

Воздействие загрязнения природной среды радионуклидами на древесно-кустарниковую растительность

А. А. Белов – Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства

Дан обзор научно-технических публикаций по проблеме загрязнения лесов радионуклидами. Приведены сведения о последствиях острого и хронического ионизирующего облучения деревьев в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Ключевые слова: радиационная биология, радиационное загрязнение биосферы, ионизирующее облучение древесной растительности.

RADIONUCLIDE ENVIRONMENTAL CONTAMINATION IMPACTS ON TREE AND BUSH VEGETATION - ARTICLE NAME

A. A. Belov – Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry

The review of scientific and technical papers concerning the radionuclide pollution of forests is made. The data on the consequence of keen and chronic ionizing radiation of forest trees in result Chernobyl accident are cited.

Key words: radiation biology, biosphere radioactive contamination, ionizing radiation of tree vegetation.

Исследования динамики роста лесной растительности в условиях загрязнения радионуклидами входят в научную систему знаний, именуемую радиационной биологией (радиобиологией). Начало радиобиологии принято датировать 24 февраля 1896 г., когда Анри Беккерель открыл явление радиоактивности и ее носителей – химические элементы (уран, торий) и продукты их распада: полоний, радий (1898), актиний (1900) и др. До 1921 г. в основном происходило накопление сведений и делались первые попытки осмысления биологических реакций на облучение. В течение двух десятилетий (до 1944 г.) осуществлялась разработка теории точечного тепла, происходило становление фундаментальных принципов количественной радиобиологии, изучение связи эффектов с величиной поглощенной дозы и мутагенного действия ионизирующего излучения в рамках радиационной генетики. Период с 1945 по 1985 г. характеризуется дальнейшим развитием количественной радиобиологии на всех уровнях биологической организации, включая молекулярную и клеточную радиобиологию, разработку биологических способов противолучевой защиты, лечение лучевых поражений и т.п. [53]. Огромное значение имели исследования на биофизической станции «Миассово», проводившиеся под руководством Н. В. Тимофеева-Ресовского. На этом этапе, в частности, осуществлено одно из первых в нашей стране исследование по накоплению изотопов растениями [8], проведена оценка накопления радионуклидов более чем тридцатью видами растений (преимущественно сельскохозяйственных и луговых) [32].

Начало современного, четвертого этапа развития радиобиологии относится к 1986 г. Проблема глобального загрязнения биосферы антропогенными радионуклидами, возникновение которой связано с испытаниями ядерного оружия в атмосфере в 40-х – 70-х годах XX в., аварией на производственном объединении «Маяк» в 1957 г. и других объектах атомной энергетики, не только существенно обострилась после аварии на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 г.), но и привела к качественному изменению содержа-

ния понятий «радиобиология» и «радиационная безопасность».

Опасность радиоактивного загрязнения природы была осознана всеми слоями общества, и социальный аспект проблемы поставил перед радиобиологами принципиально новые задачи. Этому способствовал, прежде всего, масштаб аварии на Чернобыльской АЭС. Радиоактивному загрязнению подверглась огромная территория, охватывающая несколько природно-климатических зон. Продуктами радиоактивных выбросов были загрязнены значительные площади густонаселенных территорий Европы, а наиболее радиологически значимым оказался долгоживущий радионуклид ^{137}Cs . Масса ^{137}Cs и ^{134}Cs , поступивших в атмосферу в процессе аварии, оценивается в $33 \pm 10\%$ общего количества этих радионуклидов, имевшихся в активной зоне Чернобыльской АЭС перед аварией [10]. Доля вещества радиоактивного йода, выброшенного из разрушенного реактора Чернобыльской АЭС, оценивается в 20–25%, доля тугоплавких изотопов (в том числе трансурановых элементов) – в 2–3,5%, сумма всех изотопов (без благородных газов, по состоянию на 6 мая 1986 г.) – 3–4% общего количества, имевшегося в реакторе [25].

Количество ^{137}Cs , загрязнившего территорию Европы, составило 2,1 МКи, из этого количества 1,3 МКи выпало на территории Советского Союза, в том числе 0,514 МКи на территории европейской части России [38].

Общая площадь загрязнения почв Европы ^{137}Cs плотностью свыше 1 Ки/км² достигла 204,1–207,5 тыс. км², в том числе России – 56,5–59,6 тыс. км², Республики Беларусь – 43,5–46,45 тыс. км² и Украины – 37,6–41,84 тыс. км². В странах Восточной и Центральной Европы, а также в Скандинавии радиоактивное загрязнение почвы радиоцезием плотностью свыше 1 Ки/км² выявлено на площади около 60 тыс. км² [26]. Всего в разных странах на территориях, загрязненных радионуклидами, по состоянию на середину первого десятилетия XXI в., проживало около 5 млн чел. [14]. Согласно прогнозу, для достижения доаварийных уровней ^{137}Cs в верхнем слое почв толщиной 5 см на значительной

площади загрязненных территорий потребуются десятилетия, в частности, в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС – от 160 до 350 лет, а очищение от ^{90}Sr произойдет примерно в 2 раза быстрее (за 90–220 лет) [48].

Переходу радиоэкологических исследований на принципиально иной, более высокий уровень способствовала организация сети радиоэкологических стационаров и служб в системе различных ведомств (Госкомгидромета, Комитета по лесу, Минсельхоза и др.) с привлечением к работе специалистов смежных научных дисциплин. Значительно возросли масштабы самих исследований и объемы получаемого экспериментального материала. В результате увеличения финансирования расширилась и обновилась материально-техническая база научных исследований. Рассекречивание большей части работ и материалов, связанных с изучением поведения радионуклидов в объектах природной среды, дозовых нагрузок и т.п., в конце 1980-х гг. в совокупности с новыми научными достижениями способствовало бурному развитию радиоэкологии [63].

