

На правах рукописи

Белов Артём Анатольевич

**ДИНАМИКА РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА
СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ
В НАСАЖДЕНИЯХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ,
ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ**

06.03.02 - Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва 2017

Диссертация выполнена в Федеральном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский ордена Трудового Красного Знамени институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (ФБУ ВНИИЛМ)

Научный руководитель: **Марадудин Иван Иванович**
доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела радиационной экологии и пироэкологии леса, Федеральное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства»

Официальные оппоненты: **Румянцев Денис Евгеньевич**
доктор биологических наук, профессор кафедры экологии и защиты леса, заведующий лабораторией дендрохронологии, Мытищинский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Позолотина Вера Николаевна
доктор биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией популяционной радиобиологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»

Защита состоится 30 ноября 2017 г. в 13 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.054.01 при Институте лесоведения РАН по адресу: 143030, Московская обл., Успенское, Советская ул., 21, в зале заседаний Ученого совета.

Тел./факс: 8(495) 634-52-57, E-mail: root@ilan.ras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института лесоведения РАН и на сайте <http://ilan.ras.ru> (дата размещения 21 сентября 2017 г.).

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат биологических наук

 И.А. Уткина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Радиоактивное загрязнение окружающей среды при авариях на АЭС создает серьезные экологические и социальные проблемы, оказывая существенное негативное влияние на состояние здоровья и условия жизнедеятельности людей на обширных территориях.

Преодоление негативных последствий радиационных аварий признано приоритетной задачей социально-экономического развития нашей страны и одной из стратегических целей государства в области лесных отношений. Достоверная информация о состоянии лесов на загрязненных радионуклидами территориях является необходимым условием разработки обоснованных планов ведения лесного хозяйства на этих территориях.

В результате аварии на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г. радиоактивному загрязнению подверглось около 60 тыс. км² территории европейской части России (Руководство по ведению..., 1997). Наибольшая плотность загрязнения - более 40 Ки/км² - отмечена в Брянской области.

За прошедшее с аварии на Чернобыльской АЭС время радионуклиды, поступившие в наземные экосистемы, стали частью биосферы, вовлечены в биосферные процессы и подчиняются законам экологии. Их присутствие обуславливает изменение естественных свойств лесных экосистем, ведет к формированию фитоценозов с особыми условиями роста и развития растений. Ионизирующее излучение способно как ингибировать, так и стимулировать ростовые процессы, изменяя морфофизиологические параметры растительных организмов и их сообществ (Тимофеев-Ресовский, 1962; Тихомиров, 1972; Алексахин, 1993; Щеглов, Цветнова, 2001; Спиридонов, 2001; и др.).

Изучение особенностей роста деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как одной из основных лесообразующих пород Брянской области, на территориях, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС, представляет значительный научный интерес и имеет большое практическое значение для организации лесохозяйственной деятельности.

Цель работы заключалась в дендрохронологическом исследовании динамики радиального прироста сосны обыкновенной в средневозрастных и приспевающих сосняках-зеленомошниках в лесорастительном районе сосновых лесов Полесской низменности Брянской области, загрязненных радионуклидами вследствие аварии на Чернобыльской АЭС.

Задачи исследования:

Изучить особенности динамики радиального прироста древесины деревьев разных категорий состояния в средневозрастных и приспевающих насаждениях сосны обыкновенной, загрязненных радионуклидами, на разных стадиях развития радиационной аварии.

Дать количественную оценку изменений радиального прироста деревьев сосны обыкновенной в зависимости от плотности загрязнения почвы радионуклидами.

Оценить санитарное состояние сосновых древостоев после 30 лет произрастания на землях лесного фонда, загрязненных радионуклидами, в зоне с плотностью загрязнения более 40 Ки/км² (по цезию-137).

Разработать предложения по совершенствованию методов радиационного мониторинга лесов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Хроническое ионизирующее облучение средневозрастных и приспевающих сосняков-черничников Брянской области, загрязненных радионуклидами вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, является фактором, не повлекшим ухудшения их санитарного состояния, но существенно повлиявшим на динамику радиального прироста древесины части древостоев главной лесобразующей породы.

2. Качественные особенности воздействия ионизирующего облучения на рост деревьев (ускорение или замедление) и их количественные показатели определяются плотностью загрязнения почвы радионуклидами и варьируют в пространстве и времени в зависимости от конкретных условий, включая физиологическое состояние деревьев, фенологические сроки формирования прироста (весенний или летний), а также стадии развития радиационной аварии, различающиеся элементным составом радионуклидов и их локализацией в пространстве насаждения.

3. В силу независимого характера действия радиологических, лесоводственных и погодно-климатических факторов воздействие их комплекса на радиальный прирост деревьев отличается неоднозначностью: каждому значению любого из факторов может соответствовать несколько значений результирующего признака и - в зависимости от конкретной ситуации - под действием хронического ионизирующего излучения может происходить как стимулирование, так и супрессия роста годичных колец древесины.

Научная новизна:

- разработаны алгоритмы количественной оценки воздействия ионизирующего облучения на радиальный прирост древесины деревьев в сосновых насаждениях, загрязненных радионуклидами, адаптированные к разным периодам развития аварии на Чернобыльской АЭС;
- получены количественные показатели, характеризующие особенности влияния ионизирующего облучения на динамику радиального прироста сосны обыкновенной в связи с фенологическими сроками его формирования и физиологическим состоянием деревьев; проанализирована изменчивость показателей эффекта воздействия радиационного фактора на радиальный прирост в зависимости от времени, прошедшего с момента выброса радионуклидов из разрушенного блока АЭС;
- выявлены количественные зависимости, характеризующие влияние радиационного фактора на радиальный прирост деревьев сосны в разные периоды после аварии в связи с пространственной изменчивостью плотности загрязнения почв радионуклидами;
- проведен анализ изменения запаса древесины в насаждении, загрязненном радионуклидами, в течение 30 лет.

Практическая значимость:

- разработана и рекомендована производству математически оптимизированная схема отбора проб древесины, позволяющая получать статистически достоверные характеристики хода роста сосновых насаждений при радиационном мониторинге лесов с требуемой точностью при оптимальных затратах труда и времени;
- материалы исследования могут быть использованы при принятии органами управления лесным хозяйством решений по использованию, воспроизводству, охране и защите лесов с учетом выявленных особенностей адаптации сосны обыкновенной к

условиям произрастания на загрязненных территориях, а также для прогнозирования динамики хода роста сосновых древостоев в этих условиях;

- результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе при изучении радиационной экологии леса в учебных заведениях лесохозяйственного и природоохранного профиля.

