На правах рукописи

Касацкий Андрей Александрович

БИОЛОГИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ ^{137}Cs И К В ЛЕСНЫХ ФИТОЦЕНОЗАХ ЮЖНОЙ ТАЙГИ И ЛЕСОСТЕПИ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЙ

Специальность: 03.02.13 - почвоведение и
03.02.08 - экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва
2014

Работа выполнена на кафедре радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель:
доктор биологических наук, профессор, кафедра радиоэкологии и токсикологии МГУ имени М.В. Ломоносова
Щеглов Алексей Иванович

Официальные оппоненты:
Санжарова Наталья Ивановна, доктор биологических наук,ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, заместитель директора по научной раборте.

Брехова Любовь Ивановна, кандидат биологических наук, Государственное образовательное учреждение Воронежский государственный университет, доцент кафедры почвоведения и управления земельными ресурсами.

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Брянский»

Защита состоится «___»_____201___ г. в 15 час. 30 мин. в аудитории _____на заседании диссертационного совета Д 501.001.57 при МГУ им. М.В. Ломоносова на факультете почвоведения по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Московского государственного университета имени. М.В. Ломоносова.
Автореферат разослан «___»_____201__ г.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба присылать по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения. Факс: (495) 939-29-47;
(495) 939-21-47.

Ученый секретарь диссертационного совета: Алла Сергеевна Никифорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Лесные экосистемы представляют собой сложное природное образование с множеством связей между их компонентами, что накладывает существенный отпечаток на перераспределение в них техногенных радионуклидов. Как известно, поведение радиоактивных элементов, поступивших в лесные экосистемы аэральным путем в результате глобальных и аварийных выбросов, имеет свою специфику. По сравнению с литогенными стабильными изотопами и химическими аналогами оно первоначально сопровождается интенсивным поглощением растительным ярусом, а впоследствии специфическим перераспределением в системе «почва-растение». При этом для стабильных изотопов и химических аналогов радионуклидов характерны устоявшиеся показатели биологического круговорота (БК), выработанные эволюционным путем, для искусственных радионуклидов данное равновесное состояние не выражено.

Исследования по БК техногенных радионуклидов в лесных экосистемах начали проводиться достаточно давно (Клечковский, 1956; Тимофеев-Ресовский, 1962; Алексахин, Нарышкин, 1977; Алексахин, Тихомиров, 1976; Куликов, Пискунов, 1979; Тихомиров, Алексахин, 1972; Тюрюканова, Беляева, 1973 и др.). В этих работах первоначально были сформулированы некоторые положения БК данных элементов. Особую актуальность исследования по данному направлению приобрели после аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.). Наиболее полное отражение особенности биологического круговорота техногенных радионуклидов на первых этапах после выпадений нашли в работах А.И. Щеглова с соавторами (Щеглов, 1999; Щеглов, Тихомиров, 1996; Щеглов, Цветнова, 2000; Shcheglov, Tsvetnova, Klyashtorin, 2001 и др.). Полученные ими закономерности позднее были подтверждены и дополнены в работах других исследователей (Орлов, 2005; Переволоцкий, 2006, Мамихин и др., 2014). Вместе с тем, в рамках данной проблемы нерешенными остались вопросы, связанные с количественной оценкой потоков радионуклидов и их химических аналогов в системе «почва – растение», соотношением данных потоков и с оценкой изменения этого соотношения во времени при различных формах выпадений. В связи с этим возникает необходимость оценки показателей биологического круговорота техногенных радионуклидов в различных фитоценозах ближней и дальней зон чернобыльских выпадений в отдаленный период после выпадений и оценки пространственно – временной динамики БК в целом.

Целью настоящих исследований явилось выявление особенностей биологического круговорота ^{137}Cs и К в лесных фитоценозах южной тайги и лесостепи в отдаленный период после чернобыльских выпадений.

В задачи исследований входило:

1. Выявление показателей загрязнения ^{137}Cs (удельной активности и плотности загрязнения), содержания К и особенностей распределения данных элементов в почвах исследуемых фитоценозов.

2. Определение удельной активности ^{137}Cs и содержания К в компонентах древостоя и структурных компонентах опада различных фитоценозов.
3. Определение показателей биологического круговорота органического вещества, ^{137}Cs иК в различных фитоценозах.
4. Сравнительный анализ показателей биологического круговорота ^{137}Cs иК в различных фитоценозах.
5. Выявление особенностей биологического круговорота 137Cs и К в лесных фитоценозах ближней и дальней зон выпадений в отдаленный период.
6. Анализ пространственно – временной динамики показателей биологического круговорота ^{137}Cs в лесах ближней и дальней зон чернобыльских выпадений.

Научная новизна. Показаны особенности биологического круговорота ^{137}Cs в лесах ближней и дальней зон чернобыльских выпадений в отдаленный период. Выявлена различная продолжительность периодов достижения квазиравновестного состояния ^{137}Cs чернобыльского выброса на территории РФ, подвергшейся радиоактивному загрязнению, характеризующейся различными типами выпадений и почвенно-экологическими условиями. Установлено, что в настоящее время в лесах ближней зоны на слабоподзолистых иллювиально-железистых песчаных почвах (Брянское Полесье) показатели БК ^{137}Cs практически совпадают с таковыми его химического аналога - К. В лесных фитоценозах дальней зоны выпадений на темно-серых лесных почвах лесостепи (Тульская область РФ) на современном этапе наблюдаются значимые различия в показателях БК ^{137}Cs и К. Биологический круговорот ^{137}Cs характеризуется значительным превышением возврата элемента в почву над его потреблением. Наибольшие различия в исследуемых показателях отмечаются в лиственных фитоценозах. Показано, что период достижения квазиравновесного состояния ^{137}Cs в лесах зоны радиоактивного загрязнения в пределах Европейской части РФ различен: на участках ближней зоны выпадений начало данного периода приурочено к 2000 г., на участках дальней зоны выпадений оно отодвинуто на более длительный срок.

Практическая значимость. Исследование особенностей биологического круговорота техногенных радионуклидов в лесных экосистемах на различных этапах после выпадений позволяет установить изменение параметров их миграции; охарактеризовать роль лесных экосистем в удержании экотоксикантов в пределах территории загрязнения, разработать более совершенные прогностические модели динамики запасов радионуклидов в растительном покрове при различных сценариях радиоактивных выпадений и почвенно-экологических условий. Оценка параметров биологического круговорота техногенных радионуклидов и их изменение во времени позволяют дать оценку динамики нисходящих потоков радионуклидов и других поллютантов, а также внести коррективы в

технологии использования основной лесохозяйственной продукции, получаемой с загрязненных территорий с учетом динамики вклада коры в общее загрязнение древостоев

Апробация работы.Материалы диссертации были доложены на XX международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов - 2013» (Москва, 2013 г.); заседании кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (октябрь 2013 г.), Генеральной ассамблее Европейского Союза наук о Земле, секция «Загрязнение почв и ремедиация» (EuropeanGeosciencesUnion –EGU, Вена, 2014);VII съезде по радиационным исследованиям. Радиобиология. Радиоэкология. Радиационная безопасность (Москва, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 3 тезисов и 3 статьи, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 131 страницах компьютерного текста и состоит из введения, 6 глав, выводов и списка литературы, включающего 169 источников, из них 15 на английском языке. Работа проиллюстрирована 48 таблицами и 34 рисунками.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Объекты исследования.

Исследования проводились в 2010-2012 г. в хвойных и лиственных фитоценозах Брянской и Тульской областей Российской Федерации, подвергшихся наиболее значимому радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС. На крайнем западе Брянской области (Красногорский р-н, Красногорское лесничество), на территории наиболее близко примыкающей к ЧАЭС в пределах РФ, в лесных биогеоценозах на слабоподзолистых иллювиально-железистых песчаных почвах на флювиогляциальных отложениях были заложены 2 участка площадью 25*25 м: у*часток 1* - в сосняке–зеленомошнике 70-80-летнего возраста. Доминирующей породой в первом ярусе является сосна обыкновенная (PinussylvestrisL.). *Участок 2* заложен в березняке злаково-разнотравном 60 –летнего возраста. Доминирующей породой является береза повисшая (BetulapendulaRoth).

На территории Тульской области исследования проводились вПлавском районе (Плавское лесничество), который, по данным экологического районирования относится к последнему 4 (высокому) уровню потери экологического качества природно-территориальных комплексов (Состояние почвенно-земельных ресурсов…, 2002). Здесь объектами исследований послужили темно-серые лесные почвы под различными искусственными одновозрастными (60-70-летними) насаждениями березы и сосны, где также были заложены 2 участка площадью 25*25 м: у*часток 3* - в сосняке мертвопокровном (доминирующая порода -сосна обыкновенная), у*часток 4* – вберезняке злаково-разнотравном, расположенном в 300 м от участка 3 (доминирующая порода - береза повисшая) 60-70- летнего возраста.

Методы исследований.

Полевые работы включали детальное лесотаксационное и морфометрическое обследование стационарных пробных площадей (СПП) с оценкой породного состава, ярусности, высоты и диаметра ствола, возраста деревьев.

Для оценки радиологической обстановки на каждой пробной площади дозиметром- радиометром ДРГ-01Т проводилось измерение мощности экспозиционной дозы гамма-излучения на поверхности почвы и на высоте 1 м в 10 кратной повторности.

