

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

КОМИССАРОВА Ольга Леонидовна

**ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ И АККУМУЛЯЦИИ ЦЕЗИЯ-137 В
СИСТЕМЕ «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ» СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
УГОДИЙ ПЛАВСКОГО РАДИОАКТИВНОГО ПЯТНА В ОТДАЛЕННЫЙ
ПЕРИОД ПОСЛЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЙ**

Специальность: 1.5.15 – Экология (биологические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

**Научные
руководители:**

Щеглов Алексей Иванович,
доктор биологических наук, доцент/с.н.с.
Парамонова Татьяна Александровна,
кандидат биологических наук

**Официальные
оппоненты:**

Ладонин Дмитрий Вадимович,
доктор биологических наук, доцент/с.н.с., профессор
кафедры химии почв факультета почвоведения, МГУ
имени М.В. Ломоносова
Линник Виталий Григорьевич,
доктор географических наук, главный научный
сотрудник лаборатории эволюционной биогеохимии и
экологии, ФГБУН «Институт геохимии и аналитической
химии им. В.И. Вернадского РАН»
Прудников Петр Витальевич,
доктор сельскохозяйственных наук, директор
ФГБУ «Центр химизации и сельскохозяйственной
радиологии «Брянский»

Защита диссертации состоится 3 октября 2023 года в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.12, биологический факультет, аудитория М-2.

Тел: 8(495)–939-24-67, электронная почта: *paramonovata@my.msu.ru*

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/015.3/2572>

Автореферат разослан «23» августа 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Парамонова Т.А.

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Авария на Чернобыльской атомной электростанции (далее – ЧАЭС), произошедшая в 1986 году, стала крупнейшей радиационной катастрофой XX века (INES, 2008) и привела к радиоактивному загрязнению обширных территорий России, Белоруссии, Украины и других стран Европы. Сельскохозяйственная отрасль производства нашей страны столкнулась при этом с серьезными последствиями: в результате аварии в Европейской части России пострадало более 2,3 млн. га земель сельскохозяйственного назначения (Сельскохозяйственная радиоэкология, 1992; Атлас загрязнения Европы..., 1998).

Основным дозообразующим радионуклидом в составе конденсационных чернобыльских выпадений являлся цезий-137 (^{137}Cs), имеющий длительный период полураспада ($T_{1/2}=30,17$ лет) и прочно фиксируемый глинистыми минералами почв, в связи с чем представляющий наибольшую экологическую значимость среди чернобыльских радионуклидов. Ореолы с превышением допустимого уровня радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs (37 кБк/м^2 или 1 Ки/км^2) в 5-40 раз сформировались в таких регионах, как Брянская, Тульская, Калужская, Орловская области (Атлас загрязнения Европы..., 1998; № 1244-1-ФЗ «О социальной защите граждан...», 1991). В пределах черноземной зоны одним из наиболее пострадавших участков является Плавское радиоактивное пятно Тульской области с первоначальной плотностью загрязнения почв ^{137}Cs до 555 кБк/м^2 (Атлас современных и прогнозных аспектов..., 2009).

В настоящее время плодородные почвы территории продолжают активно использоваться в сельском хозяйстве в качестве пахотных и сенокосных угодий, что ведет к передаче ^{137}Cs в продукцию растениеводства и животноводства. Таким образом, изучение закономерностей поведения радионуклида в системе «почва-растение» имеет как прикладное значение для организации рационального землепользования на территории, так и сохраняет высокий научный интерес для всестороннего понимания процессов биогеохимической миграции ^{137}Cs .

Цель работы: изучить закономерности поведения и накопления ^{137}Cs в системе «почва-растение» агрогенных и естественных луговых биogeоценозов на черноземах, приуроченных к территории Плавского радиоактивного пятна в отдаленный период после аварии на ЧАЭС.

Задачи исследования:

- 1) оценить современные уровни радиоактивного загрязнения почв и растений в агрогенных и природных травянистых экосистемах исследуемого района;
- 2) исследовать распределение ^{137}Cs в профиле пахотных и целинных почв на территории Плавского радиоактивного пятна;
- 3) выявить сравнительные особенности аккумуляции ^{137}Cs и подвижных форм калия (К) в ризосфере различных сельскохозяйственных культур и травянистых растений природных лугов;
- 4) изучить распределение и параметры накопления ^{137}Cs и К в надземной и подземной частях различных видов растений агроценозов и природных травянистых экосистем;
- 5) рассчитать основные статьи баланса ^{137}Cs в агроценозах и природных травянистых экосистемах на территории Плавского радиоактивного пятна в отдаленный период после аварии на ЧАЭС.