Апробация работы.

Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских работ, проводившихся Всероссийским НИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства в 2009-2016 гг. по Программе совместной деятельности по преодолению последствий Чернобыльской катастрофы в рамках Союзного государства.

Основные положения диссертации и ее отдельные разделы представлены на научной конференции молодых ученых, посвященной 75-летию ФГУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (г. Пушкино Московской обл., 2009 г.), международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы лесного комплекса» Брянск, 2009 и 2010 гг.) и «Наука о лесе XXI века», посвященной 80-летию Института леса НАН Беларуси (Гомель, 2010 г.), международном научно-практическом семинаре «Радиоэкология, охрана и защита леса: проблемы комплексного мониторинга» (г. Пушкино Московской обл., 2012 г.), международной научно-практической конференции «Инновации и технологии в лесном хозяйстве» (Санкт-Петербург, 2013, 2014 гг.), на международных семинарах по совершенствованию методов радиоэкологического лесного мониторинга (Москва, Пушкино Московской области, Гомель, Могилев, 2010-2013 гг.), на конкурсе молодых ученых и аспирантов организаций, подведомственных Рослесхозу, в 2013 г.

Материалы диссертации включены в отчетную научно-техническую документацию плановых конкурсных НИОКР отдела радиационной экологии и пирологии леса ФБУ ВНИИЛМ в рамках исследований воздействия ионизирующих излучений на состояние лесных древостоев и осуществлению научно-методического обеспечения федеральных целевых программ по преодолению последствий радиационных аварий и катастроф.

Личное участие автора. В диссертации приведены данные, полученные при личном участии автора на всех этапах проведения работ: определения цели и задач

научных исследований, разработки программы и методики проведения всего комплекса полевых и лабораторных исследований, сбора, анализа и математико-статистической обработки экспериментального материала, выполнения измерительных дендрометрических работ, обобщении полученных результатов и подготовки публикаций.

Публикации. По материалам научных исследований опубликовано 17 научных трудов, из них 2 - в изданиях, входящих в Перечень ВАК основных ведущих журналов и изданий.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, основных выводов и предложений, списка использованных источников из 324 библиографических наименований, в том числе 46 – на иностранных языках, изложена на 158 страницах, включая 12 рисунков и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 Воздействие загрязнения природной среды радионуклидами на древесно-кустарниковую растительность

В главе приведен обзор более 100 научно-технических публикаций (в том числе более 30 на иностранных языках) по проблемам воздействия острого и хронического ионизирующего облучения на лесную растительность. Дано краткое изложение результатов исследований особенностей загрязнения радионуклидами лесных территорий вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 года (Ипатьев и др., 1994, 1999; Израэль, 1996, 2006; Марадудин и др., 2001; Щеглов, Цветнова, 2001, 2004) и последствий острого облучения древесной растительности (Карабань и др., 1979, 1980; Спиридонов и др., 1989; Козубов, Таскаев, 1990; Тихомиров, Щеглов, 1994; Абатуров и др., 1996), рассмотрены основные закономерности накопления, распределения и миграций радионуклидов цезий-137 и стронций-90 в структурных частях древесных растений и в системе «почва-растение» (Щеглов и др., 1993, 1999; Мухамедшин и др., 1996; Богачев и др., 2000; Репях и др., 2000; Булавик, Переволоцкий, 2003; Булко, 2003), последствия длительного действия ионизирующих излучений сравнительно небольшой интенсивности на растительность (Тимофеев-Ресовский, 1957; Криволуцкий и др., 1988; Кузин, 1991, 1993; Романов,

Спирин, 1991; Алексахин, 1993), изменения санитарного состояния древостоев (Панфилов, 1990; Панфилов и др., 1990) и др.

В Руководстве по ведению лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения от аварии на Чернобыльской АЭС (на период 1997 - 2000 гг.) (Марадулин и др., 1997) зафиксировано, что в зависимости от дозы облучения может проявляться как угнетение, так и стимуляция роста древесных растений. В то же время в зависимости от конкретных условий одни и те же дозы радиации могут оказывать как негативное влияние, так и ускорять ростовые процессы (Гродзинский, 1989; Глазун, 1998; Скок, 2005).

Анализ современного состояния радиационной экологии свидетельствует о том, что вопрос отдаленных последствий воздействия радиоактивного загрязнения на лесные экосистемы и их биологической устойчивости все еще остается недостаточно изученным (Раздайводин, Марадулин, 2014). Исследованиям динамики роста годовых колец древесины чаще всего отводится вспомогательная роль по отношению к другим направлениям исследований в лесах, загрязненных радионуклидами, а сами исследования в основном имеют описательный характер. (Мусаев, 1993, 1995).

Глава 2 Объект и район исследований

Леса Брянской области относятся к лесорастительной зоне хвойно-широколиственных лесов и входят в лесной район хвойно-широколиственных лесов европейской части Российской Федерации. Общая площадь сосновых лесов - 427,7 тыс. га (39%), около 25 % которых относятся к лесорастительному району сосновых лесов Полесской низменности, наиболее пострадавшему в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Загрязнение радионуклидами территорий Клинцовского и Злынковского лесничеств отмечено на площади соответственно 152,4 тыс. га, в том числе более 2,4 тыс. га с плотностью загрязнения свыше 40 Ки/км². Для распределения плотности загрязнения территорий лесного фонда отчетливо выражена неравномерность (рисунок 1).

Большую часть (более 45%) загрязненных лесов области составляют хозяйственно ценные хвойные насаждения разных возрастов, среди которых преобладают средневозрастные и молодняки. Высокой степени загрязнения почв

соответствует и уровень содержания радионуклидов в лесных ресурсах: практически на всей территории лесничеств отмечен самый высокий в России уровень содержания ^{137}Cs в древесине растущих деревьев – более 550 Бк/кг.

