


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/17>

УДК 630*561.2



Оценка воздействия радиационного загрязнения на радиальный прирост дуба черешчатого в Алексеевском лесничестве Белгородской области

Полина С. Дрыгина ✉, apollona.di@yandex.ru  <https://orcid.org/0009-0005-3383-4022>

Алексей Н. Водолажский, vod.a@list.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0847-3462>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В настоящее время актуальны вопросы, связанные с загрязнением окружающей среды факторами различного происхождения. В статье рассмотрено влияние такого загрязнения техногенного характера, как радиационное. В настоящее время изучение этого направления является достаточно актуальным, так как благополучное существование человека не обходится без использования ядерной энергетики. В связи с этим возрастает риск возникновения катастроф, что влечет за собой необратимые последствия для растительных сообществ и биосферы в целом. Примером таких необратимых последствий, является самая крупная катастрофа прошлого столетия, произошедшая на Чернобыльской атомной электростанции. Именно последствия, связанные с этим событием затронуты в данной работе, так как объекты исследования находятся в районе, непосредственно подвергнувшись волне радиационного поражения. В статье раскрыт вопрос о влиянии радиационного загрязнения на растения. Объектом исследования стали насаждения дуба черешчатого. Были подобраны участки с минимальной (1-4,99 Кюри) и максимальной (5-14,99 Кюри) дозами радиации, а также «чистый» контрольный участок. Выяснили особенности влияния разных доз радиации на прирост дуба черешчатого с помощью дендрохронологического метода и выявили достоверность полученных результатов методами математической статистики для отобранного количества образцов. Была изучена динамика радиального прироста деревьев дуба на исследуемых объектах. На основе полученных аналитических данных установлена тенденция влияния радиации на прирост, а именно установлено снижение значений радиального прироста. Установлено также, что изменение прироста зависит от того, какой дозе радиоактивного излучения были подвержены исследуемые объекты.

Ключевые слова: радиальный прирост, радиационное загрязнение, дуб черешчатый, влияние радиации на растения, облучение

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дрыгина П. С. Оценка воздействия радиационного загрязнения на радиальный прирост дуба черешчатого в Алексеевском лесничестве Белгородской области / П. С. Дрыгина, А. Н. Водолажский // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 60–75. – Библиогр.: с. 71–74 (28 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/17>.

Поступила 18.11.2023 Пересмотрена 13.12.2023 Принята 28.12.2023 Опубликована онлайн 16.01.2024

Article

Assessment of the impact of radiation contamination on radial growth of petiole oak in the Alekseevskoye lesnichestvo of Belgorod oblast

Polina S. Drygina✉, apollona.di@yandex.ru  <https://orcid.org/0009-0005-3383-4022>

Alexei N. Vodolazhskiy, vod.a@list.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0847-3462>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

Nowadays the issues related to environmental pollution by factors of various origins are topical. The article considers the impact of such technogenic pollution as radiation. At present, the study of this area is quite relevant, since a prosperous human existence does not do without the use of nuclear energy. In this regard, the risk of catastrophes is increasing, which entails irreversible consequences for plant communities and the biosphere as a whole. An example of such irreversible consequences is the largest catastrophe of the last century, which occurred at the Chernobyl nuclear power plant. It is the consequences associated with this event that are affected in this paper, since the objects of the study are located in the area directly exposed to the wave of radiation damage. The paper reveals the issue of the impact of radiation contamination on plants. The object of the study were plantations of oak cherry. Plots with minimum (1-4.99 Curie) and maximum (5-14.99 Curie) radiation doses, as well as a "clean" control plot were selected. We clarified the features of the influence of different doses of radiation on the growth of pedunculate oak using the dendrochronological method and revealed the reliability of the results obtained using mathematical statistics methods for a selected number of samples. The dynamics of radial growth of oak trees at the studied objects was studied. Based on the obtained analytical data, a tendency for the influence of radiation on growth was established, namely, a decrease in the values of radial growth was established. It was also established that the change in growth depends on the dose of radioactive radiation the objects under study were exposed to.

Keywords: *radial growth, radiation pollution, petiole oak, effect of radiation on plants, irradiation*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Drygina P. S., Vodolazhskiy A. N. (2023). Assessment of the impact of radiation contamination on radial growth of petiole oak in the Alekseevskoye lesnichestvo of Belgorod oblast. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 2, pp. 60–75 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/17>.

Received 18.11.2023. *Revised* 13.12.2023. *Accepted* 28.12.2023. *Published online* 16.01.2024

Введение

На данный момент, среди различных факторов, которые оказывают техногенное воздействие на окружающую среду, радиация занимает особое место. Радиация – неотъемлемая составляющая окружающей среды человека [8].

Радиоактивные вещества, попадающие в атмосферный воздух, оседают и попадают в почву, а за несколько лет радионуклиды из почвы поступают в растения, что является основным путем попадания их в пищу человека и животных. Так, при аварийных ситуациях, например при аварии на Чернобыльской АЭС, после радиоактивных выпадений, радионуклиды из почвы попали в растения уже на следующий год [2].

Лес - одна из наиболее чувствительных к ионизирующей радиации природных экосистем. Его поражение наблюдается даже при небольших дозах облучения. В загрязненном радиоактивными веществами лесу постепенно увеличивается поступление радионуклидов в растения, в том числе и в древесину, из почвы через корни, и этот источник становится главным в загрязнении древесины. Особенно неустойчивы к ионизирующей радиации хвойные леса. Хвойные деревья характеризуются высокой задерживающей способностью и медленным очищением от выпадающих из атмосферы радионуклидов [7].

Лиственные леса более устойчивы к облучению.

Для изучения состояния вопроса по этой теме необходим анализ имеющихся литературных источников.

В книге В.Н. Позолотиной «Отдалённые последствия действия радиации на растения» [17] была рассмотрена трансформация первичного поражения радиацией растительных сообществ в отдалённые эффекты. Объектом исследования являются сосновые леса в зоне ЧАЭС.

Сначала воздействие радиационного облучения фатально влияет на организмы, приводит к изменению показателей возрастной структуры и производительности в популяции, неустойчивости к болезням и иным факторам окружающей среды.

Также наблюдается замедление роста или ускорение процесса развития. Однако следующий этап включает в себя каскад вторичных изменений, которые затрагивают все системы.