Объект исследования. Почвы и растения агроценозов и луговых биогеоценозов на территории Плавского радиоактивного пятна. **Предмет исследования** – поведение ^{137}Cs в системе «почва-растение».

Научная новизна. В условиях натуральных полевых исследований была проведена количественная оценка интенсивности миграции ^{137}Cs в системе «почва-растение» агроценозов и луговых биогеоценозов в ореоле радиоактивного загрязнения черноземов европейской части России после завершения 1-го цикла полураспада ^{137}Cs . Выявлены параметры аккумуляции ^{137}Cs в надземных (листья и стебли, генеративные органы) и подземных (корни, клубни) органах растений, системный анализ которых в большинстве современных исследований не проводится. Определена емкость биологического круговорота ^{137}Cs в агроценозах основных сельскохозяйственных культур и луговых биогеоценозах черноземной зоны в пост-чернобыльский период.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты исследования могут служить основой для решения дискуссионных вопросов радиэкологии о специфичности корневого потребления ^{137}Cs растениями разных систематических групп, об особенностях аккумуляции радионуклида в органах растений, а также о сопоставимости биогеохимических циклов радионуклидов и основных элементов минерального питания растений (^{137}Cs и К). В прикладном аспекте выявленные

закономерности биологической миграции ^{137}Cs в агроценозах основных сельскохозяйственных культур могут являться основой для оценки экологических рисков и выработки решений по рациональному ведению растениеводства на радиоактивно загрязненных землях.

Методология и методы исследования. Работа была выполнена на основе проведения полевых натурных исследований, основанных на классических методах изучения биологического круговорота элементов и органического вещества. Лабораторные исследования включали высокоточный гамма-спектрометрический, а также общепринятый агрохимический анализ почв и растений. Интерпретация полученных результатов проводилась на основе общенаучных подходов, а также с привлечением различных методов вариационной статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Современные уровни плотностей загрязнения ^{137}Cs почв на территории Плавского радиоактивного пятна в 4-5 раз превышают нормативно установленное допустимое значение. Основной запас ^{137}Cs в агрочерноземах находится в агротурбированом, а в целинных почвах – в дерновом горизонте.

2. В отдаленное время после Чернобыльской аварии параметры корневого потребления ^{137}Cs из загрязненных почв и его накопление в биомассе сельскохозяйственных культур и различных видов луговой растительности характеризуются низкой интенсивностью. Распределение ^{137}Cs по органам растений неодинаково и зависит от их биологических особенностей и систематической принадлежности,

3. Близкие по химическим свойствам ^{137}Cs и К не имеют значимой корреляции показателей биологической миграции в системе «почва-растение», а также характеризуются различными особенностями распределения между надземными и подземными органами растений.

Степень достоверности результатов и апробация результатов. Результаты работы получены на основе классической постановки биогеохимических исследований с применением современного аналитического оборудования и обработкой данных с применением статистических методов. Апробация работы была проведена на 37 научных конференциях, в том числе European Geosciences Union General Assemblys (2015, 2016, 2017, 2018, Вена, Австрия); International Conferences on Radiation in Various

Fields of Research (Херцег-Нови, Черногория, 2015, 2017, 2018, 2021); VII съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (2016, Белгород, Россия); IYFSWC/ICSE Conference (2018, Москва, Россия); VI Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (Томск, Россия, 2021); IX Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (Курчатов, Казахстан, 2021); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, Россия, 2021).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 24 научные работы, из них 5 работ в рецензируемых журналах, индексируемых в базах Scopus, Web of Science, RSCI, и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие во всех этапах работы: постановки цели и задач исследования; планировании, организации и проведении полевых работ; лабораторных анализов; статистической обработки и интерпретации данных; апробации и публикации результатов исследования, а также подготовил текст диссертации и автореферата.

В работе [1] вклад автора составил 0,7 печатных листа (п.л.) из 1,3 п.л.; в работе [2] 0,2 п.л. из 0,5 п.л.; в работе [3] 0,2 п.л. из 1,0 п.л.; [4] 0,5 п.л. из 1,0 п.л.; в работе [5] 0,2 п.л. из 1,2 п.л.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и основных выводов, списка литературы из 203 наименований, из которых – 81 на иностранных языках. Она изложена на 127 страницах и включает 16 таблиц и 28 рисунков.

