

УДК 631.4:349.41+631.41+631.438.2

Composition, Property and Level of Radionuclide Contamination of the Soil Cover within 15 km Zone of the Beloyarsk Nuclear Power Plant

Inna V. Molchanova*,
Svetlana Yu. Kaygorodova, Lyudmila N. Mikhailovskaya,
Tatyana Yu. Gaberstein and Ivan A. Hlystov
Institute of Plants and Animals Ecology Ural Branch RAS
202, 8 Marta Str., Ekaterinburg, 620144, Russia

Received 20.01.2015, received in revised form 20.04.2015, accepted 12.08.2016

The investigation of soil-plant cover was conducted in the 15 km zone of the Beloyarsk Nuclear Power Plant (BNPP). In this paper, data of the complex analysis of the land structure, variety of the soil types, their physical and chemical properties and content of ^{90}Sr , ^{137}Cs and $^{238-240}\text{Pu}$ are presented. The greater part of the investigated territory (85.2 %) is occupied with lands of the forest fund: brown forest soils, rusty soils, soddy-brown soils, soddy-podzolic, grey and dark grey soils of middle and light granulometric composition. The agricultural lands are presented by dark and light agrozems. Radionuclides content in the examined soils decreased in the order $^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^{238-239}\text{Pu}$. The content of ^{90}Sr , ^{137}Cs and $^{238-239}\text{Pu}$ fluctuated between 0.4-7.8, 0.1-9.8 and 0.03-0.1 kBq/m², respectively. On the whole, the level of the radionuclides content in the soil cover is within the limits of the background that was formed in the Urals region.

Keywords: soil types, soils, physicochemical qualities, radionuclides, geochemical contiguous.

DOI: 10.17516/1997-1389-2016-9-3-321-337.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: molchanova_i_v@mail.ru

Состав, свойства и уровень радионуклидного загрязнения почвенного покрова 15-километровой зоны Белоярской АЭС

И.В. Молчанова, С.Ю. Кайгородова,
Л.Н. Михайловская, Т.Ю. Габерштейн, И.А. Хлыстов
Институт экологии растений и животных УрО РАН
Россия, 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

Представлены данные сопряженного анализа структуры земельных угодий в пределах 15-километровой зоны Белоярской АЭС (БАЭС), типового разнообразия почв, физико-химических свойств и уровня содержания в них ^{90}Sr , ^{137}Cs , и $^{238-240}\text{Pu}$. Большую часть (85,2 %) обследованной территории занимают почвы земель лесного фонда: буроземы, ржавоземы, дерново-подбуры, дерново-подзолистые, серые и темно-серые почвы среднего и легкого гранулометрического состава. Земли сельскохозяйственного назначения (5,3 %) представлены в основном агроземами темными и светлыми. Пойменные почвы (0,4 %), несмотря на их высокое потенциальное плодородие, слабо используются в сельском хозяйстве. В обследованных почвах радионуклиды по уровню содержания располагаются в убывающем ряду: $^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^{238-239}\text{Pu}$. При этом содержание ^{90}Sr варьирует от 0,4 до 7,8 кБк/м², ^{137}Cs – от 0,1 до 9,8 кБк/м², и $^{238-239}\text{Pu}$ – от 0,03 до 0,1 кБк/м². Такие количества находятся в пределах фоновых значений, характерных для Уральского региона.

Ключевые слова: категории земель, почвы, агрохимические свойства, радионуклиды, геохимическое сопряжение.

Введение

Накопленный опыт мониторинговых исследований в районах расположения атомных электростанций показал, что даже с учетом нескольких крупных аварий они обладают хорошими экологическими показателями по сравнению с другими вариантами производства электроэнергии (Колтик, 2001). Сооружение и эксплуатация крупных промышленных объектов неизбежно влекут за собой изменение состояния и свойств основных компонентов окружающей среды. Почвенный покров – незаменимый компонент биосферы, находясь в центре соприкосновения и взаимодействия всех приповерхностных геосфер Земли, явля-

ется основным узлом экологических связей, существующих между ними. В условиях изменения окружающей среды почвенный покров нуждается в слежении за его состоянием, поскольку на него приходится основная техногенная нагрузка (Елпатьевский, 1993; Добровольский, Никитин, 2000; Черников и др., 2000; Герасимова и др., 2003). Такая система наблюдений включает, наряду со сведениями о строении почвенного покрова и свойствах почв, оценку уровней содержания в них основных долгоживущих радионуклидов.

Мониторинг радиоактивного загрязнения компонентов наземных и водных экосистем в зоне влияния Белоярской АЭС (БАЭС)

на Урале в течение многих лет ведется силами сотрудников Института экологии растений и животных УрО РАН (Трапезников и др., 2007; Molchanova et al., 2013).

Атомная станция функционирует в штатном режиме с 1964 г. В 2015 г. запущен в эксплуатацию 4-й энергоблок, в непосредственной близости от него планируется сооружение 5-го. В процессе строительства большое значение имеет техногенный фактор. В пределах нарушенных территорий расширяется селитебная площадь, частично вырубается леса, изменяется соотношение между растительными группировками, водный режим территории и общий облик почвенно-растительного покрова, возможно химическое загрязнение участков, расположенных вблизи строящихся объектов. Учитывая изменения окружающей среды, иногда принимающие стремительный характер, и заботясь о своей безопасности, человечество выработало специальные виды деятельности, содержанием которых является анализ сложившейся ситуации на определенной территории и разработка мер по управлению ситуацией (Санжарова и др., 2010; Вакуловский, 2011; Фесенко, Фогт, 2012; Спиридонов, 2014).

В настоящей работе впервые представлены данные сопряженного анализа структуры земельных угодий, физико-химических свойств почв, доминирующих в пределах 15-километровой зоны БАЭС, и уровня содержания в них основных загрязнителей – долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{238-240}\text{Pu}$.

Объекты и методы исследований

Для оценки состава, структуры земельных угодий и типового разнообразия почв, доминирующих в пределах 15-километровой зоны Белоярской АЭС, составлена земельная и почвенная карты (М 1:50 000). Размеры земельных угодий и почвенных ареалов оцене-

ны прямым подсчетом площадей, выделенных на карте с помощью сантиметровой палетки.

При составлении карты земельных угодий использованы материалы Управления Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Свердловской области; публичная кадастровая карта, лесохозяйственные регламенты (2008-2012 гг.) Свердловского, Березовского и Сухоложского лесничеств.

Почвенная карта составлена на основе материалов маршрутной почвенной съемки, выполненной авторами в 2012-2013 гг. Для оценки типового разнообразия почв закладывали опорные полнопрофильные разрезы, из которых с учетом генетических горизонтов отбирали образцы для оценки химического и гранулометрического состава почв. Для определения содержания в почвах основных долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{238-240}\text{Pu}$ пробы отбирали слоями в 5 см с учетом площади до глубины 30-60 см. Схема расположения точек отбора почвенных проб приведена на рисунке.

