

Радиоэкологические исследования хвойных пород деревьев

Н.А. Мельник¹, А.Н. Кизеев²

¹ *Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН*

² *Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН*

Аннотация. Рассматривается пространственное распределение суммарной удельной радиоактивности и содержание радионуклидов природного и техногенного происхождения в ассимиляционном аппарате хвойных пород деревьев: ели сибирской и сосны обыкновенной, произрастающих в центральной части Кольского полуострова. Установлена тенденция к накоплению радиоактивности в двухлетней хвое исследуемых деревьев. Показано, что хвоя ели содержит большее количество радионуклидов по сравнению с хвоей сосны. Полученные данные находятся на уровне фоновых значений, однако можно предполагать, что флуктуации этих радиационных факторов могут оказывать влияние на физиолого-биохимический статус хвойных деревьев, обуславливая тем самым их неспецифическую резистентность к техногенным поллютантам.

Abstract. The spatial distribution of total specific radioactivity and natural and artificial radionuclides' content in needles of the Siberian fir and Scotch pine, growing in the central part of the Kola Peninsula has been considered. The tendency to accumulation of radioactivity in two-year needles of the explored tree species has been established. The authors have suggested that the fir needle contain a lot of radionuclides in comparison with the pine needle. The obtained data are at the level of background values, however it is possible to suppose that the fluctuations of these radiation factors can exert influence on the physiological and biochemical status of coniferous trees.

1. Введение

Сохранение биосферных функций лесных экосистем в условиях освоения территории Севера является одной из важнейших международных проблем. Известно, что лесные биогеоценозы чувствительны к содержаниям химических элементов в почве, воде и воздухе (Крючков, Сыроид, 1986).

В настоящее время в связи с развитием атомной промышленности, испытаниями ядерного оружия и радиационными авариями значительная часть территории нашей планеты в той или иной степени загрязнена радионуклидами. Выпавшие в результате локальных эмиссий или глобальных переносов радионуклиды, пройдя ряд физико-химических трансформаций, становятся неотъемлемой техногенной составляющей практически всех ландшафтов (Черных, Сидоренко, 2003). Древесные фитоценозы аккумулируют радионуклиды в больших количествах, по сравнению с другими природными ценозами (*Радиационное воздействие...*, 1990). Сконцентрированные в лесной подстилке и коре деревьев, радионуклиды при лесных пожарах способны подниматься вместе с дымом в воздух и попадать в тропосферу и даже стратосферу, а затем переноситься по воздуху на большие расстояния (Довгуша и др., 1999), вследствие чего риску радиоактивного облучения может подвергаться население на значительных по площади территориях.

Кольский полуостров – один из наиболее индустриально развитых регионов на Севере. Здесь расположены крупнейшие предприятия горнодобывающей, обогащательной и металлургической промышленности, ежегодно извлекающие на поверхность земли миллионы тонн горных пород и выбрасывающие в окружающую среду тысячи тонн загрязняющих веществ, среди которых наиболее опасными для природы и для человека являются тяжелые металлы и радионуклиды. Помимо этих предприятий, на территории Кольского полуострова находятся: Кольская атомная электростанция (КАЭС), база Северного флота, судоремонтные заводы "Нерпа" и "Атомфлот", объекты хранения радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива – ФГУП "СевРАО" и Мурманский спецкомбинат "Радон" (*Доклад...*, 2004).

Учитывая обилие источников радиоактивного загрязнения на территории Кольского Севера, можно предположить миграцию радионуклидов из атмосферы и почвы в растительность. В связи с этим особую актуальность приобретает радиационно-экологический мониторинг бореальных лесов Кольского полуострова.

2. Объекты и методы

Объектом исследований послужил ассимиляционный аппарат ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих в ряде индустриально развитых регионов в центральной части Кольского полуострова, и являющихся здесь главными лесообразующими породами. В работе детальному исследованию подвергалась двухлетняя хвоя, которая у вечнозеленых растений несет основную фотосинтетическую нагрузку (Лукьянова и др., 1986).

Отбор растительных образцов проводили ежемесячно, с июня по сентябрь 2004 г., на стационарных пробных площадках, представляющих собой ельники кустарничково-зеленомошные и сосняки кустарничково-лишайниковые V и Va класса бонитета, произрастающие на подзолистых Al-Fe-гумусовых почвах (Раменская, 1983; Цветков, Семенов, 1985), приуроченные: к 30-километровой зоне действия Кольской АЭС (г. Полярные Зори), а также зонам влияния медно-никелевого комбината "Североникель" (г. Мончегорск) и Кандалакшского алюминиевого завода (КАЗ – г. Кандалакша). Древесная растительность на данных площадках типизирована в зависимости от степени ее повреждения выбросами комбината "Североникель" (табл. 1).