Была пересмотрена концепция радиационной защиты окружающей среды. Если ранее на первое место выдвигалась защита человека, то теперь была провозглашена необходимость защиты всей биосферы. Были интенсифицированы работы по новым научным направлениям, таким как: изучение биологического действия малых доз ионизирующих излучений и отдаленных последствий облучения; исследование комбинированных эффектов различных радионуклидов с химическими загрязнителями среды; расшифровка механизмов поражающего и стимулирующего действия излучений низкой интенсивности; поиск принципиально новых средств защиты от хронического облучения [36].

Развитие отечественной радиобиологии как научной дисциплины после Чернобыльской катастрофы связано с именами таких ученых, как Ю. Д. Абатуров, А. В. Абатуров, Р. М. Алексахин, Н. П. Архипов, А. В. Богачев, И. М. Булавик, Н. И. Булко, Д. М. Гродзинский, В. С. Давыдчук, А. М. Дворник, С. И. Душа-Гудым, Ю. А. Израэль,

В. А. Ипатьев, Р. Т. Карабань, Е. В. Квасникова, Г. М. Козубов, Н. Е. Косиченко, В. П. Краснов, А. Д. Кривоуцкий, Ю. Б. Кудряшов, Н. Д. Кучма, И. И. Марадудин, К. Д. Мухамедшин, С. В. Мамин, А. А. Орлов, А. Д. Покаржевский, Г. Н. Романов, В. П. Сидоров, А. И. Таскаев, Ф. А. Тихомиров, Д. А. Спирин, А. И. Щеглов, Б. И. Якушев и др.

Большое внимание было уделено радиобиологическим исследованиям в лесных биогеоценозах. Непосредственно после аварии на Чернобыльской АЭС был проведен анализ последствий острого гамма-облучения [27, 28, 30, 31]. Отмечено, что в зоне, прилегающей к АЭС, при высоких дозах радиации прежде всего погибали деревья сосны, отличающиеся меньшей устойчивостью к радиоактивному воздействию: гибель сосны происходит при поглощенной дозе облучения 50 Гр. Наиболее чувствительны к ионизирующему излучению апикальные точки роста, более устойчивыми оказались камбиальные слои древесины, отмирание которых зафиксировано при дозе радиации в пределах 100–200 Гр [46, 57].

Более устойчивы, чем сосна, оказались деревья дуба, а также кустарники, травы, лишайники и мхи. Повреждение лиственных деревьев и кустарников выражалось в усыхании вершин, для травяных ценозов и мохово-лишайникового покрова в зоне летального поражения было характерно угнетение ростовых процессов и повреждение репродуктивных органов в течение первого вегетационного периода. Отмечено уменьшение флористического состава и обеднение структуры фитоценозов.

В зоне с расчетной поглощенной дозой 10–20 Гр (при максимальной мощности экспозиционной дозы 0,1–0,5 Р/ч) произошла полная гибель молодых экземпляров сосны при частичном омертвлении молодых побегов взрослых деревьев. Наряду с молодняками наиболее пострадали ослабленные насаждения сосняков-беломошников на бедных песчаных почвах.

Радиационное поражение лесных биоценозов в зоне Чернобыльской катастрофы не приобрело массового характера и коснулось преимущественно сосновых лесов. Гибель сосновых на-

саждений составила менее 0,5 % общей площади лесов этой зоны и не оказала существенного влияния на радиоэкологическую обстановку в целом, хотя и ухудшила ее в непосредственной близости от атомной станции [54, 58, 59].

Среди проблем современного этапа развития радиобиологии важное место занимает необходимость более глубокого анализа радиоэкологических последствий хронического действия ионизирующих излучений сравнительно небольшой интенсивности на живые организмы [3, 14, 21, 33].

Исследования влияния хронического воздействия малых доз ионизирующих излучений на природные популяции живых организмов имеют достаточно длительную историю: они были начаты еще в 50-х годах XX в. [5, 7, 22, 44, 52, 56].

При оценке эффектов, вызываемых ионизирующими излучениями в малых дозах, принципиально важно, что этот эффект невозможно прогнозировать путем экстраполяции данных, полученных при больших дозах, в область малых доз. Многочисленные исследования убедительно свидетельствовали о том, что зависимость «доза – эффект» в диапазоне малых доз имеет характер не линейный, а близкий к синусоидальному.

К важнейшим аспектам радиобиологии малых доз относится повышенная чувствительность биологических объектов к воздействию радиации, переходящая к повышенной радиорезистентности при более высоких нелетальных дозах, а также стимулирующее действие излучений на рост, развитие и другие физиологические показатели, названное «эффектом радиационного гормезиса» (термин введен в 1980 г. Т. Д. Лакки).

При объяснении разных эффектов «больших» и «малых» доз радиации на биологические объекты предполагается, что «большие» дозы влияют на радиочувствительные ткани, в то время как «малые» дозы изменяют регуляторные функции радиоустойчивых тканей. «Большие» дозы усиливают в клетках патологические эффекты, поскольку кванты энергии разрушают ДНК, и этот процесс усиливается биологически активными веществами клетки. «Малые» дозы активизируют деятельность мембран и цитозо-

ля, не затрагивая генетический аппарат [37]. Но в целом признается, что механизм действия гормезиса пока не вполне ясен [9].

Научно-практическое значение радиэкологических исследований в природных растительных, в том числе лесных, сообществах в настоящее время обусловлено тем, что большое количество древесных и травянистых растений, произрастающих на территориях, загрязненных в результате аварий на объектах атомной энергетики и при испытаниях ядерного оружия, используется для хозяйственных целей или является сырьем для производства разнообразных продуктов потребления населением. Площадь лесов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС в России составила 11,56 тыс. км², Республике Беларусь – 16,85 тыс. км² и в Украине – 12,32 тыс. км² [15]. В этих условиях сверхнормативное накопление нуклидов в растительной продукции представляет потенциальную опасность для здоровья производителей и потребителей этой продукции [18, 65] и признано одним из наиболее существенных негативных последствий аварии на Чернобыльской АЭС [43].