Для характеристики состава и свойств почв в буферных зонах СПП закладывался опорный почвенный разрез. В каждом разрезе проводилось подробное морфологическое описание генетических горизонтов, а также отбирались образцы лесной подстилки и минеральной толщи почв послойно с шагом 10 см до глубины 150-200 см.

Для определения степени загрязнения почв по ^{137}Cs и содержания обменного (подвижного) калия на исследуемых участках были заложены микропрофили, из которых послойно до глубины 20 см производился отбор почвенных образцов, согласно методикам, принятым при радиоэкологических исследованиях (Щеглов, 1999, Shcheglov et.al., 2001; Хомитулин, 2001). Первоначально в точках опробования методом рамки (площадью 25*25 см) отбирали лесную подстилку с подразделением ее на подгоризонты (О1, О2, 03). Для отбора образцов минеральной части почв применяли пробоотборник цилиндрической формы с площадью горизонтального сечения 54,1 см^2, позволяющий делить почвенный образец на сантиметровые слои (Щеглов, 1999, Shcheglov et.al., 2001).

Отбор проб структурных компонентов исследуемых пород производили по методикам, традиционно принятым в области изучения биологического круговорота веществ (Базилевич, Титлянова, 1978; Ремезов, 1959; Родин, Базилевич, 1965). Определение запасов фитомассы в древесном ярусе осуществляли методом, в основу которого был положен экспериментальный материал и математические зависимости между различными компонентами древостоя, выявленные ранее в ходе проведения исследований на СПП Брянской и Тульской областей, входящих в сеть радиоэкологического мониторинга кафедры радиоэкологии и экотоксикологии МГУ (Щеглов, 1999; Shcheglov et.al., 2001). Экспериментальный материал для оценки показателей биологического круговорота органического вещества, стабильного калия и ^{137}Cs получали непосредственно на исследуемых участках. Для этого проводили выбор модельных деревьев с учетом таксационного описания растительного покрова СПП. Выбранное модельное дерево спиливали и разделяли на структурные части: прирост хвои текущего года формирования, хвоя прошлых лет формирования, ветви крупные (толщиной > 1 см), ветви мелкие (толщиной < 1 см). Отбор компонентов производили равномерно по всей кроне. Отбор проб коры наружных и внутренних слоев коры, а также древесины осуществляли из выпилов, сделанных на разной высоте ствола. На ключевых участках также

проводилось экспериментальное определение фитомассы корней древесных растений (сосны и березы). Для этого выбиралось модельное дерево, в направлении от ствола которого на ширину кроны закладывалась траншея. Из траншеи послойно отбирались почва и корни древесных растений-эдификаторов. Глубина отбора варьировала в зависимости от глубины проникновения основной массы корней – от 30 до 50 см. Методика определения фитомассы корней включала снятие 10-см слоев почвы с последующим отбором корней различного диаметра (Базилевич, Титлянова, 1978). Почву после замачивания промывали на наборе сит различного диаметра, посредством этого корни были разделены на ряд фракций: а) 0 - 3 мм – тонкие сосущие корни; б) 3 – 10 мм – ростовые корни; в) 10 – 20 мм – крупные ростовые корни; г) > 20 мм – корни, выполняющие опорную функцию. После фракционирования корни высушивались, затем определялась фитомасса каждой фракции в различных слоях исследуемой почвенной толщи.

Количественная оценка массы опада проводилась с помощью опадоуловителей, которые в 10-кратной повторности устанавливались на каждом участке. Сбор и учет опада осуществлялся поздней осенью после окончания массового листопада. Опад собирали отдельно с каждого опадоуловителя, затем формировалась средняя проба, которая разбиралась на компонентные составляющие. Определялся фракционный состав опада: ассимилирующие органы (листья, хвоя), ветви, кора, шишки и морфологически плохо идентифицируемая и трудноразделимая фракция диаметром < 2 мм (т.н. «прочие»), в которую входят мелкие чешуйки коры, пылеватая фракция, фрагменты различных структур, семена, пыльца и т.п. Полученные фракции высушивалась при температуре 105°С, а затем и взвешивалась.

Оценка годичного прироста в древесном ярусе, в том числе подземных органов, давалась на основании ранее установленных соотношений для структур древостоя, полученных непосредственно на исследуемых участках (Щеглов и др., 1999; Shcheglov et.al., 2001). В балансовых расчетах удельную активность ^{137}Cs и концентрацию К в годичном приросте корней и корневом опаде считали одинаковой, как это практикуется в исследованиях подобной направленности (Щеглов, 1999; Shcheglov et.al., 2001).

Для характеристики основных свойств почв в отобранных из разрезов пробах проводили соответствующую подготовку к химическим и физико-химическим анализам, включающую разделение почвенной массы на скелет и мелкозем, сушку и размол.

Во всех почвенных пробах по общепринятым методикам были проведены следующие виды анализов: pH водный и солевой; состав обменных оснований - в солевой вытяжке 1н КС1 (Ca, Mg-атомно-абсорбционным методом; Al-с хромазуролом); гидролитическая кислотность - по Каппену; содержание гумуса - по Тюрину в модификации ЦИНАО. Емкость

катионного обмена и степень насыщенности основаниями рассчитывалась по стандартным формулам (Аринушкина, 1970).

Для определения удельной активности ^{137}Cs и содержания стабильного К все пробы почв, растений, опада измельчали, затем также высушивали при температуре 105ºС и тщательно размалывали до однородной массы.

Определение удельной активности радионуклидов ^{137}Csво всех пробах проводили без озоления на спектрометрическом комплексе Мультирад (страна изготовитель РФ). Гамма-спектрометрию осуществляли на анализаторе со сцинтилляционным NaI (Tl) детектором Предел обнаружения ^{137}Cs - 3 Бк/пробу; погрешность определения – 10-15%.

Определение содержания обменного (подвижного) калия в почвах осуществляли различными метолами: в почвах Брянской области - по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО, в почвах Тульской области - по методу Чирикова; концентрацию К в растениях – пламеннофотометрическим методом после мокрого озоления (ГОСТ 26207-91; ГОСТ 30504-97).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Состав и свойства почв СПП Брянской области. На участках, заложенных в Брянской области в сосняке-зеленомошнике и березняке разнотравно-злаковом, сформированы слабоподзолистые иллювиально-железистые песчаные почвы на флювиогляциальных отложениях.

В *сосняке* почвы характеризуются сильно и очень сильнокислой реакцией среды, ненасыщенны основаниями и очень низкогумусны. В *березняке*, в отличие от сосняка, почвы характеризуются среднекислой реакцией среды, более насыщены основаниями и содержат больше гумуса. Степень насыщенности основаниями в профиле в 1,2 – 1,8 раз, а количество гумуса в 1,5-2,4 раза выше, чем в почвах сосняка. Однако по данному показателю почвы березняка также классифицируются как низкогумусные (таблица 1).

Таблица 1

Основные физико-химические и химические свойства почв сосняка и березняка Брянской области

Горизонт	pH		Гидролитическая кислотность	Обменные основания		Σ Ca^{2+} и Mg^{2+}	Степень насыщенностиосно-ваниями, %	Гумус, %
	pH_{H2O}	pH_{KCl}		Ca^{2+}	Mg^{2+}			
			смоль(+)/кг					
Сосняк								
EB	4,93	4,05	10,20	4,21	2,07	6,28	38,1	1,24
B1	5,60	4,50	2,76	2,57	1,01	3,58	56,5	1,17
B2	5,80	4,85	1,74	1,79	0,75	2,54	59,3	0,34
BC	5,40	4,60	0,96	1,12	0,38	1,50	61,0	0,22
Березняк								
AE	5,21	4,95	5,86	6,71	5,17	11,88	67,0	2,94
B1	5,95	4,90	1,82	4,21	2,18	6,39	77,8	1,38
B2	5,99	5,00	0,91	1,95	0,97	2,92	76,2	0,46
BC	5,63	4,75	0,83	1,22	0,60	1,82	69,8	0,31

Состав и свойства почв СПП Тульской области. На исследуемых СПП Тульской области сформированы темно-серые лесные почвы. На участке под *сосняком* данные почвы характеризуются сильно и очень сильнокислой реакцией среды в подподстилочном горизонте АЕ и среднекислой – во всей нижележащей толще. Почвы насыщены основаниями и выскогумусны. Темно-серые лесные почвы Тульской области под *березняком* в отличие от почв под сосняком характеризуются среднекислой реакцией среды в верхней части профиля и слабокислой – в нижней. В составе обменных катионов ППК также преобладают Ca^{2+} и Mg^{2+}, при этом концентрация данных элементов и степень насыщенности основаниями почв под березовым насаждением выше аналогичных показателей в почвах сосняка. Почвы березняков так же, как и почвы сосняка, высокогумусны (таблица 2).

Таблица 2.