Образцы хвои (не менее 2-3 кг) отбирали из верхней части кроны деревьев. Объем выборки на каждой пробной площадке составлял 10-12 деревьев 60-80-летнего возраста, что считается достаточным для получения достоверных результатов исследований (Helmisaari, 1992).

Радиационно-экологические исследования хвои ели и сосны включали определение: удельной альфа-бета-активности, количественного содержания наиболее радиотоксичных нуклидов естественного (^7Be , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{238}U , и др., в Бк/кг) и техногенного (^{137}Cs , ^{90}Sr и др.) происхождения, мощность экспозиционной дозы (МЭД, в мкР/ч).

Определение суммарной альфа-бета-активности проводили радиометрическим методом (радиологический комплекс "Прогресс-АБГ", радиометры УМФ-1500Д, "Спутник"). Определение содержания радионуклидов проводили гамма-спектрометрическим методом (гамма-спектрометр "Прогресс" со сцинтилляционным датчиком NaI/Tl размером 63×63 мм) (Мельник, 2003).

Определение удельной радиоактивности ^{40}K проводили по энергетической линии гамма-квантов (E_γ) 1461 КэВ, а определение удельной радиоактивности отдельных нуклидов – матричным способом обработки сцинтилляционных гамма-спектров в энергетических интервалах (КэВ): 380 ÷ 520 ÷ 630 ÷ 720 ÷ 800 ÷ 1300 ÷ 1600 ÷ 1950 ÷ 2800, а также по энергетическим линиям ^{226}Ra , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{228}Ac , ^{208}Tl , ^{212}Bi , ^{137}Cs и др. (рис. 1).

Средние значения погрешности определения радионуклидов гамма-спектрометрическим методом при доверительной вероятности 0.95 составляли до 60 % в зависимости от концентрации радионуклидов, геометрии измерения и экспозиции.

3. Результаты и их обсуждение

Установлено, что МЭД на поверхности сырой и воздушно-сухой массы растительных образцов равна фоновым значениям и не превышает 15 мкР/ч. Суммарная удельная радиоактивность в ассимиляционных органах хвойных пород деревьев существенно варьирует в зависимости от местоположения пробных площадок ($p < 0.05$, рис. 2). Отмечена тенденция к накоплению радиоактивности в хвое этих пород деревьев с увеличением их возраста. Радиоактивность хвои второго года жизни выше (на порядок и более) по сравнению с радиоактивностью хвои текущего и первого годов жизни.

Максимальные значения суммарной удельной активности были зарегистрированы в хвое обеих пород деревьев в непосредственной близости от комбината "Североникель" (пробные площадки 1-04 и МК1-04), а также в Кандалакшском районе (площадки 6-04 и МК6-04). Повышенные значения суммарной удельной активности также были выявлены в хвое ели в районе р. Чуна (площадка 4-04) и в хвое сосны в районе р. Пиренга (площадка МК4-04). Минимальные значения удельной радиоактивности были отмечены в еловой хвое в Мончегорском районе (площадка 3-04), а в сосновой хвое в районе г. Полярные Зори (площадка МК5-04).

Установлено, что рассматриваемая активность обусловлена содержанием в хвое естественных радионуклидов рядов урана-238 и тория-232. Содержание тория-232 в хвое сосны варьировало от 5 до 200 Бк/кг, и в хвое ели от 80 до 380 Бк/кг, соответственно (рис. 3).

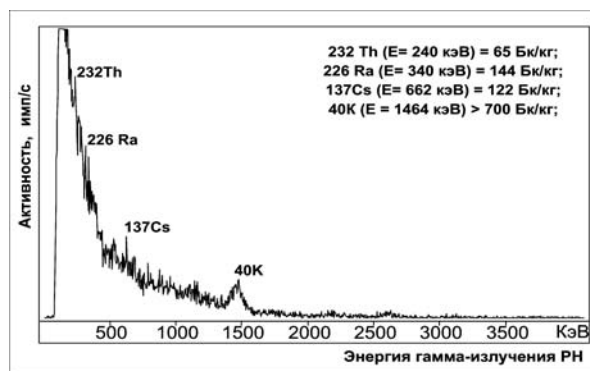


Рис. 1. Гамма-спектр хвои сосны обыкновенной: пробная площадка МК4-04 (время экспозиции – 1800 с., масса – 11 г, геометрия – "чашка Петри")