С другой стороны, хроническое ионизирующее облучение может влиять на физиологическое состояние групп или отдельных экземпляров растений в микропопуляциях и воздействовать на генотип растений с неясными отдаленными последствиями. Высказывается мнение, что даже незначительные дозы радиации могут оказывать заметное влияние на физиолого-биохимическое состояние хвойных пород деревьев [39]. Исследования генетических последствий воздействия радиации на организм, начатые в нашей стране основателем радиационной генетики Н. В. Тимофеевым-Ресовским в конце 1950-х гг. и систематически проводимые после аварии на Чернобыльской АЭС, получили новый импульс [3, 4, 12, 24, 29, 35, 45, 64].

За рубежом изучение генетических аспектов воздействия ионизирующих излучений на лесные древесные растения проводится с середины XX в. [66, 71, 72].

Большинство исследований, проведенных на землях, покрытых лесной растительностью, с

относительно низким уровнем ионизирующего излучения, связано с анализом метаболических и мутационных процессов на молекулярном и клеточном уровнях, а также с изучением накопления, распределения и миграций долгоживущих радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в структурных частях древесных растений и в системе «почва – растение» [11, 13, 47, 60–62], с исследованием аномалий развития и морфологических особенностей репродуктивных органов растений [6, 50, 51], оценкой радиогеохимической ситуации в районе исследований [23] и т.п.

Детальные исследования изменчивости ростовых процессов деревьев лесообразующих пород при хроническом воздействии радиации проводились в значительно меньшем объеме – в основном в условиях лаборатории или в лесных питомниках. За рубежом в середине XX в. подобные исследования осуществлялись с использованием ^{60}Co : на нескольких видах сосен – в основном сосна смолистая (*P. Rigida*), сосна веймутова (*P. strobes*), сосна ладанная (*P. Taeda*). Изучалось ингибирование роста после острого и хронического в течение нескольких лет облучения [73, 76], морфологические изменения [67], особенности фотосинтеза [69], интенсивность повреждения листвы и хвои насекомыми [79] и т.п. Отмечено, что растения, имеющие меньшее число хромосом и более крупные ядра клеток, более чувствительны к воздействию гамма-радиации, чем полиплоидные виды, и растения с большим числом хромосом и меньшим размером ядер. Кроме того, имеет значение скорость деления ядер – меньшая скорость деления ведет к большому ущербу от радиации, поскольку каждая промежуточная фаза деления подвергается более длительному воздействию ионизирующего излучения [77].

В настоящее время имеющиеся данные не позволяют сформировать единое мнение о влиянии хронического облучения на рост растений. Одни исследователи указывают на ингибирование роста, другие отвергают наличие каких-либо последствий радиационного воздействия, а третьи отмечают возможность гормезиса, т.е. позитивного действия относительно невысоких доз радиации.

В модельных опытах облучение деревьев сосны смолистой при дозе от 1 до 5 Р/сут. в течение нескольких лет, по мнению исследователей [80], вызывало уменьшение радиального прироста древесины, причем наиболее заметно прирост снижался в комлевой части. При этом эффект радиации был тем меньше, чем больше крона дерева.

В другом опыте облучение сеянцев сосны при средней дозе гамма-излучения 10 мР/ч в последней декаде апреля – мае вызвало стимуляцию активности камбиальных клеток и более быстрый рост ксилемы и флоэмы, чем в контроле (доза в контроле – 0,03 мР/ч); одновременно с этим отмечено снижение интенсивности роста опытных растений в высоту. Авторы [68] считают, что радиация в испытанной дозе подавляет в растениях синтез эндогенного ауксина IAA, определяющего скорость роста в высоту, за счет чего усиливается образование гиббереллинов и/или цитокининов, регулирующих прирост по толщине ствола.

В ряде исследований воздействие радиации на ростовые процессы фиксировалось в качестве одного из дополнительных, сопутствующих параметров в ходе анализа изменчивости репродуктивных органов деревьев и кустарников [55]. Так, в зоне слабого радиационного поражения растительности на периферии 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС и в радиоактивных пятнах за ее пределами в 1986–1987 гг. отмечено снижение всхожести семян при отсутствии морфологических нарушений у хвойных деревьев. В зоне же среднего поражения имели место угнетение роста и гибель точек роста хвойных деревьев [59]. В ельниках хроническое радиоактивное загрязнение вызывало существенную изменчивость ростовых процессов в репродуктивных органах ели европейской. С увеличением мощности экспозиционной дозы (МЭД) достоверно снижалась масса шишек и семян, изменялась форма шишек [6]. В сосновых насаждениях юга Нечерноземной зоны европейской части России выявлена обратная зависимость размеров (длины и ширины) и массы шишек от МЭД, хотя в ряде опытов со слабыми дозами наблюдался эффект стимуляции ростовых процессов [51].

Целенаправленные исследования влияния хронического ионизирующего излучения на состояние и рост деревьев в высоту и толщину ствола после аварии на Чернобыльской АЭС проведены в явно недостаточном количестве. Между тем, можно предположить, что действие хронического облучения может оказаться сравнимым по силе воздействия с техногенными химическими выбросами. Известно, что в результате техногенного загрязнения среды происходит снижение интенсивности линейного и радиального прироста. Исследования показывают, что промышленные выбросы сернистого газа SO_2 , диоксида азота NO_2 и окиси азота NO могут снижать годовые приросты в 1,5 раза [20].