Основные физико-химические и химические свойства почв сосняка и березняка Тульской области

Горизонт	pH		Гидролитическая кислотность	Обменные основания		Σ Ca^{2+} и Mg^{2+}	Степень насыщенности основаниями, %	Гумус, %
	pH_{H2O}	pH_{KCl}		Ca^{2+}	Mg^{2+}			
			смоль(+)/кг					
Сосняк								
АЕ	5,00	4,00	14,2	16,4	8,4	24,8	63,6	7,15
А1	5,87	4,60	6,25	17,6	6,0	23,6	79,1	4,00
АВ	6,23	4,66	4,65	16,1	7,7	23,8	83,6	1,67
В1	6,26	4,51	3,5	14,5	5,9	20,8	85,6	0,65
В2	6,79	4,87	2,65	15,0	5,8	20,8	88,7	0,40
Березняк								
А	5,80	4,84	6,08	20,8	8,0	28,8	82,6	6,39
АВ	5,90	4,95	3,78	18,2	7,2	25,4	87,0	2,44
В1	6,28	5,49	2,94	15,8	11,0	26,8	90,1	0,86
В2	6,57	5,46	2,33	16,55	7,45	247,0	91,1	0,68

Радиоэкологическая характеристика территории Тульской и Брянской областей

Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения. В первые годы после аварийного выброса на Чернобыльской АЭС (1986) мощность эквивалентной поглощенной дозы гамма-излучения (МЭД) на территории Брянской области в пределах исследуемых участков в среднем составляла 0,71 мР/ч на поверхности почвы, на территории Тульской –0,18 мР/ч (Щеглов, 1999; Shcheglov, Tsvetnova, Kliashtorin, 2001). За период, прошедший после чернобыльских выпадений в лесных экосистемах исследуемой территории произошло изменение радиоэкологической обстановки, что выражается также и в снижении значений МЭД вследствие радиоактивного распада и заглубления активности в почвенную толщу. Так, по данным на 2011 г., МЭД на участке *сосняка* Брянской области заметно снижается и в среднем составляет 0,52 мР/ч на поверхности почвы и 0,36 мР/ч на высоте 1 м. В

березняке радиационная обстановка характеризуется несколько более мягкими показателями по сравнению с участком сосняка. Здесь отмечаются более низкие показатели МЭД на поверхности почвы и высоте 1 м, соответственно 0,43 и 0,30 мР/ч. По всей видимости, это связано с неоднородностью первичных радиоактивных выпадений, что отчетливо проявляется при анализе уровней загрязнения исследуемых участков. В целом же можно констатировать, что на СПП Брянской области значения МЭД почти в 20 раз превышают фоновые уровни данного показателя (Титаева, 2000; Ядерная энциклопедия, 1996). При этом наиболее напряженная радиационная остановка складывается в сосновом насаждении.

В Тульской области показатели МЭД значимо отличаются от аналогичных величин в сравнении с участками Брянской области (более чем в 10 раз). По данным на 2011 г., на участке сосняка значения МЭД в среднем составляют 0,033 мР/ч на поверхности почвы и 0,026 мР/ч на высоте 1 м, на участке березняка – соответственно 0,032 и 0,024 мР/ч. Таким образом, в настоящее время отмеченные уровни МЭД находятся в пределах фоновых значений данного показателя. Соответственно радиационная обстановка на рассматриваемой территории является вполне удовлетворительной.

Удельная активность, запасы ^{137}Cs и их распределение в почвах сосняка и березняка Брянской области.

Проведенные нами исследования показали, что *в сосняке* удельная активность ^{137}Cs в 0-20 см слое микропрофиля почв колеблется от 0,3 до 170 кБк/кг с наибольшими показателями в подгоризонте О3 подстилки и прилегающем к нему 0-1 см минеральном подподстилочном слое, с глубиной отмечается резкое падение рассматриваемого показателя.

По данным на 2002 год, плотность загрязнения 0-20 см слоя почв сосняка Брянской области составляла 5200 кБк/м^2(Щеглов, Цветнова, 2004). В рассматриваемый период основные запасы ^{137}Cs в почвах были сосредоточены в подстилке и подподстилочной 0-1 см минеральной толще (> 70%). В настоящее время плотность загрязнения почв сосняка по ^{137}Cs составляет 3698 кБк/м^2. При этом в слое подстилки, в основном в подгоризонте О3, аккумулировано 13,2% суммарных запасов радионуклида ^{137}Cs, в прилегающем к подстилке 0-1 см слое - 36,7%, а в целом в 0-5 см толще – 67, 3%. То есть в О3 и 0-1 см подподстилочном слое в настоящее время сосредоточено более 50% от суммарных запасов данного радионуклида и лишь около 20% активности переместилось в 1-3 см толщу (рис. 1).

Для выявления особенностей распределения ^{137}Cs и его химического аналога – стабильного К нами была проведена детальная оценка изменения его концентрации и запасов (обменных форм) в 0-20 см почвенной толще, где аккумулированы основные запасы ^{137}Cs в профиле. В исследуемой толще почв под сосновым насаждением в Брянской области концентрация

обменного (подвижного) калия варьирует от 0,01 до 1,5 г/кг (рис.1), а под березовым -– от 0,01 до 2,2 г/кг, с наибольшими показателями в слое О1.

А Б

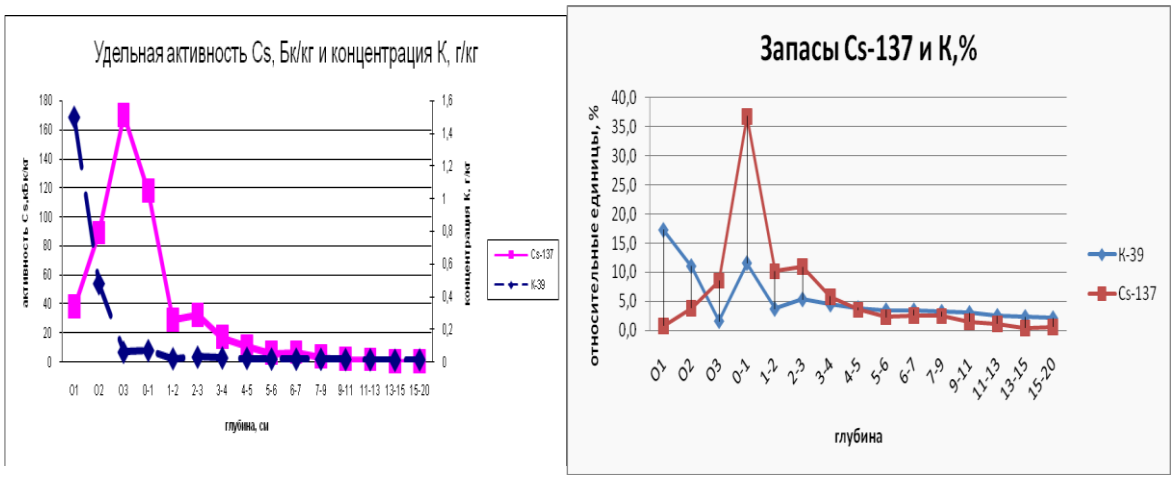

Рис. 1. Изменение концентрации обменного К, г/кг и удельной активности ^{137}Cs, кБк/кг (А) и распределение запасов этих элементов, % (Б) в микропрофиле почв сосняка Брянской области

Запасы К в 0-20 см толще почв сосняка достигают 5 г/м^2. При этом выраженные максимумы накопления К отмечаются в подгоризонте подстилки О1 и верхнем 0-1 см слое. Таким образом, повышенные значении концентрации и запасов стабильного К, как и ^{137}Cs, наблюдаются в 0-1 см подподстилочном слое. Однако, в отличие от ^{137}Cs, абсолютный максимум концентрации и запасов К в микропрофиле почв отмечается в листовом подгоризонте подстилки (О1). Все это, очевидно, обусловлено аккумуляцией элемента вследствие биологического круговорота (О1) и повышенной сорбцией К в самом верхнем подподстилочном минеральном слое 0-1 см.

В целом *в березняке* прослеживаются аналогичные закономерности в изменении удельной активности ^{137}Cs в исследуемой 0-20 см толще почв. Данный показатель варьирует от 1,8 до 77 кБк/кг с максимальными значениями в слое лесной подстилки.

В первый период после выпадений, плотность загрязнения 0-20 см слоя почв в березняках Брянской области была примерно в 1,5 раза ниже. Наблюдаемые различия в показателях плотности загрязнения были, очевидно, связаны с высокой пространственной неоднородностью первичных выпадений, которая отмечалась даже в пределах локальных участков (Щеглов, 1999; Shcheglov, Tsvetnova, Kliashtorin, 2001; Щеглов, Цветнова, 2004). При этом, в рассматриваемый период основные запасы ^{137}Cs в почвах березняка, так же как и сосняка, были сосредоточены в подстилке (> 70%). В настоящее время плотность загрязнения 0-20 см толщи почв березняка по ^{137}Cs составляет 2600 кБк/м^2.При этом только 14 % от суммарных запасов данного радионуклида осталось в слое подстилки, а около 70% активности переместилось в слой 0-5 см и примерно 16% - в нижележащую 5-15 см толщу.

В почвах под березовым насаждением концентрация и запасы обменного (подвижного) калия в исследуемой 0-20 см толще несколько выше чем в почвах сосняка и составляют 0,01 – 2,2 г/кг и 8,2 г/м^2 соответственно. Это, очевидно, определяется особенностями протекания БК калия в березовых лесах.

В целом, можно констатировать, что распределение ^{137}Cs и его химического аналога К в 0-20 см толще лесных почв под сосняками и березняками Брянской области по истечении более 25 лет после чернобыльских выпадений по-прежнему характеризуется определенными различиями. Основные запасы этих элементов в рассматриваемой толще почв приурочены: ^{137}Cs - к гумифицированному подгоризонту подстилки и 0-1 см подподстилочной толще, калия – к листовому подгоризонту подстилки О1 и 0-1 см минеральному слою.

