

Научная статья
УДК 630.181.351

ЛЕС КАК БАРЬЕР РАДИАЦИОННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ

Георгий Алексеевич Семеновых¹, Анна Геннадьевна Семеновых²

^{1, 2} Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

² Специализированный учебно-научный центр УрФУ, Екатеринбург, Россия

¹ snakyjor@gmail.com

² semenovyhag@m.usfeu.ru

Аннотация. Оценена роль лесов как природного барьера радиационному загрязнению, механизмы их взаимодействия с радионуклидами и возможные стратегии обращения с зараженными лесными массивами.

Ключевые слова: радиационное загрязнение, период полураспада, фиторемедиация

Для цитирования: Семеновых Г. А., Семеновых А. Г. Лес как барьер радиационному загрязнению // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России = Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia : материалы XXI Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург : УГЛТУ, 2025. С. 1067–1071.

Original article

FOREST AS A BARRIER TO RADIATION POLLUTION

Georgii A. Semenovikh¹, Anna G. Semenovikh²

¹ Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

² Specialized Educational and Scientific Center of UrFU, Ekaterinburg, Russia

¹ snakyjor@gmail.com

² semenovyhag@m.usfeu.ru

Abstract. The article assesses the role of forests as a natural barrier to radiation pollution, the mechanisms of their interaction with radionuclides and possible strategies for dealing with contaminated forest areas.

Keywords: radiation pollution, half-life, phytoremediation

For citation: Semenovikh G. A., Semenovikh A. G. (2025) Les kak barer radiatsionnomu zagryazneniyu [Forest as a barrier to radiation pollution]. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii [Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia] : proceedings of the XXI All-Russian (national) Scientific and Technical Conference of undergraduate and postgraduate students. Ekaterinburg : USFEU, 2025. Pp. 1067–1071 (In Russ).

Леса играют важнейшую роль в экосистемах планеты, обеспечивая биологическое разнообразие, регулируя климат и защищая почвы от эрозии. Еще одним, менее изученным аспектом их значения является способность лесов служить естественным барьером на пути радиационного загрязнения.

«В условиях недавних обстрелов запорожской атомной электростанции (ЗАЭС) проблема ядерного терроризма и физической безопасности ядерных объектов стала особенно актуальной» [1].

На территории Свердловской области расположено несколько потенциально опасных предприятий: АО «В/О «Изотоп», ЗАО «Квант», Белоярская АЭС и другие. Все они могут стать объектами ядерного терроризма.

После ядерных аварий, таких как Чернобыльская катастрофа 1986 г., стало очевидно, что лесные массивы могут замедлять и частично изолировать распространение радионуклидов, предотвращая их мгновенное попадание в почву и грунтовые воды, снижая воздействие на население и экосистемы за пределами аварийных зон.

Цель данной статьи – исследовать роль лесов как природного барьера радиационному загрязнению, механизмы их взаимодействия с радионуклидами и возможные стратегии обращения с зараженными лесными массивами.

Если говорить об истории атомных катастроф Земли, то на ум сразу приходят Хиросима (1945) и Чернобыль (1986).

В первом случае речь идет об использовании атомной бомбы. Отметим, что опасность ядерной эскалации существует и сегодня. «До начала специальной военной операции наибольшую опасность для интересов безопасности России представляло бы постепенное вовлечение Украины в ядерную деятельность альянса с перспективой размещения на территории страны ядерного оружия США и высокоточных ударных систем» [1]. Основной вклад в выброс Хиросимы ($\approx 69\%$) дал изотоп углерода 14 с периодом полураспада ($T_{1/2}$) 5730 лет. Но, «в экосистемах Земли углерод-14 включается в те же процессы, что и его стабильный аналог – углерод-12. Последний является одним из наиболее широко распространенных элементов в биосфере Земли и входит в структурную основу практически всех организмов на планете» [2]. Распад этого изотопа идет с выбросом электрона (β -распад). Такое излучение имеет малую проникающую способность, следовательно, не представляет большой угрозы.

В Хиросиме радиоактивность от взрыва была интенсивной в первые недели и месяцы, но со временем значительно уменьшилась. Благодаря этому, почва и экосистема не подверглись долгосрочному воздействию радионуклидов, что позволило растительности и экосистемам быстрее восстановиться и городу снова заселиться людьми.