Ионизирующее излучение признается одним из значимых факторов роста деревьев. Еще во второй половине XX в. в лабораторных условиях зафиксировано влияние радиации на структуру годовых колец древесины [70]. Это же явление отмечено при исследованиях в зоне Чернобыльской аварии [34, 40, 75]. Частота нарушений в структуре годовых колец обратно пропорциональна расстоянию до Чернобыльской АЭС. Так, в 5 км от реактора частота нарушений в структуре колец после аварии оказалась в 3 раза больше, чем в предшествующие годы [78]. Кроме того, отмечается, что повреждения клеток в годовых кольцах в районе кроны более удалены от начала колец, чем в нижней части стволов, что, по-видимому, обусловлено более интенсивной продукцией клеток в начале сезона в верхней части стволов [42].

В 1986 г. у деревьев сосны, подвергшихся облучению, особенно дозами 3–4 Гр и более, отмечены нарушения структуры годовых слоев древесины: выпадение отдельных рядов трахеид, искривление и расширение радиальных лучей, появление серии недооформленных травматических смоляных ходов и групп клеток паренхимы, нарушение рядности трахеид; выявлена гибель (до 24%) образовательных тканей – камбиальных инициалей [1]. Неповрежденные инициалы образовывали неправильные ряды мелких толстостенных трахеид и группы клеток паренхимы, недооформленные или оформленные в травма-

тические смоляные ходы, а также крупные радиальные лучи [17].

В 1986 г. на территориях в районе Чернобыльской АЭС отмечено повышенное количество случаев наличия у деревьев сосны ложных (двойных) годовых колец древесины. Аналогичное явление было отмечено также ранее, за четыре года до аварии – в 1982 г. Однако эти случаи в основном приурочены к участкам с низким уровнем радиационного поражения и, по-видимому, были связаны с особенностями гидрологического режима в начале вегетационного периода, а именно: значительным дефицитом почвенной влаги – первая половина года отличалась засушливостью [46].

В 1987 г. слой ранней древесины отличался признаками, которые обычно не свойственны деревьям сосны обыкновенной, особенно при потере точек апикального роста, а именно: высокой степенью паренхимизации, наличием травматических смоляных ходов и сравнительно широких радиальных лучей [2].

В зависимости от величины поглощенной дозы может наблюдаться как отсутствие и снижение прироста при дозе 2000–5000 рад, так и стимуляция роста хвои и побегов при дозе 70–100 рад [49].

Несмотря на то что авария на Чернобыльской АЭС совпала с началом вегетационного периода, в 1986 г. вблизи эпицентра выброса радионуклидов радиация на прирост древесины деревьев в более влажных местообитаниях практически не повлияла: размер годовых колец был близок к нормальному, по-видимому, за счет питательных веществ, накопленных в предшествующем году, и ослабления «конкуренции» с погибшими побегами и хвоей за распределение продуктов фотосинтеза. Снижение прироста прослеживалось лишь в относительно сухих условиях местопрорастания [41].

С 1987 г. вследствие острого облучения у сосен резко снизился прирост на всех обследованных участках; минимальный прирост зафиксирован в 1988 г.; затем наблюдалось медленное восстановление, не достигшее, однако, начальных (фоновых) величин. В кроновой части стволов

восстановление прироста происходило быстрее, чем в нижней, что, возможно, связано с большей доступностью продуктов фотосинтеза. В корнях прирост резко снизился в 1987 г., после чего кольца ксилемы не откладывались [41]. Отмечается, что снижение прироста в 1986–1988 гг. было характерно для деревьев с сильным повреждением хвои [46]. Высказано мнение, что повреждение ассимиляционного аппарата в большей мере содействовало потерям прироста древесины, чем прямое воздействие радиации на камбиальную ткань ствола [74].

Установлены изменения в соотношении ранней и поздней древесины: относительная величина позднего прироста древесины увеличилась существенно в 1986 г. и уменьшилась в 1987 г. [75].

Выпадения годичных колец по стволу в ряде образцов древесины приурочены к 1988–1989 гг. Сделан вывод, что главным поражающим фактором для ближайших к Чернобыльской АЭС оставшихся в живых деревьев явилось излучение от нуклидов, выпадавших из радиоактивного облака и с пылью из воздуха на поверхность почвы и на само дерево. Прямое излучение от станции и поступление радионуклидов с влагой из почвы решающего значения не имели, по крайней мере, в 1986 и 1987 гг. [41].

При исследованиях в сосняках юга Нечерноземной зоны европейской части России отмечено негативное влияние сравнительно небольших доз радиации на прирост древесины по радиусу ствола на следующий год после аварии на Чернобыльской АЭС, при том, что «даже при дозах, приводящих к аномальному росту и отмиранию молодых побегов и хвои, не нарушен ритм процессов деления камбия» [51].

Анализ хода роста сосновых насаждений в 1986–1995 гг. в районе расположения Чернобыльской АЭС выявил тенденцию к уменьшению прироста деревьев, причем в первые 3 года уменьшение толщины и структуры годичных колец не отмечено, а действие радионуклидов проявилось позднее: после их поглощения корневой системой и накоплением в клетках камбия [16]. По мнению автора, в целом при МЭД до 1,5 мР/ч

хроническая радиация не оказывала сильного ингибирующего воздействия на ростовые процессы, а зачастую вызывала их стимуляцию. При обсуждении результатов исследований отмечалась сложность вычленения эффекта хронического облучения деревьев радиацией из комплекса факторов, среди которых наибольшее значение имели температура воздуха и количество осадков в течение вегетационного периода.