Удельная активность и запасы ^{137}Cs в почвах сосняков и березняков радиоэкологического полигона Тульской области. Удельная активность ^{137}Cs в почвах Тульской области после аварии на ЧАЭС примерно на 2 – 3 порядка превышала фоновые показатели этого радионуклида в дочернобыльский период – 4-10 Бк/кг (Атлас загрязнения Европы.., 1998). За прошедшее после аварии время на рассматриваемой территории произошли заметные изменения в радиоэкологической обстановке, что в значительной степени связано, с одной стороны, с радиоактивным распадом и высокой необменной сорбцией ^{137}Cs в темно-серых лесных почвах данного региона, а с другой, - с интенсивным перераспределением радионуклида. Последнее, в основном, обусловлено зоофактором (Щеглов и др., 1992; Щеглов, 1999).

В настоящее время удельная активность ^{137}Cs в 0-20 см толще почв под сосняком Тульской области колеблется от 0,08 до 4 Бк/кг. При этом максимальные значения отмечаются в 1-2 см слое анализируемой толщи, с последующим значительным снижением данного показателя вниз по профилю. В подстилке фиксируется невысокий уровень удельной активности радионуклида (0,46 Бк/кг), что, по-видимому, обусловлено ее маломощностью и слабой выраженностью.

После аварии на ЧАЭС плотность радиоактивного загрязнения по ^{137}Cs на территории Плавского района Тульской области составляла 185-555 кБк/м^2 (5-15 Ки/км^2). В настоящее время плотность загрязнения почв под *сосняком* достигает 241 кБк/м^2, с максимальными показателями в 1-2 см слое (рис.2) . При этом в слое подстилки аккумулировано всего около 0,1%, а в подподстилочной 0-5 см толще – почти 75% от суммарных запасов ^{137}Cs. То есть в толщу глубже 5 см мигрировало примерно 24% активности. В этом заключается различие в распределении запасов ^{137}Cs в сосняках Тульской и Брянской областей, где до настоящего времени почти 50% от общих запасов радионуклида сосредоточено в подгоризоне подстилки О3 и 0-1 см минеральной толще

Концентрация и запасы К в микропрофиле (0-20 см) темно-серой лесной почвы составляют 0,05 - 2,7 г/кг и 24,5 г/м^2 соответственно, с максимальными значениямии: концентрации- в слое подстилки, а запасов – в минеральном слое 0-1 см. То есть содержание и распределение подвижного К в исследуемой толще почв сосняков Тульской и Брянской областей заметно различается (рис. 2).

А Б

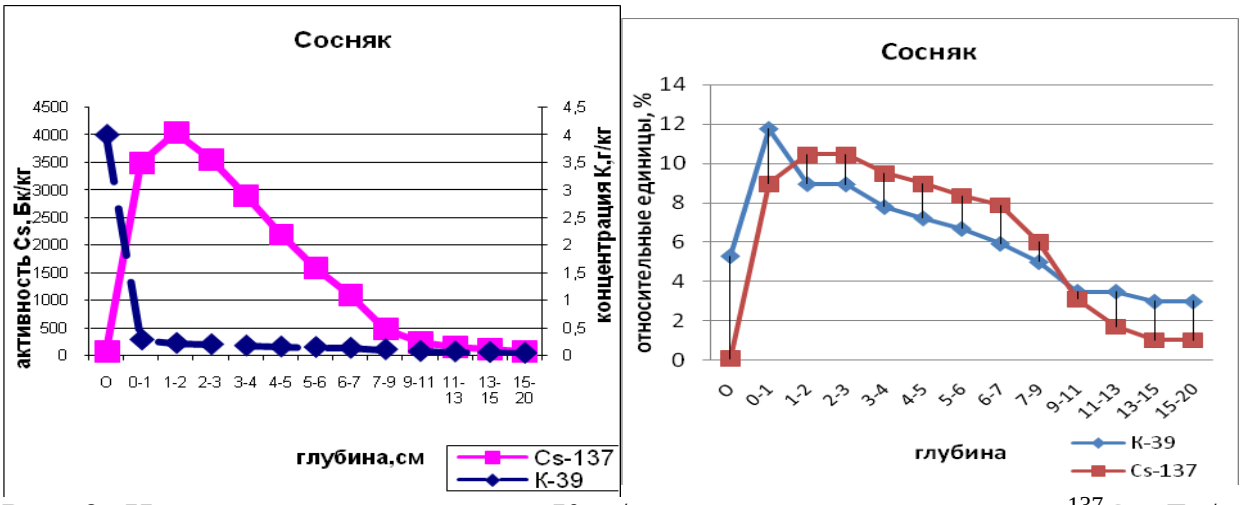

Рис. 2. Изменение концентрации К, г/кг и удельной активности ^{137}Cs, Бк/кг (А) и распределение запасов этих элементов, % (Б) в микропрофиле почв сосняка Тульской области

Диапазон изменения удельной активности ^{137}Cs в микропрофиле почв *березняка* Тульской области несколько уже, чем в сосняке – 0,04- 2,6 кБк/м^2 Здесь максимальные также отмечаются в 1-2 см минеральном слое. Меньшие показатели удельной активности ^{137}Cs наблюдаются и в горизонте О, что объясняется тем, что здесь подстилка относится к деструктивному типу и представлена только листовым подгоризонтом О1, разлагающимся в течение 1 года. В сосновом фитоценозе, где скорость трансформации растительных остатков ниже, подстилка более выражена.

Плотность загрязнения почв под березняком Тульской области составляет 240 кБк/м^2, что незначимо отличается от таковой на участке сосняка, расположенном от него в непосредственной близости. Однако в данном фитоценозе в слое подстилки содержится всего 0,07% активности, что почти в 1,5 ниже, чем в подстилке сосняка, а максимальные запасы радионуклида сосредоточены в 3-4 см слое (20,7%). Это может быть обусловлено, как уже подчеркивалось, более интенсивным разложением маломощной деструктивной подстилки березняка, с одной стороны, и более интенсивным перераспределением радионуклида вследствие деятельности дождевых червей, с другой (Щеглов, 1999). В целом основной запас ^{137}Cs в березняке Тульской области в настоящее время также сконцентрирован в 0-5 см толще – 55,4%. Однако здесь в толщу глубже 5 см мигрировало большее количество

активности – 44,5%. В этом прослеживаются различия в распределении запасов ^{137}Cs в березняках и сосняках Тульской области.
В исследуемом микропрофиле (0-20 см) почв березняка количество подвижного К колеблется от 0,05 до 4 г/кг с максимальными показателями в подстилке. Запасы обменного (подвижного) К в 0-20 см толще почв березового насаждения составляют 26,1 г/м^2, что несколько выше чем в почвах сосняка. Вместе с тем характер распределения запасов К и ^{137}Cs (в относительных единицах, %) очень сходен, здесь не отмечается таких резких различий, которые были выявлены для профильного изменения концентрации К в почвах.

Таким образом, можно констатировать, что в лесных БГЦ лесостепной зоны подстилка не является горизонтом аккумуляции или биогеохимическим барьером на пути миграции радионуклидов. Основным аккумулирующем слоем является верхняя 0-5 см минеральная толща почв, обогащенная органическим веществом и органоминеральными соединениями.

Биологическая продуктивность и круговорот органического вещества в лесных фитоценозах Тульской и Брянской областей. По запасам фитомассы и годичному приросту исследуемые растительные сообщества в *Брянской области* различаются незначимо: соответственно в сосняке они оцениваются как 22,5 и 0,7 кг/м^2, березняке – 22,3 и 1 кг/м^2. Аналогичные закономерности для региона исследований отмечались и ранее (Щеглов, 1999). В структуре фитомассы всех древесных пород абсолютно доминирует древесина (64 – 69%), при этом максимальные показатели отмечаются у сосны. Затем следует фракция корней (17,7-17,6%), на 3 месте по вкладу в общую фитомассу стоят фракции: у сосны - ветвей крупных (5,5%), а у березы – кора внутренняя (6,5%); вклад других структур древостоя значительно меньше. Наименьший вклад в структуру фитомассы вносят: у сосны – ветви мелкие (0,8%), у березы - ассимилирующие органы текущего года формирования (1,4%).
Различия в структуре фитомассы отдельных пород связаны с их биологическими особенностями, а также конкретными условиями корневого питания, архитектурой кроны и другими характеристиками (Родин, Базилевич, 1965).
Основное отличие в показателях БК в сосняке и березняке заключается в величинах возврата органического вещества в почву. Так, в березняке 44% от годичного прироста поступает в почву, а в сосняке – 36,2%, что в 1, 2 раза меньше. Таким образом, в истинном приросте сосняков удерживается больше органического вещества по сравнению с березняками, соответственно 63,8 и 56,0% (таблица 3).

Таблица 3.