В настоящее время радиационная обстановка в лесах Клинцовского и Злынковского лесничеств в основном определяется присутствием долгоживущего радионуклида цезий-137; мощность дозы колеблется в диапазоне от 0,15...0,20 до 5 мкЗв/ч, однако имеются локальные участки с более высокими уровнями ионизирующего излучения. Плотность загрязнения почвы в исследованных насаждениях по данным измерений в 2010 г. колебалась от 2,6 до 156 Ки/км², достигая в отдельных локальных участках 275 Ки/км²(по цезию-137).

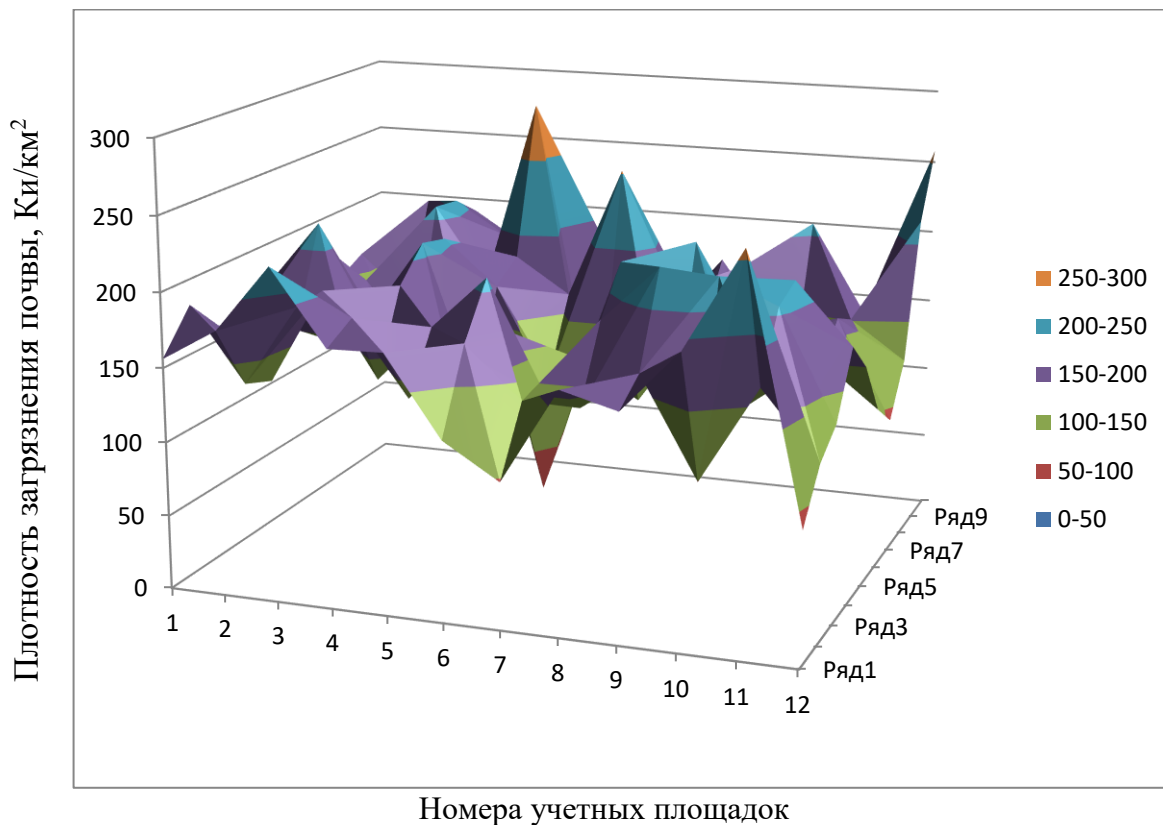


Рисунок 1. Распределение плотности загрязнения почвы радиоцезием в опытном насаждении Красногорского участкового лесничества по данным измерений в 2010 г.

Полевые исследования по теме диссертации проведены в средневозрастных и приспевающих чистых сосняках зеленомошной группы типов леса – преимущественно в сосняках-черничниках II класса бонитета, произрастающих на свежих супесчаных

почвах (тип условий произрастания В₂-В₃) на равнинных или повышенных участках местности). Основной объем полевых исследований выполнен на 12 постоянных и 10 временных пробных площадях.

Глава 3 Методика исследований

Методика исследований разработана в соответствии с программными целями и задачами диссертации, исходя из понятия о лесной древесной растительности как составной части биогеоценоза и радиальном приросте древесины как объективном показателе комплексного влияния факторов внешней среды на древесную растительность.

Полевые и лабораторные радиометрические исследования проведены в 2010-2015 гг. согласно действующим инструкциям, регламентирующим определение общих параметров радиационной обстановки в насаждениях (значений плотности потока α , β -частиц и мощности экспозиционной дозы), активности радионуклидов в объемных образцах почвы, древесины, коры, хвои и др., плотности загрязнения почвы радионуклидами.

Закладка, обработка и оформление пробных площадей проводили в соответствии с правилами ведения лесотаксационных работ (ГОСТ 16128-70; ОСТ 56-69-83). В процессе сплошного таксационного перечета на пробных площадях осуществляли оценку санитарного состояния деревьев по внешним признакам по стандартной 6-балльной шкале.

При сборе, транспортировке, первичной обработке приростных кернов и датировке годовичных колец древесины руководствовались общепринятыми методами (Битвинскас, 1974). Отбор кернов на постоянных пробных площадях проводили из стволов 10-15 живых деревьев разных категорий состояния (по 2-4 керна на высоте 1,3 м). На временных площадях керны отбирали из 3-5 деревьев лучшей категории состояния на высоте ствола от 0,3 до 20 м. Измерения радиального прироста вели с использованием бинокулярного микроскопа МБС-1 с точностью до 0,05 мм.

В общей сложности обследовано более 3 тыс. модельных деревьев, отобрано более 300 проб почвы и растительных образцов для определения содержания радионуклидов, взято 450 приростных кернов из деревьев сосны обыкновенной.

При обработке экспериментального материала использованы компьютерные программы по математической статистике на базе стандартного пакета программ Excel-2007.

Имеющийся опыт дендрохронологических исследований свидетельствует о том, что размер радиального прироста деревьев является показателем, интегрирующим разнонаправленные воздействия многочисленных постоянных и переменных глобальных и локальных факторов, включающих не только разные типы условий произрастания, различия в погодных ситуациях разных лет, возрастные изменения в динамике роста деревьев, но и микростациальные особенности участков насаждений, индивидуальную устойчивость растений, положение дерева в насаждении и т.п. (Шиятов, 1973, 1986, 2000; Мусаев, 1993; Матвеев, 1999; и др.).