В целом отмечается, что при воздействии ионизирующего излучения наиболее сильно повреждаются образовательные, меристематические ткани, состоящие из интенсивно делящихся и сохраняющих физиологическую активность на протяжении всей жизни клеток, за счет жизнедеятельности которых обеспечивается непрерывное нарастание массы растения и формируются специализированные (проводящие, механические и т. п.) ткани. Сильные дозы радиации, убивающие меристему, обуславливают последующее, спустя некоторое время, отмирание всего растения. Умеренные дозы связаны с нарушениями морфогенеза из-за снижения активности клеток меристематических тканей, проявляющимися в морфологических аномалиях, радиоморфозах, полном или частичном отмирании побегов и корней, удлинении вегетационного периода, выпадении репродукционной фазы из фенологического цикла. Малые дозы радиации могут вызывать усиление ростовых и формообразовательных процессов [19].

Отмечается, что воздействие радиационного облучения на динамику роста древесины проявляется на фоне колебаний прироста, обусловленных изменчивостью условий погоды. В частности, в районе Чернобыльской аварии у деревьев сосны устойчиво прослеживается положительная корреляция ширины годичных колец данного года, во-первых, с количеством осадков последних четырех месяцев предшествующего года, что можно объяснить благоприятными условиями для накопления влаги в почве и снеговом покрове в этот период, в то время как потребление влаги растениями прекращено; во-вторых, с температурой марта текущего года и осадками мая текущего года, что связано с потребностью

деревьев во влаге в период активного роста; при этом значимая корреляция изменчивости ширины годичного кольца с изменением осадков отдельных месяцев встречается чаще, чем с изменением температуры, что свидетельствует об определенном дефиците влаги для роста в течение вегетационного периода [41].

По мнению автора, существует принципиальная возможность ретроспективно выявлять наличие острого радиоактивного загрязнения территории в прошлом на основе показателей изменчивости прироста и структуры годичных колец. Возможность ретроспективной индикации хронического радиоактивного повреждения представляется менее перспективной [41].

Обзор публикаций по проблемам, связанным с последствиями загрязнения лесных биогеоценозов веществами – источниками ионизирующего излучения, свидетельствует о явно недостаточном количестве исследований воздействия радиационного фактора на динамику хода роста основных лесобразующих пород. Как справедливо отмечает Е. К. Мусаев [41], в общем спектре исследований, посвященных последствиям аварии на Чернобыльской АЭС (а в равной степени и других радиационным авариям и испытаний ядерного оружия), исследованиям динамики роста годичных колец древесины до по-

следнего времени отводится вспомогательная роль по отношению к другим направлениям исследований в лесах, загрязненных радионуклидами, а сами исследования в основном имеют описательный характер. При этом используемые методики исследования не всегда соответствуют сложности изучаемого явления. Выводы нередко даются по результатам прямого измерения величины прироста в местах воздействия радиации и визуального изучения срезов древесины, не учитываются различия в погодных ситуациях разных лет, изменения прироста, вызванные локальными факторами и возрастными изменениями в динамике роста деревьев.

Между тем, годичные кольца стволов деревьев аккумулируют информацию о прошлых событиях и факторах, воздействовавших на интенсивность ростовых процессов. Радиационная катастрофа масштаба Чернобыльской, несомненно, «должна сказаться на приросте древесины» [40]. Поэтому, несмотря на огромный объем проведенных исследовательских работ, вопросы влияния ионизирующего излучения, как острого, так и хронического, на состояние и рост основных лесобразующих пород на территориях, подвергшихся загрязнению радионуклидами, остаются актуальными и требуют дальнейшей детальной разработки.

Список литературы

1. Абатуров, А. В. Особенности пространственного распределения радиационного поражения сосняков вблизи ЧАЭС / А. В. Абатуров // Биологич. и радиэкологич. аспекты последствий аварии на Чернобыльской атомной станции : тез. докл. 1-й Междунар. конф. – Зеленый мыс : Ротапринт. – 1990. – С. 17.
2. Абатуров, А. В. Рост сосны по диаметру после радиоактивного облучения (район аварии Чернобыльской АЭС) / А. В. Абатуров, Н. И. Гольцова // Совр. пробл. экологич. анатомии растений: матер. II Всесоюзн. совещ. по экологич. анатомии растений. – Владивосток, 1990. – С. 3–4.
3. Абрамов, В. И. Влияние хронического облучения на природные популяции растений : автореф. дисс. ... канд. биол. наук (03.00.15) / В. И. Абрамов. – М., 1985. – 22 с.
4. Абрамов, В. И. Генетические последствия хронического действия ионизирующих излучений на популяции / В. И. Абрамов, В. Л. Шевченко // Радиационный мутагенез и его роль в эволюции и селекции. – М., 1987. – С. 83–109.
5. Алексахин, Р. М. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах / Р. М. Алексахин, М. А. Нарышкин. – М. : Наука, 1977. – 144 с.

