Оценка состояния лесных фитоценозов в 30-км зоне Кольской АЭС по наземным и спутниковым данным

А.Н. Кизеев¹, К.Ю. Силкин²

¹Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского научного центра РАН, Апатиты, 184209, Россия E-mail: aleksei.kizeev@mail.ru ²Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Россия E-mail: const.silkin@mail.ru

Проведены подробные радиоэкологические исследования хвои сосны обыкновенной и листьев черники на сети стационарных мониторинговых площадок, расположенных в 30-км зоне Кольской атомной электростанции. В рассматриваемых растениях были проведены гамма-спектрометрические измерения удельных активностей техногенного радионуклида ¹³⁷Cs – одного из основных компонентов радиоактивного загрязнения биосферы. Установлены потенциальные источники поступления данного радионуклида в хвою и в листья исследуемых растений. Впервые выполнен анализ благополучия фитоценозов на этих площадках по данным многозонального космического зондирования. Каждая мониторинговая площадка наблюдалась из космоса в течение сезона в среднем на 6 отдельных сценах. В работе были использованы материалы космических аппаратов: Landsat 7 и Landsat 8. Для получения возможности объективно сравнивать результаты наземных радиологических исследований и материалов дистанционного зондирования был построен обобщённый эмпирический индикатор удельной активности фитомассы, учитывающий проективное покрытие сосны и черники в совокупности со значениями удельной активности их хвои и листьев. Выявлена значительная корреляция между полученными параметрами. Установлено наличие градиента, характеризующего состояние окружающей среды в районе расположения атомной станции.

Ключевые слова: Кольская атомная станция, фитоценозы, радиоэкологические исследования, удельная активность, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 06.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-125-135

Введение

Мурманская область является зоной интенсивной производственной деятельности человека. Здесь расположены крупнейшие в России предприятия горнодобывающей, обогатительной и металлургической промышленности. На территории полуострова находится Кольская атомная электростанция (КоАЭС), атомфлот, объекты утилизации отработанного ядерного топлива. Все они входят в число радиационно опасных источников (Доклад..., 2014).

Лесные фитоценозы относятся к важнейшей составляющей биоресурсного потенциала страны (Исаев и др., 2014). Они способны аккумулировать радионуклиды в больших количествах, чем другие экосистемы. Можно предположить, что в компонентах растительного покрова в районе КоАЭС происходит накопление не только естественных, но и техногенных радионуклидов. Загрязнение окружающей природной среды радионуклидами затрагивает различные аспекты жизни растений, включая деятельность фотосинтетического аппарата (Кизеев, Никанов, 2006; Кизеев, 2016).

В настоящее время во всем мире разворачиваются масштабные программы глобального мониторинга растительных ресурсов на основе принципиально новых технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Можно констатировать, что появился новый общедоступный измерительный инструмент, который отвечает требованиям исследователей, изучающих различные земные объекты и процессы, и обладает в совокупности такими уникальными свойствами, как (Исаев и др., 2014):

 глобальность зоны наблюдения – т.е. возможность фиксировать то, что нельзя в течение короткого срока охватить другими системами наблюдений;

 объективность получаемой информации – т.е. независимость результатов от наблюдателя (пользователя) и условий измерений;

 высокая повторяемость – т.е. возможность обеспечить сбор рядов данных, необходимых для слежения за динамикой различных процессов;

воспроизводимость – т.е. возможность получения различными группами учёных доступа к одному и тому же набору данных для независимых проверок полученных результатов;

наличие архивов долговременных непрерывных наблюдений, в ряде случаев с исторической глубиной до 30 лет.

Комплексных мониторинговых исследований состояния растительного покрова в районах расположения атомных предприятий Кольского Севера, с использованием методов радиационной экологии и многозонального космического зондирования, до сих пор не проводилось. Поэтому целью данной работы явилась оценка экологического состояния лесных фитоценозов в 30-км локальной зоне КоАЭС по данным наземных радиоэкологических исследований и материалам ДЗЗ.

