

СОСТОЯНИЕ ЛЕСНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ В 30-КМ ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ КОЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

А.Н. КИЗЕЕВ¹, Д.В. МАНАХОВ², К.Ю. СИЛКИН³

¹ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт имени Н.А. Аврорина Кольского научного центра РАН, Апатиты (aleksei.kizeev@mail.ru)

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва (demian2@yandex.ru)

³Воронежский государственный университет, Воронеж (const.silkin@ya.ru)

CONDITION OF FOREST PHYTOCENOSES WITHIN THE 30-KM AFFECTED ZONE OF THE KOLA NUCLEAR POWER PLANT

A.N. KIZEEV¹, D.V. MANAKHOV², K.Yu. SILKIN³

¹FSBIS Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N.A. Avrorin of Kola Science Centre of RAN, Apatity (aleksei.kizeev@mail.ru)

²Moscow Lomonosov State University, Moscow (demian2@yandex.ru)

³Voronezh State University, Voronezh (const.silkin@ya.ru)

Резюме. В работе приведены результаты исследований состояния лесных фитоценозов в 30-км зоне влияния Кольской атомной электростанции. Впервые дана оценка их благополучию по результатам наземных радиационно-экологических исследований и данным дистанционного зондирования Земли из космоса.

Ключевые слова: Кольская АЭС, ¹³⁷Cs, состояние фитоценозов.

Abstract. In this work the research data on forest phytocenoses within the 30-km affected zone of the Kola nuclear power plant are given. It is the first time that welfare of these phytocenoses was investigated basing on of radioecological measurements and Earth's remote sensing data.

Key words: Kola NPP, ¹³⁷Cs, condition of phytocenoses.

Мурманская область – один из наиболее индустриально развитых регионов на Крайнем Севере России. Здесь расположены крупнейшие в стране горнодобывающие, обогатительные и металлургические предприятия [Доклад..., 2015]. На территории региона действует Кольская атомная электростанция (КоАЭС), построенная в 1973–1984 гг. КоАЭС имеет в эксплуатации 4 энергоблока с реакторами ВВЭР-440, общей мощностью 1760 МВт. За время эксплуатации станция выработала более 260 млрд. кВт/ч электроэнергии [Кизеев, 2016].

Кольский полуостров богат лесными массивами и является полигоном для лесной радиэкологии. Известно, что лесные экосистемы на Земле представляют собой самостоятельный тип организации сообществ живых организмов. Они очень чувствительны к техногенному загрязнению. Радиочувствительность хвойных лесов в целом достаточно близка к таковой у млекопитающих (в том числе и человека) – самых радиочувствительных живых организмов. Леса играют большую защитную роль при выпадении радиоактивных веществ, становясь биогеохимическим барьером в миграции радионуклидов на местности, подвергшейся радиационному загрязнению [Алексахин, 2010; Щеглов, Цветнова, 2010]. Поскольку КоАЭС окружена хвойными лесами, то можно предположить, что в компонентах растительных сообществ в районе её расположения происходит интенсивное накопление техногенных радионуклидов. При этом особую актуальность приобретают исследования состояния высокочувствительных лесных фитоценозов в 30-км зоне действия атомной станции – потенциального источника повышенной радиационной опасности.

Работа проводилась в течение 2014–2015 гг. на стационарных мониторинговых площадках (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения стационарных мониторинговых площадок вокруг КоАЭС.