В связи с этим на начальном этапе исследования проведена разработка методических подходов, учитывающих особенности роста лесных насаждений на территориях, загрязненных радионуклидами и позволяющих достоверно вычленить действие радиационного фактора из сложного комплекса причин, определяющих вариативность радиального прироста.

С учетом теоретических положений прикладной радиоэкологии леса (Марадудин и др., 2001) в рамках анализируемого периода выделено три основных стадии развития радиационной ситуации при загрязнении лесов радионуклидами, различающихся элементным составом радионуклидов, их локализацией в пространстве насаждения и спецификой облучения растений. Применительно к району исследований отдельно рассматривались ситуации 1986 года (ранняя стадия, или стадия острого облучения), периода 1997-1989 гг. (промежуточная стадия) и периода после 1989 года (поздняя, или восстановительная стадия). В качестве основного показателя, определяющего степень долговременного воздействия радиационного фактора на ход роста деревьев сосны, принята плотность загрязнения почвы радионуклидами: известно (Раздайводин и др., 2009), что содержание радионуклидов в древесине и других структурных элементах сосны существенно варьирует во времени, но при этом в целом соответствует плотности загрязнения почвы.

На основе приростных проб, отобранных в насаждениях, незагрязненных радионуклидами, проведен дендроклиматический анализ, позволивший разработать

множественно-регрессионные уравнения, количественно оценивающие величину радиального прироста сосны в районе исследований в зависимости от погоды отдельных месяцев года. Однако апробация способа определения эффекта радиационного фактора путем сопоставления фактического радиального прироста и прироста, рассчитанного по уравнениям регрессии, в насаждениях, загрязненных радионуклидами выявила его малую эффективность из-за наличия значительной неопределенности, поскольку стандартные погрешности уравнений превышают рекомендуемые (Орлов, 2002) значения.

В связи с этим в качестве основного использован модернизированный традиционный методологический подход, обычно применяемый в биоценологических исследованиях, а именно подход по схеме «опыт – контроль», т.е. сравнение радиального прироста в древостоях, подвергшихся и не подвергшихся действию изучаемого фактора. Алгоритм расчетов, использованный в диссертации, включал показатели ширины годичных колец в опытных и контрольных древостоях не только в определенные периоды после аварии на Чернобыльской АЭС, но и их показатели в этих насаждениях в течение десяти лет до аварии.

В ходе работ по оптимизации методики исследований по теме диссертации показана необходимость отдельного анализа динамики раннего и позднего прироста древесины и дифференцированного анализа деревьев разных категорий санитарного состояния в силу существенных различий динамики роста их годичных колец (рисунок 2).

Выявлена статистически достоверная сопряженность динамики радиального прироста древесины на разной высоте ствола деревьев сосны от 0,3 до 20 м (коэффициент корреляции $0,70 < r < 0,85$ при вероятности $P > 98 \%$), позволяющие использовать результаты измерений на высоте 1,3 м для характеристики хода роста древесины во всем диапазоне высот.

На основе выявленных математических закономерностей временной и пространственной изменчивости ширины годичных колец деревьев сосны в районе исследований определено оптимальное количество модельных деревьев и приростных кернов, отбираемых из одного дерева, для достижения необходимой статистической точности дендрометрических работ.

Глава 4 Радиальный прирост сосны в насаждениях, загрязненных радионуклидами, в ранней и промежуточной стадиях развития аварии

Количественную оценку влияния радиации на радиальный прирост древесины сосны в ранней стадии аварии на ЧАЭС проводили на основе результатов измерения фактического прироста 1986 г. в загрязненном радионуклидами ($Z_{(n)test}$) и контрольном ($Z_{(n)contr}$) насаждениях и определения соответствующих ожидаемых значений прироста при отсутствии радиационного фактора ($ZR_{(n)test}$ и $ZR_{(n)contr}$). Два последних показателя рассчитывали способом экстраполяции по уравнениям регрессии на фактор времени за период 1976-1985 гг. Расчет эффекта воздействия радиационного фактора на радиальный прирост древесины (ΔW_{Zrel}) проводили по формуле

$$\Delta W_{Zrel} = 100[1 - ZR_{(n)test} * Z_{(n)contr} * Z_{(n)test}^{-1} * ZR_{(n)contr}^{-1}], \quad (1)$$

где ΔW_{Zrel} , - показатель относительного эффекта воздействия радиационного фактора на радиальный прирост древесины 1986 г. %; $Z_{(n)test}$ и $Z_{(n)contr}$ – фактический прирост древесины в опыте и контроле, мм; $ZR_{(n)test}$ и $ZR_{(n)contr}$ – ожидаемый (расчетный) прирост в опыте и контроле, мм.

Оценки параметра ΔW_{Zrel} , близкие к 0 %, указывают на отсутствие влияния радиационного фактора, положительные оценки - на стимулирующий эффект ионизирующего облучения, отрицательные – на эффект супрессии, ведущий к потерям прироста.

Анализ приростных кернов из деревьев сосны на пробных площадях с плотностью загрязнения почвы менее 40 Ки/км² (по состоянию на 2010 г.) не выявил каких-либо изменений радиального прироста деревьев, которые можно было бы связать с влиянием радиационного фактора. В связи с этим основное внимание обращено на лесные насаждения с более высокими уровнями радиоактивного загрязнения (от 70 до 275 Ки/км²), которые в районе исследований локализованы в Красногорском участковом лесничестве Клинцовского лесничества.

Как показал анализ, уменьшение прироста древесины в 1986 году, в стадии **острого облучения**, в этих древостоях наблюдалось лишь в начале вегетационного периода. Потери раннего (весеннего) прироста составили: 13,1 % для деревьев без признаков ослабления, 25,2 % для ослабленных, 8,9 % для сильно ослабленных и 15,4 % для усыхающих деревьев (все оценки достоверны с вероятностью более 95 %).

Статистически достоверные потери прироста поздней (летней) древесины не выявлены, что, по-видимому, обусловлено уменьшением плотности поверхностного загрязнения зеленой кроновой фитомассы во второй половине вегетационного периода в результате перемещения большей части выпавших радионуклидов под полог леса.