Материалы

КоАЭС – первая атомная станция России за Полярным кругом. Она построена в 1973– 1984 годах и имеет в эксплуатации 4 энергоблока с реакторами ВВЭР-440 общей мощностью 1760 МВт. Район расположения КоАЭС находится в юго-западной части Кольского полуострова, представляет собой полого-холмистую равнину с абсолютными отметками 120–250 м и характеризуется обилием ледниковых форм рельефа: конечно-моренных гряд, камов и озов, зандровых конусов. Депрессии заняты низинными болотами, юго-западной акваторией озера Имандра и небольшими озёрами в различной степени зарастания. Четвертичные отложения, прикрывающие коренные породы, представлены песчаными и супесчаными, сильно завалуненными моренами, реже – безвалунными отложениями песков и супесей, а в некоторых местах – суглинками (Экологический атлас..., 1999).

В качестве объекта наших исследований использовалась система из 12 стационарных площадок 4 типов (*табл. 1*). Каждая из них имеет площадь 1 га.

Исследуемые площадки располагались в районе озер Имандра и Верхняя Пиренга. Для них были выбраны места с максимально автоморфными условиями и однородным растительным покровом. Древостой характеризуется преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с участием других пород деревьев – гибридных форм березы повислой и березы пушистой (*Betula pendula* Roth. X *Betula pubescens* Ehrh.), а также ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.). В травяно-кустарничковом покрове на всех площадках доминируют представители рода *Vaccinium*, преимущественно черника (*Vaccinium myrtillus* L.).

N₫	Группа	Точка	Широта	Долгота	Расстояние от АЭС, км	Тип леса	
1		C-1	67,4666	32,4451	1,8	сосняк чернично-лишайниковый	
2	Станционные	C-2	67,4824	32,4140	3,7	сосняк чернично-багульниково- зелёномошный	
3		П-1	67,5411	32,3204	11,1	сосняк чернично-лишайниковый	
4	Пробные	П-2	67,5590	32,4879	10,5	сосняк зелёномошно-лишайниковый черничный	
5		П-3	67,4520	32,6735	8,1		
6		П-4	67,3808	32,4350	9,6	ельник чернично-зелёномошный (с примесью сосны)	
7		П-5	67,4038	32,3378	9,3	сосняк зелёномошно-лишайниковый черничный	
8		К-I	67,5684	32,2386	15,7	сосняк чернично-лишайниковый	
9	Контрольные	K-II	67,5903	32,5967	14,8		
10		K-III	67,4341	32,8917	17,6	сосняк зелёномошно-лишайниковый черничный	
11		K-IV	67,3358	32,3835	15,1		
12	Фоновая	Φ	67,5774	31,8298	30,7	сосняк чернично-лишайниковый	

Таблица 1. Характеристика мониторинговых площадок

Станционные площадки находятся в пределах санитарно-защитной зоны (C33) атомной станции (C-1) и C33 хранилища сухих слабоактивных отходов – ХССО (C-2); 5 пробных площадок – в зоне наблюдения (3H) КоАЭС на расстоянии ~10 км от станции (П-1 – П-5); 4 контрольные площадки – на границе 3H на расстоянии ~15 км (K-I – K-IV) и 1 фоновая площадка – на расстоянии ~30 км от станции (Ф). Картографическое представление системы площадок (мониторинговых точек) можно видеть на *рис. 1*.

Материалы наземных исследований

С каждой площадки в течение вегетационного периода (июнь – сентябрь) 2014 г. производили отбор образцов сосны обыкновенной и черники. Побеги сосны отбирали из верхней части кроны деревьев. Объем выборки на каждой точке составлял 10–12 деревьев 60–80-летнего возраста, что считается достаточным для получения достоверных результатов исследований (Helmisaari, 1992). Надземную часть черники (побеги с зелёными листьями) отбирали в количестве не менее 10 отдельных проб с каждой площадки.

На каждый растительный образец заполняли сопроводительную этикетку с указанием места и времени отбора. В лаборатории оставляли только хвою и листья. Из объединённых проб для каждой площадки путём тщательного перемешивания составляли смешанные образцы массой 1 кг, после чего их высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали и хранили в полиэтиленовых пакетах до начала анализа (Черных, Сидоренко, 2003).



Рис. 1. Схема расположения мониторинговых точек вокруг КоАЭС

Данные ДЗЗ

Архив материалов космических аппаратов Landsat содержит множество многозональных сцен по изучаемому району. Из них были выбраны те, которые характеризовались низким процентом облачного покрытия территории. Сезонный охват соответствовал периоду май – сентябрь. В работе были использованы материалы космических аппаратов: Landsat 7 и Landsat 8.