Наряду с этим обследованы два геохимических сопряжения, в которых пробы отбирали в элювиальных, трансэлювиальных и аккумулятивных элементарных ландшафтах. Одно из сопряжений располагалось в пределах низинного Каменского болота (в 3-5 км к северу от АЭС), а второе – приурочено к Ольховской болотно-речной экосистеме, в которую длительное время сбрасывались слаборадиоактивные дебалансные воды АЭС и общеканализационные стоки г. Заречного. Расположенная в 5 км к юго-востоку от Белоярской АЭС экосистема включает одноименное болото и вытекающую из него небольшую речку Ольховку, впадающую в р. Пышму (рис.).

Диагностика почв и техногенных поверхностных образований (ТПО) проведена

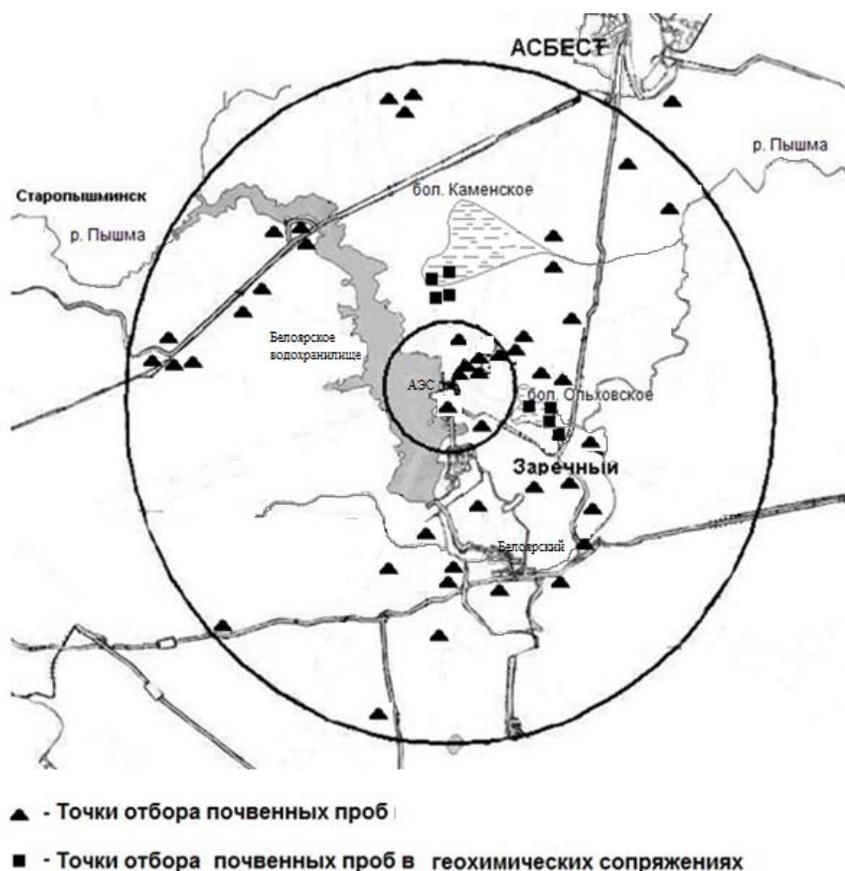


Рис. Карта-схема 15-километровой зоны Белоярской АЭС

в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России (Шишов и др., 2004). При анализе состава почвенного покрова учтены почвенные разности на уровне типа и подтипа, ТПО – на уровне групп и подгрупп.

Химические анализы выполнены по стандартным методикам (Аринушкина, 1970; Воробьева, 2006) и в соответствии с ГОСТами в аттестованной лаборатории Института экологии растений и животных УрО РАН (Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.515630, действительный до 25.04.2016). Гранулометрический состав мелкозема почв определен на автоматическом лазерном анализаторе частиц «Analysette 22» NanoTec (фирмы FRITSCHE). Интерпретация резуль-

татов гранулометрического анализа проведена с помощью треугольника Ферре в соответствии с международной классификацией гранулометрического состава почв (Шейн, Карпачевский, 2007).

Удельная активность ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$, выделенных радиохимическими методами, измерена на бета-спектрометре с программным обеспечением «Прогресс» (Россия) и альфа-анализаторе фирмы Canberra Packard (США), а ^{137}Cs – на гамма-спектрометре с многоканальным анализатором фирмы Ortec (США). Погрешность методов не превышала 20 %.

Результаты

Общая площадь обследованной территории 900 км², из них 41,4 км² занимает аква-

тория Белоярского водохранилища и р. Пышмы. Основная площадь (85,2 %) относится к землям лесного фонда (табл. 1). В их пределах расположены эксплуатационные леса, леса зеленых зон и лесопарков. На хорошо дренированных вершинах и пологих склонах холмов доминируют буроземы, ржавоземы, дерново-подбуры. К пологим склонам, ложбинам, логам приурочены дерново-подзолистые, серые, темно-серые и темно-серые глееватые почвы,

ареал которых имеет подчиненное положение.

Заболоченные леса и болота составляют около 3 % территории лесных земель. Болота, как правило, сточные, низинные; вектор их стока ориентирован в долины рек. Почвенный покров представлен торфяными эутрофными типичными почвами в сочетаниях и комбинациях с торфяно-перегнойно-глеевыми типичными.

Таблица 1. Состав земель и структура почвенного покрова 15-километровой зоны БАЭС

Категории земель по целевому назначению	Площадь		Почвы и ТПО
	км ²	%	
Земли лесного фонда:	767,0	85,2	
Защитные и эксплуатационные леса, леса зеленых зон, лесопарков (сосновые и сосново-березовые)	700,0	77,8	Буроземы типичные и оподзоленные в сочетании с литоземами серогумусовыми типичными; ржавоземы типичные и оподзоленные; дерново-подбуры псевдофибровые и оподзоленные; дерново-подзолистые типичные и глееватые; дерново-перегнойные; серые и темно-серые типичные и глееватые почвы
Леса водоохраных зон (березово-ольховые с примесью сосны) в комплексе с пойменными лугами и притеррасными болотами	5,0	0,6	Аллювиальные серогумусовые типичные и глееватые в сочетаниях с комбинациями аллювиальных торфяно-глеевых и торфяно-минеральных, перегнойно-глеевых и иловато-перегнойных почв
Заболоченные леса (березово-ольховые) в комплексе с болотами	23,0	2,6	Торфяные эутрофные типичные в комбинациях с торфяно-перегнойно-глеевыми типичными почвами
ООПТ (генетические резерваты сосновых и сосново-березовых лесов; в комплексе с агроценозами и болотными экосистемами)	39,0	4,3	Дерново-подзолистые типичные, агроземы светлые, буроземы и ржавоземы оподзоленные, дерново-подбуры псевдофибровые и глееватые, торфяные эутрофные торфяно-глеевые почвы
Земли с/х назначения:	48,0	5,3	
С/х производство	41,0	4,6	Агроземы светлые и темные, агроторфоземы, торфоземы агроминеральные
Сады и огороды	7,0	0,8	Агросерые, агродерново-подзолистые, агроземы светлые и темные, агроторфоземы, агроаллювиальные серогумусовые и темногумусовые
Земли поселений	35,6	4,0	Урбиквализемы в сочетании с турбоземами, стратоземами, абраземами и агроземами, агросерые, агродерново-подзолистые, агроземы светлые и темные
Земли промышленности, энергетики, транспорта, связи и т.д.	8,0	0,9	Литостраты в комбинации с реплантоземами; абраземы в сочетании с турбоземами; абралиты в комбинациях с литостратами и турбоземами; артиурбистраты в комбинации с артииндустратами; абраторфоземы; урбиквализемы