Абсолютно другая ситуация сложилась в Чернобыле. При аварии выделилось множество радиоактивных изотопов, некоторые из которых имеют очень длинные периоды полураспада и продолжают излучать радиацию даже спустя десятилетия. Основные долгоживущие радионуклиды, влия-

ющие на радиационный фон: Cs-137 ($T_{1/2} \approx 30$ лет), Sr-90 ($T_{1/2} \approx 30$ лет), Pu-239 ($T_{1/2} \approx 24100$ лет), Am-241, который образуется из Pu-241 ($T_{1/2} \approx 433$ г.). Эти и другие изотопы осели на землю и проникли в почву, воду и биоту, что создало долгосрочное и постоянное загрязнение на десятки лет. Большинство долгоживущих изотопов распадаются с испусканием β - (Cs-137, Sr-90) или α - (Pu-239, Am-241) частиц, имеющих малую проникающую способность. Так, распад цезия идет по реакции $^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{137}_{56}\text{Ba} + \bar{e} + \bar{\nu}_e$. Более чем в 90 % на первом этапе образуется промежуточный нестабильный изомер бария, который переходит в основное состояние с испусканием γ -кванта. Таким образом, Cs-137 испускает гамма- и бета-излучение. Гамма-лучи обладают высокой проникающей способностью, оказывая воздействие даже на глубокие ткани, что увеличивает риск раковых заболеваний и других клеточных повреждений. А так как цезий легко растворяется в воде, он может попасть в организм, где накапливается в мягких тканях, особенно в мышцах, и β -излучением разрушает окружающие клетки. Sr-90 химически похож на кальций, поэтому легко встраивается в кости и зубы, облучая костный мозг. Попадая в организм с водой или едой Sr-90, испускает бета-излучение, которое повреждает клетки костного мозга и может привести к развитию лейкемии и других заболеваний крови.

В отличие от Хиросимы, Чернобыльский регион имеет обширные лесные массивы, что существенно изменило динамику восстановления экосистемы. Наличие лесов в окрестностях Чернобыля сделало распространение радиационного загрязнения довольно сложным.

Некоторые виды деревьев способны снижать уровень радиации в почве и воздухе, поглощая радиоактивные изотопы и очищая среду. Такие растения не устраняют радиацию, но поглощают и удерживают радиоактивные частицы, уменьшая их количество в окружающей среде.

1. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*). Предпочитает легкие песчаные и супесчаные почвы, растет в зонах с умеренным климатом, засухоустойчива, морозостойка, светолюбива. Активно поглощает радионуклиды, (Cs-137 и Sr-90) через корневую систему и задерживает их в древесине и хвое. Сосна способна аккумулировать радионуклиды в хвое, что создает долгосрочное радиоактивное загрязнение на участке. Способна выдерживать крайне высокие уровни радиации (до 1000 кБк/м²), что позволяет ей существовать в зонах с высоким уровнем радиационного загрязнения [3].

2. Тополь (*Populus*). Растет на влажных почвах, часто вблизи водоемов; широко распространен в умеренном и субарктическом климатах, влаголюбив, плохо переносит засуху. Благодаря большой биомассе активно поглощает радионуклиды через корневую систему, аккумулирует их в древесине и листьях. Быстрый рост делает тополь подходящим для фиторемедиации, так как он быстрее поглощает и накапливает радионуклиды. Способен переносить уровни загрязнения около 500–700 кБк/м², что позволяет использовать его для очистки территорий от радионуклидов.

3. Береза (*Betula*). Растет на разнообразных почвах, от кислых до нейтральных; встречается в лесах умеренного пояса, засухоустойчива, светолюбива, морозостойка. Поглощает радионуклиды через корни и аккумулирует их в древесине и листьях. Способна выдерживать уровни загрязнения до 600 кБк/м², часто применяется для биоремедиации.

4. Ива (*Salix*). Предпочитает влажные почвы, часто встречается вдоль рек и болот, влаголюбива, плохо переносит засуху. Высокая скорость роста и способность к накоплению радионуклидов через корни делают иву полезной для фиторемедиации. Радиоактивные элементы накапливаются в листьях и стволах. Способна выдерживать достаточно высокие уровни радиации (до 700 кБк/м²), что делает ее подходящей для очистки территорий.