При этом уменьшается (исчезает полностью) способность растений к семенной продуктивности с передачей мутаций потомству. У древесных растений при поражении камбия наблюдается снижение прироста биомассы, так же ослабевает иммунитет растений, уменьшается рост и развитие, возникают морфологические деформации (уродства). Подавление физиологических процессов вызвано, главным образом, окислительным стрессом и многочисленными генетическими повреждениями [6].

Щетинкин С. В. изучал последствия аварии на Чернобыльской АЭС в 30 километровой зоне на примере культур сосны обыкновенной, березы повислой и осины при разных дозах радиации [20]. Отмечено как ингибирующее, так и стимулирующее воздействие. У березы выявлено увеличение на 25% площади листовой поверхности и симметричности листьев (на 50%) при величине радиации в 1,5 Ки/км². При увеличении дозы до 25 Ки/км² размеры листьев наоборот уменьшаются.

По-другому проявляется радиационное воздействие у осины. При малых дозах (0,5–1,5 Ки/км²) листовая пластина уменьшается и рост замедляется, а при дозе в 25,3 Ки/км² площадь листьев увеличивается на 30% с сохранением относительной симметричности.

Спустя некоторое время после аварии на сосновых шишках отмечены изменения в развитии пыльцевых трубок [9]. Дисимметричная форма изменчивости рядов чешуй у шишек сосны также подвержена влиянию радиации [14]. Если в обычных условиях имеется только одна пара парастихных дробей, то при радиационном загрязнении территории их выявляют 8, но доминирует [19] по-прежнему одна, характерная для контроля.

П. И. Юшков изучал влияние разных доз гамма-излучения на камбиальные клетки берёзы. Исследования проводились при уровне радиации 1000 – 2000 Гр, 600 – 800 Гр и 200 – 600 Гр [22]. В первом случае наблюдалась гибель камбия по всей окружности ствола. Во-втором – деревья тоже

погибали, но на второй год после облучения. В третьем – доказанного влияния на прирост стволовой древесины не отмечено [13].

М. Н. Неруш изучал изменчивость радиального прироста дуба под влиянием радиационного облучения [16]. У деревьев больших и средних размеров наблюдалась повышенная изменчивость радиального прироста [1]. В частности, у толстых деревьев отмечено его заметное снижение. Это же характерно и при увеличении периода воздействия радиации [19]. Кроме этого, выявлено, уменьшение ранней и поздней древесины и нивелирование различий между ними.

С 1968 по 1979 годы в Донецком ботаническом саду НАН Украины и Донецком государственном университете было проведено исследование последствий радиационного воздействия на дуб черешчатый *Quercus robur* L. Семена дуба были облучены различными дозами гамма-излучения. В результате были получены мутантные формы деревьев. Эти мутации проявляются в зигзагообразности, раздвоении и сильном наклоне ствола. Изменения в развитии продолжают наблюдаться до сегодняшнего дня [10].

При влиянии больших доз радиации на биологические объекты отмечается усиление в клетках патологических эффектов в результате разрушения ДНК. Биологически активные вещества клетки способствуют усилению данного процесса. При воздействии малых доз активизируется деятельность мембран. Генетический аппарат при этом не затрагивается [12]. Однако механизм действия гормезиса до конца не изучен. [4]. Радиационный гормезис представляет собой уникальное явление в растительном мире, которое проявляется в усиленном росте, ускоренном развитии, повышенной толерантности к стрессорам и накоплению ценных соединений в ответ на низкие дозы облучения [28]. Генетическое разнообразие в популяциях растений, населяющих техногенно загрязненные территории, определяется видовыми особенностями, природой экологического фактора и силой его воздействия [5].

Влияние радиации на структуру годичных слоев деревьев фиксировалось и в лабораториях, и в зоне воздействия Чернобыльской АЭС после ава-

рии [11, 24]. На прилегающих территориях отмечалось в 3 раза больше нарушений в строении годичных колец после трагедии на этой электростанции по сравнению с доаварийным периодом [25].

В условиях лаборатории или в лесных питомниках изучалась изменчивость ростовых процессов деревьев лесообразующих пород при хроническом воздействии радиации [3]. Исследовались ингибирование роста, морфологические изменения, особенности фотосинтеза и т.д. после острого, хронического в течение нескольких лет облучения нескольких видов сосен – в основном сосна смолистая (*P. Rigida*), сосна веймутова (*P. strobes*), сосна ладанная (*P. Taeda*) [26]. Отмечено, что растения, имеющие меньшее число хромосом и более крупные ядра клеток, более чувствительны к воздействию гамма-радиации, нежели растения с большим числом хромосом и меньшим размером ядер. Кроме того, меньшая скорость деления ядер ведет к большому ущербу от радиации, так как промежуточные фазы деления в таком случае подвержены более длительному воздействию ионизации [27].

Анализ литературных источников показывает, что, при значительном объеме исследований по воздействию радиации на древесные растения, влияние этого фактора конкретно на радиальный прирост изучено недостаточно. Таким образом тема нашего исследования является актуальной и будет способствовать расширению знаний в этой области.

Исходя из вышесказанного, можно считать целью исследования выяснение влияния радиации на рост и развитие деревьев дуба, в частности на их радиальный прирост (в нашем случае, объектом исследования выступил древостой дуба черешчатого) в связи с уровнем загрязнения радиацией после аварии на Чернобыльской АС. Выявить, имеются ли различия в радиальном приросте древостоев, произрастающих в условиях радиационного загрязнения различной величины.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Наши исследования начались с построения маршрута, по которому будет производиться сбор материала для дальнейшего изучения. Объектом исследования послужили древесные насаждения

дуба черешчатого в Алексеевском лесничестве Белгородской области (кварталы 63, 92, 77). Исследуемые насаждения произрастают в одинаковых лесорастительных условиях (D_2) и типах леса (ДСН), относятся к одному возрасту (80-85 лет), имеют одинаковую относительную полноту (0,7), а также характеризуются схожими значениями остальных таксационных показателей (состав древостоя, под-рост, подлесок и др). Таксационные показатели исследуемых насаждений указаны в табл. 1. Разли-чие на 1 класс бонитета в контроле и на подвер-женных радиационному загрязнению участках мо-

жет объясняться именно влиянием радиации, так как остальные характеристики и условия произрас-тания (ТЛУ и тип леса) одинаковы.