Благодарности. Автор работы выражает глубокую признательность научным руководителям д.б.н., профессору А.И. Щеглову, к.б.н. Т.А. Парамоновой за всестороннюю помощь в подготовке диссертации, ценные советы и поддержку. Отдельную благодарность автор работы выражает за помощь в подготовке и проведении полевых и лабораторных исследований к.г.н. Л.А. Турыкину, к.г.н. Н.В. Кузьменковой, к.б.н. К.В. Павлову, к.г.н. М.М. Иванову. Автор благодарит сотрудников кафедры радиоэкологии и экотоксикологии за ценные советы при подготовке и обсуждении результатов диссертации. Автор работы также выражает особую признательность за

постоянную поддержку М.В. Зайцевой, родителям и коллегам НИЦ «Курчатовский институт». Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ №14-05-00903А и № 20-35-90119/20 Аспиранты.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Литературный обзор

Чернобыльские выпадения ^{137}Cs характеризуются значительной первичной пространственной неоднородностью, которая обусловлена неравномерным характером атмосферных осадков вследствие метеорологических условий, особенностей растительного покрова на подстилающей поверхности, разнообразием мезо- и микрорельефа. Исходный состав чернобыльских выпадений был многокомпонентным, однако в пост-чернобыльский период доминирующее значение в наземных экосистемах районов конденсационных выпадений имеет долгоживущий ^{137}Cs ($T_{1/2}$ 30,17 лет), поступивший в окружающую среду в массовом количестве 75-86 ПБк (Атлас загрязнения Европы..., 1998).

Особенностью поведения ^{137}Cs в почве является его способность к необменной сорбции глинистыми минералами, сопровождающаяся вхождением радионуклида в межпакетные пространства их кристаллической решетки (Staunton and Roubaud, 1997). На интенсивность перехода ^{137}Cs из почвы в растения оказывает влияние совокупность факторов, среди которых: физико-химическая форма радионуклида, свойства почвы, плотность радиоактивного загрязнения почвы, климатические условия, положение участка в рельефе, соотношение ^{137}Cs и К в почве, микробиологическая активность, а также биологические особенности растений (Coughtrey and Thorne, 1983; Сельскохозяйственная радиоэкология, 1992; Богачев, 1997; Фокин, 2011 и др.).

Наибольший практический интерес представляет накопление ^{137}Cs в продукции растениеводства и кормопроизводства. Однако для понимания деталей биогеохимического цикла ^{137}Cs в агроценозах необходимо учитывать аккумуляцию радионуклида не только в растительной продукции, но и во всех органах растений, включая редко исследуемые корни. Анализ литературы показал, что практически в 90% исследований рассматривается переход ^{137}Cs только в надземные органы растений, а роль корневых систем как биологических барьеров при миграционных потоках радионуклида в растения изучена недостаточно. При этом многие авторы отмечают, что

накопление и транслокация ^{137}Cs у представителей разных семейств растений различна. Согласно обобщенным литературным данным, у растений семейства *Злаковые* выявлена преимущественная аккумуляция ^{137}Cs в корневой системе, а интенсивность транслокации в надземные органы низкая; для растений других семейств накопление в надземной части биомассы чаще превалирует над аккумуляцией в подземной биомассе, либо распределение ^{137}Cs по надземным и подземным органам примерно одинаковое (Парамонова и Мамихин, 2017; Burger and Lichtscheidl, 2018).

Известно, что при высоком содержании в питательной среде доступного для растений K , интенсивность корневого потребления ^{137}Cs существенно снижается, поскольку все каналы клетки заняты переносом ионов K^+ . В условиях дефицита K в почве происходит активизация переноса ^{137}Cs в растениях как по специфическим, так и неспецифическим ионным каналам (Shaw et al, 1992, Zhu and Smolders, 2000; White and Broadley, 2000). При этом может изменяться интенсивность транслокации ^{137}Cs в надземную биомассу растений.

Глава 2. Характеристика района исследования

Климат Тульской области умеренно-континентальный, характеризуется теплым летом, умеренно холодной зимой. Средняя месячная температура воздуха самого теплого месяца года (июль) Плавского района в среднем составляет 20°C ; температура самого холодного месяца года (январь) -10°C . Среднегодовое количество атмосферных осадков около 470-575 мм. Две трети осадков выпадает в виде дождя, одна треть – в виде снега (Главное управление МЧС России..., 2023).