Это район санитарно-защитной зоны (СЗЗ) атомной станции: С-1 (координаты $67^{\circ}27'59.821''$ с.ш. и $32^{\circ}26'42.299''$ в.д.) и СЗЗ хранилища сухих слабоактивных отходов –

С-2 (67°28'56.701"; 32°24'50.400"). 5 пробных площадок расположены в зоне наблюдения (ЗН) КоАЭС на расстоянии 10 км от станции: П-1 (67°32'27.780"; 32°19'13.260"), П-2 (67°33'32.461"; 32°29'16.321"), П-3 (67°27'7.081"; 32°40'24.539"), П-4 (67°22'50.941"; 32°26'0.060") и П-5 (67°24'13.561"; 32°20'15.900"); 4 контрольных площадки – на границе ЗН на расстоянии 15 км: К-I (67°34'6.060"; 32°14'18.780"), К-II (67°35'25.200"; 32°35'48.120"), К-III (67°26'2.940"; 32°53'30.840") и К-IV (67°20'8.700"; 32°23'0.600"); а также 1 фоновая площадка – на расстоянии 30 км от станции – Ф (67°34'38.820"; 31°49'47.219").

По типу леса большинство площадок относятся к соснякам чернично-лишайниковым и соснякам зелёномошно-лишайниковым черничным [Самбук, 1932; Аврорин и др., 1936; Нешатаев, Нешатаева, 2002]. Древостой характеризуется преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с участием других пород деревьев – гибридных форм берёзы повислой и берёзы пушистой (*Betula pendula* Roth. x *Betula pubescens* Ehrh.), а также ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.). В травяно-кустарничковом покрове на площадках доминируют представители рода *Vaccinium*, преимущественно черника (*Vaccinium myrtillus* L.).

Встречаются также брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), вороника (*Empetrum hermaphroditum* Lange ex Hagerup), голубика (*Vaccinium uliginosum* L.) и багульник (*Ledum palustre* L.). В мохово-лишайниковом покрове доминируют лишайники *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Wezda и *Cadonia rangiferina* (L.) Weber ex F.N. Wigg. Встречаются лишайники *Cladonia deformis* (L.) Hoffm. и *Cetraria islandica* (L.) Ach. На камнях обычна мозаика из накипных эпилитных лишайников родов *Bellefleuria*, *Lecidea* и *Porpidia*. Из селёных мхов характерны *Pleurozium schreberii* (Brid) Mitt. и *Hylocomium splendens* Hedw.

В качестве объектов изучения были выбраны компоненты растительности – ветви и хвоя сосны обыкновенной, побеги черники и ягель – которые очень чувствительны к содержанию химических элементов в биосфере. Отбор растительных образцов проводили в течение вегетационного периода (июнь-сентябрь), в соответствии с общими требованиями к отбору проб [Черных, Сидоренко, 2003].

Радиоэкологические исследования выполняли в соответствии с нормативными документами по радиационной безопасности окружающей среды и человека [Нормы ..., 1999]. Они включали в себя радиометрическую съёмку местности (мкЗв/ч), измерение мощности экспозиционной дозы (МЭД, мкЗв/ч), а также количественного содержания одного из наиболее радиотоксичных долгоживущих дозообразующих радионуклидов техногенного происхождения – ¹³⁷Cs (период полураспада 30.17 лет). Удельные активности ¹³⁷Cs (Бк/кг) в пробах определяли с помощью сцинтилляционного спектрометрического комплекса «Мультирад» с гамма-детектором NaI(Tl) 63x63 и программным обеспечением «Прогресс».

Анализ благополучия фитоценозов на мониторинговых площадках производили по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. В работе были использованы материалы космических аппаратов: Landsat 7 и Landsat 8 (NASA, США). Каждая площадка наблюдалась в течение вегетационного сезона 2014 г. в среднем на 6 отдельных сценах.

В результате проведённой работы было установлено, что радиационный фон на мониторинговых площадках в среднем составлял 0,09 мкЗв/ч. МЭД на поверхности сырой и воздушно-сухой массы растительных образцов была равна фоновым значениям и не превышала 0,15 мкЗв/ч. Эти показатели находятся в пределах МЭД для населения на открытой местности (0,2 мкЗв/ч) и соответствуют малым уровням ионизирующего излучения (область малых доз для живых объектов, находится в пределах до 0,2–0,5 Зв, согласно [Нормы ..., 1999]).

Удельная активность ¹³⁷Cs в компонентах растительного покрова варьировала на разных площадках (таблица).