Степень радиационного загрязнения терри-тории участка устанавливалась по таксационному описанию Алексеевского лесничества на 30.07.2022 г. [23]. Работы по радиационному об-следованию земель на территории ОКУ «Алексеев-ское лесничество» проводились филиалом ФБУ «Российский центр защиты леса» «Центр защиты леса Воронежской области».

Таблица 1

Таксационная характеристика насаждений объектов исследований в Алексеевском лесничестве
Белгородской области

Table 1

Taxation characteristics of plantings of research objects in Alekseevsky forestry, Belgorod region

Исследуемый участок Study area	Состав composition of tree species	Средний возраст, лет mean age, years	Средняя высота, м mean height, m	Средний диаметр, см mean diameter on breast height, cm	Кл. бони-тета growth class	ТЛУ/ Тип леса forest growth conditions / type of forest	Полно-та den-sity of tree place-ment	Запас на 1 га, м ³ Standing volume, m ³ /ha
Контроль (без радиационного загрязнения, 63 квартал, выдел 5) Control (without radiation contamination, 63 quarter, section 5)	5ДВС4ЯОВ 1КЛВ+КЛН	85	24	32	I	D_2 / ДСН	0,7	270
Участок с дозой радиации 1-4,99 Кюри (92 квартал, выдел 1) Site with radiation dose 1-4.99 Curie (92 quarter, section 1)	5ДВС2ЯОВ 2ЛИП1КЛН +ДННП	80	22	28	II	D_2 / ДСН	0,7	220
Участок с дозой радиации 5-14,99 Кюри (77 квартал, выдел 1) Site with radiation dose of 5-14.99 Curie (77 quarter, section 1)	6ДВС4ЯОВ +КЛН	80	23	28	II	D_2 / ДСН	0,7	230

Рельеф в районе расположения исследуемых участков ровный. Объекты исследования находятся на незначительном расстоянии друг от друга, что обуславливает одинаковый уровень воздействия на них температуры и количества осадков (рис. 1).

На всех исследуемых объектах (рис. 2-4) мы провели уточнение таксационных показателей ме-

тодом глазомерно - измерительной таксации. В квартале 63, выдел 5 выбран контрольный участок без радиационного загрязнения. Квартал 77, выдел 1 подвержен радиационному загрязнению плотно-стью от 5 до 14,99 Кюри. Квартал 92, выдел 1, име-ет плотность радиационного загрязнения от 1 до 4,99 Кюри.

Дизайн эксперимента и сбор данных

На каждом участке были заложены круговые площадки для взятия кернов древесины. Они закладывались в глубине каждого выдела на удалении от просек. Координаты площадок не определялись. Центром каждой площадки служило среднее по диаметру дерево дуба. При этом мы опирались на методику, которая описывается в учебном пособии Матвеева С. М. «Дендрохронология» [15]. Это разработанный П. А. Феклистовым и другими способ учета годичного прироста древостоя по малому числу деревьев. Он основан на связи приростов у соседних деревьев в следствии их взаимной компенсации. В этом случае изучается прирост соседних деревьев на круговых площадках радиусом 11,29 м. Различия средних значений годичного прироста при учете на таких площадках и при учете по 100 учетным деревьям не достоверны. Точность оценки прироста древостоя в абсолютных величинах в этом случае составляет около 6 %.

Мы отобрали материалы для дальнейшего изучения влияния радиации на древостой - керны, в количестве 15 штук с 15 деревьев (по 5 шт. на каждый участок). Керны отбирались у среднего дерева на площадке и окружающих его деревьев.

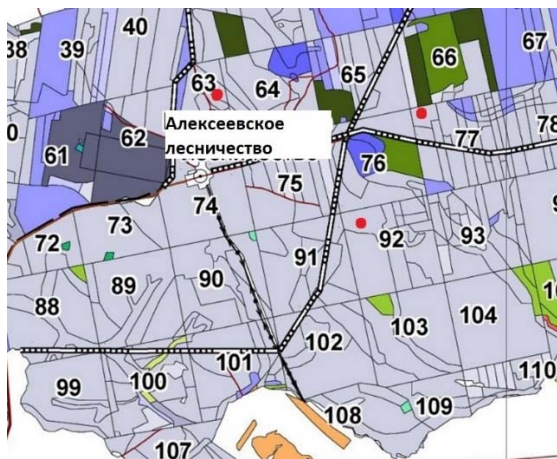


Рисунок 1. Расположение объектов исследования

Figure 1: Location of study objects

Источник: собственные исследования

Source: own research



Рисунок 2. Алексеевское лесничество, квартал 63 (контрольный участок)

Figure 2: Alekseevskoye forestry, block 63 (control area)

Источник: собственные исследования
Source: own research

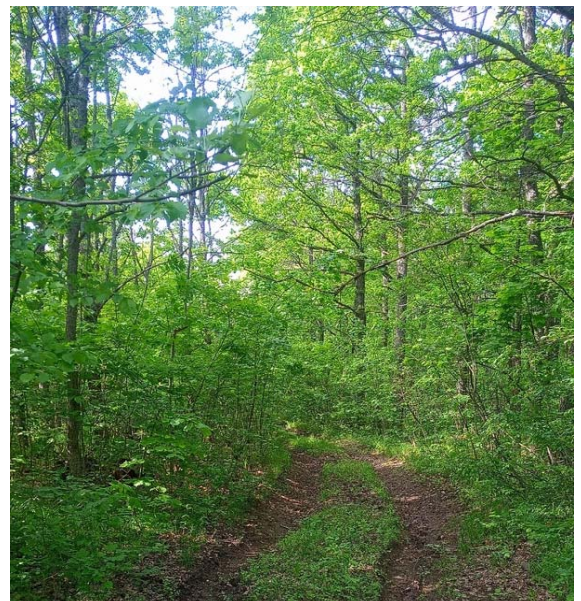


Рисунок 3. Алексеевское лесничество, квартал 77 (радиационное загрязнение от 5 до 14,99 Кюри)

Figure 3. Alekseevskoye forestry, block 77 (radiation contamination from 5 to 14.99 Curie)