Почвообразующей породой территории области являются карбонатные лессовидные суглинки, имеющие мощность 3-5 м. По характеру рельефа район исследования представляет равнину, сильно расчлененную речными долинами, задернованными балками (Доклад об экологической ситуации..., 2022).

На территории Тульской области самыми распространенными почвами являются черноземы (46% от площади области) (Почвенный покров..., 2003). В Плавском районе в основном залегают выщелоченные черноземы (черноземы и агрочерноземы глинисто-иллювиальные) (Добровольский, Урусевская, 2004).

Территория Тульской области имеет высокую степень земледельческой освоенности: земли сельскохозяйственного назначения составляют 72% (1845 тыс. га)

земельного фонда региона. Из них пашни – 79%, пастбища – 15%, сенокосы – 3%, многолетние насаждения – 3% (Региональный доклад ..., 2021). В Плавском районе в структуре земельного фонда преобладают сельскохозяйственные угодья (88% от всей площади), при этом на долю пашни приходится 85% сельскохозяйственных земель (Доклад о состоянии и использовании земель..., 2021).

Глава 3. Объекты и методы исследования

На территории Плавского радиоактивного пятна в 2014-2021 гг. были изучены почвы агроценозов с посевами пшеницы яровой и озимой, ячменя ярового, кукурузы, гречихи, горчицы, картофеля, сои, гороха, рапса, подсолнечника, амаранта, бобово-злаковой травосмеси (козлятник-кострец); а также естественных биогеоценозов – суходольного и пойменного лугов (рисунок 1).

Агроценозы на исследованной территории занимали элювиальные и транзитно-элювиальные позиции ландшафта - вершины и водораздельные склоны; суходольный луг располагался на транзитно-аккумулятивном элементе ландшафта у подножия склона террасы; влажный луг - в пойме р. Локна и был приурочен к аккумулятивному типу ландшафта.

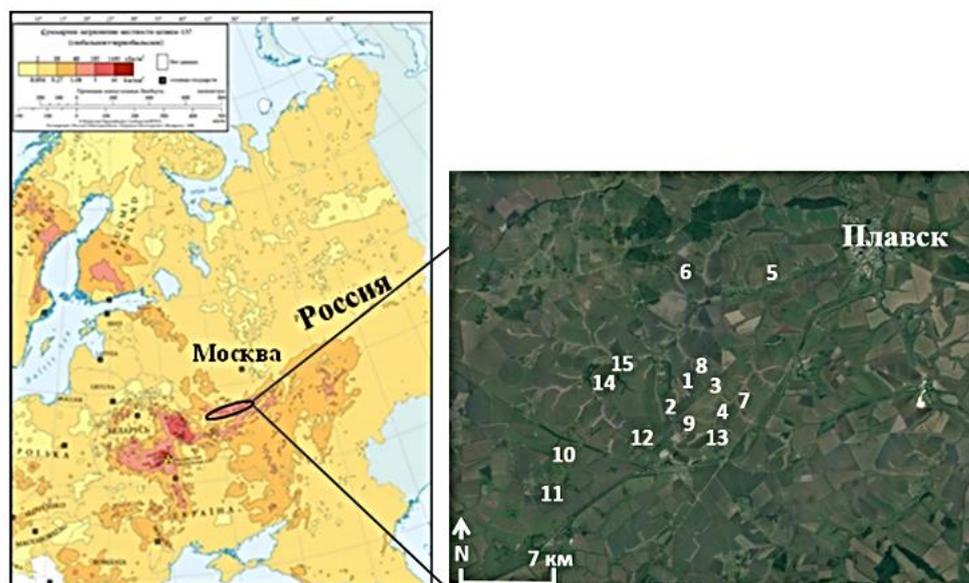


Рисунок 1 – Расположение опорных площадок исследования на территории Плавского радиоактивного пятна: а) карта загрязнения почвы ^{137}Cs в Европе после аварии на ЧАЭС, май 1986 года (Атлас загрязнения Европы..., 1998); б) изображение Google Earth. Обозначение площадок исследования: 1 – пшеница яровая, 2 – пшеница озимая, 3 – ячмень яровой, 4 – кукуруза, 5 – гречиха, 6 – горчица, 7 – картофель, 8 – соя, 9 – горох, 10 – рапс, 11 – подсолнечник, 12 – амарант, 13 – травосмесь, 14 – суходольный луг, 15 – пойменный луг

Почвы пахотных угодий были представлены агрочерноземами глинисто-иллювиальными; суходольного луга – типичными черноземами глинисто-иллювиальными; пойменного луга – аллювиальными темногумусовыми почвами (Классификация почв России, 2004).