Таблица
Удельная активность ¹³⁷Cs в растениях, Бк/кг

№	Пло- щадка	Сосна обыкновенная		Черника		Ягель
		ветви	хвоя	ветви	листья	
1	С1	10±5,6	13±2,5	35±6,5	13±10,9	49±2,7
2	С2	15±5,7	7±2,1	50±5,9	61±9,6	59±2,9
3	1	19±3,4	23±3,1	87±6,9	165±17,1	72±3,7
4	2	12±2,4	9±2,9	38±7,6	58±12,5	80±3,8
5	3	14±3,7	19±4,6	36±5,1	72±13,4	37±4,4
6	4	11±2,7	23±3,0	38±4,7	51±8,3	29±2,0
7	5	11±3,8	18±3,2	26±4,9	56±10,2	49±2,7
8	I	26±3,5	34±3,7	80±7,2	115±13,9	105±3,3
9	II	13±4,1	21±3,2	31±8,2	41±13,6	29±1,4
10	III	9±2,6	11±2,4	69±8,1	71±12,6	22±1,8
11	IV	15±3,2	32±4,0	59±6,6	66±11,1	64±3,4
12	Ф	21±3,0	27±3,8	90±8,7	120±15,6	58±3,1

В ветвях сосны обыкновенной удельная активность ¹³⁷Cs в среднем находилась в пределах от 9 до 26, а в хвое – от 7 до 34 Бк/кг. В ветвях черники – от 26 до 90, а в листьях – от 13 до 165 Бк/кг. Удельная активность ¹³⁷Cs в ягеле составляла от 22 до 105 Бк/кг.

Основные пути поступления радионуклидов в бореальные лесные экосистемы – это атмосферный и водный перенос, а также миграция, вызванная геохимическими факторами [Черных, Сидоренко, 2003].

Накопление ¹³⁷Cs в исследуемых растениях могло обуславливаться естественным круговоротом продуктов деления, поступивших в атмосферу и почву от испытаний ядерного оружия, проводившихся ранее на полигонах планеты, а также вследствие глобального загрязнения атмосферы выбросами Чернобыльской АЭС. Максимальные величины удельных активностей ¹³⁷Cs не превышали установленного допустимого уровня для лекарственных растений, составляющего 400 Бк/кг [СанПин 2.3.2.1078-01, 2011].

Из вышеприведенной таблицы видно, что на большинстве площадок листья растений содержат повышенное количество ¹³⁷Cs. В ветвях его содержание было меньше. В побегах черники и в ягеле ¹³⁷Cs больше, чем в компонентах сосны обыкновенной. Содержание ¹³⁷Cs в ягеле обусловлено его аэральным поглощением из атмосферы. Максимальное содержание радиоцезия в побегах черники связано с корневым поступлением из органических горизонтов почвы, в которых, как известно, содержание ¹³⁷Cs возрастает [Щеглов, Цветнова, 2010]. Более низкая концентрация ¹³⁷Cs в сосне связана с тем, что зона поглощения корней деревьев находится на достаточно большой глубине, где содержание радионуклида незначительно.

Исследования состояния лесной растительности в 30-км зоне КоАЭС показали, что она не испытывает видимого угнетающего техногенного воздействия от ¹³⁷Cs. На основании действующих «Правил санитарной безопасности в лесах» [Правила ..., 2013], жизненное состояние древостоя здесь в целом можно охарактеризовать как «здоровое (без признаков ослабления)» и отнести к I категории по шкале состояния деревьев. Для таких древостоев характерна густая крона, хвоя/листья зелёного цвета, прирост текущего года нормального размера.