Круговорот органического вещества в лесных фитоценозах

Фитоценоз	Запасы фитомассы, кг/м^2	Показатели биологического круговорота					
		Годичный прирост		Удерживается в фитомассе		Поступает в почву с опадом	
		кг/м^2/год	%	кг/м^2/год	%	кг/м^2/год	%
Брянское Полесье							
Сосняк	21,5	0,7	100	0,4	63,8	0,2	36
Березняк	22,3	1	100	0,6	56	0,4	44
Северная лесостепь							
Сосняк	23,8	0,8	100	0,475	62	0,3	38
Березняк	26,3	1,5	100	0,874	57	0,7	43

По запасам фитомассы и годичному приросту исследуемые растительные сообщества в *Тульской области* различаются более значимо, особенно по величине годичной продукции: в сосняке они оцениваются как 23,8 кг/м^2 и 0,8 кг/м^2 соответственно, в березняке – 26,3 кг/м^{2}и 1,5 кг/м^2 . В структуре фитомассы древесных пород Тульской области, как это отмечалось и для фитоценозов Брянского Полесья, абсолютно доминирует древесина (68,1 – 70,8%), второй по представленности в фитомассе является фракция корней (11,5- 14,4%), при этом наибольший процент отмечается в древостое сосняка. На 3 месте по вкладу в общую фитомассу в сосняке стоит фракция ветвей крупных (5,6%), а в березняке – кора внутренняя (6,9%). Вклад других структур древостоя меньше и колеблется от 0,8 до 4,1%.

Годичная продукция исследуемых древесных пород также различна, меньший годичный прирост отмечается у сосны, у березы этот показатель в 2 раза выше. В общей годичной продукции древостоев доминируют фракция древесины и ассимилирующих органов. Прирост древесины варьирует от 29,9% (у березы) до 44,4% (у сосны), ассимилирующих органов - от 41,8% (береза) до 49,5% (сосна). Фракция корней, которая в структуре общей фитомассы древостоев по вкладу занимала 2-ое место, в годичной продукции у сосны перемещается на 3 а у березы - на последнее место.

Исследуемые лесные фитоценозы Тульской области также различаются по показателям возврата органического вещества в почву с опадом . В годовом цикле возврат органических остатков в почву ниже показателя удерживания в фитомассе, больший возврат в абсолютных и относительных единицах отмечается в березняке и меньший в сосняке. Это в целом соответствует показателям БК органического вещества в фитоценозах Брянского Полесья, где в годичном приросте также наблюдается превалирование удерживания органического вещества в годичном приросте над показателями его возврата в почву. Однако в сосновых насаждениях Брянской области процент

возврата в почву несколько ниже, чем в сосняках Тульской области, а в березняках он, напротив, выше.

Накопление ^{137}Cs и К в растительном покрове лесных фитоценозов Брянской и Тульской областей. Оценка накопления ^{137}Cs и К в растительном покрове лесных фитоценозов Брянской области показала, что концентрация стабильного К в структурных компонентах сосны варьирует в пределах 0,01 - 0,52%, березы – 0,02 -0,66%, а удельная активность ^{137}Cs соответственно у сосны - 4, 2 - 38 кБк/кг, березы - 6,4 - 43 кБк/кг (таблица 4).

Таблица 4.

Концентрация К и удельная активность ^{137}Cs в компонентах древостоя Брянской области

Структурный компонент	Сосна		Береза	
	К, %	^{137}Cs, кБк/кг	К, %	^{137}Cs, кБк/кг
Древесина	0,02	4,2	0,02	6,4
Кора внутренняя	0,27	18,5	0,17	33,4
Кора наружная	0,01	4,30	0,03	13,4
Ветви крупные	0,09	9,9	0,05	8,4
Ветви мелкие	0,15	27,0	0,25	22,3
Прирост текущего года (хвоя/листья)	0,52	38,0	0,66	34,6
Хвоя прошлых лет формирования	0,25	30,0	-	-
Корни крупные	0,08	8,6	0,27	16,0
Корни мелкие	0,15	23,0	0,26	43,0

В целом ^{137}Cs, как и калий в основном накапливается в физиологически активных органах и тканях (ассимилирующие органы текущего года формирования, внутренние слои коры и т.д.) древостоя.

Суммарный запас подвижного К в общей фитомассе сосняка составляет 12,2 г/м^2, а ^{137}Cs - 153,7 кБк/м^2. Березняк характеризуется более высокими показателями общих запасов К и ^{137}Cs (21,3 г/м^2 и 293, 6 кБк/м^2 соответственно), что вполне закономерно, поскольку береза является более продуктивной породой и характеризуется более высокими показателями концентрации К и удельной активности ^{137}Cs в различных структурах. Сообразно с величиной органической массы и концентрацией/удельной активностью элементов максимальный вклад в общую фитомассу вносит древесина (сосна) или корни (береза), минимальный – наружные слои коры (сосна) или листья (береза) (рис.4).

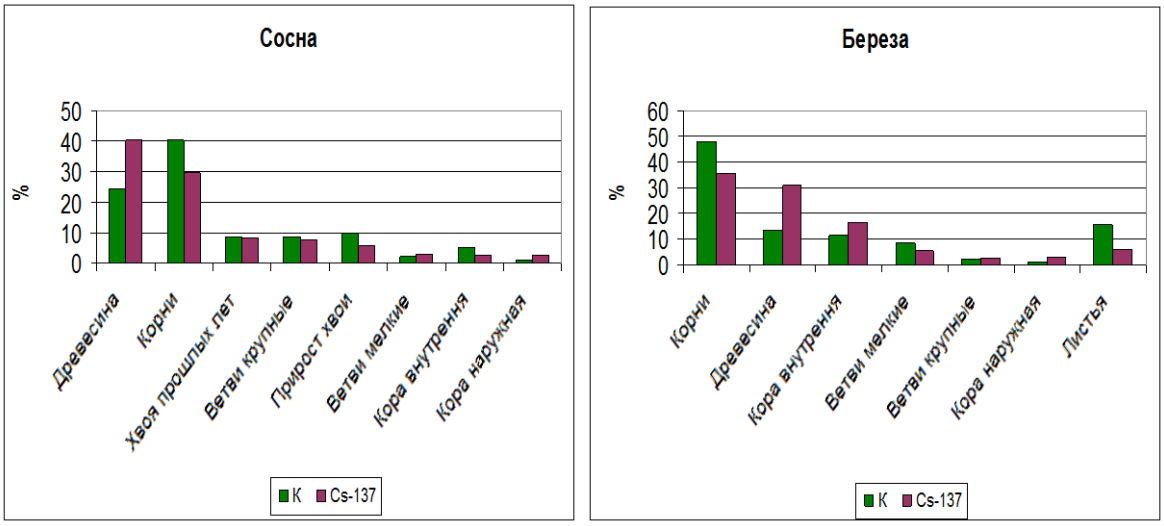

Рис. 4. Распределение запасов К и ^{137}Cs по структурным компонентам сосны и березы СПП Брянской области

В *Тульской области* растительные формации отличаются как по содержанию К и удельной активности ^{137}Cs, так и общим запасам этих элементов. Здесь концентрация стабильного К в структурных компонентах сосны изменяется в пределах 0,04 -0,49%, березы – 0,05 -1,4%, а удельная активность ^{137}Cs варьирует в пределах двух порядков, у сосны от 0,86 до 141 Бк/кг, березы - от 0,15 до 284 Бк/кг (таблица 5).

Таблица 5.

Концентрация К и удельная активность ^{137}Cs в компонентах древостоя Тульской области

Структурный компонент	Сосна		Береза	
	К, %	^{137}Cs, Бк/кг	К, %	^{137}Cs,Бк/кг
Древесина	0,04	0,86	0,05	0,15
Кора внутренняя	0,45	20	0,17	15
Кора наружная	0,04	141,2	0,05	284,8
Ветви крупные	0,06	3,5	0,12	4,8
Ветви мелкие	0,25	7,6	0,39	23,7
Прирост текущего года (хвоя/листья)	0,66	19,7	1,44	20,2
Хвоя прошлых лет формирования	0,49	6,9	-	-
Корни	0,13	9,4	0,21	14,2

Суммарный запас К в общей фитомассе сосняка достигает 18,1 г/м^2, березняка - 34,9 г/м^2, что примерно в 1,5 раз выше, чем в растительных сообществах Брянской области, в то же время общий запас ^{137}Cs - более чем в 100 раз ниже по сравнению с фитоценозами Брянской области и составляет 207,7 Бк/м^2 в сосняке и 348,8 Бк/м^2 березняке. В целом по величине емкости БК К и ^{137}Cs березняк превосходит сосняк, при этом различия между граничными значениями достигают как для калия, так и для ^{137}Cs – примерно 1,6 раз. В то же время для стабильного изотопа калия он в большей степени

определяется фитомассой рассматриваемых структур, а для ^{137}Cs - его удельной активностью в этих структурах.

Так, по относительному накоплению К в различных компонентах древостоя исследуемых растительных сообществ можно построить следующие ряды:

− сосна: прирост текущего года > хвоя прошлых лет формирования > кора внутренняя > ветви мелкие > корни > ветви крупные > древесина ≥ кора наружная;

− береза: листья > ветви мелкие > корни > кора внутренняя > кора наружная ≥ древесина.

Для ^{137}Cs эти ряды существенным образом видоизменяются:

− сосна: кора наружная >> ветви мелкие > листья > кора внутренняя > корни > ветви крупные > древесина.

− береза: кора наружная >> кора внутренняя > прирост текущего года > корни > ветви мелкие > хвоя прошлых лет формирования > ветви крупные > древесина.