Летние сезоны 2015–2016 года отличались аномальной погодой (более облачной прохладной, влажной). Поэтому для подробного анализа был выбран 2014 г. Так как предполагается, что антропогенные факторы, участвующие в формировании искомых аномалий благополучия фитоценозов, действуют в течение многих лет, то данный подход не должен повлиять на достоверность исследований. Каждая мониторинговая площадка наблюдалась из космоса в течение сезона этого года в среднем на 6 отдельных сценах.

Методы

Обработка наземных данных

Лабораторные исследования выполняли в соответствии с нормативными документами по радиационной безопасности окружающей среды и человека (Нормы..., 1999). Радиоэкологические исследования проб включали радиометрическую съемку местности (мкЗв/ч) и количественное определение одного из наиболее радиотоксичных долгоживущих дозообразующих радионуклидов техногенного происхождения – ¹³⁷Cs (период полураспада 30,17 лет).

Удельные активности ¹³⁷Cs (Бк/кг воздушно сухой массы) в пробах определяли на базе Факультета почвоведения Московского государственного университета (МГУ) им. М.В. Ломоносова с помощью сцинтилляционного спектрометрического комплекса «Мультирад» с гамма-детектором NaI(Tl) 63×63 с программным обеспечением «Прогресс» (Методика..., 2003).

Для получения возможности объективно сравнивать результаты наземных радиологических исследований и материалов дистанционного зондирования был построен обобщённый эмпирический индикатор удельной активности фитомассы, учитывающий проективное покрытие сосны и черники в совокупности со значениями удельной активности их хвои и листьев. Индикатор имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{S_{\rm C}A_{\rm C} + S_{\rm q}A_{\rm q}}{S_{\rm C} + S_{\rm q}},$$

где $A_{\rm C}$ – удельная активность хвои сосны, $A_{\rm q}$ – удельная активность листьев черники; $S_{\rm C}$ – видимая площадь крон сосны, $S_{\rm q}$ – видимая площадь крон черники. По результатам полевых наблюдений в среднем для всех площадок было принято $S_{\rm C}$ = 0,6, $S_{\rm q}$ = 0,25 (как доля от площади участка).

Пространственное распределение данного индикатора по изучаемой территории представлено на *рис.* 2.

Обработка многозональных космоснимков

Обработка собранных материалов Д33 производилась с целью обеспечения одинакового радиометрического масштаба при любых условиях съёмки и характеристиках сенсоров космических аппаратов в соответствии с официальным руководством миссии (Landsat 7 Science Data Users Handbook; Using the USGS Landsat 8 Product).

Значение *NDVI* (Экология Севера..., 2003; Шовенгердт, 2010) рассчитывалось для всех доступных наблюдений мониторинговых площадок. В дальнейшем с помощью анализа сезонных тенденций была проведена оценка величины *NDVI* в пике вегетационного периода. Полученные результаты представлены на *рис. 3*.



Рис. 2. Схема пространственного распределения обобщённого индикатора удельной активности фитомассы



Рис. 3. Схема пространственного распределения оценочных значений NDVI на пике вегетационного сезона

Поскольку индекс *NDVI* прямо пропорционален накопленной за определённый период биомассе (Кашкин, Сухинин, 2001), то есть возможность провести сопоставление этого параметра с физиологическим состоянием растений, чьи листья (хвоя) подвергались радиационному воздействию.

Результаты

Результаты наземных исследований

Естественный радиационный фон в районе исследований в среднем составлял 0,09 мкЗв/ч. Данный показатель находится в пределах мощности дозы для населения

на открытой местности (0,2 мкЗв/ч) и соответствует малым уровням ионизирующего излучения (область малых доз для живых объектов – до 0,2–0,5 Зв, согласно (Нормы..., 1999)). Удельная активность ¹³⁷Cs в исследуемых компонентах растительного покрова на

мониторинговых точках представлена в табл. 2.