Источник: собственные исследования
Source: own research

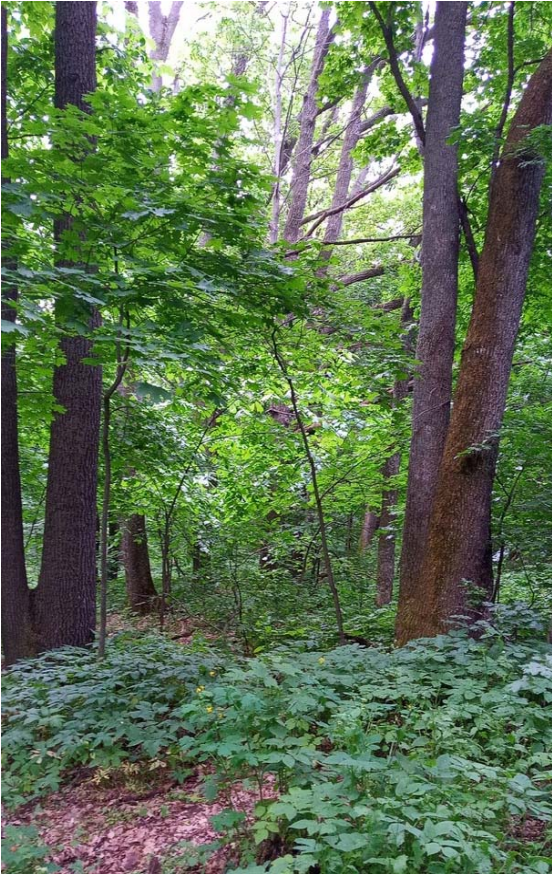


Рисунок 4. Алексеевское лесничество, квартал 92 (радиационное загрязнение от 1 до 4,99 Кюри)
Figure 4. Alekseevskoye forestry, block 77 (radiation contamination from 1 to 4.99 Curie)

Источник: собственные исследования
Source: own research

Процесс взятия кернов осуществлялся путем сверления в направлении, перпендикулярном продольной оси ствола дерева, с востока на запад на глубину 10 см, чтобы не сломать бурав ввиду высокой твердости древесины дуба.

Анализ данных (Data analysis)

Измерение ширины годичных колец с предварительной их датировкой выполнялось на подготовленных (зачищенных и смоченных водой) кервах дуба с помощью специального прибора LINTAB. На следующем этапе проводился расчет средних значений радиального прироста дуба черешчатого и статистическая обработка полученных результатов.

Среднюю ширину годичного слоя находили путем суммирования годичных колец всех имеющихся образцов по соответствующему году с последующим делением на количество этих образцов. Результаты получали с точностью 0,01мм.

Данные исследования предоставили в табличной и графической форме, после дали визуальную оценку синхронности между ними.

Основные статистические показатели рассчитывали с помощью программы «Excel» по известным формулам. Так среднее квадратическое (основное) отклонение (σ) по формуле

$$\sigma = + \sqrt{\frac{\sum \alpha^2}{N-1}} \quad (1)$$

Среднюю арифметическую величину для малой выборки по формуле

$$M = \frac{\sum V}{N} \quad (2)$$

где V - значение варианты;

N - общее число вариантов (объем ряда).

Коэффициент изменчивости (C) это выраженное в процентах основное отклонение относительно средней величины и так далее.

Оценка существенности различий между средними радиальными приростами проводилась на основе отношения фактической разности средних величин к ошибке этой разности. Это показатель достоверности (существенности) различия:

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_{M1}^2 + m_{M2}^2}}, \quad (3)$$

где M_1 и M_2 - средние значения признака на сравниваемых участках;

m_{M1} и m_{M2} - основные ошибки среднего значения признака на соответствующих участках.

Результаты и обсуждение

После выполнения работ по измерению ширины годичных колец с помощью измерительного прибора LINTAB и обработки полученных данных, результаты отображали в графической форме. Средние значения прироста на контрольном участке и участках с разными дозами радиационного загрязнения отображены на рис. 5.

Анализируя график прироста на контрольном участке в периоде с 1987 по 2022 год (после аварии на Чернобыльской АС) можно сделать вы-

вод что, общий характер колебаний относительно неравномерный. Наивысшее значение прироста на данном участке составило 2,14 мм в 1996 году. Наименьший прирост наблюдается в 2005 году и составляет 1,04 мм. Стоит заметить, что на протяжении всего графика фиксируются довольно высокие значения прироста. В интересующем нас промежутке времени, начиная с 1987 года (после катастрофы ЧАЭС) и по 2022 год наблюдаются частые колебания прироста. В 1987 году значение прироста составляло 1,42 мм. До 2022 года большинство значений прироста находятся в промежутке от 1,04 до 2,0 мм. Начиная с 1996 года прирост имеет плавный, затухающий характер.

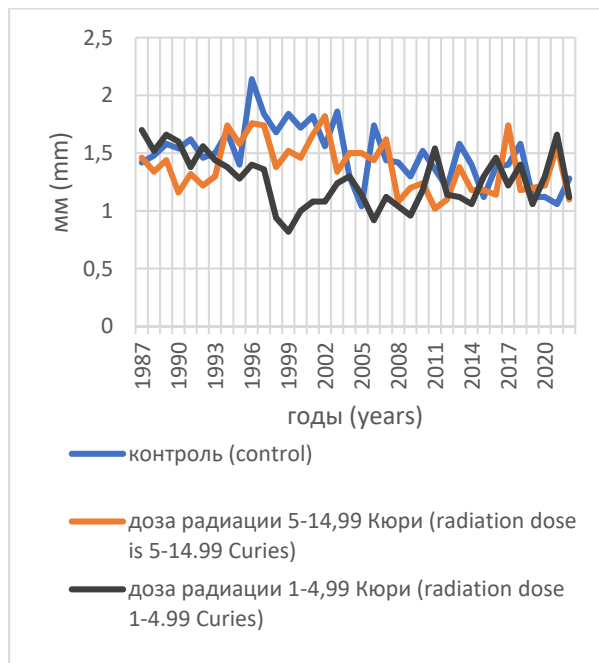


Рисунок 5. Средние значения радиального прироста на исследуемых участках: мм – значения прироста

Figure 5. The average values of radial growth in the studied areas: mm - growth values

Источник: собственные исследования
Source: own research

На участке с дозой радиации 5-14,99 Кюри колебания прироста имеют высокую частоту. Наблюдается хаотичный характер колебаний. Наивысшее значение прироста равно 1,66 мм (2001 год). Наименьший показатель прироста равен 1,02 мм (2011 год). В периоде с 1987 по 2022 год большинство значений прироста находятся в промежут-

ке от 1,02 до 1,5 мм. Однако в 1987 году он составил 1,46 мм, что на 0,04 мм больше показателей контрольного участка. В 1996 году он равен 1,76 мм, что на 0,38 мм меньше в сравнении с контрольным участком. Опираясь на полученные данные, можно полагать, что на такие резкие перепады в приростах могла подействовать радиация, доза которой на данном участке составляет 5-14,99 Кюри.