5. Дуб (*Quercus*). Растет на хорошо дренированных, плодородных почвах, предпочитает умеренный климат, засухоустойчив, морозостойкий, светолюбив. Поглощает радионуклиды через корневую систему и удерживает их в древесине, коре и листьях. Из-за долгого жизненного цикла дуб может длительно аккумулировать радионуклиды, что помогает снижать их подвижность. Переносит умеренные уровни радиационного загрязнения до 500 кБк/м².

Но необходимо понимать, что сегодня леса Чернобыля стали потенциальным источником повторного распространения радионуклидов. Климатические изменения последних лет ведут к повышению среднегодовой температуры и, как следствие, увеличению вероятности возникновения лесных пожаров. Радиоактивные вещества с большим периодом полураспада сохраняются в почве и растительности, и при лесных пожарах они могут высвободиться в воздух с дымом. Это приведет к повторному загрязнению воздуха и распространению радиации на новые территории, где радионуклиды могут попасть в пищевые цепочки. Пожары в чернобыльских лесах представляют серьезную опасность и до сих пор требуют контроля.

Таким образом, остро встает вопрос утилизации леса, загрязненного радиацией. Перечислим основные способы утилизации и обращения с радиоактивными деревьями и растительностью.

1. Вырубка и захоронение. Радиоактивные деревья могут быть срублены и захоронены в специальных могильниках, предназначенных для радиоактивных отходов. Этот метод требует больших площадей для безопасного хранения, что может быть дорого и сложно в реализации.

2. Сжигание с фильтрацией дыма. Сжигание деревьев в специальных установках с фильтрацией может значительно уменьшить объем отходов. При этом дым и пепел, содержащие радионуклиды, улавливаются фильтрами. Пепел, остающийся после сжигания, и фильтры с радиоактивными частицами захоранивают как радиоактивные отходы.

3. Биологическая обработка (фиторемедиация). Определенные микроорганизмы могут разлагать или связывать радионуклиды в почве и растениях, уменьшая их подвижность.

4. Стабилизация территории и лесные могильники. В некоторых случаях, если вырубка леса экономически или технически затруднительна, зараженные деревья оставляют на месте, а сам участок ограждают и обустривают для долгосрочного хранения. Это называется «лесной могильник».

Каждый из этих методов требует значительных ресурсов и строгого контроля, поскольку работа с радиоактивной древесиной несет опасность для окружающей среды и здоровья людей.

Общая площадь лесов на территории Свердловской области по государственному лесному реестру составляет примерно 70 % общей площади. Основными лесобразующими породами являются сосна и береза, на их долю приходится 34 и 36 % общей площади лесных земель. Около 2 % лесных насаждений расположены на землях промышленности и обороны, то есть в зонах с потенциально повышенным уровнем радиации. Леса, окружающие зоны радиационного загрязнения, играют ключевую роль в сдерживании и изоляции радионуклидов. Они выступают своеобразным щитом, задерживающим радиацию на листве, в древесине и почве, что помогает уменьшить радиационное воздействие на более удаленные экосистемы и населенные пункты. Однако этот защитный эффект временный: с течением времени накопленные радионуклиды могут представлять угрозу при разложении органики, лесных пожарах или вырубке зараженных деревьев. Изучение лесов как барьеров радиационному заражению подчеркивает важность этих экосистем для экологической безопасности и стабильности. Грамотное управление и защита таких лесов помогут снизить долгосрочные риски и смягчить последствия радиационных аварий для природы и человека.

Список источников

1. Новая ядерная девятка? Оценка угроз распространения ядерного оружия в мире. Доклад. 2-е изд. (испр. и доп.) / Ред. В. А. Орлов ; М. : ПИР-Пресс, 2023. 230 с.
2. Чеботина М. Особенности накопления радионуклида в компонентах природной среды. Уральский геофизический вестник, 2007. № 4 (13), С. 87–95.
3. Булко Н. И., Митин Н. В. Миграция и накопление ^{137}Cs в сосновых типах леса на сопряженных участках ландшафта. Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. Ил НАН Беларуси. Гомель : Ил НАН Беларуси, 1998. Вып. 49. С. 136–148.