N₫	Группа	Точка	Хвоя сосны	Листья черники	α	
1	Станинании на	C-1	$13 \pm 2,5$	$13 \pm 10,9$	13,2	
2	Станционные	C-2	$7 \pm 2,1$	61 ± 9,6	23,1	
3		П-1	$23 \pm 3,1$	$165 \pm 17,1$	65,0	
4		П-2	$9 \pm 2,9$	$58 \pm 12,5$	23,6	
5	Пробные	П-3	$19 \pm 4,6$	72 ± 13,4	34,6	
6		П-4	$23 \pm 3,0$	51 ± 8,3	31,1	
7		П-5	$18 \pm 3,2$	$56 \pm 10,2$	29,4	
8		K-I	$34 \pm 3,7$	$115 \pm 13,9$	58,3	
9	1/	K-II	$21 \pm 3,2$	41 ± 13,6	27,3	
10	контрольные	K-III	$11 \pm 2,4$	71 ± 12,6	29,0	
11		K-IV	32 ± 4,0	$66 \pm 11,1$	41,6	
12	Фоновая	Φ	$27 \pm 3,8$	$120 \pm 15,6$	54,4	

Таблица 2. Величины средних значений удельной активности ¹³⁷Cs и абсолютной погрешности измерений в хвое сосны обыкновенной и в листьях черники, а также обобщённый эмпирический индикатор удельной активности фитомассы, Бк/кг

Удельная активность ¹³⁷Сѕ в хвое сосны обыкновенной в среднем находилась в пределах от 7 до 34, а в листьях черники – от 13 до 165 Бк/кг. Повышенное содержание данного радионуклида в хвое сосны отмечалось на площадках П-1, П-4, К-I, К-IV и Ф, а в листьях черники – на площадках П-1, К-I и Ф. Поступление ¹³⁷Сѕ в ассимиляционные органы исследуемых растений 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 (Израэль, 1998; Матишов, Матишов, 2001). Согласно результатам сравнительного анализа удельных активностей ¹³⁷Сѕ на разных мониторинговых точках по *t*-критерию, вклад КоАЭС был незначительным. Максимальные величины удельных активностей ¹³⁷Сѕ не превышали установленного допустимого уровня для лекарственных растений, составляющего 400 Бк/кг (СанПин..., 2011).

Результаты дистанционного анализа

Построенная схема распределения значений вегетационного индекса (*puc. 3*) демонстрирует разнородную картину, среди которых выделяются следующие варианты значений:

- минимум (П-1);
- нижний квартиль (С-1, П-3, К-І, Ф);

- медиана (П-2, К-IV);
- верхний квартиль (С-2, П-5, К-II, К-III);
- максимум (П-4).

Прослеживается определённая азимутальная анизотропия. Аномалии пониженных значений NDVI (то есть менее благополучных фитоценозов) вытянулись преимущественно по направлению СЗ-ЮВ, а положительных – вкрест им. Хотя ситуация не совсем однозначна и получить своё объяснение только влиянием розы ветров может лишь отчасти.

Корреляция между наземными и спутниковыми данными

Был проведён корреляционный анализ полученных пространственных распределений индикатора *a*, с одной стороны, и значений *NDVI* – с другой. Корреляция Пирсона (Харченко, 2008) выполнялась в скользящем окне между рядами значений, упорядоченных по удалённости от АЭС (*puc. 4*). Для этого сопоставляемые параметры были отсортированы по порядку увеличения расстояния между АЭС и мониторинговыми площадками (значения расстояний приведены в *maбл. 1*). После чего вдоль этих двух одномерных рядов было пропущено скользящее окно, в котором производилось вычисление коэффициента корреляции.



Рис. 4. Коэффициент корреляции между активностью биомассы и NDVI в зависимости от удаления точки по отношению к АЭС

Полученные значения были приписаны к мониторинговым площадкам, против которых располагалась середина окна. Распределение коэффициента корреляции в пространстве показано на *puc*. 5.

Можно видеть, что абсолютно все мониторинговые площадки характеризуются отрицательной корреляцией сопоставляемых параметров. При этом выделяется отчётливый тренд усиления отрицательной связи по мере удаления точки от атомной станции. Иными словами, по мере удаления от АЭС степень влияния содержания радионуклидов в растениях на их состояние возрастает. И влияние это, безусловно, негативное.