На участке с низкой степенью радиационного загрязнения (доза радиации 1-4,99 Кюри) можно отметить относительную равномерность в колебаниях радиального прироста. До 1999 года прирост идёт на спад, а далее постепенно повышается. Максимальное значение прироста составляет 1,7 мм (1987 год), а минимальное 0,82 мм (1999 год). В 1987 году прирост составил 1,7 мм, что на 0,28 мм больше контрольного участка, и на 0,24 мм больше участка к высокой дозой радиации. В 1996 году прирост составил 1,40 мм. Данное значение меньше контрольного на 0,74 мм, а также меньше, чем на участке с высокой радиацией на 0,36 мм. Основные значения прироста находятся в интервале от 0,82 до 1,4 мм. Такие отклонения могут свидетельствовать о влиянии радиации.

При анализе значений коэффициента корреляции по исследуемым участкам установлено, что на контрольном участке (квартал 63) значение коэффициента корреляции 0,72, на участке с дозой радиации 1-4,99 Кюри (92 квартал) – 0,79, на участке с дозой радиации 5-14,99 Кюри (77 квартал) – 0,74. Это достаточно высокие показатели. Выраженный сигнал популяции (EPS) в исследуемых обобщенных древесно-кольцевых хронологиях составил по исследуемым участкам 0,92, 0,94 и 0,93 соответственно, что выше принятого порогового значения – 0,85, т.е. хронологии являются представительными – осреднённая ширина годичных колец за каждый год достоверно отражает прирост всей совокупности.

На основе средних данных радиального прироста взятых с трёх исследуемых участков, вычислили значения текущего среднегодового радиального прироста за период с 1987 по 2022 год.

Вычисления основных статистических показателей обработаны и приведены в табл. 2.

Анализируя данные, мы видим, что коэффициент варьирования среднего радиального прироста достаточно стабилен и находится в пределах от 16% до 18%. Величина ошибки среднего значения (m_m), контролируется через t_m и P_m . Полученные средние значения признаков являются достоверными, так как показатель достоверности больше 3, а точность исследований является достаточно высокой, то есть меньше 5 %.

После проведенных расчетов следует осуществить оценку разности между средними значениями приростов на исследуемых участках для установления ее существенности или несущественности. Для участков без радиационного загрязнения и с дозой радиации 1-4,99 Кюри данные расчетов приведены в таблице 3 из которых следует, что разность между средними значениями составляет 0,22 мм при величине ошибки 0,056. Показатель достоверности (3,96) оказался больше стандартного значения критерия Стьюдента 2,72 на уровне значимости 0,01 при числе степеней свободы $f=35$, то есть имеющиеся различия между средними показателями существенны с вероятностью 0,99.

Далее сравним показатели между контрольным участком и участком с дозой радиации 5-14,99 Кюри (таблица 4). В этом случае разность между средними значениями составляет 0,1 мм. Ошибка разности равна 0,055. Показатель достоверности (1,85) оказался меньше стандартного значения критерия Стьюдента 2,03 на уровне значимости 0,05 при числе степеней свободы $f=35$, то есть имеющиеся различия между средними показателями несущественны при вероятности 0,95. При этом стандартное значение критерия Стьюдента на уровне значимости 0,1 при числе степеней свободы $f=35$ составляет 1,69, что меньше полученного показателя существенности различий (1,85). Поэтому с вероятностью 0,90 различия достоверны.

Также сравним между собой показатели на участках с максимальной и минимальной дозами загрязнения радиацией. Данные отображены в таблице 5, из материалов которой мы видим, что раз-

ность между средними значениями составляет 0,12 мм. Ошибка разности равна 0,053. Показатель достоверности (2,28) оказался больше стандартного значения критерия Стьюдента 2,03 на уровне значимости 0,05 при числе степеней свободы $f=35$, то есть имеющиеся различия между средними показателями существенны с вероятностью 0,95.

Таким образом, сравнивая контрольный участок с объектами, имеющими минимальную и максимальную дозы радиации, выявлено наличие влияния радиации на радиальный прирост дуба при определенной дозе радиации. Отмечено снижение этого показателя. Выяснилось, что при сравнении контрольного участка и объекта с дозой радиации 1-4,99 Кюри значения прироста снизились значительно, нежели при влиянии радиации в дозе 5-14,99 Кюри. О влиянии радиации на прирост также можно говорить, сравнивая оба участка, подверженных радиационному загрязнению. Исходя из этого, можно сделать вывод, что радиационное излучение способно влиять на радиальный прирост, а также есть разница между дозами, поражающими древостой.

Влияние только низкой дозы радиации на снижение радиального прироста может быть связано с индивидуальными особенностями реакции породы на это воздействие. В частности, подобным образом радиация влияет на размер листовой пластинки у осины по исследованиям Щетинкина [20]. При низкой дозе радиации ее размер уменьшается, то есть наблюдается уменьшение прироста, а при большой дозе – увеличивается.

Надо отметить, что полученные результаты можно считать предварительными, обоснованными для полученного объема полевого материала. Они требуют подтверждения на большем количестве образцов как на этих, так и на новых объектах исследований с охватом большего временного диапазона. Это даст возможность сопоставить приросты до и после аварии на Чернобыльской АС, явившейся источником радиационного загрязнения.