Уменьшение раннего прироста древесины деревьев сосны в насаждении, загрязненном радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС, при несущественном изменении размеров позднего слоя древесины определили в 1986 году меньший против ожидаемого размер общего годового прироста деревьев всех категорий состояния. Оценки потерь общего прироста по двум вариантам расчета составили: 5,1 % при вероятности $P > 80$ % у деревьев без признаков ослабления, 13,6 % при $P > 95$ % у ослабленных деревьев, 5,7 % при $P > 80$ % у сильно ослабленных деревьев и 9,5 % при $P > 95$ % у усыхающих деревьев.

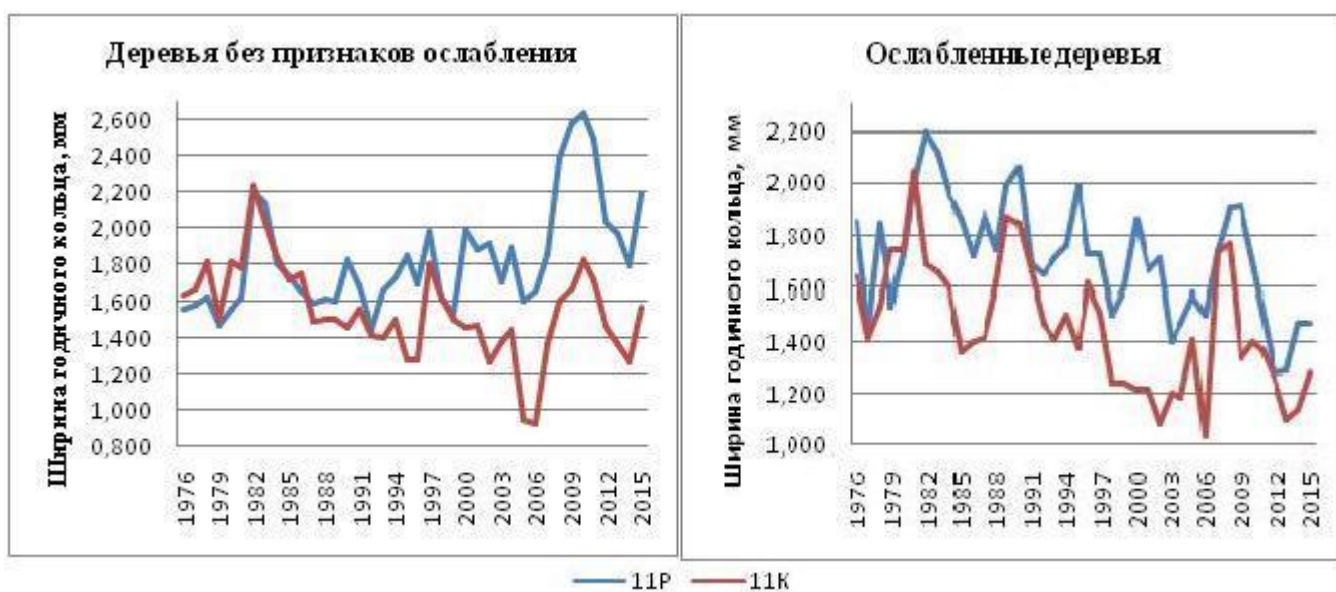


Рисунок 2. Динамика ширины годичных колец деревьев сосны на загрязненной радионуклидами (11Р) и контрольной (11К) пробных площадях с 1986 по 2015 гг.

Для определения изменений радиального прироста древесины под влиянием радиационного фактора **в промежуточной стадии** развития радиационной аварии (1987-1989 гг.) использовали фактические значения среднего годового прироста в указанный период и в десятилетний период, предшествовавший аварии на ЧАЭС. Показатель эффекта воздействия радиационного фактора на текущий радиальный прирост ($\Delta W_{z_{rel}}$) рассчитывали из соотношения:

$$\Delta W_{Z_{rel}} = 100 * Z_{t(test)} * Z_{bas(contr)} * Z_{bas(test)}^{-1} * Z_{t(contr)}^{-1} - 100 \pm t * m_{iz} \quad (2)$$

где $\Delta W_{Z_{rel}}$ - показатель относительного эффекта воздействия радиационного фактора на текущий радиальный прирост, %; $Z_{t(test)}$ и $Z_{t(contr)}$ – оценки среднего годового текущего прироста в 1987-1989 гг. соответственно в опытном и контрольном древостоях, мм; $Z_{bas(test)}$ и $Z_{bas(contr)}$ – то же в 1976-1985 гг., мм; t – критерий Стьюдента; m_{iz} – стандартная (среднеквадратическая) погрешность.

Установлено, что в годы промежуточной стадии развития радиационной ситуации доминировали тенденции к негативному воздействию ионизирующего облучения деревьев на рост ранней и позитивному воздействию на рост поздней древесины. Показатели воздействия радиационного фактора на ранний прирост равны -13,8 % (вероятность $P > 80$ %) для ослабленных, -20,0 ($P > 95$ %) для сильно ослабленных и -12,1 % ($P > 68$ %) для усыхающих деревьев; на поздний прирост – +30,3 и +13,1 % (в обоих случаях $P > 80$ %) соответственно для деревьев без признаков ослабления и ослабленных деревьев.

Существенное изменение общего прироста в промежуточной стадии развития аварии выявлено у деревьев без признаков ослабления (увеличение прироста на 13,9; $P > 80$ %) и сильно ослабленных деревьев (уменьшение прироста на 9,0 %; $P > 68$ %).

В остальных случаях показатели влияния радиационного фактора на прирост несут незначительные.

Глава 5 Динамика радиального прироста сосны в поздней стадии развития радиационной аварии

Экологическая обстановка в лесных насаждениях в третьей стадии развития радиационной аварии (после 1989 г.) существенно отличается от условий, складывающихся в двух первых стадиях, поскольку доминантным способом поступления радионуклидов в растения становится корневое питание и основную роль играет внутреннее облучение.

Расчетами по формуле (2) статистически достоверного влияния радиационного фактора на динамику радиального прироста древесины деревьев сосны в древостоях с плотностью загрязнения почвы менее 40 Ки/км² не выявлено. При анализе данных, полученных на пробных площадях с наиболее высокой плотностью загрязнения почвы,

установлены диаметрально противоположные тренды изменений радиального прироста древесины у деревьев разных категорий санитарного состояния. Выявлено наличие эффекта стимулирования в период с 1990 по 2015 г. роста ранней и поздней древесины деревьев без признаков ослабления и – в отдельные периоды - ослабленных деревьев, поздней древесины сильно ослабленных и усыхающих деревьев, а также замедление роста ранней древесины сильно ослабленных и усыхающих деревьев.