Анализ этих рядов показывает, что на первое место по вкладу в загрязнение древостоев выходят компоненты, экспонированные к первичным аэральным выпадениям (наружные слои коры), а древесина, характеризующаяся максимальными запасами фитомассы, перемещается на последнее место. Очевидно, это обусловлено тем, что на территориях, удаленных от источника выброса, с тяжелыми по гранулометрическому составу почвами основной вклад в загрязнение надземной части древесного яруса длительное время вносит кора наружная (рис. 5).

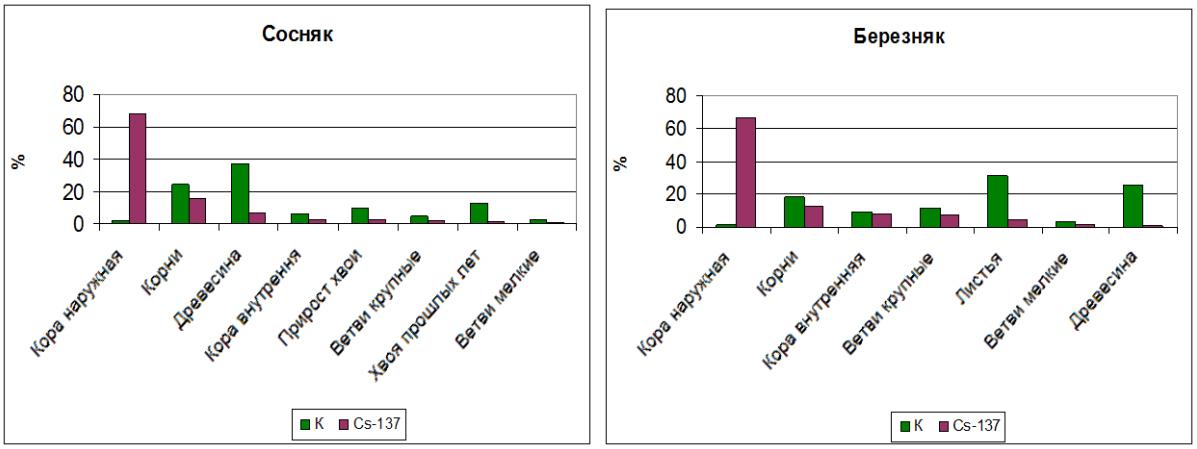

Рис. 5. Распределение запасов К и ^{137}Cs по структурным компонентам сосны и березы СПП Тульской области

Биологический круговорот ^{137}Cs и К в лесных фитоценозах южной тайги и лесостепи в отдаленный период после чернобыльских выпадений. На основании полученных данных нами было оценено накопление ^{137}Cs и К в годичной продукции сосняков и березняков Брянской и Тульской областей, поступление этих элементов в составе опада и закрепление в истинном приросте.

Расчеты показали, что в фитоценозах *Брянской области* запасы К и ^{137}Cs в годичном приросте всех структурных компонентов березы выше, чем таковые у сосны, что вполне закономерно, поскольку накопление К в лиственных породах происходит интенсивнее, чем в хвойных. При этом удерживание данных элементов в истинном приросте превалирует над их поступлением в почву в составе растительного опада (таблица 6).

Таблица 6

Особенности биологического круговорота К и ^{137}Cs в сосняках и березняках Брянской области в отдаленный период после чернобыльских выпадений

Показатель БК	К, г/м^2	^{137}Cs, кБк/м^2
Сосняк		
На формирование годичного прироста	1,6	12,9
Возвращается в почву с опадом (в год)	0,4	4,1
Удерживается в фитомассе (в год)	1,18	8,8
Березняк		
На формирование годичного прироста	3,7	24
Возвращается в почву с опадом (в год)	1,16	8,6
Удерживается в фитомассе (в год)	2,6	15,4

То есть как в сосняках, так и в березняках обнаруживается большое сходство в показателях БК калия и ^{137}Cs, в частности в величинах поступления элементов в почву в составе растительного опада (рис. 6), а соответственно удержания в годичном приросте: в сосняках поступление К в почву с опадом составляет 27%, а ^{137}Cs - 32%, соответственно в фитомассе задерживается 73% калия и 68% ^{137}Cs. В березняках Брянской области поступление К и ^{137}Cs в почву с опадом несколько больше и достигает 31% и 35% соответственно, в фитомассе в годичном цикле задерживается 69% калия и 65% ^{137}Cs. Это, возможно, связано с различиями в интенсивности выщелачивания К и ^{137}Cs из фитомассы структур различных древесных пород, формирующих опад.

Вместе с тем поток К и особенно ^{137}Cs, поступающий на поверхность почвы с растительным опадом в исследуемых фитоценозах, достаточно высок и колеблется: для К – от 1,2 (сосняк) до 2,6 (березняк) г/м^2 , а ^{137}Cs - от 8,8 кБк/м^2 в сосняке до 15 кБк/м^2 в березняке. Основной вклад в поступление растительных остатков в почву составляет опад ассимилирующих органов, наиболее высок он в березняке (78%). При этом активность опада, как правило, определяется активностью наружных слоев коры и морфологически плохо дифференцируемой и трудноразделимой фракции < 2 мм (т.н. «прочие»).

В целом, показатели круговорота К и ^{137}Cs в сосняках и березняках Брянского Полесья в настоящее время во многом совпадают и в годовом цикле характеризуются превышением количества элементов, задерживающихся в фитомассе, над их возвратом в почву. Высокий процент удерживания К в годичном приросте древесных пород исследуемых регионов и соответственно несколько отличное от известного в научной литературе

поступления элемента с опадом, возможно, обусловлен методикой учета и отбора образцов опада (один раз в год).

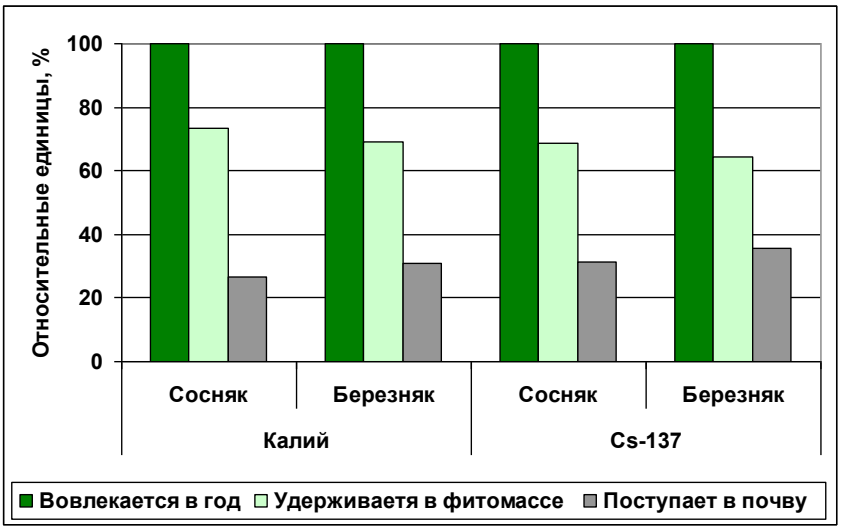

Рис.6. Показатели годичного потребления и возврата ^{137}Cs и К в сосновом и березовом насаждениях Брянской области

В *Тульской области* отмечаются иные закономерности в показателях БК К и ^{137}Cs. Так, если для К показатели БК примерно соответствуют таковым, отмеченным для фитоценозов Брянской области, то для ^{137}Cs они резко различны (таблица 7).

Таблица 7

Особенности биологического круговорота К и ^{137}Cs в сосняках и березняках Тульской области в отдаленный период после чернобыльских выпадений

Показатель БК	К		^{137}Cs	
	г/м^2	%	Бк/м^2	%
Сосняк				
На формирование годичного прироста	2,4	100	8,8	100
Возвращается в почву с опадом (в год)	0,6	25	35,7	«407»
Удерживается в фитомассе (в год)	1,8	75	-	-
Березняк				
На формирование годичного прироста	11,9	100	32,7	100
Возвращается в почву с опадом (в год)	3,9	33,3	161,7	«494»
Удерживается в фитомассе (в год)	7,9	66,7	-	-

Можно отметить, что в настоящее время в сосняках поступление К в почву с опадом составляет 25%, в годичном приросте фитомассы удерживается 75%, а в березняках поступление К в почву с опадом достигает 33%, в годичном приросте фитомассы удерживается 67%. В то же время ^{137}Cs поступает в почву в 4,1 раз больше, чем извлекается из нее на формирование годичного прироста. Так, поступление ^{137}Cs в почву в 4,1-4,9 раз больше, чем извлекается из нее на формирование годичного прироста. В связи с этим рассчитать традиционным способом (как разницу между годовым поступлением и возвратом в почву) удерживание элемента в фитомассе не

представляется возможным. Можно лишь предположить, что данный показатель должен соответствовать таковому К в рассматриваемых растительных сообществах, то есть 70-80% в сосняке и 60-70% в березняке.
В целом же, как в сосновом, так и в березовом насаждениях северной лесостепи, сформированных на темно-серых лесных почвах дальней зоны выпадений (Тульская область РФ), в отдаленный период после чернобыльских выпадений (более 25 лет) биологический круговорот ^{137}Cs отличается от БК калия и по-прежнему характеризуется значительным доминированием нисходящих потоков элемента (рис. 7).