Таблица 2

Статистическая показатели расчётов среднего радиального прироста дуба черешчатого (*Quercus robur*)

Table 2

Statistical indicators of calculations of the average radial growth of pedunculated oak (*Quercus robur*)

Исследуемый участок Study area	Период лет 1987-2022 гг. The period of years 1987- 2022.	M, мм	C, %	m _м , мм	t _м	P _м , %
Контроль (без радиационного загрязнения, 63 квартал) Control (without radiation contamination, 63 quarter)	36	1,48	17	0,041	35,94	2,78
Участок с дозой радиации 1-4,99 Кюри (92 квартал) Site with radiation dose 1-4.99 Curie (92 quarter)	36	1,26	18,08	0,038	33,18	3,01
Участок с дозой радиации 5-14,99 Кюри (77 квартал) Site with radiation dose of 5-14.99 Curie (77 quarter)	36	1,38	16,18	0,037	37,61	2,65

Примечание: M – средняя арифметическая величина; C – коэффициент изменчивости; m_м – основная ошибка среднего значения признака; t_м – показатель достоверности среднего значения признака; P_м – показатель точности исследования

Note: M - arithmetic weighted mean; C - coefficient of variability; mm - basic error of the mean value of the trait; tm - indicator of reliability of the mean value of the trait; RM - indicator of accuracy of the study

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 3

Оценка достоверности (существенности) различий между средними значениями радиального прироста на участке без радиационного загрязнения и участке с дозой радиации 1-4,99 Кюри

Table 3

Assessment of reliability (materiality) of differences between mean values of radial growth at the site without radiation contamination and the site with radiation dose of 1-4.99 Curie

Исследуемые участки Areas under study	Контроль (без радиационного загрязнения) Control (without radiation contamination)	Участок с дозой радиации 1-4,99 Кюри Site with a radiation dose of 1-4.99 Curie
Средний прирост за 36 лет, мм Average growth over 36 years	1,48	1,26
Разность средних значений, мм Difference in mean values	0,22	
Ошибка среднего значения, мм Mean value error	0,041	0,038
Ошибка разности средних значений, мм Mean difference error	0,056	
Показатель существенности различия между средними значениями Significance of the difference between the mean values	3,96	

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 4

Оценка достоверности (существенности) различий между средними значениями радиального прироста на участке без радиационного загрязнения и участке с дозой радиации 5-14,99 Кюри

Table 4

Assessment of reliability (materiality) of differences between mean values of radial growth at the site without radiation contamination and the site with radiation dose of 5-14.99 Curie

Исследуемые участки Areas under study	Контроль (без радиационного загрязнения) Control (without radiation contamination)	Участок с дозой радиации 5-14,99 Кюри Site with a radiation dose of 5-14.99 Curies
Средний прирост за 36 лет, мм Average growth over 36 years	1,48	1,38
Разность средних значений, мм Difference in mean values	0,1	
Ошибка среднего значения, мм Mean value error	0,041	0,037
Ошибка разности средних значений, мм Mean difference error	0,055	
Показатель существенности различия между средними значениями Significance of the difference between the mean values	1,85	

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 5

Оценка достоверности (существенности) различий между средними значениями радиального прироста на участках с максимальной и минимальной дозами радиации

Table 5

Assessment of reliability (materiality) of differences between mean values of radial growth at sites with maximum and minimum radiation doses

Исследуемые участки Areas under study	Участок с дозой радиации 5-14,99Кюри Site with radiation dose of 5-14.99Curie	Участок с дозой радиации 1-4,99 Кюри Site with a radiation dose of 1-4.99 Curie
Средний прирост за 36 лет, мм Average growth over 36 years	1,38	1,26
Разность средних значений, мм Difference in mean values	0,12	
Ошибка среднего значения, мм Mean value error	0,037	0,038
Ошибка разности средних значений, мм Mean difference error	0,053	
Показатель существенности различия между средними значениями Significance of the difference between the mean values	2,28	

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Заключение

В результате проделанной работы, можно сделать следующие выводы.

1. На объектах с максимальной и минимальной радиацией за 36 лет радиальный прирост дуба черешчатого оказался ниже на 0,1 и 0,22 мм (соответственно) по сравнению с контрольным участком.

2. Между контрольным участком и объектом с радиацией 1-4,99 Кюри выявлена существенная разница в текущем среднегодовом радиальном приросте за период с 1987 по 2022 годы с вероятностью 0,99. Показатель достоверности в этом случае оказался равен 3,96 при стандартном значении критерия Стьюдента 2,72.

3. Между участком с дозой радиации 5-14,99 Кюри и контролем разница в средних значениях годового прироста за исследуемый период составила 0,1 мм. Различия несущественны при вероятности 0,95. В случае понижения уровня вероятности до 0,90 разницу можно считать достоверной, так как стандартное значение критерия Стьюдента на уровне значимости 0,1 составляет 1,69, что меньше полученного показателя существенности различий (1,85).

4. Сравнивая два участка с разным уровнем радиационного загрязнения, установили, что разница между средними показателями, равная 0,12

мм, оказалась существенной с вероятностью 0,95. Показатель достоверности равен 2,28 при стандартном значении критерия Стьюдента 2,03.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что радиация способна влиять на радиальный прирост дуба при определенных уровнях загрязнения. В большей степени влияние на прирост оказало облучение в минимальной дозе (1-4,99 Кюри), нежели максимальная доза радиации (5-14,99 Кюри). В любом из этих случаев значения прироста уменьшаются, но есть разница в том, под влиянием какой дозы облучения оказался древесный ствол. Это соотносится с закономерностью, установленной С. В. Щетинкиным при радиационном воздействии на осину [21], когда меньшая доза радиации оказывала ингибирующее воздействие на листовую пластинку, а большая – стимулирующее. Это может быть обусловлено видовой реакцией на радиационное воздействие.

Надо отметить, что данное исследование необходимо продолжить для получения большего объема материала как по установленным объектам исследований, так и на дополнительных участках для более детального анализа приростов за максимальный временной интервал, охватывающий периоды не только после радиационного воздействия, но и до него.

Список литературы

1. Антанайтис, В.В. Прирост леса. Лесная промышленность / В.В. Антанайтис, В.В. Загребев. – Москва, 1981. – 200 с.
2. Андрияшина, Т.В. Воздействие радиоактивного загрязнения на окружающую среду / Т.В. Андрияшина, Н.В. Шильникова // Вестник казанского технологического университета. – 2011 – № 10. – С. 39–44.
3. Белов, А.А. Воздействие загрязнения природной среды радионуклидами на древесно-кустарниковую растительность / А.А. Белов // Лесохозяйственная информация. – 2012. – С. 13.
4. Богданов, И. М. Проблема оценки эффектов воздействия «малых» доз ионизирующего излучения / И. М. Богданов, А.И. Сорокина, М.А. Маслюк // Бюллетень сибирской медицины. – 2005. – № 1. – С. 145–151.
5. Эффекты хронического облучения в популяциях растений на примере референтного организма «сосна обыкновенная». Обзор / С. А. Гераськин, П. Ю. Волкова, А. А. Удалова [и др.] // Радиация и риск. – 2018. – № 4. – С. 95 – 118. DOI: 10.21870/article_0131-3878-2018-27-4-95-118.
6. Влияние хронического облучения на электрические сигналы растений и их роль в формировании устойчивости к стрессорам среды / М.А. Гринберг, Е.Н. Громова, С.В. Гудков, В.А. Воднеев // Сборник научных трудов VI съезда биофизиков России. – 2019. – № 2. – С. 338–339.