Площадь лесов водоохранных зон, расположенных в пойме р. Пышмы, невелика. Пойма частично занята сенокосами, пастбищами, огородами. Почвенный покров этих территорий представлен аллювиальными серогумусовыми почвами. Они занимают относительно высокие участки центральной поймы и часто встречаются в сочетаниях и комбинациях с аллювиальными торфяно-глеевыми, а также торфяно-минеральными почвами заболоченных притеррасных понижений. Кроме того, в границах земель лесного фонда выделены особо охраняемые природные территории (ООПТ) – резерваты и заказники – общей площадью 39 км², где преобладают дерново-подзолистые типичные почвы, буроземы и ржавоземы оподзоленные.

Земли сельскохозяйственного назначения занимают 5,3 % от общей площади. Почвенный покров представлен различными по качеству агроземами. Мелиорированные торфяники в их составе расположены на площади около 12 км² (1,3 % территории) и используются под торфоразработки и как сельхозугодья. Почвы представлены агроторфоземами и торфоземами агроминеральными.

На обследованной территории выделены земли населенных пунктов (г. Заречный, пос. Белоярский и др.), доля которых составляет около 4 % от общей площади. Почвенный покров в их пределах сильно трансформирован урбогенезом и техногенезом.

Землям промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики и т.д. принадлежит всего 0,9 % общей площади. Почвенный покров этих территорий значительно нарушен процессами техногенеза и урбогенеза, кое-где на месте почв сформировались ТПО: литостраты в комбинации с реплантоземами, абралиты в комбинациях с литостратами и турбоземами,

артиурбистраты в комбинации с артиндустратами.

Оценивая физико-химические свойства почв, доминирующих в пределах земель лесного фонда, их условно разделили по режиму увлажнения на две группы. Почвы с неустойчивым водным режимом и летним дефицитом почвенной влаги отнесли к группе автоморфных, а почвы с избыточным увлажнением и близким к поверхности уровнем залегания грунтовых вод – к группе гидроморфных почв. Автоморфные почвы земель лесного фонда: буроземы, дерново-подбуры, дерново-подзолистые и темно-серые, в которых преобладают дерновые и подзолообразовательные процессы, характеризуются слабокислой реакцией водной вытяжки (табл. 2). Величина рН в почвенных профилях варьирует в узких пределах – 5,0-6,3. Как правило, в нижних горизонтах профиля она несколько выше, чем в органогенных. В гумусовых горизонтах этих почв содержание общего углерода удерживается на уровне 5,0-13,5 % и снижается до десятых долей процента в минеральной части профиля; в слоях лесных подстилок оно составляет 20-27 %. Степень насыщенности основаниями почвенного поглощающего комплекса средняя и высокая. Среди обменных оснований преобладает кальций. Органогенные и гумусовые горизонты хорошо обеспечены элементами питания растений. Содержание в гумусовых горизонтах и подстилках подвижных форм фосфора удерживается на уровне 13-53 мг/100 г, калия – 30-201 мг/100 г, а легкогидролизуемого азота – 2,5-43,5 мг/100г и резко падает с глубиной. Содержание нитратов низкое, на один-два порядка ниже величин ПДК.

В состав земель лесного фонда входят пойменные почвы водоохранных зон, а также почвы заболоченных лесов и болот. Эта группа гидроморфных почв (торфяно-глеевая

Таблица 2. Агрохимические свойства автоморфных почв в составе земель лесного фонда

Горизонт*	Глубина, см	pH _{вод}	Обменные основания, мг-экв/100 г			Подвижные мг/100 г		Легкогидр. N, мг/100 г	C _{общ} , %	NO ₃ , мг/кг
			Ca+Mg	Ca	Mg	P ₂ O ₅	K ₂ O			
Дерново-подбур оподзоленный										
O	0-1,5	5,3	10,1	6,9	3,2	53,8	196,1	43,7	26,1	4,3
AY	1,5-8	5,9	2,1	1,3	0,8	22,9	30,0	9,7	4,9	0,1
BFe	8-46	5,8	2,0	—**	—	—	—	—	0,2	—
C	46-70	6,0	8,3	—	—	—	—	—	0,1	—
Бурозем оподзоленный										
O	0-4	5,2	8,5	5,9	2,7	20,2	136,4	15,6	23,9	16,1
AY	4-12	5,5	2,1	1,9	0,3	3,1	23,6	5,1	5,0	0,4
AYe	12-16	5,8	2,0	—	—	—	—	—	1,1	—
Дерново-подзолистая типичная										
O	0-4	5,4	48,0	40,0	8,0	39,9	187,2	17,2	22,0	10,1
AY	4-16	5,4	15,5	8,0	7,5	30,5	35,4	10,2	6,0	1,1
EL	16-20	5,0	13,6	7,0	6,6	5,2	30,2	2,5	1,2	0,8
BEL	20-29	5,1	9,6	5,6	4,0	0,6	4,2	0,3	0,2	0,3
BT	29-39	5,3	20,0	10,5	9,5	—	—	—	0,1	—
Дерново-подзолистая глееватая										
O	0-2,5	5,3	11,7	6,9	4,8	21,6	201,1	6,8	19,7	3,5
AO	2,5-6	5,4	8,0	6,1	1,9	5,9	44,3	4,6	12,2	0,3
AYg	6-24	6,0	10,0	6,7	3,3	3,1	20,6	2,5	8,6	0,1
BELg	24-33	6,3	—	—	—	—	—	—	1,3	—
Темно-серая глееватая										
O	0-3	5,6	61,8	48,3	13,5	43,6	190,4	18,5	27,0	1,0
AO	3-13	5,3	69,2	51,3	17,8	12,7	49,0	11,4	13,6	0,3
AU	13-19	5,6	38,0	30,0	8,0	8,9	76,6	9,2	9,3	0,3
AUe	19-25	5,6	12,3	9,5	2,8	4,8	64,6	10,2	5,5	0,2
BELg	25-52	5,6	12,4	9,1	3,3	—	—	—	0,8	0,04

*O – индекс лесной подстилки; AY – серогумусового горизонта; AYe – серогумусового оподзоленного; BFe – альфегумусового оподзоленного; C – почвообразующей породы; EL – элювиального (подзолистого) горизонта; BEL – элювиально-иллювиального; BT – иллювиального текстурного; AYg – серогумусового глееватого; BELg – глееватого элювиально-иллювиального; AO – грубогумусового; AU – темногумусового; AUe – темногумусового с признаками оподзоливания.