Полевые исследования. Во время полевых работ на всех опорных площадках по унифицированной схеме были проведены геоботаническое и почвенно-морфологическое описание компонентов агроценозов и природных лугов, а также отбор образцов почвенного и растительного материала.

Образцы почвы ненарушенного сложения отбирались с помощью кольцевого пробоотборника ПГ-450 площадью 300 см^2 послойно с шагом 10 см до глубины 30 см в трехкратной повторности. В центральной и периферийной частях Плавского пятна также исследовались полнопрофильные разрезы агрогенных и целинных черноземов с отбором почвенных проб по генетическим горизонтам. Кроме того, в корнеобитаемой толще были отобраны пробы почв из «ближней» (непосредственно скрепленной корнями) и «дальней» (не скрепленной корнями) зон ризосферного пространства различных видов сельскохозяйственных культур и биологических групп растительности суходольного луга. Учет биомассы надземной части растений проводили методом укосных площадок $S=(50 \times 50) \text{ см}^2$ в трехкратной повторности. Укосы бобово-злаковой травосмеси разделялись на растения козлятника и костреца, укосы суходольного и пойменного лугов – на биологические группы злаков и разнотравья. Для контроля содержания ^{137}Cs в получаемой сельскохозяйственной продукции растениеводства в агроценозах были отдельно отобраны зерновки пшеницы, ячменя, кукурузы, гречихи, семена подсолнечника и горчицы, клубни картофеля, стручки гороха, рапса, сои. Пробоотбор подземной части растений осуществлялся с помощью кольцевого пробоотборника площадью 300 см^2 , по 10-см слоям до глубины 30 см в трехкратной повторности. Отмывку подземной биомассы культур производили под струей проточной воды до полного осветления промывных вод на системе сит с ячейками 1 мм и 0,5 мм (Байтулин, 1976; Perez-Harguindeguy, 2013).

Лабораторные исследования. В лабораторных условиях образцы почв и растений высушивались до воздушно-сухого состояния, в целях гомогенизации размельчались. Почва просеивалась через сито с ячейкой диаметром 1 мм. Растительность перемалывалась на лабораторной мельнице.

Измерения удельной активности ^{137}Cs в почве проводились в геометрии «дента» на гамма-спектрометре «Мультирад» с блоком детектирования БДКС-63-01А с использованием программы обработки спектров «Прогресс 5.1» (Россия), экспозиция измерения 30 минут; в компонентах растительной биомассы — в геометрии «дента» или «чашка Петри» на гамма-спектрометре Canberra GR 3818 с детектором из особо чистого германия HPGe (США), экспозиция измерения 1440 минут.

Определение обменного К в почве проводилось по методу Масловой в вытяжке уксуснокислого аммония ($\text{CH}_3\text{COONH}_4=1$ моль/л), необменного К — по методу Пчелкина (вытяжка 2 н HCl) с последующим определением элемента на пламенном фотометре (Аринушкина, 1970). Содержание К в золе растений определялось также на пламенном фотометре после растворения ее в горячем 20% растворе HCl (Практикум по агрохимии, 2001).

Общие свойства почв и растений определялись общепринятыми методами (Аринушкина, 1970; Практикум по агрохимии, 2001).

Определение общей и рабочей адсорбирующей поверхности корней проводилось методом, предложенным Д.А. Сабининым и И.И. Колосовым с помощью фотоэлектроколориметра при длине волны 680 нм (Воскресенская и др., 2008).

Глава 4. Общая характеристика агроценозов и луговых биогеоценозов

Плавского радиоактивного пятна

4.1. Физические и химические свойства почв. Усредненная плотность сложения поверхностного 30-см слоя агроценозов на исследуемой территории варьировала в пределах $0,94-1,37$ г/см³, целинных почв лугов – $1,15-1,16$ г/см³. Пахотные и целинные почвы характеризовались нейтральной реакцией среды (pH=6,5-7,1) и высоким содержанием органического вещества ($C_{\text{орг}}=5,2-6,8\%$) (Paramonova et al., 2015).