7. Что мы узнали о биологических эффектах облучения в ходе 35-летнего анализа последствий аварии на чернобыльской АЭС? / С.А. Гераськин, С.В. Фесенко, П.Ю. Волкова, Н.Н. Исамов // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2021. – № 3. – С. 234 – 260. DOI 10.31857/article_S0869803121030061.
8. Радиозэкологическая опасность для населения в районах распространения высокорadioактивных гранитов / А.Н. Злобина, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, И.М. Фархутдинов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 3. – С. 111–125. DOI:10.18799/24131830/2019/3/172.
9. Ипатьева, В.А. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации: моногр. / В.А. Ипатьева; Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т леса. – Гомель. – 1999. – С. 454.
10. Корниенко, В. О. Влияние радиационного облучения на архитектуру надземной части дуба черешчатого *Quercus robur* L. / В. О. Корниенко // Науковий вісник НЛТУ України. – 2016. – № 26.3. – С. 7. – DOI:10.15421/article_40260315.
11. Козубов, Г. М. Радиобиологические и радиозэкологические исследования древесных растений / Г.М. Козубов, А.И. Таскаев; Рос. АН, Урал. отд-ние, Коми науч. центр, Ин-т биологии. – Санкт-Петербург. – 1994. – С. 255. ISBN 5-02-026009-6.
12. Кузин, А. М. Проблема малых доз и идеи гормезиса в радиобиологии / А. М. Кузин // Радиобиология. – 1991. – № 1. – С. 16–21.
13. Махнева, О. В. Биологические свойства семян березы, сформировавшихся на повышенном радиационном фоне / О. В. Махнева, П. И. Юшков // Экология и интродукция растений на Урале. – 1991. – С. 44–48.
14. Мельник, Н. А. Радиозэкологическое исследование хвойных пород деревьев / Н. А. Мельник // Вестник МарГТУ. – 2006. – № 3. – С. 429–433.
15. Матвеев, С. М. Дендрохронология: учеб. пособие / С. М. Матвеев, Д. Е. Румянцев ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2013. – 140 с. ISBN 978-5-7994-0535-9.
16. Неруш, М. Н. Рост и развитие насаждений дуба в условиях радиоактивного загрязнения / М. Н. Неруш // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2006. – С. 6.
17. Позолотина, В. Н. Отдалённые последствия действия радиации на растения / В. Н. Позолотина; Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Ин-т экологии растений и животных. – Екатеринбург. – 2003. – С. 244. – ISBN 5-93472-100-3.
18. Тябера, А.П. Оценка изменений радиального прироста деревьев под влиянием загрязнения среды / А. П. Тябера // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. – 1984. – С. 194-195.
19. Хорин, А. В. Методика отбора правых и левых форм у сосны обыкновенной и других пород / А. В. Хорин // Лесотехнический журнал. – 1970. – № 5. – С. 110–114.
20. Щетинкин, С. В. Некоторые аспекты влияния радиоактивного загрязнения на генеративную сферу сосны обыкновенной / С. В. Щетинкин // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 2 (10). – С. 168–172.
21. Щетинкин, С. В. Генетические и биологические эффекты малых доз радиации в лесных экосистемах / С. В. Щетинкин // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2019. – С. 7.
22. Юшков, П. И. Действие ионизирующих излучений на лесные насаждения. Проблемы радиозэкологии и пограничных дисциплин / П. И. Юшков. – 1998. – С. 201–229.
23. Таксационное описание лесотаксационных выделов на 30.07.2022. ОКУ «Алексеевское лесничество» Белгородской области, Воронеж: Филиал ФГУП «Рослесинфорг» «Воронежлеспроект», 2022. – 591 с.

24. Skuterud, L. Histological changes in *Pinus sylvestris* L. in the proximal-zone around the Chernobyl Power. *Plant. Sci. Environm / L. Skuterud, N. I. Goltsova, R. Naeumann // Sikkeland Science of the total environment.* – 1994. – №. 157. – P. 387–397.

25. Tulik, M. Cambial story of scots pine trees (*Pinus sylvestris*) prior and after Chernobyl accident as encoded in the xylem / M. Tulik // *Environm. Exptriment. Botany.* – 2001. – № 46 (1). – P. 1–10. – DOI: 10.1016/article_S0098-8472(01)00075-2

26. Hadley, E. B. Effects of ionizing radiation on rates of CO₂ exchange of pine seedlings / E. B. Hadley, G. M. Woodwell // *Radiat. Res.* – 1965. – № 24. – P. 650–656.

27. Sparrow, A. H. Prediction of the sensitivity of plants to chronic gamma irradiation / A. H. Sparrow, G. M. Woodwell // *Radiation Botany.* – 1962. – № 1. – P. 9–26.

28. Volkova, P. Y. Radiation Hormesis In Plants / P. Y. Volkova, E. V. Bondarenko, E. A. Kazakova // *Current Opinion, in Toxicology.* – 2022. – № 30. 100334. DOI: 10.1016/article_2022.02.007.