Наиболее существенное положительное влияние хроническое ионизирующее облучение оказало на прирост деревьев без признаков ослабления: за период с 1990 по 2009 г. прирост ранней древесины был на 30,8 %, а прирост поздней древесины на 54,0 % больше, чем в контрольном древостое. Средний размер годичных колец в целом у деревьев данной категории состояния в опытном древостое оказался на 41,0 % больше, чем в контрольном.

У деревьев в категории «ослабленные» выявлено крайне незначительное стимулирующее воздействие радиационного фактора на рост годичных колец (около 1,0 %), не выходящее за пределы статистической погрешности измерений.

У сильно ослабленных и усыхающих деревьев замедление роста ранней древесины (соответственно на 22,0 и 14,3 %) в сочетании с позитивной реакцией позднего прироста на радиационный фактор (на 17,5 и 2,0 %) обусловило незначительное, статистически недостоверное уменьшение среднего размера годичных колец – на 7,1 и 8,3 % соответственно.

На основе полученных оценок воздействия радиационного фактора на радиальный прирост деревьев разных категорий состояния проведено моделирование динамики основных таксационных характеристик (включая фактический запас древесины) исследованных древостоев в Красногорском участковом лесничестве в возрастном диапазоне от 50 до 80 лет. При одинаковых исходных показателях в момент аварии на Чернобыльской АЭС фактический запас древесины деревьев, которые при проведении полевых обследований отнесены к категории «без признаков ослабления», спустя 30 лет вследствие стимулирующего эффекта радиационного фактора оказался на 52,5 % больше ожидаемого в соответствии с таблицами хода роста сомкнутых сосновых насаждений II бонитета (Захаров и др., 1962). Суммарный фактический запас

ослабленных, сильно ослабленных и усыхающих деревьев оказался несколько меньше (на 2,0 %) ожидаемого запаса древесины.

Глава 6 Пространственная изменчивость радиального прироста деревьев сосны в связи с плотностью загрязнения почвы радионуклидами

Широкий диапазон плотности загрязнения почвы в локальных участках древостоев в районе исследований (от 2,6 до 275 Ки/км² в 2010 году) обусловил возможность определения ее граничных значений, при которых начинает проявляться воздействие хронического ионизирующего облучения на радиальный прирост, а также возможность определения градиента изменений прироста на единицу изменения плотности загрязнения почвы. При анализе в качестве функционального параметра использовали приростной индекс, рассчитываемый как частное от деления среднегодовых оценок прироста в данный период времени после аварии на Чернобыльской АЭС на его оценки в десятилетний период перед аварией. Поскольку прямые измерения удельной массовой активности радионуклидов в участках исследований в период до 2010 года не проводили, были использованы расчетные значения этого показателя с учетом скорости естественного распада радиоцезия.

Как показали расчеты, граничным в условиях сосняков-черничников лесорастительного района сосновых лесов Полесской низменности Брянской области являлась плотность загрязнения почвы радиоцезием, равная 70 Ки/км². Положительная статистическая связь между плотностью загрязнения почвы и значениями приростного индекса деревьев сосны в категории «без признаков ослабления» выявлена как для раннего, так и для позднего прироста древесины в годы промежуточной стадии и в каждый пятилетний период восстановительной стадии радиационной аварии (таблица 1). При этом в каждый последующий период с момента аварии наблюдалась достоверная тенденция к увеличению дополнительного прироста древесины под влиянием радиационного фактора при одних и тех же значения содержания радиоцезия в почве, что, возможно, связано с накоплением вещества радионуклида в структурных элементах деревьев. Отмечено, что увеличению плотности загрязнения почвы в одном насаждении в сравнении с другим на 10 Ки/км² в 1987-1989 гг. соответствовало увеличение индекса раннего прироста на 1,2% и позднего прироста на 6,8 %, а к 2005-2009 гг. показатели градиента возросли соответственно до 6,9 и 19,1 %.

Таблица 1. Статистические показатели зависимости индекса радиального прироста деревьев сосны (I_{z_t} , %) в древостоях Красногорского участкового лесничества от плотности загрязнения почвы радиоцезием (^{137}Cs , Ки/км²). Результаты корреляционно-регрессионного анализа

Годы	Коэффициент корреляции и параметры уравнения зависимости приростного индекса от плотности загрязнения почвы радионуклидами		
	Показатели корреляции		Уравнение регрессии $I_{z_t} = a + b(^{137}\text{Cs}) + c(^{137}\text{Cs})^2 + d(^{137}\text{Cs})^3$
	$R \pm m_r$	P (%)	
Ранний прирост			
1987-89	0,475±0,340	< 80	$I_{z_t} = 100 - 0,07265(^{137}\text{Cs}) + 0,000695(^{137}\text{Cs})^2 - 0,000000803(^{137}\text{Cs})^3$
1990-94	0,768±0,261	> 95	$I_{z_t} = 100 - 0,27914(^{137}\text{Cs}) + 0,001881(^{137}\text{Cs})^2 - 0,00000152(^{137}\text{Cs})^3$
1995-99	0,342±0,384	< 80	$I_{z_t} = 100 - 0,07418(^{137}\text{Cs}) + 0,000977(^{137}\text{Cs})^2 - 0,00000134(^{137}\text{Cs})^3$
2000-04	0,625±0,318	> 90	$I_{z_t} = 100 - 0,26666(^{137}\text{Cs}) + 0,003178(^{137}\text{Cs})^2 - 0,00000522(^{137}\text{Cs})^3$
2005-09	0,443±0,366	< 80	$I_{z_t} = 100 - 0,02655(^{137}\text{Cs}) + 0,004501(^{137}\text{Cs})^2 - 0,00000895(^{137}\text{Cs})^3$
Поздний прирост			
1987-89	0,446±0,365	< 80	$I_{z_t} = 100 + 0,10376(^{137}\text{Cs}) + 0,000385(^{137}\text{Cs})^2 - 0,000000723(^{137}\text{Cs})^3$
1990-94	0,859±0,209	> 95	$I_{z_t} = 100 - 0,31718(^{137}\text{Cs}) + 0,003567(^{137}\text{Cs})^2 - 0,00000428(^{137}\text{Cs})^3$
1995-99	0,327±0,386	< 80	$I_{z_t} = 100 - 0,16657(^{137}\text{Cs}) + 0,002953(^{137}\text{Cs})^2 - 0,00000485(^{137}\text{Cs})^3$
2000-04	0,788±0,251	> 95	$I_{z_t} = 100 - 0,36336(^{137}\text{Cs}) + 0,004122(^{137}\text{Cs})^2 - 0,00000496(^{137}\text{Cs})^3$
2005-09	0,592±0,329	> 80	$I_{z_t} = 100 - 0,71781(^{137}\text{Cs}) + 0,009183(^{137}\text{Cs})^2 - 0,00001135(^{137}\text{Cs})^3$