** – анализы не выполнялись.

типичная, торфяная эутрофная перегнойно-торфяная, аллювиальная торфяно-глеевая) характеризуется кислой и слабокислой реакцией водной вытяжки (табл. 3). Исключение составляет аллювиальная торфяно-минеральная почва, величина pH водной вытяжки которой приближается к нейтральным значениям. Ал-

лювиальные почвы богаты элементами питания растений (NPK) и общим углеродом, что позволяет считать их перспективными для использования в сельском хозяйстве.

Земли сельскохозяйственного назначения представлены агроземами светлыми и темными с нейтральной реакцией водной вы-

Таблица 3. Агрехимические свойства гидроморфных почв в составе земель лесного фонда

Горизонт*	Глубина, см	pH _{вод}	Обменные основания, мг-экв/100 г			Подвижные, мг/100 г		Легкогидр. N, мг/100 г	C _{общ} , %	NO ₃ , мг/кг
			Ca+Mg	Ca	Mg	P ₂ O ₅	K ₂ O			
Торфяно-глеявая типичная										
O	0-4	5,0	8,0	5,3	2,7	31,2	120,9	19,3	28,1	41,8
T	4-26	5,2	3,7	3,5	0,3	16,1	33,1	20,2	24,8	1,2
TG	26-50	5,3	2,3	1,3	1,0	89,5	5,6	9,7	5,2	1,0
G	50-...	5,4	2,4	—**	—	—	—	0,0	1,5	0,0
Перегноино-торфяная эутрофная (Каменское болото)										
O	0–3	5,1	62,8	49,8	13,0	56,2	101,2	12,1	32,0	15,5
TE1	3–15	5,5	60,9	47,9	13,0	29,4	25,4	5,5	27,1	2,3
TE2	15-45	5,4	66,6	52,1	14,5	15,5	30,7	5,0	24,6	0,4
TE3	45-65	5,4	65,0	49,3	14,1	—	—	1,5	18,4	—
Аллювиальная торфяно-глеявая типичная (низовья Ольховского болота)										
O	0–3	5,3	63,5	50,4	13,1	114,2	98,7	15,2	30,4	8,2
T1	3–25	3,9	48,5	42,6	5,9	22,5	46,1	19,0	28,0	1,9
T2	25-48	4,5	97,1	80,6	16,5	30,0	20,8	10,3	27,9	0,4
T3	48-65	5,4	19,7	16,1	3,6	10,4	15,4	—	18,2	—
G	65-80	4,8	53,8	42,4	11,3	94,2	8,9	—	1,0	—
Аллювиальная торфяно-глеявая торфяно-минеральная										
O	0-2	6,4	8,5	6,9	1,6	142,7	157,8	19,0	20,5	3,0
T	2-18	7,0	6,7	5,0	1,7	121,6	52,1	9,6	12,2	6,7
Tmg	18-60	6,0	6,1	4,0	2,1	71,4	28,2	8,0	6,7	0,4
G	60-...	6,1	10,7	7,5	3,2	—	—	—	3,3	0,1

*T – индекс торфяного горизонта; TG – торфяно-глеявого; G – глеявого; TE – торфяного эутрофного; Tmg – торфяного горизонта с примесью минерального материала в виде прослоек. Цифрами 1-3 обозначены подгоризонты. Остальные обозначения как в табл. 2.

** – анализы не выполнялись.

тяжки. Содержание питательных элементов (NPK) и их соотношение в агроземах сильно варьирует и зависит в основном от применяемой агротехники. Требуется корректировка баланса NPK и пополнение содержания органического углерода за счет сбалансированного внесения органических и минеральных удобрений.

Гранулометрический состав изученных типов почв варьирует в диапазоне от тяжелых супесей (опесчаненных суглинков) до тонких суглинков. На обследованной территории преобладают почвы легкого и средне-

го гранулометрического состава. Тяжелым гранулометрическим составом мелкозема характеризуются только нижние (текстурные) горизонты дерново-подзолистых почв и некоторые пахотные горизонты агроземов темных. Заиливание глеевых горизонтов торфяно-глеявых и аллювиальных почв компенсируется значительным содержанием песчаной фракции в этих почвах, и в целом их состав остается пылевато-суглинистым.

Для лесных почв вершин и склонов холмов (дерново-подбуров, ржавоземов, буроземов, дерново-подзолистых почв) характерна

значительная каменистость и дресвянистость, которые не учитываются при гранулометрическом анализе мелкозема. Эти факторы еще более облегчают состав почв, усиливают трещиноватость, аэрацию, дренаж и снижают их барьерные функции.

При оценке содержания в почвах ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{238-240}\text{Pu}$ учтены пути поступления радионуклидов в окружающую среду. В районе БАЭС загрязнение окружающей среды может происходить в результате регламентированных сбросов слаборадиоактивных дебалансных вод и газоаэрозольных выбросов, которые через воздушный бассейн попадают на поверхность почвенно-растительного покрова. Известно, что по мере удаления от источника загрязнения интенсивность выпадений радиоактивных веществ из атмосферы снижается и их содержание в почвах приближается к фоновым уровням, характерным для данного региона. В пределах Уральского региона содержание ^{90}Sr в почве составляет 1,6-3,0, ^{137}Cs – 4,6-6,8, а изотопов $^{238-240}\text{Pu}$ – 0,08-0,2 кБк/м² (Молчанова и др., 2006; Mikhailovskaya et al., 2015). Эти значения условимся считать региональным фоновым уровнем. В результате многолетнего радиоэкологического мониторинга в зоне БАЭС было показано, что газоаэрозольные выбросы станции не вносят

заметного вклада в формирование регионального фонового уровня (Трапезников и др., 2007). Поэтому в табл. 4 приведено содержание радионуклидов в почвах различных категорий земель без учета их удаленности от источника загрязнения. Видно, что по этому показателю радионуклиды располагаются в убывающем ряду: $^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^{238-240}\text{Pu}$. Как правило, содержание каждого радионуклида варьирует в пределах фоновых величин, характерных для Уральского региона. В отдельных случаях диапазон варьирования содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs расширяется по сравнению с фоном. Такие случаи имеют место на землях промышленного производства, что может быть обусловлено повышенной техногенной нагрузкой. В целом в пределах выделенных зон содержание радионуклидов изменяется случайным образом, без формирования сколько-нибудь выраженного пространственного тренда. Слабое влияние газоаэрозольных выбросов штатно работающей АЭС на уровень загрязнения почвенно-растительного покрова отмечали и другие исследователи (Djingova, Kuleff, 2002).