Рис. 5. Схема пространственного распределения значений коэффициента корреляции между активностью биомассы и NDVI

Выводы

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

в районе расположения КоАЭС впервые выявлена устойчивая связь между удельной активностью 137Сs и благополучием фитоценозов;

 вблизи атомной станции отрицательный эффект у растительных сообществ проявляется менее интенсивно, чем на большем удалении от неё (в пределах изучаемой территории);

 оценка бореальных фитоценозов, подверженных влиянию малых доз/концентраций техногенных поллютантов (радионуклиды, тяжёлые металлы и др.) должна стать обязательным элементом комплексного экологического мониторинга природных (лесных) сообществ.

Авторы выражают глубокую признательность за помощь в аналитической обработке растительных материалов к.б.н., старшему преподавателю факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова Д.В. Манахову.

Литература

- 1. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2014 году. Мурманск, 2015. 177 с.
- 2. *Израэль Ю.А.* Радиоактивное загрязнение земной поверхности // Вестник Российской Академии Наук. 1998. Т. 68. № 10. С. 898–915.

- 3. Исаев А.С., Барталев С.А., Лупян Е.А. Спутниковое зондирование Земли уникальный инструмент мониторинга лесов России // Вестник Российской Академии Наук. 2014. Т. 84. № 12. С. 1073–1079.
- 4. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
- 5. Кизеев А.Н., Никанов А.Н. Накопление радионуклидов в древесной растительности в индустриально развитых регионах Кольского полуострова // Экология человека. 2006. № 1. С. 38–41. Кизеев А.Н. Содержание ¹³⁷Сs и ⁴⁰К в почвенно-растительном покрове в районе расположения Кольской
- 6. атомной электростанции // Глобальный научный потенциал. 2016. № 5. С. 56–59.
- 7. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2001. 417 с.
- 8. Методика измерения активностей радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». Менделеево: ГНМЦ «ВНИИФТРИ», 2003. 30 с.
- 9. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. 116 с.
- 10. СанПин 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов, 2011 (в редакции от 06.07.11). 56 с.
- 11. Харченко М.А. Корреляционный анализ: учебное пособие для вузов. Воронеж гос. ун-т. Воронеж: ИПЦ ВЃУ, 2008. 30 с.
- 12. Черных Н.А., Сидоренко С.Н. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере. М.: Изд-во РУДН, 2003. 430 c.
- 13. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
- Экология Севера: Дистанционные методы изучения нарушенных экосистем (на примере Кольского полу-14 острова). Ред. А.П. Капица и У.Г. Рис. М.: Научный мир, 2003. 248 с.
- 15. Экологический атлас Мурманской области. Москва-Апатиты, 1999. 48 с.
- Helmisaari H.-S. Spatial and age-related variation in nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* needles // Silva Fennica. 1992. Vol. 26. No. 3. P. 145–153.
- 17. Landsat 7 Science Data Users Handbook // Goddard Space Flight Center, NASA. URL: https://landsat.gsfc.nasa. gov/landsat-7-science-data-users-handbook/ (accessed: 15.01.2015).
- Using the USGS Landsat 8 Product // U.S. Geological Survey. URL: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_ 18. Product.php (accessed: 15.01.2015).

State estimation of forest phytocenosis in the 30-km zone of the Kola NPP from ground and satellite data

A.N. Kizeyev¹, K.Yu. Silkin²

¹N.A. Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden - Institute of Kola Science Centre RAS Apatity 184209, Russia E-mail: aleksei.kizeev@mail.ru ²Voronezh State University, Voronezh 394018, Russia E-mail: const.silkin@mail.ru

Detailed radioecological studies of common pine needles and bilberry leaves at the stationary monitoring network sites located in a 30-km zone of the Kola nuclear power plant were conducted. Gamma-spectrometric measurement of specific activities of technogenic radionuclides ¹³⁷Cs were taken in these plants. This radionuclide is one of the major components of radioactive pollution of the biosphere. Potential sources of the radionuclide intake into the needles and leaves of the tested plants were traced. For the first time a welfare analysis of phytocenosis at these sites according to satellite remote sensing data was carried out. Each monitoring site was observed from the space during the season on 6 certain stages on average. Data of Landsat 7 and 8 were used. A generalized empirical indicator of radioactivity of phytomass was constructed. This parameter is used to get a possibility to objectively compare the ground radiological measurements and remote sensing data. This indicator considers the projective cover of the pine and bilberry and radioactivity value of their needles and leaves. Considerable correlation between the received parameters was revealed. Presence of a gradient characterizing the environmental condition in the vicinity of the nuclear power plant location was found.