6. Алешин, И. В. Изменчивость репродуктивных и ростовых процессов ели европейской в различных зонах хронического радиоактивного загрязнения ЧАЭС Брянского округа зоны широколиственных лесов : автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук (06.03.01) / И. В. Алешин. – Брянск, 2006. – 26 с.
7. Бак, З. Основы радиобиологии / З. Бак, П. Александер. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 500 с.
8. Баранов, В. И. Содержание радиоактивных элементов ториевого ряда в наземных растениях / В. И. Баранов, К. Г. Кунашева // Тр. биогеохим. лаб. АН СССР. – Т. 10. – 1954. – С. 104–108.
9. Богданов, И. М., Проблема оценки эффектов воздействия «малых» доз ионизирующего излучения / И. М. Богданов, М. А. Сорокина, А. И. Маслюк // Бюллетень сибирской медицины. – 2005. – № 1. – С. 145–151.
10. Боровой, А. А. Выброс радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС / А. Боровой, А. Ю. Гагаринский // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90. – Вып. 2. – С. 137–145.
11. Булавик, И. М. Накопление ^{137}Cs сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) / И. М. Булавик, А. Н. Переволоцкий // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2003. – № 1. – С. 18–23.
12. Булах, А. А. Особенности морфогенеза вегетативных побегов многолетних растений в условиях радионуклидной аномалии на территории 30-километровой зоны ЧАЭС / А. А. Булах // Радиобиологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС : Всесоюз. конф. ; Минск, 30 окт. – 1 нояб. 1991: Тез. докл. – Минск, 1991. – С. 16–17.
13. Булко, Н. И. Накопление ^{137}Cs в компонентах фитомассы основного древесного яруса сосновых насаждений при наличии подлесочного яруса определенного видового состава / Н. И. Булко // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. – Вып. 56. – Гомель, 2003. – С. 8–23.
14. Бурлакова, Е. Б. Радиационная безопасность как исследовательская проблема / Е. Б. Бурлакова, В. И. Найдич // Вестник РАН. – 2006. – Т. 76. – № 11. – С. 1034–1037.
15. Возняк, В. Я. Чернобыль: возвращение к жизни (реабилитация радиоактивно-загрязненных территорий) / В. Я. Возняк – М : МП «Москомплекс», 1993. – 207 с.
16. Глазун, И. Н. Изменчивость хвойных растений в радиоактивно загрязненных насаждениях Брянского округа зоны широколиственных лесов : автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук (06.03.01) / И. Н. Глазун. – Брянск : БГИТА, 1998. – 18 с.
17. Гольцова, Н. И. Строение вегетативных органов сосны обыкновенной при радиоактивном загрязнении в районе аварии Чернобыльской АЭС / Н. И. Гольцова // Современные проблемы экологической анатомии растений : Матер. II Всесоюз. совещ. по экологич. анатомии растений. – Владивосток, 1990. – С. 53–55.
18. Гончаров, Е. А. Особенности радиационного мониторинга лесных биогеоценозов Пензенской области : автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук (03.00.16) / Е. А. Гончаров. – Йошкар-Ола, 2007. – 24 с.
19. Гродзинский, Д. М. Радиобиология растений / Д. М. Гродзинский. – Киев : Наукова думка, 1989. – 380 с.
20. Груздев, В. С. Исследование и экологический анализ воздействия техногенных выбросов предприятий черной металлургии на окружающую среду : автореф. дисс. ... канд. техн. наук (03.00.16) / В. С. Груздев. – Москва, 2007. – 21 с.
21. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Д. А. Криволуцкий, Ф. А. Тихомиров, Е. А. Федоров, А. Д. Покаржевский, А. И. Таскаев. – М. : Наука, 1988. – 240 с.

22. Дертингер, Г. Молекулярная радиобиология. Действие ионизирующих излучений на элементарные биологические объекты / Г. Дертингер, Х. Юнг. – М. : Атомиздат, 1973. – 248 с.
23. Замятина, Ю. Л. Изучение истории поступления радионуклидов в окружающую среду на основе F-радиографического анализа годичных колец деревьев: на примере Красноярского края и Центральной Европы : автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук (25.00.36) / Ю. Л. Замятина. – Томск, 2008. – 20 с.
24. Игонина, Е. В. Изучение мутационного процесса в хронически облучаемых популяциях *Pinus sylvestris* L. (сосна обыкновенная), произрастающих в зоне аварии на Чернобыльской атомной станции : Автореф. дисс. ... канд. биол. наук (03.01.01) / Е. В. Игонина. – М., 2010. – 25 с.
25. Израэль, Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий / Ю. А. Израэль. – СПб : Прогресс-погода, 1996. – 355 с.
26. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ / Сост.: Л. А. Абагян, В. Г. Асмолов, А. К. Гуськов, В. Ф. Демин [и др.]. – М: Атомная энергия, 1986. – Т. 61. – Вып. 5. – 320 с.
27. Ипатьев, В. А. Лес и Чернобыль / В. А. Ипатьев, И. М. Булавик, В.Ф. Багинский [и др.] - Минск : МНПП «Стенер», 1994. – 235 с.
28. Ипатьев, В. А. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В. А. Ипатьев, В. Ф. Багинский, И. М. Булавик. – Гомель : Институт леса НАН Республики Беларусь, 1999. – 454 с.
29. Кальченко, В. А. Радиационно-генетический мониторинг популяций *Pinus sylvestris* L. зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / В. А. Кальченко, И. С. Федотов, Е. В. Игонина, А. В. Рубанович, В. А. Шевченко // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2000. – Т. 40. – № 5. – С. 607–612.
30. Карабань, Р. Т. Действие острого гамма облучения на лесной биогеоценоз / Р. Т. Карабань, Н. Н. Мищенко, Б. С. Пристер [и др.] // Проблемы лесной радиоэкологии. – 1979. – Вып. 38. – С. 27–52.
31. Карабань, Р. Т. Поражение древесного яруса при остром гамма-облучении в разные фазы / Р. Т. Карабань, Н. Н. Мищенко, Д. А. Спирин [и др.] // Доклады АН СССР. – 1980. – Т. 252. – № 3. – С. 776–778.
32. Ковалевский, А. Л. Основные закономерности формирования химического состава растений / А. Л. Ковалевский // Биогеохимия растений. – 1966. – № 1. – С. 6–28.
33. Коггл, Дж. Биологические эффекты радиации / Дж. Коггл. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
34. Козубов, Г. М. Радиобиологические и радиоэкологические исследования древесных растений / Г. М. Козубов, А. И. Таскаев. – СПб. : Наука. СПб отд., 1994. – 255 с.
35. Корогодина, В. И. Функциональная концепция мутагенеза / В. И. Корогодина, В. Л. Корогодина, Ч. Файси // Природа. – 1990. – № 2. – С. 5–12.
36. Кудряшов, Ю. Б. Радиобиология: вчера, сегодня, завтра // Чернобыль: Долг и мужество / Ю. Б. Кудряшов. – Т. 1. – М., 2001. – С. 256–263.
37. Кузин, А. М. Проблема малых доз и идеи гормезиса в радиобиологии / А. М. Кузин // Радиобиология. – 1991. – Т. 31. – Вып. 1. – С. 16–21.
38. Манзон, Д. А. Динамика миграции цезия-137 после Чернобыльской аварии на территории Русской равнины : автореф. дисс. ... канд. геогр. наук (25.00.36) / Д. А. Манзон. – М., 2010. – 26 с.
39. Мельник, Н. А. Радиоэкологическое исследование хвойных пород деревьев / Н. А. Мельник, А. Н. Кизеев // Вестник МарГТУ. – 2006. – Т. 9. – № 3. – С. 429–433.