References

1. Antanaitis, V.V. Forest growth. Forest industry / V.V. Antanaitis, V.V. Zagreev. - Moscow, 1981. - 200 c.
2. Andriyashina, T.V. Impact of radioactive pollution on the environment / T.V. Andriyashina, N.V. Shilnikova // *Bulletin of Kazan Technological University.* - 2011 - № 10. - C. 39-44.
3. Belov, A.A. Impact of environmental contamination by radionuclides on tree and shrub vegetation / A.A. Belov // *Forestry information.* - 2012. - C. 13.
4. Bogdanov, I.M. The problem of assessing the effects of exposure to "low" doses of ionizing radiation / I.M. Bogdanov, A.I. Sorokina, M.A. Maslyuk // *Bulletin of Siberian Medicine.* - 2005. - № 1. - C. 145-151.
5. Effects of chronic irradiation in plant populations on the example of the reference organism "common pine". Review / S.A. Geraskin, P.Yu. Volkova, A.A. Udalova, E.A. Kazakova, D.V. Vasiliev, N.S. Dikareva, E.S. Makarenko, G.T. Duarte, A.G. Kuzmenkov // *Radiation and Risk.* - 2018. - № 4. - C. 95 - 118. DOI: 10.21870/article_0131-3878-2018-27-4-95-118.
6. Effect of chronic irradiation on electrical signals of plants and their role in the formation of resistance to environmental stressors / M.A. Greenberg, E.N. Gromova, S.V. Gudkov, V.A. Vodnnev // *Collection of scientific papers of the VI Congress of Biophysicists of Russia.* - 2019. - № 2. - C. 338-339.
7. What have we learned about the biological effects of irradiation during the 35-year analysis of the consequences of the Chernobyl accident? / S.A. Geraskin, S.V. Fesenko, P.Y. Volkova, N.N. Isamov // *Radiation Biology. Radioecology.* - 2021. - № 3. - C. 234 - 260. DOI 10.31857/article_S0869803121030061
8. Radioecological danger for the population in the areas of highly radioactive granites / A.N. Zlobina, L.P. Rikhvanov, N.V. Baranovskaya, I.M. Farhutdinov // *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources.* - 2019. - № 3. - C. 111 - 125. DOI:10.18799/24131830/2019/3/172
9. Ipatieva, V.A. Forest. Man. Chernobyl. Forest ecosystems after the Chernobyl accident: state, forecast, population reaction, ways of rehabilitation: monograph / V.A. Ipatieva; National Academy of Sciences of Belarus. Institute of Forestry. - Gomel. - 1999. - C. 454.
10. Kornienko, V.O. Effect of radiation exposure on the architectonics of the above-ground part of the oak *Quercus robur* L. / V.O. Kornienko // *Naukovy visnik NLTU of Ukraine.* - 2016. - No. 26.3. - P. 7. DOI:10.15421/article_40260315
11. Kozubov, G.M. Radiobiological and radioecological studies of woody plants / G.M. Kozubov, A.I. Taskaev; Ros. Academy of Sciences, Ural Branch, Komi Scientific Center, Institute of Biology. - St. Petersburg. - 1994. - C. 255. ISBN 5-02-026009-6
12. Kuzin, A. M. The problem of small doses and ideas of hormesis in radiobiology / A. M. Kuzin // *Radiobiology.* - 1991. - № 1. - C. 16-21.

13. Makhneva, O.V. Biological properties of birch seeds formed on the increased radiation background / O.V. Makhneva, P.I. Yushkov // Ecology and plant introduction in the Urals. - 1991. - C. 44-48.
14. Melnik, N.A. Radioecological study of coniferous tree species / N.A. Melnik // Vestnik MarSTU. - 2006. - № 3. - C. 429-433.
15. Matveev, S.M. Dendrochronology: textbook / S.M. Matveev, D.E. Rummyantsev; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, FGBOU VO "VGLTU". - Voronezh, 2013. - 140 c. ISBN 978-5-7994-0535-9.
16. Nerush, M.N. Growth and development of oak plantations in conditions of radioactive contamination / M.N. Nerush // Actual problems of forest complex. - 2006. - C. 6.
17. Pozolotina, V.N. Long-term effects of radiation on plants / V.N. Pozolotina; Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Institute of Ecology of Plants and Animals. - Ekaterinburg. - 2003. - C. 244. ISBN 5-93472-100-3
18. Tyabera, A.P. Assessment of changes in radial growth of trees under the influence of environmental pollution / A.P. Tyabera // Influence of industrial enterprises on the environment. - 1984. - C. 194-195.
19. Khorin, A.V. Methodology of selection of right and left forms in common pine and other species / A.V. Khorin // Forestry Journal. - 1970. - № 5. - C. 110-114.
20. Shchetinkin, S.V. Some aspects of the impact of radioactive contamination on the generative sphere of the common pine / S.V. Shchetinkin // Lesotechnical Journal. - 2013. - № 2 (10). - C. 168-172.
21. Shchetinkin, S.V. Genetic and biological effects of low radiation doses in forest ecosystems / S.V. Shchetinkin // Actual problems of forest complex. - 2019. - C. 7.
22. Yushkov, P.I. Action of ionizing radiations on forest plantations. Problems of radioecology and border disciplines / P.I. Yushkov. - 1998. - C. 201-229.
23. Taxation description of forest taxation units as of July 30, 2022. Public educational institution "Aleksievskoe forestry" of the Belgorod region, Voronezh: Branch of the Federal State Unitary Enterprise "Roslesinforg" "Voronezhlesproekt", 2022. - 591 p.
24. Skuterud, L. Histological changes in *Pinus sylvestris* L. in the proximal-zone around the Chernobyl Power. Plant. Sci. Environm / L. Skuterud, N.I. Goltsova, R. Naeumann // Sikkeland Science of the total environment. – 1994. – №. 157. – P. 387-397.
25. Tulik, M. Cambial story of scots pine trees (*Pinus sylvestris*) prior and after Chernobyl accident as encoded in the xylem / M/ Tulik // Environm. Exptiment. Botany. – 2001. – № 46 (1). – P. 1-10. – DOI: 10.1016/article_S0098-8472(01)00075-2.
26. Hadley, E. B. Effects of ionizing radiation on rates of CO₂ exchange of pine seedlings / E. B. Hadley, G.M. Woodwell // Radiat. Res. – 1965. – № 24. – P. 650–656.
27. Sparrow, A. H. Prediction of the sensitivity of plants to chronic gamma irradiation / A. H. Sparrow, G. M. Woodwell // Radiation Botany. – 1962. – № 1. – P. 9–26
28. Volkova, P.Y. Radiation Hormesis In Plants / P.Y. Volkova, E.V. Bondarenko, E.A. Kazakova // Current Opinion, in Toxicology. – 2022. – № 30. 100334. Doi: 10.1016/article_2022.02.007

Сведения об авторах

✉ *Дрыгина Полина Сергеевна* – студентка магистратуры лесного факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-3383-4022>, e-mail: apollona.di@yandex.ru.

Водолажский Алексей Николаевич – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0847-3462>, e-mail: vod.a@list.ru.

Information about the authors

✉ *Polina S. Drygina* – Dr. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3383-4022>, e-mail: apollona.di@yandex.ru.

Alexei N. Vodolazhskiy – Cand. Sci. (Agric.), Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0847-3462>, e-mail: vod.a@list.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author