Детальное исследование зоны жидких сбросов БАЭС, проведенное ранее, показало, что Ольховское болото представляет собой источник вторичного загрязнения окружаю-

Таблица 4. Содержание радионуклидов (кБк/м²) в почвах различных категорий земель

Категории земель по целевому назначению	n	^{90}Sr	^{137}Cs	$^{238-239}\text{Pu}$
Земли лесного фонда:				
Леса зеленых зон	11	2,1(0,8-4,4)	5,7(1,5-8,2)	0,04(0,01-0,06)
Лесопарки	5	1,4(0,4-2,5)	4,6(3,3-6,2)	0,11(0,08-0,13)
Лесозащитные зоны	3	1,8(1,4-2,2)	2,9(2,1-3,5)	0,04(0,01-0,06)
Леса водоохранных зон	7	2,5(1,2-3,2)	5,4(2,9-8,0)	0,09(0,02-0,16)
Заболоченные леса	3	2,4(1,6-4,0)	5,5(4,2-8,8)	0,04(0,01-0,08)
Земли с/х назначения	8	1,5(0,9-1,8)	4,2(2,9-5,5)	0,03(0,03-0,04)
Земли поселений	8	1,0(0,7-1,2)	4,6(1,0-5,9)	0,10(0,06-0,13)
Земли промышленности	14	2,6(0,8-7,8)	3,4(0-9,8)	0,03(0,02-0,04)

щей среды. Накопленные в болоте радионуклиды, помимо их миграции в открытую гидрографическую сеть, поступают и в сопредельный почвенный покров, формируя зону с повышенным содержанием радионуклидов. Максимальное содержание радионуклидов обнаружено в полосе приболотных субаквальных почв. Являясь природным буфером, приболотные почвы ограничивают поступление радионуклидов в сопредельные участки ландшафта. На расстоянии 500 м от берега болота влияние жидких сбросов станции не обнаруживается (Трапезников и др., 2007; Молчанова и др., 2009; Molchanova et al., 2013).

Изучение закономерностей миграции радионуклидов в почвенном покрове показало, что спустя полвека от начала эксплуатации БАЭС в пределах зоны влияния ее газоаerosольных выбросов в почвах естественного сложения основное количество радионуклидов сосредоточено в верхних корнеобитаемых горизонтах. В зависимости от типа почв максимум содержания радионуклидов обнаруживается в верхней части почвенного профиля на глубине от 5 до 15 см. Изученные радионуклиды, как правило, имеют сходный характер распределения

в пределах одной почвенной разности. Из всех изученных свойств почв, влияющих на характер вертикального распределения радионуклидов, в них наиболее значимым оказался водный режим. В качестве примера в табл. 5 и 6 приведено распределение радионуклидов в профиле дерново-подзолистой и аллювиальной торфяно-глеевой почв. Дерново-подзолистая почва с автоморфным водным режимом характеризуется более тяжелым гранулометрическим составом, низким содержанием обменных катионов и органического вещества по сравнению с аллювиальной торфяно-глеевой почвой, формирующейся в гидроморфных условиях. В автоморфной дерново-подзолистой почве пологого склона максимальная удельная активность ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$ наблюдается в органических горизонтах (лесная подстилка), а ^{137}Cs – в верхнем 4–9-сантиметровом слое почв. Максимальные запасы всех изученных радионуклидов приурочены к горизонту АУ мощностью 10 см. Вниз по почвенному профилю содержание радионуклидов снижается, достигая минимальных значений на глубине 20–25 см. Сходный тип распределения наблюдается и в гидроморфной почве. Однако в аллювиальной торфяно-глеевой

Таблица 5. Вертикальное распределение радионуклидов в дерново-подзолистой почве, зона aerosольных выбросов БАЭС

Горизонт*	Глубина, см	^{90}Sr		^{137}Cs		$^{238-239}\text{Pu}$	
		Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²
О	0-4	47,5±0,1	0,01	16,5±8,8	0,07	0,9±0,1	0,007
АУ	4-9	7,9±0,3	0,34	47,6±2,4	2,00	0,7±0,1	0,020
	9-14	8,4±3,1	0,44	36,9±5,8	2,00	1,0±0,2	0,048
ЕL	14-19	5,1±3,2	0,35	17,0±13,0	1,00	0,1±0,05	0,005
ВЕL	19-24	2,9±1,4	0,29	2,2±1,0	0,30	н.о.	-
	24-29	2,7±1,3	0,14	н.о.**	-	н.о.	-
	Сумма		1,57		5,37		0,080

*Обозначения как в табл. 2. **н.о. – ниже предела обнаружения.

Таблица 6. Вертикальное распределение радионуклидов в аллювиальной торфяно-глеевой почве, зона аэрозольных выбросов БАЭС

Горизонт*	Глубина, см	⁹⁰ Sr		¹³⁷ Cs		²³⁸⁻²⁴⁰ Pu	
		Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²
О	0-4	124,0±12,2	0,60	264,0±50,0	1,31	2,8±0,5	0,014
Т1	4-9	49,3±5,0	0,40	180,7±31,0	0,62	3,1±0,6	0,024
	9-14	30,6±4,5	0,26	54,5±10,8	0,48	1,5±0,3	0,015
	14-19	16,0±1,5	0,26	19,0±2,0	0,34	0,4±0,1	0,006
	19-24	17,3±1,8	0,20	12,7±1,4	0,14	0,1±0,05	0,001
Т2	24-29	13,3±1,5	0,20	10,8±1,5	0,14	н.о.**	-
	29-34	8,7±1,6	0,15	3,3±1,1	0,06	н.о.	-
	34-39	8,0±1,8	0,15	3,0±1,0	0,06	н.о.	-
	Сумма		2,22		3,15		0,060

*Обозначения как в табл. 2 и 3, цифрами обозначены подгоризонты; **н.о. – ниже предела обнаружения.

почве удельная активность радионуклидов по всей глубине почвенного профиля выше, а значимые количества ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs обнаружены глубже, чем в дерново-подзолистой. При этом запасы радионуклидов в обеих почвах примерно одинаковы. Основное количество радионуклидов содержится в верхнем корнеобитаемом 20-сантиметровом слое, за пределы которого мигрирует около 30 % ⁹⁰Sr и 10 % ¹³⁷Cs. Что касается ²³⁸⁻²⁴⁰Pu, то практически весь он находится в пределах верхнего слоя в 20 см.