Примечания: 1. Категории деревьев определены при проведении обследований насаждений в 2010 г.; 2. (^{137}Cs) – плотность загрязнения почвы радиоцезием, Ки/км².

Достоверная реакция сильно ослабленных и усыхающих деревьев (3-й и 4-й категорий состояния) на разницу в удельной активности радионуклидов в условиях проведенного исследования не выявлена.

Глава 7 Санитарное состояние сосновых древостоев, загрязненных радионуклидами

Анализ проведен на основе определения жизненного состояния деревьев по внешним признакам в соответствии со стандартной шкалой, приведенной в «Санитарных правилах в лесах Российской Федерации» в процессе проведения лесоводственно-таксационных обследований насаждений (таблица 2).

Установлено, что долговременное воздействие ионизирующего излучения не вызвало визуально различимых патологических изменений роста и развития деревьев и не оказало отрицательного действия на биологическую устойчивость насаждения. Сформировавшаяся к настоящему времени структура насаждения с высокой плотностью загрязнения радионуклидами характеризуется несколько большей в

сравнении с контролем долей деревьев без визуальных признаков ослабления (5,41 % против 3,86 % в контроле) и меньшей долей сильно ослабленных деревьев (24,59 % против 30,90 %).

Таблица 2. Таксационные характеристики 75-летних сосновых древостоев II класса бонитета на опытной и контрольной пробных площадях в Красногорском участковом лесничестве (по данным пересчетов в 2010 г.)

Показатель	Категории состояния деревьев						Деревья 1-4-й категорий	Все деревья
	1	2	3	4	5	6		
Опытная пробная площадь, плотность загрязнения – 156 Ки/км ²								
Число деревьев, шт.	20	122	91	60	16	61	293	370
Густота древостоя, шт./га	80	488	364	240	64	244	1172	1480
Доля деревьев, %	5,41	32,97	24,59	16,22	4,32	16,49	79,19	100
Средний диаметр, см	22,9	22,1	19,0	14,0	11,6	11,3	19,5	17,8
Средняя высота, м	22,0	21,8	21,6	17,8	12,5	11,5	20,9	18,1
Контрольная пробная площадь, плотность загрязнения – 2,6 Ки/км ²								
Число деревьев, шт.	9	79	72	42	8	23	202	233
Густота древостоя, шт./га	45	395	360	210	40	115	1010	1165
Доля деревьев, %	3,86	33,91	30,90	18,03	3,43	9,87	86,70	100,00
Средний диаметр, см	25,5	24,9	21,2	15,7	13,4	8,5	21,7	20,1
Средняя высота, м	20,1	19,8	18,9	16,3	13,2	9,0	18,8	17,6

Однако выявленные отклонения не выходят за пределы естественной вариативности нормального состояния приспевающих сосновых насаждений. В загрязненных радионуклидами, как и в контрольных насаждениях не обнаружено визуальных проявлений тератогенеза в морфологии ветвей и зеленой кроновой фитомассы, не отмечено повреждений деревьев хвоегрызущими и стволовыми насекомыми и развития гнилевых болезней.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Хроническое ионизирующее облучение средневозрастных и приспевающих сосняков-черничников Брянской области в зоне со средней плотностью выпадения радиоизотопов в год аварии на Чернобыльской АЭС, равной 280 Ки/км², обусловило устойчивые изменения динамики радиального прироста древесины деревьев сосны обыкновенной в течение последующих 30 лет.

2. Граничная плотность загрязнения почвы радионуклидами, при превышении которой проявлялось воздействие радиационного фактора на радиальный прирост древесины, оценена в 70 Ки/км². Эффект радиационного фактора при одной и той же плотности загрязнения почвы радионуклидами варьировал в зависимости от физиологического состояния деревьев, фенологических сроков формирования прироста, а также стадии развития радиационной аварии.

3. В год выброса радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС зафиксировано достоверное уменьшение слоя весенней древесины в среднем на $17,3 \pm 2,6$ % в годовых кольцах деревьев сосны всех категорий состояния (1. без ослабления, 2. ослабленные, 3. сильно ослабленные, 4. усыхающие). Воздействие радиационного фактора на прирост поздней древесины не выявлено ни для одной из категорий деревьев сосны.

4. В промежуточной стадии радиационной аварии (1987-89 гг.) ранний прирост деревьев лучшей категории состояния (без признаков ослабления) восстановился; ранний прирост остальной части древостоя оказался ниже показателей контрольного насаждения в среднем на $16,0 \pm 1,5$ %. В дальнейшем последовательно нарастал положительный эффект воздействия радиации на ранний прирост деревьев без признаков ослабления, достигнув $71,8 \pm 9,3$ % в 2005-2009 гг., сменившийся уменьшением этого показателя до $50,2 \pm 10,9$ % в 2010-2015 гг. Влияние радиационного фактора на ранний прирост ослабленных деревьев достоверно не проявлялось. У сильно ослабленных и усыхающих деревьев угнетение роста ранней древесины, отмеченное в первые четыре года после аварии, достаточно отчетливо проявлялось и в дальнейшем, достигнув максимальной величины (соответственно $36,7 \pm 7,9$ и $37,5 \pm 4,3$ %) в 2005-2009 гг.