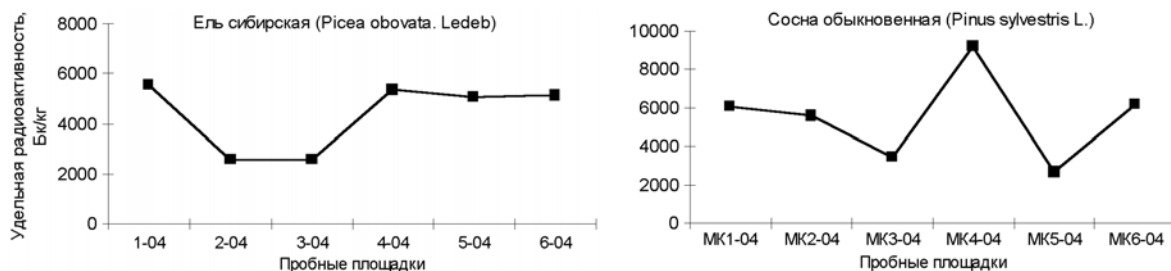


Рис. 2. Пространственное распределение суммарной удельной радиоактивности в ассимиляционных органах хвойных пород деревьев центральной части Кольского полуострова

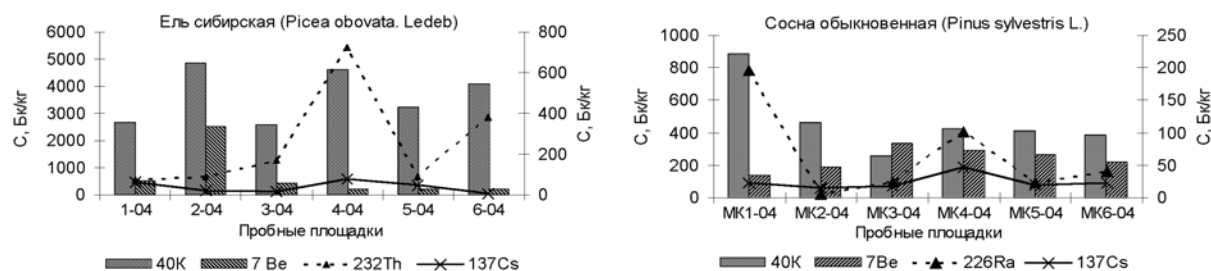


Рис. 3. Пространственное распределение природных и техногенных радионуклидов в ассимиляционных органах хвойных пород деревьев центральной части Кольского полуострова (С – концентрация радионуклидов, Бк/кг)

Содержание урана-238 (радия-226) изменялось в зависимости от расстояния до потенциальных объектов загрязнения окружающей среды в пределах от 5 до 200 Бк/кг в хвое сосны и до 300 Бк/кг в хвое ели.

В ассимиляционных органах рассматриваемых пород деревьев в большом количестве содержится природный ^{40}K (от 2500 до 4800 Бк/кг в хвое ели и от 250 до 800 Бк/кг в хвое сосны), который вносит наибольший вклад в бета-активность исследуемых проб.

Техногенные радионуклиды (^{22}Na , ^{60}Co , ^{106}Ru , ^{133}Ba , ^{140}La и др.) в измеримых количествах не обнаружены. Исследования показали, что наибольший вклад в суммарную удельную активность хвои сосны вносит ^{137}Cs (коэффициент множественной корреляции между этими показателями равен 0.83).

Содержание цезия-137 в хвое сосны находилось в пределах от 15 до 50 Бк/кг, а в хвое ели оно колебалось в значительно большем интервале – от 6 до 80 Бк/кг. При этом повышенные концентрации ^{137}Cs были обнаружены в хвое ели и сосны на расстоянии 8-9 км к югу от комбината "Североникель". Значительные концентрации ^{137}Cs были выявлены в сосновой хвое в районе р. Пиренга (площадка МК4-04) и в хвое ели в районе р. Чуна (площадка 4-04). Минимальные концентрации ^{137}Cs были обнаружены в еловой и сосновой хвое в районе г. Полярные Зори (площадки 5-04 и МК5-04).

Такое неоднозначное распределение ^{137}Cs в ассимиляционных органах хвойных пород деревьев можно объяснить следующими причинами. С одной стороны, повышенное накопление ^{137}Cs хвоей ели и сосны может быть связано с неравномерным осаждением из верхних слоев атмосферы на поверхность почвенно-растительного покрова продуктов деления от проводившихся ранее испытаний ядерного оружия и от аварийных выбросов Чернобыльской АЭС (Отчет..., 2004). С другой стороны, значительное увеличение ^{137}Cs в хвое ели и сосны может быть обусловлено с интенсивным закислением центральной части Кольского полуострова выбросами комбината "Североникель", вследствие чего увеличивается подвижность ионов цезия в почве, и происходит интенсивная миграция его через корневую систему в надземные органы растений.