Иначе распределяются радионуклиды в аллювиальной торфяно-глеевой почве, загрязненной жидкими сбросами БАЭС (табл. 7). Удельная активность и запасы ⁹⁰Sr и ²³⁸⁻²⁴⁰Pu в ней на 1 порядок, а ¹³⁷Cs на 2 порядка величин выше, чем в такой же почве за пределами зоны влияния жидких сбросов БАЭС (табл. 6). Содержание ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs увеличивается с глубиной, достигая максимума при 25-35 см. В нижней части профиля наблюдается закономерное снижение удельной активности с глубиной. Отмечено повышение запасов этих радионуклидов на глубине 40-50 см. К этой же части профиля приурочено максимальное содержание ²³⁸⁻²⁴⁰Pu. Значимые

количества радионуклидов обнаруживаются на глубине 80 см.

Результаты радиоэкологического обследования двух геохимических сопряжений показали, что в районе Каменского болота запас ⁹⁰Sr в почвенно-растительном покрове элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов обследованного сопряжения примерно одинаков (табл. 8). Отмечается накопление ¹³⁷Cs в почвах трансаккумулятивных ландшафтов (центр болота, заболоченная пойма р. Каменка), однако содержание радионуклидов в них не превышает регионального фонового уровня. В пределах геохимического сопряжения, выходящего к Ольховскому болоту, загрязненному жидкими сбросами БАЭС, содержание ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs увеличивается по вектору стока и достигает максимума в заболоченной пойме р. Ольховка. На водораздельном участке и на склоне оно удерживается на уровне региональных фоновых значений. Заметим, что высокое содержание радионуклидов в центре Ольховского болота и на его окраинах обусловлено не столько перемещением радионуклидов в ландшафте, сколько их поступлением в болото с жидкими техногенными сбросами БАЭС. Однако смещение фронта загрязнения ¹³⁷Cs и

Таблица 7. Вертикальное распределение радионуклидов в аллювиальной торфяно-глеевой почве, зона жидких сбросов БАЭС

Горизонт*	Глубина, см	⁹⁰ Sr		¹³⁷ Cs		²³⁸⁻²³⁹ Pu	
		Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²
О	0-5	128,0±38,8	2,1	2672±121	44,5	2,5±0,5	0,041
Т1	5-10	178,1±48,5	2,8	2571±120	40,9	3,9±0,7	0,063
	10-15	211,2±49,6	2,9	2538±110	35,6	1,8±0,2	0,025
	15-20	370,6±70,5	6,7	6222±273	113,1	2,0±0,2	0,036
	20-25	230,7±56,3	5,5	22956±939	550,2	2,7±0,4	0,065
Т2	25-30	292,0±71,3	9,6	42303±1744	1398,5	1,5±0,2	0,050
	30-35	324,3±73,8	9,3	39102±1612	1125,7	1,0±0,2	0,027
	35-40	116,8±34,7	2,7	18296±756	429,8	0,9±0,2	0,021
	40-50	170,7±61,5	6,8	18378±767	730,9	5,3±0,5	0,210
Т3	50-65	65,0±22,0	1,9	2447±115	73,4	0,8±0,1	0,031
Г1	65-80	14,6±5,0	0,4	520±30	15,5	0,4±0,1	0,016
	Сумма		50,7		4458,1		0,560

*Обозначения как в табл. 2 и 3, цифрами обозначены подгоризонты.

Таблица 8. Содержание радионуклидов в почвах геохимических сопряжений, кБк/м²

Элемент рельефа	Ольховское болото		Каменское болото	
	⁹⁰ Sr	Cs ¹³⁷	⁹⁰ Sr	Cs ¹³⁷
Верхняя часть пологого склона	2,4±0,9	6,5±1,5	1,7±0,5	5,2±0,4
Пологий склон	2,1±1,5	6,9±1,5	3,1±0,3	4,3±0,2
Окраина болота	10,6±2,2	67,3±9,1	3,2±0,9	4,2±0,6
Центр болота	30,6±10,8	1650±495	1,9±0,6	6,2±1,9
Заболоченная пойма реки	49,0±12,0	4678±500	2,8±1,0	8,8±2,2

⁹⁰Sr по вектору стока в приболотных почвах и донных отложениях болота наблюдалось и ранее (Молчанова и др., 2009).

Обсуждение

При проведении мониторинговых обследований особую значимость приобретают «исходные» наблюдения, фиксирующие состояние экосистем на момент строительства и начала функционирования потенциально опасного объекта. Эти стадии отличаются по действующим факторам, которые можно разделить на две группы – факторы нерадиационной и радиационной природы. При-

веденные в работе оценки факторов нерадиационной природы, полученные на этапе строительства и ввода в эксплуатацию 4-го блока БАЭС, могут служить отправной точкой локального мониторинга вокруг станции как источника техногенного воздействия на основной депонирующий компонент окружающей среды – почвенный покров. Поскольку станция эксплуатируется в штатном режиме в течение 50 лет, в пределах обследованной нами территории сложилась метастабильная ситуация, которая неизбежно изменится с вводом в эксплуатацию новых мощностей. Прежде всего под новую площадку станции,

транспортные коммуникации, расширение селитебной территории было произведено отчуждение природных угодий и лесных массивов; на площади около 5 км² вырублены эксплуатационные леса и леса зеленых зон в черте г. Заречного (Вакуловский, 2011). В результате реализации намечаемой хозяйственной деятельности по строительству и эксплуатации 4-го и 5-го энергоблоков Белоярской АЭС почвенный покров на территории промплощадки и прилегающих к ней участков будет существенно нарушен и преобразован, а исходные типы горно-лесных почв полностью уничтожены. Следует ожидать, что преобразование почвенного покрова будет идти таким же образом, как и на промплощадке Белоярской АЭС, эксплуатируемой в течение 50 лет. Так, в результате строительства промышленных объектов, линейных сооружений, асфальтирования дорог и прилегающих территорий вместо исходных почвенных разностей (дерново-подбуров, буроземов, темно-серых глеевых, перегнойно-глеевых и торфяных почв) сформируются абраземы (почвы со снятыми верхними горизонтами), увеличится площадь ТПО и городских почв (Lebedeva et al., 2005). Среди них будут преобладать литостраты (различные насыпи), урбиквазиземы (почвоподобные образования с большим количеством включений строительных материалов, дорожных покрытий, коммуникаций и т.п.) и, возможно, артиурбистраты (свалки бытового мусора и строительных отходов). За пределами строительной площадки, в условиях отсутствия ярко выраженных антропогенных нагрузок, естественные процессы, протекающие в почвах, стремятся сохранить их в стабильном исходном состоянии. Поэтому за пределами санитарно-защитной зоны БАЭС агрохимические свойства почв, не испытывающих ярко выраженного техногенного воздействия, практически не изменяются и,

согласно приведенным данным, не отличаются от характеристик их аналогов, формирующихся в пределах Екатеринбургского округа Зауральской южно-таежной почвенной провинции (Гафуров, 2008). Подобные результаты получены и в ходе мониторинга территорий, примыкающих к Курской и Ростовской АЭС (Вакуловский, 2011). Отмечено, однако, что такие свойства почв, как емкость катионного обмена, сумма поглощенных оснований, содержание гумуса, подвижного калия и илистой фракции, существенным образом влияют на поведение радионуклидов в почвах в зоне размещения АЭС (Wasserman, 2009). Поэтому слежение за этими показателями является необходимой составляющей экологического мониторинга.