40. Мусаев, Е. К. Влияние радиационного поражения на годовичные кольца сосны в районе Чернобыльской АЭС / Е. К. Мусаев // Лесоведение. – 1993. – № 4. – С. 41–49.
41. Мусаев, Е. К. Реакция прироста и структуры годовичных колец сосны (*Pinus sylvestris* L.) на радиоактивное воздействие в районе Чернобыльской АЭС : автореф. дисс. ... канд. биол. наук (03.00.16) / Е. К. Мусаев. – Красноярск, 1995. – 27 с.
42. Мусаев, Е. К. Сезонный рост и строение годовичных колец сосны обыкновенной в зоне Чернобыльской катастрофы / Е. К. Мусаев // Лесоведение. – 1996. – № 1. – С. 16–28.
43. О федеральной целевой программе «Преодоление последствий радиационных аварий на период до 2015 года». Постановление Правительства Российской Федерации от 29.06.2011 № 523.
44. Передельский, А. А. Основания и задачи радиэкологии / А. А. Передельский // Журнал общей биологии. – 1957. – Т. 18. – № 1. – С. 17–30.
45. Позолотина, В. Н. Отдаленные последствия действия радиации на растения / В. Н. Позолотина. – Екатеринбург : Академкнига, 2003. – 244 с.
46. Радиационное воздействие на хвойные леса в районе аварии на Чернобыльской АЭС / Отв. ред. Г. М. Козубов, А. И. Таскаев. – Сыктывкар : Коми НИЦ РАН, 1990. – 136 с.
47. Репях, С. М. Изучение пространственной неоднородности накопления техногенных радионуклидов в компонентах лесного биоценоза Красноярского края / С. М. Репях, М. А. Катанаева, А. Г. Ковалев, Л. Н. Руденко // Химия растительного сырья. – 2000. – № 1. – С. 51–56.
48. Рудая, С. М., Самоочищение почв 30-километровой зоны ЧАЭС от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr / С. М. Рудая, О. В. Чистик // Приемы повышения плодородия почв, эффективности удобрений и средств защиты растений : матер. междунар. науч.-практ. конф. – Ч. 2. – Горки, 2003. – С. 271–274.
49. Руководство по ведению лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения от аварии на Чернобыльской АЭС (на период 1997-2000 гг.) / Сост.: И. И. Марадудин, А. В. Панфилов, Т. В. Русина, В. А. Шубин [и др.]. – М., 1997. – 61 с. (Утверждено приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 31.03.97 № 40).
50. Самошкин, Е. Н. О вариабельности посевных качеств семян сосны в течение последних 11 лет после аварии на ЧАЭС / Е. Н. Самошкин, И. Н. Глазун // Селекция, генетические ресурсы и сохранение генофонда лесных древесных растений (Вавиловские чтения). – Вып. 59. – Гомель, 2003. – С. 239–242.
51. Скок, А. В. Изменчивость репродуктивных и ростовых процессов сосны обыкновенной в различных зонах хронического радиоактивного загрязнения ЧАЭС Южного Нечерноземья РФ : автореф. дисс. ... канд. биол. наук (03.00.16) / А. В. Скок. – Брянск, 2005. – 24 с.
52. Тимофеев-Ресовский, Н. В. Развитие и современное состояние радиационной генетики / Н. В. Тимофеев-Ресовский // Тр. Ин-та биологии УФ АН СССР. – Вып. 13. – Свердловск, 1957. – С. 73–86.
53. Тихомиров, Ф. А. Действие ионизирующих излучений на экологические системы / Ф. А. Тихомиров. – М. : Атомиздат, 1972. – 176 с.
54. Тихомиров, Ф. А. Радиэкологические последствия кыштымской и чернобыльской радиационных аварий в лесных экосистемах / Ф. А. Тихомиров, А. И. Щеглов // Экология регионов атомных станций. – Вып. 1. – М., 1994. – С. 71–88.
55. Федотов, И. С. Действие гамма-излучения на вегетативные и репродуктивные органы сосны *Pinus sylvestris* / И. С. Федотов, Ф. А. Тихомиров, Р. Т. Карабань, Б. С. Пристер // Тр. Ин-та прикладной геофизики. – Вып. 38. – М. : Гидрометиздат, 1979. – С. 53–67.
56. Хильми, Г. Ф. Теоретическая биогеография леса / Г. Ф. Хильми. – М. : Изд-во АН СССР, 1957. – 266 с.