Уран (радий-226) также образует в этих условиях подвижные формы и хорошо аккумулируется в наземной части растений, в том числе в хвое. Наибольшие концентрации ^{226}Ra и ^{232}Th были обнаружены в еловой и сосновой хвое в районах рек Чуна и Пиренга (площадки 4-04 и МК4-04). Источником поступления радиоактивных элементов в растения в этих районах может служить почва, в которую они попадают из почвообразующих пород, а также из грунтовых или поверхностных вод, текущих от мест с избыточным содержанием природных радионуклидов или от мест неглубокого захоронения радиоактивных отходов.

В исследуемых объектах был также обнаружен природный радионуклид космического происхождения ^7Be (рис. 3), который поступает с атмосферными осадками и аэрозолями из стратосферы вместе с воздушными массами (Мельник, 2004). Наибольшие концентрации его были обнаружены в хвое ели сибирской (от 180 до 2500 Бк/кг). В хвое сосны обыкновенной концентрация его находилась в пределах 130-330 Бк/кг. Это связано с интенсивным перемешиванием воздушных масс на открытых площадях на стадиях интенсивной и затухающей дефолиации в еловых и сосновых лесах (площадки 2-04 и МК3-04). Пространственное распределение ^7Be в хвое ели аналогично распределению ^{137}Cs

(коэффициент множественной корреляции для этих нуклидов равен 0.86). Вследствие этого, ^7Be может служить трассером при определении максимальных расстояний переноса техногенных радионуклидов при возможных аварийных выбросах на КАЭС.

Таким образом, различные уровни накопления радионуклидов природного и техногенного происхождения елью и сосной в значительной мере обусловлены поступлением их из атмосферного воздуха, а также из почвы и подстилающей породы. Обнаруженные радионуклиды распределяются по видам растительных объектов следующим образом: наибольшее количество их содержится в хвое ели сибирской, а наименьшее – в хвое сосны обыкновенной (рис. 3), что указывает на различную степень их накопления. Результаты, полученные в условиях Крайнего Севера, хорошо согласуются с результатами исследований радиоустойчивости хвойных пород деревьев, полученными в условиях высоких доз радиации (Одум, 1986; Козубов, Таскаев, 1994). При этом сосна характеризовалась меньшей устойчивостью к воздействию радиационного фактора, по сравнению с елью и другими высшими растениями.

4. Заключение

В результате проведенных исследований было впервые показано распределение радиологических характеристик в ассимиляционном аппарате ели сибирской и сосны обыкновенной, произрастающих в центральной части Кольского полуострова. Установлена тенденция к накоплению радиоактивности в двухлетней хвое этих пород деревьев. В еловой и сосновой хвое содержатся радионуклиды космогенного, геогенного и антропогенного происхождения. Количественное содержание радионуклидов в хвое ели выше, по сравнению с хвоей сосны.

Несмотря на вариабельность, максимальные значения рассматриваемых радиологических показателей не выходили за пределы природного фона. Однако поскольку хвойные деревья отличаются высокой радиочувствительностью (Гродзинский, 1989), можно предположить, что даже незначительные дозы радиации способны оказывать влияние на физиолого-биохимическое состояние рассматриваемых растений.

Наши дальнейшие исследования, направленные на интеграцию эколого-физиологических и радиоэкологических подходов к оценке состояния лесных биогеоценозов, позволят более объективно прогнозировать устойчивость лесных экосистем Крайнего Севера к альтерирующим факторам различного техногенного происхождения.