К факторам радиационной природы относится загрязнение почвенно-растительного покрова и пресноводных экосистем радионуклидами, поступающими в окружающую среду в ходе эксплуатации потенциально опасных ядерных объектов. Важная задача предпускового периода заключается в определении фонового содержания долгоживущих радионуклидов в основных компонентах окружающей среды. Приведенные в работе данные, характеризующие содержание ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs и ²³⁸⁻²⁴⁰Pu в почвах обследованной 15-километровой зоны БАЭС перед вводом в эксплуатацию новых мощностей, могут рассматриваться как реперные. Они могут послужить отправной точкой в проведении долговременного радиоэкологического мониторинга в зоне Белоярской АЭС.

Радионуклиды, загрязняющие почву, в течение длительного времени могут удерживаться в верхних корнеобитаемых горизонтах почв. Вертикальная миграция их в почвенном профиле в значительной мере определяется водным режимом. По-видимому, характер вертикального распределения радионукли-

дов в торфяно-глиевых почвах, загрязненных жидкими сбросами АЭС, в значительной степени обусловлен динамикой поступления в них радионуклидов. Белоярская АЭС – вторая промышленная атомная станция в России, единственная в стране АЭС с разными типами реакторов на одной площадке. Состав и активность ее жидких радиоактивных сбросов изменялись в течение всего периода эксплуатации станции. Известно, что максимальное количество радиоактивных сбросов поступало в Ольховское болото на начальных этапах эксплуатации Белоярской АЭС. Резкое снижение содержания радионуклидов в дебалансных водах станции произошло 25 лет назад, после вывода из эксплуатации первых двух энергетических блоков (Молчанова и др., 2009).

Наблюдаемое смещение фронта загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr по вектору стока и их накопление в почвах трансаккумулятивных ландшафтов свидетельствуют о перераспределении радиационной нагрузки на компоненты обследованных природных экосистем с течением времени. Характеристика закономерностей поведения радионуклидов в геохимических сопряжениях может служить основой для прогнозных оценок характера и масштабов перераспределения радионуклидов в экосистемах зоны влияния Белоярской АЭС.

Заключение

В ходе проведенного обследования почвенного покрова 15-километровой зоны БАЭС были оценены структура землепользования, типовое разнообразие почв, их агрохимические свойства, а также содержание в них долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{238-240}\text{Pu}$. Широко распространены почвы, сформированные под покровом сосновых и сосново-березовых

лесов. Они представлены хорошо дренированными буроземами, ржавоземами и дерново-подбурами среднего и легкого гранулометрического состава, щебнистыми, с кислой реакцией водной вытяжки и хорошей обеспеченностью элементами питания растений. Земли сельскохозяйственного назначения занимают гораздо меньшую территорию и представлены в основном темными и светлыми агроземами. Наиболее плодородные из них агроземы темные, распространены преимущественно в юго-западной части рассматриваемой территории. Пойменные почвы р. Пышмы, несмотря на высокое потенциальное плодородие, слабо используются в сельском хозяйстве. На землях промышленности почвенный покров практически полностью уничтожен, на месте почв сформировались ТПО, требующие рекультивации.

Наблюдения за состоянием почвенного покрова (почвенный мониторинг) включают, наряду с контролем содержания и баланса элементов питания растений, слежение за загрязнением почв радионуклидами. Последнее положение особенно актуально в зонах влияния предприятий атомно-энергетического комплекса. Проведенные исследования показали, что в настоящее время запас ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{238-239}\text{Pu}$ в почвах основных категорий земель удерживается на уровне фоновых значений, характерных для Уральского региона. Исключение составляет Ольховская болотно-речная экосистема (зона сброса слаборадиоактивных дебалансных вод АЭС), запас ^{137}Cs в почвах которой примерно в 100 раз превышает фоновый уровень.

Такие исследования в районах действующих и строящихся атомно-энергетических объектов, дополненные оценками, характеризующими уровень техногенной нагрузки на депонирующие компоненты наземных

экосистем, позволяют формировать объективную картину, складывающуюся в высокотехнологичных природно-территориальных комплексах. Актуальность проводимых исследований подчеркивается и тем, что подавляющая часть техногенных изменений окружающей среды отличается разрушительной

направленностью, что ведет к деградации почвенно-растительного покрова. В связи с этим важно найти перспективные подходы к его сохранению. Одним из них может быть оценка и управление геохимическим потоком веществ в ландшафте и интенсификация барьерных функций почв.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума УрО РАН (проект ориентированных фундаментальных исследований 13-4-017-БЯ).

Список литературы

Аринушкина Е.В. (1970) *Руководство по химическому анализу почв*. М., Изд-во Моск. ун-та, 487 с. [Arinushkina E.V. (1970) *Guidance on chemical analysis of soil*. Moscow, Moscow University Press, 487 p. (in Russian)]

Вакуловский С.М. (ред.) (2011) *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2010 году*. Обнинск, ФГБУ «НПО Тайфун», Росгидромет, 281 с. [Vakulovskii S.M. (Ed.) (2011) *Radiation situation in the Russia and neighboring states in 2010 year*. Obninsk, FGBU NPO Tayfun, Rosgidromet, 281 p. (in Russian)]

Воробьева Л.А. (ред.) (2006) *Теория и практика химического анализа почв*. М., ГЕОС, 400 с. [Vorobyova L.A. (Ed.) (2006) *Theory and practice chemical analysis of soils*. Moscow, GEOS, 400 p. (in Russian)]

Гафуров Ф.Г. (2008) *Почвы Свердловской области*. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 396 с. [Gafurov F.G. (2008) *Soils of the Sverdlovsk region*. Ekaterinburg, Ural University Publishing House, 396 p. (in Russian)]

Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. (2003) *Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация*. Смоленск, Ойкумена, 268 с. [Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokofieva T.V. (2003) *Anthropogenic soils: genesis, geography, reclamation*. Smolensk, Oekumena, 268 p. (in Russian)]

Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. (2000) *Сохранение почвы как незаменимого компонента биосферы: функционально-экологический подход*. М., Наука, 185 с. [Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. (2000) *Soil conservation as an indispensable component of the biosphere: functional ecological approach*. Moscow, Nauka, 185 p. (in Russian)]