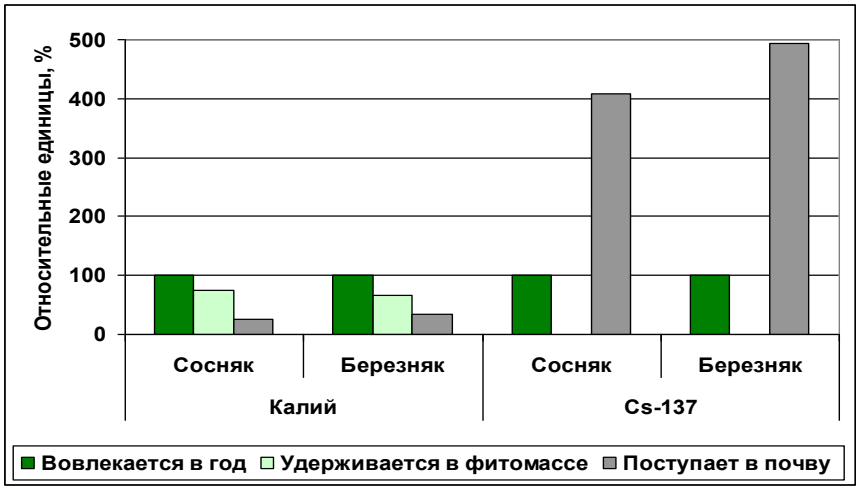

Рис.7. Показатели годичного потребления и возврата ^{137}Cs и К в сосновом и березовом насаждениях Тульской области.

Динамика показателей биологического круговорота ^{137}Cs в лесах ближней и дальней зон выпадений. Выявленные нами особенности во многом обусловлены спецификой динамики распределения загрязнения ^{137}Cs по компонентам древесного яруса ближней и дальней зон чернобыльских выпадений. В начальный период после аварии (1986 г.) в лесах как ближней, так и дальней зон максимальными уровнями загрязнения характеризовались структуры, экспонированные к выпадениям (ассимилирующие органы, ветви мелкие), а также наружные слои коры. В последующем в результате самоочищения наблюдалось снижение удельной активности ^{137}Cs в коре. Максимальная интенсивность данного процесса отмечалась в ближней зоне (30-км зона ЧАЭС), а минимальная – в дальней зоне выпадений (Тульская обл. РФ) (Щеглов, 1999; Цветнова, Щеглов, 2009, 2009а; Shcheglov , Tsvetnova, Kliashtorin, 2001).
В настоящее время удельная активность наружных слоев коры древостоя в ближней зоне в 2-3 раза ниже, чем внутренних слоев (луб) и ассимилирующих органов. Вследствие этого в лесах ближней зоны выпадений вклад наружных слоев коры в суммарное загрязнение древесного яруса и в нисходящий поток ^{137}Cs по сравнению с другими компонентами (хвоя, ветви, древесина и т.п.) по прошествии более 25 лет после аварии на ЧАЭС существенно снизился (рис. 8). В дальней зоне выпадений, напротив,

отмечается противоположная тенденция, где различия между удельной активностью различных фракций древесного яруса и корой наружной достигают 10-100 кратных величин. То есть загрязнение наружных слоев коры почти на порядок выше, чем других структур (в частности, коры внутренней и ассимилирующих органов), а древесины - на 2 порядка. Последнее свидетельствует о более высокой сорбционной способности наружных слоев коры по отношению к аэрозольным радиоактивным выпадениям по сравнению с другими их формами.

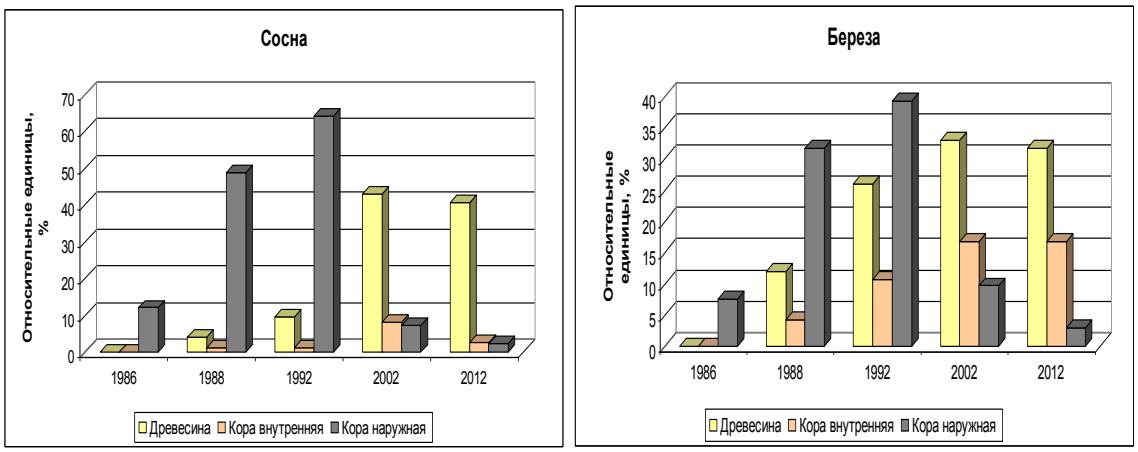

Рис. 8. Динамика вклада (%) различных компонентов сосны и березы в загрязнение древостоя ближней зоны выпадений (Брянская область РФ).

На основании выявленной динамики вклада различных компонентов в суммарное загрязнение древесного яруса ^{137}Cs в лесах ближней зоны выпадений можно заключить, что к началу 2000 гг. процессы самоочищения древостоя от внешнего загрязнения завершились практически полностью. Уровни накопления радионуклида определяются только корневым поступлением, о чем свидетельствует рост относительного вклада древесины и внутренних слоев коры в этот показатель, в то время как вклад наружных слоев коры падает до единиц %.

Прямо противоположная ситуация складывается в лесах дальней зоны выпадений. Здесь нельзя выделить какие-либо периоды, которые характеризовались бы доминированием вклада отдельных компонентов в суммарное загрязнение древостоя. На протяжении всего периода наблюдений (1986-2012 гг.) отмечается постоянный рост вклада наружных слоев коры в общее загрязнение различных пород. Более того, можно констатировать, что с 1992 года этот вклад значительно возрос и стал доминирующим (рис. 9).

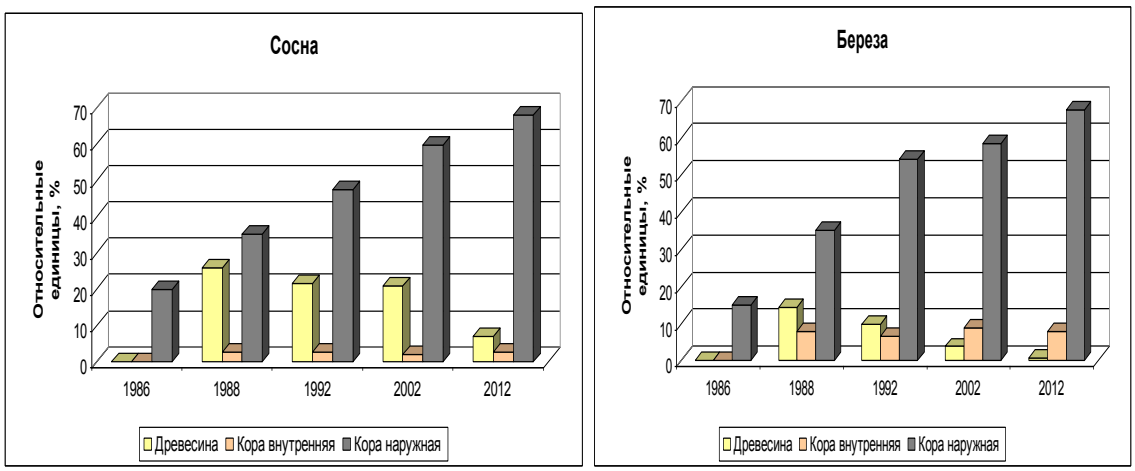

Рис. 9. Динамика вклада (%) различных компонентов сосны и березы в загрязнение древостоя дальней зоны выпадений (Тульская область РФ).

Данное положение является объяснением тому, что в лесных экосистемах дальней зоны выпадений в пределах северной лесостепи, сформированных на темно-серых лесных почвах (Тульская область РФ), в отдаленный период после чернобыльских выпадений (более 25 лет) отмечаются высокие уровни поступления ^{137}Cs с нисходящим потоком (опадом), которые, в основном, определяются степенью загрязнения наружных слоев коры.

С использованием литературных и наших данных мы попытались проанализировать динамику БК ^{137}Cs в отдаленный период после аварии на ЧАЭС и показать различия в БК этого радионуклида и его химического аналога К в лесах ближней и дальней зон выпадений на примере сосняков (рис. 10).

В начальный период после выпадений в сосняках всей территории загрязнения основной статьей круговорота ^{137}Cs являлось поступление элемента с опадом, которое составляло 82 (дальняя зона) – 95% (ближняя зона). Соответственно в фитомассе удерживалось 18-5% (Щеглов, 1999; Щеглов, Цветнова, 2010; Shcheglov, Tsvetnova, Kliashtorin, 2001).

