. 163–194.
17. Лепехов, С.Б. Об оценке жаро- и засухоустойчивости растений / С.Б. Лепехов // Современное состояние и перспективы развития земледелия и растениеводства: (к 60-летию Целины) : сборник научных работ ; ФГБУ Алтайский НИИСХ ФАНО России. – Барнаул : Алтайский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, 2014. – С. 82–97.
18. Николаева, Н.Н. Структурные особенности ассимиляционного аппарата и формирование аномальной древесины карельской березы / Н.Н. Николаева, Л.Л. Новицкая // Лесоведение. – 2007. – № 1. – С. 70–73.

References

1. Rossijskij nacional'nyj doklad: 35 let Chernobyl'skoj avarii. Itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstvij v Rossii. 1986–2021 / A.A. Finogenov, V.A. Tkachev, A.M. Lokshin [i dr.]. – Moskva : Institut problem bezopasnogo razvitiya atomnoj energetiki RAN, 2021. – 104 s.
2. Maradudin, I.I. Osnovy prikladnoj radioekologii lesa/ I.I. Maradudin, A.V. Panfilov, V.A. Shubin. – Moskva : VNIILM, 2001. – 224 s.
3. Ob utverzhdenii Osobennostej osushchestvleniya profilakticheskikh i reabilitacionnyh meropriyatij v zonah radioaktivnogo zagryazneniya lesov. Prikaz Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii RF ot 08.06.2017 № 283. Zaregistririvan v Minyuste Rossii 18.08.2017 (registracionnyj № 47860).
4. Zaharov, V.M. Zdorov'e sredy: metodika ocenki. Ocenka sostoyaniya prirodnyh populyacij po stabil'nosti razvitiya : metodicheskoe posobie dlya zapovednikov / V.M. Zaharov. – Moskva : Centr ekologicheskoy politiki Rossii, 2000. – 318 s.
5. Metodicheskie rekomendacii po vypolneniyu ocenki kachestva sredy po sostoyaniyu zhivyh sushchestv (ocenka stabil'nosti razvitiya zhivyh organizmov po urovnyu asimmetrii morfologicheskikh struktur) / MPR Rossii; Vved. 16.10.03. № 460-R. – Moskva, 2003. – 24 s.
6. Bogolyubov, A.S. Ocenka ekologicheskogo sostoyaniya lesa po asimmetrii list'ev / A.S. Bogolyubov. – Moskva : Ekosistema, 2002. – 10 s.
7. Ispol'zovanie indeksa fluktuiruyushchej asimmetrii dlya bioindikacionnoj ocenki biologicheskoy ustojchivosti lesov v zonah radioaktivnogo zagryazneniya / D.Yu. Romashkin, I.V. Chubugina, A.I. Radin, A.N. Razdajvodin // Lesnoj vestnik. – 2016. – № 5. – S. 122–128.
8. Optimizaciya ocenki biologicheskoy ustojchivosti radioaktivno zagryaznennyh sosnovykh nasazhdenij s ispol'zovaniem indeksa fluktuiruyushchej asimmetrii hvoi. – Tekst : elektronnyj / D.Yu. Romashkin, S.A. Rodin, I.V. Romashkina, A.N. Razdajvodin // Lesohozyajstvennaya informaciya. – 2023. – № 2. – S. 66–74. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.05.
9. Metodika izmereniya aktivnosti radionuklidov v schyotnyh obrazcah na scintillyacionnom gamma-spektrometre s ispol'zovaniem programmnoho obespecheniya «PROGRESS. – Moskva : GP «VNIIFTRI», 2016.
10. GOST R 8.563. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. – Moskva, 2011. – 16 s.
11. Kozlov, M.V. Difference in needle length – a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) / M.V. Kozlov, R. Niemela // Water, Air and Soil Pollution. – 1999. – V. 116. – P. 365–370.
12. Kozlov, M.V. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) / M.V. Kozlov, R. Niemela, J. Junttila // Ecological indicators. – 2002. – V. 1. – P. 271–277.
13. Plaksina, I.V., Vliyanie gustomy posadki na ksilogenez i metabolism sosny obyknovnoj i listvennicy sibirskoj / I.V. Plaksina, N.E. Sudachkova, A.I. Buzykin // Lesovedenie. – 2003. – № 4. – S. 47–53.
14. Sudachkova, N.E. Vliyanie stressovyh vozdejstvij na ksilogenez sosny obyknovnoj v usloviyah Sibiri / N.E. Sudachkova // Lesovedenie. – 2007. – № 6. – S. 101–106. – EDN HGLMON.
15. Belov, A.A. Regressionnoe modelirovanie dinamiki radial'nogo prirosta sosny obyknovnoj v zagryaznennyh radionuklidami nasazhdeniyah Bryanskoj oblasti / A.A. Belov // Lesovedenie. – 2017. – № 1. – S. 17–23.
16. Razuvaev, V.N. Pogoda i klimat v Rossii v XX veke. Rossiya v okruzhayushchem mire: 2001 : Analiticheskij ezhegodnik / V.N. Razuvaev. – Moskva : MNEPU, 2001. – S. 163–194.
17. Lepekhov, S.B. Ob ocenke zharo- i zasuhoustojchivosti rastenij / S.B. Lepekhov // Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya zemledeliya i rastenievodstva: (k 60-letiyu Celiny) : sbornik nauchnyh rabot ; FGBU Altajskij NIISH FANO Rossii. – Barnaul : Altajskij nauchno-issledovatel'skij institut sel'skogo hozyajstva, 2014. – S. 82–97.
18. Nikolaeva, N.N. Strukturnye osobennosti assimilacionnogo apparata i formirovanie anomal'noj drevesiny karel'skoj berezy / N.N. Nikolaeva, L.L. Novickaya // Lesovedenie. – 2007. – № 1. – S. 70–73.