Елпатьевский П.В. (1993) *Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах*. М., Наука, 253 с. [Elpat'evskii P.V. (1993) *Geochemistry of migration flows in natural and natural-anthropogenic geosystems*. Moscow, Nauka, 253 p. (in Russian)]

Колтик И.И. (2001) *Атомные электростанции и радиационная безопасность*. Екатеринбург, 366 с. [Koltik I.I. (2001) *Nuclear power plants and radiation safety*. Ekaterinburg, 366 p. (in Russian)]

Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н. (2006) *Радиоэкологические исследования почвенно-растительного покрова*. Екатеринбург, Изд-во УрО РАН, 89 с. [Molchanova

I.V., Karavaeva E.N., Mikhailovskaya L.N. (2006) *Radioecological investigation of soil-plant cover*. Yekaterinburg, UB RAS Press, 89 p. (in Russian)]

Молчанова И.В., Караваяева Е.Н., Михайловская Л.Н. (2009) Итоги многолетних радиоэкологических исследований природных экосистем в зоне жидких сбросов Белоярской атомной электростанции. *Вопросы радиационной безопасности*, 4(56): 20-26 [Molchanova I.V., Karavaeva E.N., Mikhailovskaya L.N. (2009) The results of several years radioecological investigations of the natural ecosystems under the influence of the Beloyarsk NPP liquid waste. *Radiation Safety Problems* [Voprosy radiacionnoj bezopasnosti], 4(56): 20-26. (in Russian)]

Санжарова Н.И., Кузнецов В.К., Исамов Н.Н., Панов А.В., Харитонов Е.В., Грудина Н.В., Шубина О.А., Абрамова Т.Н., Титов И.Е., Соломатин В.М., Петров К.В., Прохорова Т.В., Масыутенко Н.П., Санжаров А.И., Чионов В.Г., Кочерьян В.М. (2010) *Методы организации и ведения агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий в зонах техногенного загрязнения и оценка экологической обстановки в сельском хозяйстве в регионах размещения атомных электростанций и аварии на ЧАЭС*. Санжарова Н.И. (ред.) Обнинск, ВНИИЭСХРАЭ, 276 с. [Sanzharova N.I., Kuznetsov V.K., Isamov N.N., Panov A.V., Kharitonova E.V., Grudina N.V., Shubina O.A., Abramova T.N., Titov I.E., Solomatin V.M., Petrov K.V., Prokhorova T.V., Masyutenko N.P., Sanzharov A.I., Chionov V.G., Kocheryan V.M. (2010) *Methods of organization and management of agro-ecological monitoring of agricultural land in areas of technogenic pollution and assessment of the environmental situation in agriculture regional placement of nuclear power plants and the Chernobyl accident*. Sanzharova N.I. (ed.) Obninsk, VNIISKHRAE, 276 p. (in Russian)]

Спирidonov С.И. (2014) Перспективы системной радиоэкологии в решении инновационных задач ядерной энергетики. *Радиационная биология. Радиоэкология*, 54 (4): 415-422 [Spiridonov S.I. (2014) Perspectives system radioecology in solving problems of innovative nuclear energy. *Radiation Biology. Radioecology* [Radiacionnaya biologiya. Radioehkologiya], 54 (4): 415-422. (In Russian)]

Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваяева Е.Н., Трапезникова В.Н. (2007а) *Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах*. Т. 1. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 479 с. [Trapeznikov A.V., Molchanova I.V., Karavaeva E.N., Trapeznikova V.N. (2007) *Migration of radionuclides in freshwater and terrestrial ecosystems*. Vol. 1. Ekaterinburg, Ural. Univ. Press, 479 p. (in Russian)]

Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваяева Е.Н., Трапезникова В.Н. (2007б) *Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах*. Т.2. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 399 с. [Trapeznikov A.V., Molchanova I.V., Karavaeva E.N., Trapeznikova V.N. (2007) *Migration of radionuclides in freshwater and terrestrial ecosystems*. Vol. 2. Ekaterinburg, Ural. Univ. Press, 399 p. (in Russian)]

Шейн Е.В., Карпачевский Л.О. (ред.) (2007) *Теории и методы физики почв*. М., Гриф и К, 616 с. [Shein E.V., Karpachevsky L.O. (Eds.) (2007) *Theories and Methods of Soil Physics*. Moscow, «Grief and K», 616 p. (in Russian)]

Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. (2004) *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск, Ойкумена, 342 с. [Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. (2004) *Classification and diagnosis of Russian soils*. Smolensk, Oekumena, 342 p. (in Russian)]

Фесенко С., Фогт Г. (2012) Ядерная энергетика и окружающая среда: обзор проектов МАГАТЭ. *Радиационная биология. Радиоэкология*, 52 (6): 636-651 [Fesenko S., Voigt G. (2012) Nuclear Energy and the Environment: review of the IAEA Environmental Projects. *Radiation Biology. Radioecology* [Radiacionnaya biologiya. Radioehkologiya], 52 (6): 636-651 (in Russian)]

Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В., Грингоф И.Г., Ивонин В.М., Кормилицын В.Ф., Ладонин В.Ф., Литвак Ш.И., Милащенко Н.З., Мосиенко Н.А., Мосина Л.В., Муракаева С.А., Паракин В.В., Попов Г.Н., Постников Д.А., Раскатов В.А., Соколов О.А., Томилин В.Ф., Чекерес А.И. (2000) *Агроэкология*. М., Колос, 536 с. [Chernikov V.A., Alexakhin R.M., Golubev A.V., Gringof I.G., Ivonin V.M., Kormilitsyn V.F., Ladonin V.F., Litvak Sh.I., Milashchenko N.Z., Mosienko N.A., Mosina L.V., Murakaeva S.A., Parakin V.V., Popov G.N., Postnikov D.A., Raskatov V.A., Sokolov O.A., Tomilin V.F., Chekeres A.I. (2000) *Agroecology*. Moscow, Kolos, 536 p. (in Russian)]

Djingova R., Kuleff I. (2002) Concentration of caesium-137, cobalt-60 and potassium-40 in some wild and edible plants around the nuclear power plant in Bulgaria. *Journal of Environmental Radioactivity*, 59: 61–73

Lebedeva I.I., Tonkonogov V.D., Gerasimova M.I. (2005) Anthropogenic pedogenesis and the new classification system of Russian soils. *Eurasian Soil Science*, 38(10): 1026-1031

Mikhailovskaya L.N., Molchanova I.V., Nifontova M.G. (2015) Global fallout radionuclides in plants in terrestrial ecosystems of the Ural region. *Russ. J. Ecol.*, 46(1): 9-15

Molchanova I.V., Karavaeva E.N., Mikhailovskaya L.N. (2013) *Radioecological research on ecosystems of Beloyarsk NPP on the Ural*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 56 p.

Wasserman M.A. (2009) Overview of 13 years of research on radionuclide behavior in Brazilian soils. *Radioprotection*, 44 (5): 837-842