В настоящее время в лесах ближней зоны выпадений отмечается сглаживание различий в круговороте ^{137}Cs и его химического аналога – калия. В лесах дальней зоны выпадений на почвах тяжелого гранулометрического состава биологический круговорот ^{137}Cs значительно отличается от БК калия и по-прежнему характеризуется доминированием нисходящих потоков элемента. При этом относительное поступление ^{137}Cs с опадом к настоящему времени по сравнению с начальным периодом усилилось более чем в 4 раза.

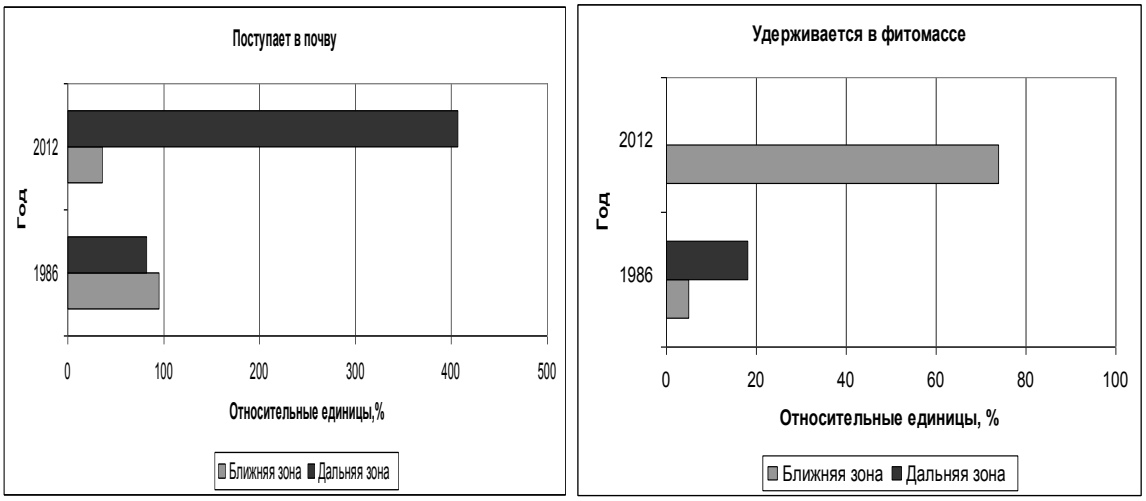

Рис. 10. Динамика некоторых показателей круговорота ^{137}Cs в сосняках ближней и дальней зон выпадений

Отсюда очевидно, что биологический круговорот ^{137}Cs в лесных экосистемах зоны радиоактивного загрязнения в пределах РФ характеризуется: а) длительным доминированием нисходящих потоков радионуклида в составе опада; б) различными периодами достижения квазиравновесного состояния радионуклида в экосистеме и соответственно приближения к круговороту его неизотопного химического аналога (калия). На участках ближней зоны выпадений начало данного периода приурочено к 2000 г.г, на участках дальней зоны выпадений оно отодвинуто на более длительный срок, в настоящее время БК^{137}Cs здесь значительно отличается от БК калия и по-прежнему характеризуется доминированием нисходящих потоков элемента в почву.

Выводы

1. В настоящее время в исследуемых лесных экосистемах Брянского Полесья плотность радиоактивного загрязнения почв по ^{137}Cs составляет 3700 кБк/м^2 в сосняке и 2600 Бк/м^2 в березняке. В лесах лесостепной зоны этот показатель более однороден и составляет около 300 кБк/м$^{2.}$. Запасы подвижного К в 0-20 см толще почв Брянского Полесья колеблются от 3,8 г/м^2 в сосняке до 4,7 г/м^2– в березняке, а в почвах Тульской области от 24,7г/м^2 до , 28,6 г/м^{2}соответственно.
2. Удельная активность^{137}Cs в структурных компонентах древесного яруса фитоценозов Брянского Полесья изменяется в пределах 4-38 кБк/кг и максимальна в ассимилирующих органах, а минимальна - в древесине. В лесных фитоценозах лесостепной зоны активность^{137}Cs в структурных компонентах древостоя значительно ниже и составляет 1-284 Бк/кг. При этом наибольшие показатели отмечаются в коре наружной, наименьшие - в древесине. Концентрация К в структурных компонентах фитоценозов Брянского Полесья и лесостепной зоны варьирует в пределах 0,1 -13 г/кг, а его распределение однотипно. Распределение ^{137}Cs и К сходно только в структурах древостоя лесов Брянского Полесья, что свидетельствует о достижении квазиравновесного состояния данных элементов в системе «почва – растение» в рассматриваемых условиях, и существенно отличается в насаждениях лесостепной зоны. .
3. Общие запасы фитомассы в сосняке и березняке Брянской области значимо не различаются и составляют 21,5 кг/м^2 и 22,33 кг/м^{2}соответственно. Основное отличие наблюдается в показателях БК - годичном приросте и возврате органического вещества в почву. В березняке годичный прирост в 1,5, а возврат в 1,2 раза выше, чем в сосняке. В Тульской области общие запасы фитомассы и исследуемые показатели БК различаются более значимо. Общие запасы фитомассы колеблются от 23,8 кг/м^2 в сосняке до 26,3 кг/м^2- в березняке. При этом годичный прирост органического вещества в березняке в 2 раза, в возврат – в 1,2 раза выше, чем в сосняке.
4. В растительном покрове лесных фитоценозов Брянской области концентрация стабильного К в структурных компонентах сосны варьирует в пределах 0,01 - 0,52%, березы – 0,02 -0,66%, а удельная активность ^{137}Cs соответственно у сосны - 4 - 38 кБк/кг, березы - 6,4 - 43 кБк/кг. В Тульской области структуры древостоя заметно отличаются по содержанию К и , особенно, удельной активности ^{137}Cs; здесь концентрация стабильного К в компонентах сосны изменяется в пределах 0,04 -0,49%, березы – 0,05 -1,44%, а удельная активность ^{137}Cs варьирует в пределах двух-трех порядков, у сосны от 0,86 до 141,2 Бк/кг, березы - от 0,15 до 284 Бк/кг.
5. В настоящее время в фитоценозах Брянского Полесья основные запасы ^{137}Cs в общей фитомассе сосредоточены в древесине (сосна) или

корнях (береза), минимальные – в наружных слоях коры (сосна) или листьях (береза). Распределение запасов К практически аналогично распределению запасов ^{137}Cs. В лесных фитоценозах лесостепи, напротив, наблюдаются отклонения от выявленных закономерностей: на первое место по вкладу в загрязнение древостоев выходят компоненты, экспонированные к первичным аэральным выпадениям (наружные слои коры), а древесина, характеризующаяся максимальными запасами фитомассы, перемещается на последнее место.

6. Исследуемые показатели биологического круговорота К и ^{137}Cs в сосняке и березняке Брянского Полесья (ближняя зона выпадений) в настоящее время во многом совпадают и в годовом цикле характеризуются превышением количества элементов, задерживающихся в фитомассе, над их возвратом в почву. В сосновом и березовом насаждениях Тульской области, сформированных на темно-серых лесных почвах (дальняя зона выпадений), биологический круговорот ^{137}Cs отличается от БК калия и по-прежнему характеризуется значительным доминированием нисходящих потоков элемента.
7. В настоящее время в лесах ближней зоны выпадений поведение ^{137}Cs в системе «почва- растение» близко к таковому его химического аналога – калия. В лесах дальней зоны выпадений на почвах тяжелого гранулометрического состава поведение ^{137}Cs в системе «почва-растение» значительно отличается от такового калия. При этом относительное поступление ^{137}Cs с растительным опадом в почву по сравнению с накоплением в годовом цикле усиливается более чем в 4 раза. В этих условиях период достижения квазиравновесного состояния К и ^{137}Cs в системе «почва – растение» характеризуется значительно большей продолжительностью.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

1. Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Касацкий А.А. Некоторые показатели биологического круговорота ^{137}Cs и ^{39}K в лесных экосистемах Брянского Полесья в отдаленный период после чернобыльских выпадений //Вестник Московского университета. Сер. 17 почвоведение, 2011. № 3. С. 43-48
2. Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Касацкий А.А. Динамика загрязнения ^{137}Cs различных компонентов лесных экосистем Брянского Полесья // Вестник Московского университета. Сер. 17 почвоведение, 2014. № 3. С. 17-22.

Статьи и материалы конференций:

3. Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Касацкий А.А. Биологический круговорот ^{137}Cs и калия в лесных экосистемах Брянского Полесья // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. Ханты-Мансийск, 2010. Вып. 14. С. 343-353.
4. Касацкий А.А. Особенности распределения ^{137}Cs и К в структурных компонентах древесного яруса в березняках и сосняках Брянского Полесья //Материалы конференции XX международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2013». Москва, 2013. С.
5. AlexeyShcheglov, Ol'gaTsvetnova, AlexeyKlyashtorinandAndreyKasatskiy. ^{137}Cs и^{39}K Distribution and Cycling in some Forest Ecosystems 25 Years after the Chernobyl Accident // EGU-General Assembly 2014. Abstracts of theSession: SSS8.1 Soil pollution and remediation (http://www.egu.eu/) EGU2014-6808.
6. Цветнова О.Б., Щеглов А.И., Касацкий А.А. Особенности биологического круговорота ^{137}Cs и изотопов калия в лесных и агрофитоценозах лесостепи в отдаленный период после чернобыльских выпадений // Тезисы докладов Yll съезда по радиационным исследованиям. Радиобиология. Радиоэкология. Радиационная безопасность. М., 2014. С.350