Литература

- Helmissaari H.-S. Spatial and age-related variation in nutrient concentrations of *Pinus Sylvestris* needles. *Silva Fennica*, v.26, N 3, p.145-153, 1992.
- Гродзинский Д.М. Радиобиология растений. Киев, Наукова думка, 384 с., 1989.
- Довгуша В.В., Тихонов М.Н., Егоров Ю.Н. Радиационная обстановка на Северо-западе России. Мурманск, Мурман. кн. изд-во, 224 с., 1999.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды Мурманской области в 2003 году. Мурманск, Мурман. кн. изд-во, 138 с., 2004.
- Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические и радиоэкологические исследования древесных растений. СПб., Наука, 256 с., 1994.
- Крючков В.В., Сыроид Н.А. Северотаежные биогеоценозы в условиях аэротехногенного воздействия. Общие проблемы биогеоценологии. М., АН СССР, с.13-15, 1986.
- Лукина Н.В., Никонов В.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, 316 с., 1998.
- Лукьянова Л.М., Локтева Т.Н., Бульчева Т.М. Газообмен и пигментная система растений Кольской Субарктики. Апатиты, Изд-во КФ АН СССР, 127 с., 1986.
- Мельник Н.А. Радиационный мониторинг естественных радионуклидов в северных широтах. Север-2003: проблемы и решения. Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, с.77-89, 2004.
- Мельник Н.А. Радиоэкологические аспекты безопасности использования горнопромышленных отходов Кольского региона в производстве строительных материалов. Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, 114 с., 2003.
- Одум Ю. Экология. В 2 т. М., Мир, т.2, 376 с., 1986.
- Отчет о радиационной обстановке в районе размещения Кольской АЭС за 2004 г. Полярные Зори, 32 с., 2004.
- Радиационное воздействие на хвойные леса в районе аварии на Чернобыльской АЭС. Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. Сыктывкар, Изд-во Коми научный центр УрО АН СССР, 136 с., 1990.
- Раменская М.Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л., Наука, 216 с., 1983.
- Цветков В.Ф., Семенов Б.А. Сосняки Крайнего Севера. М., Агропромиздат, 116 с., 1985.
- Черных Н.А., Сидоренко С.Н. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере. М., Изд-во РУДН, 430 с., 2003.

Таблица 1. Характеристика стационарных пробных площадок в еловых и сосновых лесах в центральной части Кольского полуострова

| Шифр пробной площадки | Географические координаты | | Район расположения площадки | Расстояние | | | Краткое лесоводственно-таксационное описание древостоев* | | | | | Тип состояния леса** |
|-----------------------|---------------------------|---------|-----------------------------|-----------------------|-------------|------------|--|-------------------|---------------------|--|-----|----------------------|
| | | | | от "Североникель", км | от КАЭС, км | от КАЗ, км | Состав пород | Средняя высота, м | Средний диаметр, см | Запас растительности, м ³ /га | | |
| | широта | долгота | | живые | сухие | | | | | | | |
| Еловые леса | | | | | | | | | | | | |
| 1-04 | 67°51' | 32°47' | г. Мончегорск | 8 | 46 | 75 | 10Е | 8 | 10 | 40 | 750 | ТР |
| 2-04 | 67°43' | 32°50' | | 22 | 34 | 62 | 10Е+Б | 10 | 18 | 120 | 720 | ЗД |
| 3-04 | 67°42' | 32°50' | | 29 | 28 | 56 | 9Е1Б+С | 10 | 18 | 140 | 240 | ИД |
| 4-04 | 67°38' | 32°41' | р. Чуна | 32 | 23 | 51 | 10Е+Б | 10 | 16 | 180 | 70 | |
| 5-04 | 67°22' | 32°26' | г. Полярные Зори | 63 | 10 | 21 | 7ЕЗБ+С | 11 | 18 | 220 | - | НД |
| 6-04 | 67°21' | 32°25' | г. Кандалакша | 77 | 24 | 8 | 9Е1Б | 10 | 16 | 200 | - | |
| Сосновые леса | | | | | | | | | | | | |
| МК1-04 | 67°50' | 32°47' | г. Мончегорск | 9 | 45 | 74 | 5С5Б | 7 | 8 | 120 | 600 | ТП |
| МК2-04 | 67°49' | 32°46' | | 11 | 43 | 72 | 10С | 8 | 9 | 210 | 50 | ТР |
| МК3-04 | 67°38' | 32°42' | р. Чуна | 32 | 23 | 51 | 7СЗБ | 8 | 11 | 360 | 30 | ИД |
| МК4-04 | 67°32' | 32°19' | р. Пиренга | 48 | 11 | 39 | 10С | 10 | 16 | 880 | - | |
| МК5-04 | 67°22' | 32°26' | г. Полярные Зори | 63 | 10 | 21 | 8С2Е+Б | 12 | 18 | 350 | - | НД |
| МК6-04 | 67°21' | 32°25' | г. Кандалакша | 77 | 24 | 8 | 7СЗЕ | 11 | 16 | 320 | - | |

*Данные Мончегорского и Зашейковского лесхозов;

** Тип состояния леса: ТП – техногенная пустошь с единичными живыми деревьями; ТР – Стадия техногенного редколесья; ЗД - стадия затухающей дефолиации; ИД – стадия интенсивной дефолиации; НД – стадия начальной дефолиации (Лукина, Никонов, 1998).