5. Прирост летней древесины деревьев без признаков ослабления в течение 1987-2010 гг. характеризуется последовательным возрастанием стимулирующего действия радиации, достигшего максимума, равного $70,4 \pm 10,1$ % в 2005-2009 гг. (в 2010-2015 гг. зафиксирован спад до $51,3 \pm 15,1$ %), а у ослабленных деревьев положительный эффект прослежен до 2000-2004 гг., когда он достиг максимального уровня в $25,6 \pm 10,3$ %. У сильно ослабленных и усыхающих деревьев достоверные изменения прироста поздней древесины, обусловленные радиационным фактором, не выявлены, за исключением

периода 2005-2009 гг., когда отмечено незначительное ускорение роста летней древесины.

6. Статистически достоверная связь размера радиального прироста с плотностью загрязнения почвы радионуклидами выявлена только для деревьев лучшего физиологического состояния (без ослабления). Интенсификация роста весенней древесины пропорционально плотности радионуклидного загрязнения почвы в разных древостоях оценивается градиентом, равным 1,2 % в год при возрастании содержания радионуклидов в почве на каждые 10 Ки/км² (в диапазоне от 70 до 490 Ки/км²) в период с 1987 по 1989 г.; в 2005-2009 гг. этот показатель возрос до 6,9 %/10 Ки/км² (в диапазоне от 70 до 315 Ки/км²); соответствующие оценки градиента для прироста летней древесины равны, соответственно, 1,7 и 16,1 %/10 Ки/км².

7. Выявленные отклонения хода роста сосновых насаждений Брянской области, загрязненных радионуклидами вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, указывают на необходимость систематического слежения за изменениями их состояния в будущем. В процессе исследований разработана и предложена для использования в производственных условиях статистически оптимизированная методика отбора приростных кернов и математический алгоритм оценки влияния внешнего (радиационного) фактора на ход роста деревьев в рамках радиационного мониторинга лесов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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.
2. Белов, А.А. Особенности радиального прироста древесины в ослабленных сосняках-черничниках Брянской области, загрязненных радионуклидами / А.А. Белов [Электронный ресурс] // Лесохоз. информ. : электрон. сетевой журн. – 2017. – № 1. – С. 42-51.

Статьи в сборниках научных трудов и отраслевых журналах

3. Белов, А.А. Исследование динамики содержания радиоцезия в компонентах лесных биоценозов методом факторного анализа / А.А. Белов // Актуальные проблемы лесного комплекса / Под ред. Е.А. Памфилова. Сборник науч. трудов по итогам международной науч.-техн. конф. Вып. 23. – Брянск: БГИТА, 2009. С. 86-90.
4. Белов, А.А. Особенности динамики содержания ¹³⁷Cs в почве и фитокомпонентах сосновых древостоев Брянской области в 2003-2008 гг. / А.Н. Раздайводин, А.И. Радин, Д.Ю. Ромашкин, А.А. Белов // Актуальные проблемы лесного комплекса / Под ред. Е.А. Памфилова.

Сборник науч. трудов по итогам международной науч.-техн. конф. Вып. 23. – Брянск: БГИТА, 2009. - С. 113-117.

5. Белов, А.А. Влияние размера выборки на результаты радиоэкологических исследований / А.А.Белов, А.Н. Белов // Актуальные проблемы лесного комплекса / Под ред. Е.А. Памфилова. Сборник науч. трудов по итогам международной науч.-техн. конф. Вып. 25. – Брянск: БГИТА, 2010. - С. 82-85.

6. Белов, А.А. Оценка санитарного состояния древостоев в сосняке-зеленомошнике Брянской области в зоне с плотностью загрязнения почвы цезием-137 свыше 40 Ки/км²/А.А. Белов // Наука о лесе XXI века: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию Института леса НАН Беларуси, Гомель, 17-19 ноября 2010 г. – Гомель.: Институт леса НАН Беларуси, 2010. - С. 387-393.

7. Белов, А.А. Статистическая модель распределения удельной активности цезия-137 по территории локального участка древостоя / А.Н. Раздайводин, А.А. Белов, А.Н. Белов // Лесохоз. информ. : электрон. сетевой журн. – 2011. - № 2. – С. 8-12.

8. Белов, А.А. Сравнительный анализ состояния древостоев сосны Брянской обл. при разной плотности загрязнения почвы цезием-137 / А.Н. Раздайводин, А.А. Белов // Лесохоз. информ. : электрон. сетевой журн. - 2012. - № 1. - С. 16-20.

9. Белов, А.А. Изменчивость удельного содержания радионуклидов в стволовой древесине и коре деревьев сосны / А.А. Белов // Лесное хозяйство. - 2012. - № 5. - С. 28-30.

10. Белов, А.А. Воздействие загрязнения природной среды радионуклидами на древесно-кустарниковую растительность / А.А. Белов // Лесохоз. информ. : электрон. сетевой журн. - 2012. - № 2. - С. 19-31.

11. Белов, А.А. Динамика радиального прироста в сосняках Брянской области в связи с загрязнением почвы цезием-137 / А.А. Белов // Лесное хозяйство. - 2013. - № 2. - С. 18-21.

12. Белов, А.А. Потенциальные изменения прироста сосновых насаждений в зоне аварии на Чернобыльской АЭС под воздействием потепления климата / А.А. Белов // Труды / СПб НИИ лесного хозяйства. - 2013. - № 1. - С. 34-39.

13. Белов, А.А. Особенности текущего прироста древесины в сосняках-зеленомошниках Брянской области, загрязненных радионуклидами / А.А. Белов, А.Н. Белов // Лесное хозяйство. - 2013. - № 4. - С. 27-29.

14. Белов, А.А. Распределение удельной активности радиоцезия по территории соснового насаждения / А.Н. Раздайводин, А.А.Белов, А.Н. Белов // Лесное хозяйство. - 2014. - № 1. - С. 25-26.

15. Белов А.А. Определение изменений прироста древостоев под влиянием естественных и антропогенных факторов // Инновации и технологии в лесном хозяйстве / Тез. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф., 27-28 мая 2014 г. СПб: СПбНИИЛХ, 2014. - С. 24.

16. Белов А.А. Особенности лесопатологического состояния сосновых древостоев Брянской области, подвергшихся радиационному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // Лесохоз. информ. : электрон. сетевой журн. - 2014.- № 1. - С. 11-18.

17. Белов А.А., Белов А.Н. Оптимизированная схема измерений радиального прироста сосновых насаждений, загрязненных радионуклидами // Лесное хозяйство. - 2015. - № 2. - С. 30-32.