Keywords: Kola nuclear power plant, phytocenosis, radiological studies, specific activity, remote sensing

Accepted: 06.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-125-135

References

- Doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Murmanskoy oblasti v 2014 godu (The report on state 1. and environmental protection of Murmansk region in 2014), Murmansk, 2015, 177 p.
- Izrael Yu.A., Radioaktivnoye zagryazneniye zemnoy poverkhnosti (Radioactive pollution of the land surface), 2. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk*, 1998, Vol. 68, No. 10, pp. 898–915. Isayev A.S., Bartalev S.A., Loupian E.A., Sputnikovoye zondirovaniye Zemli – unikalnyy instrument monitoringa
- 3. lesov Rossii (Remote sensing of Earth is the unique instrument of the woods of Russia monitoring), Vestnik *Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2014, Vol. 84, No. 12, pp. 1073–1079. Kashkin V.B., Sukhinin A.I., Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii
- 4 (Remote sensing of Earth from space. Digital processing of images), Moscow: Logos, 2001, 264 p.
- Kizeyev A.N. Nikanov A.N., Nakopleniye radionuklidov v drevesnoy rastitelnosti v industrialno razvitykh 5. regionakh Kolskogo poluostrova (Accumulation of radionuclides in wood vegetation in industrially developed regions of the Kola Peninsula), *Ekologiya cheloveka*, 2006. No. 1, pp. 38–41. Kizeyev A.N., Soderzhaniye ¹³⁷Cs i ⁴⁰K v pochvenno-rastitelnom pokrove v rayone raspolozheniya Kolskoy
- 6. atomnoy elektrostantsii (Contents 137Cs and 40K in the soil and vegetable cover around an arrangement of the Kola nuclear power plant), Globalnyy nauchnyy potentsial, 2016, No. 5, pp. 56-59.
- Matishov D.G. Matishov G.G., Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya (Radiation ecological oceanology), 7. Apatity: Izd-vo Kolskogo nauchnogo tsentra RAN, 2001, 417 p.
- 8 Metodika izmereniya aktivnostey radionuklidov s ispolzovaniyem stsintillyatsionnogo gamma-spektrometra s programmnym obespecheniyem "Progress" (The measurement technique of radionuclides activities by means of scintillation gamma spectrometer with the Progress software), Mendeleyevo: GNMTs VNIIFTRI, 2003, 30 p.
- SP 2.6.1.758-99 (Sanitary Regulation), Ministry of Public Health of Russia, Moscow, 1999, 116 p. 10. SanPin 2.3.2.1078-01 (Sanitary Regulation), Ministry of Public Health of Russia, Moscow, 2011 (Rev. 06.07.11),
- 56 p.
- 11. Kharchenko M.A., Korrelyatsionnyi analiz: uchebnoe posobie dlya vuzov (Correlation analysis), Voronezh: IPTC VGU, 2008, 30 p.
- 12. Chernykh N.A., Sidorenko S.N., Ekologicheskiy monitoring toksikantov v biosphere (Environmental monitoring of toxins in the biosphere), Moscow: Izd-vo RUDN, 2003, 430 p.
- 13. Schowengerdt R.A., Remote sensing: models and methods for image processing, Moscow: Tekhnosfera, 2010, 560 p. (Rus. transl.)
- 14. Ekologiya Severa: Distantsionnye metody izucheniya narushennykh ekosistem (na primere Kol'skogo poluostrova) (The Northland ecology: Remote methods of the broken ecosystems studying (on the example of the Kola Peninsula)), Moscow: Nauchnyi mir, 2003, 248 p.
- 15. Ekologicheskiy atlas Murmanskoy oblasti (Ecological atlas of Murmansk region), Moskva-Apatity, 1999, 48 p.
- 16. Helmisaari H.-S., Spatial and age-related variation in nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* needles, *Silva Fennica*, 1992, Vol. 26, No. 3, P. 145–153.
- 17. Landsat 7 Science Data Users Handbook, Goddard Space Flight Center, NASA, available at: https://landsat. gsfc.nasa.gov/landsat-7-science-data-users-handbook/.
- Using the USGS Landsat 8 Product, U.S. Geological Survey, available at: http://landsat.usgs.gov/Landsat8 18 Using Product.php.