В то же время, благодаря комплексным исследованиям состояния растительного покрова в районе расположения КоАЭС помощью методов радиационной экологии и многозонального космического зондирования была выявлена устойчивая связь между удельной активностью ¹³⁷Cs и благополучием фитоценозов. Для получения возможности объективно сравнивать результаты наземных радиоэкологических исследований и материалов дистанционного зондирования Земли был построен обобщённый эмпирический индикатор (α), учитывающий площадь покрытия сосны и черники на мониторинговых площадках в совокупности со значениями удельной активности ¹³⁷Cs в их ассимиляционных органах. Был также определён вегетационный индекс *NDVI*, характеризующий благополучие фитоценозов [Шовенгердт, 2013]. С помощью корреляционного анализа полученных пространственных распределений индикатора α с одной стороны, и значений *NDVI* – с другой, было впервые показано, что вблизи атомной станции отрицательный эффект у

растительных сообществ проявляется менее интенсивно, чем на большем удалении от неё (в пределах изучаемой территории) (рис. 2). Иными словами, по мере удаления от КоАЭС увеличивается степень влияния ^{137}Cs на состояние растений.

Таким образом, была получена новая информация о содержании техногенного радионуклида ^{137}Cs в доминирующих растениях (сосне обыкновенной, чернике, ягеле), произрастающих в 30-км зоне КоАЭС. Установлены потенциальные источники поступления данного радионуклида в компоненты исследуемых растений.

Впервые выполнен анализ благополучия фитоценозов в 30-км зоне атомной станции с помощью многозонального космического зондирования. Показано наличие градиента, характеризующего состояние растительных сообществ.

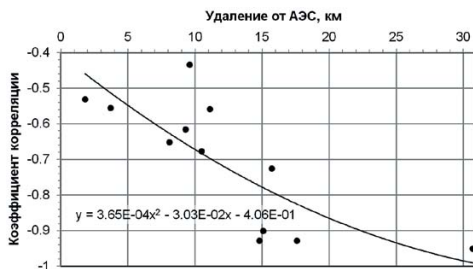


Рис. 2. Коэффициент корреляции между активностью биомассы и вегетационным индексом *NDVI* в зависимости от удаления мониторинговых площадок от КоАЭС.

ЛИТЕРАТУРА

- Аврорин Н.А., Качурин М.Х., Коровкин А.А.** 1936. Материалы по растительности Хибинских гор. *В кн.: Материалы по растительности центральной и западной частей Кольского полуострова. Труды совета по изучению производительных сил. Серия Кольская. Вып.11. Изд-во АН СССР: 19–90.*
- Алексахин Р.М.** 2010. Слово о лесной радиэкологии. *В кн.: XXXVIII Радиозоологические чтения, посвященные действительному члену ВАСХНИЛ В.М. Ключковскому (Обнинск, 15 декабря 2009 г.). Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ: 7–15.*
- Доклад** о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2014 году. 2015. Мурманск: 177 с.
- Кизеев А.Н.** 2016. Содержание ^{137}Cs и ^{40}K в почвенно-растительном покрове в районе расположения Кольской атомной электростанции. *Глобальный научный потенциал. 5: 56–59.*
- Нешатаев В.Ю., Нешатаева В.Ю.** 2002. Синтаксономическое разнообразие сосновых лесов Лапландского заповедника. *Ботанический журнал. 87(1): 99–106.*
- Нормы** радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758–99. 1999. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России: 116 с.
- Правила** санитарной безопасности в лесах. 2013. (утв. приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 24 декабря 2013 г. № 613). М.: 18 с.
- Самбук Ф.В.** 1932. Печорские леса. *В кн.: Труды ботанического музея АН СССР. Т. 24. М.: 63–250.*
- СанПин 2.3.2.1078-01.** 2011. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (в ред. от 06.07.11). М.: 56 с.
- Черных Н.А., Сидоренко С.Н.** 2003. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере. М.: Изд-во РУДН: 430 с.
- Шовенгердт Р.А.** 2013. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера: 592 с.
- Щеглов А.И., Цветнова О.Б.** 2010. Биогеохимия ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных экосистемах. *В кн.: XXXVIII Радиозоологические чтения, посвященные действительному члену ВАСХНИЛ В.М. Ключковскому (Обнинск, 15 декабря 2009 г.). Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ: 26–48.*