57. Хромова, Л. В. Частичная стерильность сосны в 1986 и 1987 гг. в зоне Чернобыльской АЭС / Л. В. Хромова, М. Г. Романовский, В. А. Духарев // Радиобиология. – 1990. – Т. 30. – Вып. 4. – С. 450–457.
58. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Ред. : Ю. А. Израэль, С. М. Вакуловский, В. А. Ветров, В. Н. Петров, Ф. Я. Ровинский, Е. Д. Стукин. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 296 с.
59. Чернобыльская катастрофа. Историография событий, социально-экономические, геохимические и медико-биологические последствия / Гл. ред. В. Г. Барьяхтар. – Киев : Наукова думка, 1995. – 558 с.
60. Чилимов, А. И. Распределение и динамика ^{137}Cs в тканях древесных растений / А. И. Чилимов, А. В. Богачев // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2000. – Т. 40. – № 2. – С. 231–237.
61. Щеглов, А. И. Динамика доступности цезия-137 в лесах 30-км зоны ЧАЭС / А. И. Щеглов, О. Б. Цветнова, Ф. А. Тихомиров, С. В. Мамихин, И. Т. Моисеев // Радиационные аспекты Чернобыльской аварии : тр. I Всесоюз. конф. ; Обнинск, 1988. – Т. 2. – Л. : Гидрометеиздат, 1993. – С. 53–56.
62. Щеглов, А. И. Распределение и запасы ^{137}Cs в компонентах лесных экосистем Украинского Полесья / А. И. Щеглов, О. Б. Цветнова, Н. Д. Кучма // Проблеми екології лісів і лісокористування на Поліссі України. – Вып. 6. – Житомир : Волинь. 1999. – С.12–25.
63. Щеглов, А. И. Лесная радиоэкология на пороге XXI века [Электронный ресурс] / А. И. Щеглов, О. Б. Цветнова // Чернобыль: Долг и мужество. – М., 2001. – С. 250–256.
64. Эколого-генетический анализ отдаленных последствий Тощкого ядерного взрыва в Оренбургской области в 1954 году: Факты, модели, гипотезы / Ред. А. Г. Васильев. – Екатеринбург, 1997. – 191 с.
65. Якушев, Б. И. Состав и поведение радионуклидов чернобыльской аварии в растениях и почвах природных комплексов / Б. И. Якушев // Европа – наш общий дом: экологические аспекты : тез. докл. науч. конф. ; Минск, 6–9 декабря 1999 г. – Минск, 1999. – С. 61.
66. Bender, M. A. Mechanisms of chromosomal aberration production. III. Chemical and ionizing radiation / M. A. Bender, Y. G. Griggs, J. S. Bedford // Mutation Res. – 1974. – Vol. 23. – P. 197–212.
67. Brandenburg, M. K. Effects of acute gamma radiation on growth and morphology in *Pinus monophylla* Torr and Frem. (Pinyon pine) / M. K. Brandenburg, H. L. Mills, W. H. Rickard, L. M. Shields // Radiat. Bot. – 1962. – Vol. 2. – P. 252–263.
68. Chandorkar, K. R. Effect of low level continuous gamma irradiation on vascular cambium activity in scotch pine *Pinus sylvestris* L. / K. R. Chandorkar, N.G. Demgler // Environm. Experiment. Botany. – 1987. – Vol. 27. – № 2. – P. 165–175.
69. Hadley, E. B. Effects of ionizing radiation on rates of CO₂ exchange of pine seedlings / E. B. Hadley, G. M. Woodwell // Radiat. Res. – 1965. – Vol. 24. – P. 650–656.
70. Hamilton, J. R. Characteristic of tracheids produced in gamma and gamma-neutron environment / J. R. Hamilton // For. Prod. J. – 1963. – Vol. 13. – P. 62–67.
71. Mergen, F. Low level chronic gamma irradiation of a pitch pine-oak forest – its physiological and genetical effects on sexual reproduction / F. Mergen, G. R. Stairs // Radiat. Bot. – 1962. – Vol. 2. – P. 205–216.
72. Mergen, F. Effect of ionizing radiation on microsporogenesis in *Pinus rigida* Mill. / F. Mergen, T. S. Johansen // Radiat. Bot. – 1963. – Vol. 3. – P. 321–331.
73. Mergen, F. Effects of chronic exposures to Co60 radiation on *Pinus rigida* seedlings / F. Mergen, B. A. Thielges // Radiat. Res. – 1966. – Vol. 6. – P. 203–210.

74. Scmitt, U. Xylem structure in pine trees crown near the Chernobyl nuclear power plant/Ukraine / U. Scmitt, C. Grunwald, D. Eckstein // IAWA Journal. – 2000. – Vol. 21. – № 4. – P. 379–387.
75. Skuterud, L. Histological changes in *Pinus sylvestris* L. in the proximal-zone around the Chernobyl Power / L. Skuterud, N.I. Goltsova, R. Naeumann, T. Sikkeland [et al.] // Plant. Sci. Environm. – 1994. – Vol. 157. – P. 387–397.
76. Sparrow, A. H. Comparisons of the tolerances of higher plant species to acute and chronic exposures of ionizing radiation / A. H. Sparrow // Jap. J. Genet. Suppl. – 1965. – Vol. 40. – P. 12–37.
77. Sparrow, A. H. Prediction of the sensitivity of plants to chronic gamma irradiation / A. H. Sparrow, G. M. Woodwell // Radiation Botany. – 1962. – Vol. 2. – № 1. – P. 9–26.
78. 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. – Vol. 46. – № 1. – P. 1–10.
79. Woodwell, G. M. Effects of ionizing radiation on terrestrial ecosystems. Experiments show how ionizing radiation may alter normally stable patterns of ecosystem behavior / G.M. Woodwell // Science. – 1962. – Vol. 138. – № 3540. – P. 572–577.
80. Woodwell, G. M. Chronic gamma radiation affects the distribution of radial increment in *Pinus rigida* stems / G.M. Woodwell, L.N. Miller // Science. – 1963. – Vol. 139. – № 3551. – P. 222–223.