4.2. Биологические показатели растений агроценозов и луговых биогеоценозов. Общие запасы сухой биомассы составляли в агроценозах $0,35-2,17$ кг/м², в луговых биогеоценозах – $0,07-1,96$ кг/м² (таблица 1). Основную долю биомассы сельскохозяйственных культур составила надземная часть – в среднем 60-70% от общих запасов биомассы растений; тогда как у луговых растений преобладала подземная биомасса. Суходольный луг состоял из злаков (55% общих запасов биомассы) и разнотравья (45%), а растительность пойменного луга практически полностью состояла

из представителей *сем. Злаковые*. Зольность в исследованных растениях варьировала в диапазоне от 5 до 14%. Содержание зольных элементов в надземных и подземных компонентах биомассы было распределено сравнительно равномерно.

Таблица 1 – Запасы биомассы и зольность растений агроценозов и луговых биогеоценозов на территории Плавского радиоактивного пятна

Агроценоз / луговой биогеоценоз	Запас биомассы, кг/м ²			Зольность, %		
	Надземная биомасса	Подземная биомасса	Общая биомасса	Надземная биомасса	Подземная биомасса	Общая биомасса
Пшеница яровая	1,27±0,21*	0,30±0,07	1,56±0,19	5,9±0,1	4,0±0,1	4,9±0,1
Пшеница озимая	1,15±0,12	0,39±0,08	1,40±0,08	5,1±0,1	4,5±0,1	4,8±0,1
Ячмень яровой	0,57±0,04	0,47±0,15	1,04±0,11	6,2±0,3	5,4±0,1	5,7±0,2
Кукуруза	2,02±0,31	0,15±0,08	2,17±0,28	8,0±1,4	6,0±1,4	5,8±1,7
Гречиха	0,43±0,06	0,28±0,08	0,71±0,07	7,1±0,7	6,1±0,2	6,7±0,5
Горчица	0,50±0,24	0,30±0,09	0,80±0,33	6,3±1,1	5,7±0,6	6,4±0,2
Картофель	0,55±0,07	0,53±0,36	0,80±0,40	16,7±0,9	5,5±0,4	8,6±0,8
Соя	0,60±0,15	0,25±0,18	0,85±0,15	9,8±0,5	3,8±0,2	7,0±0,7
Горох	0,88±0,04	0,29±0,05	1,17±0,05	7,9±0,4	4,7±0,1	6,4±0,2
Рапс	0,74±0,12	0,04±0,01	0,78±0,10	7,6±0,6	3,6±0,9	7,1±1,0
Подсолнечник	1,68±0,32	0,23±0,01	1,91±0,31	10,2±1,5	4,1±0,3	6,5±0,3
Амарант	0,48±0,08	0,23±0,05	0,72±0,11	18,7±0,6	10,6±0,2	13,6±0,2
Козлятник (травосмесь)	0,13±0,06	0,22±0,11	0,35±0,11	10,6±3,3	4,7±0,9	6,8±1,1
Кострец (травосмесь)	0,21±0,09	0,38±0,22	0,59±0,29	8,5±0,4	8,1±0,3	8,3±0,3
Суходольный луг (разнотравье)	0,09±0,02	0,51±0,33	0,60±0,31	9,5±1,2	6,9±0,7	8,6±0,9
Суходольный луг (злаки)	0,11±0,05	0,39±0,29	0,50±0,32	8,9±0,5	7,4±0,6	7,8±0,5
Пойменный луг (разнотравье)	0,03±0,01	0,04±0,01	0,07±0,01	9,5±0,4	7,1±0,4	9,3±0,5
Пойменный луг (злаки)	0,68±0,20	1,28±0,26	1,96±0,18	8,8±0,6	6,0±0,5	7,3±0,3

* – здесь и далее в таблицах и рисунках доверительный интервал рассчитывался как $\pm t_{0,95} \cdot m$

Значения общей удельной поверхности корней растений агроценозов и луговых биогеоценозов близки (116-122 см²/см³). Различий между видами и группами видов растений не выявлено. При этом недействительная удельная поверхность корней преобладает над рабочей удельной поверхностью, то есть превалирует та часть поверхности корня, которая адсорбирует вещества, но не передает их внутрь.

Глава 5. Поведение ^{137}Cs в почвах и растениях агроценозов и луговых биогценозов Плавского радиоактивного пятна

5.1. Накопление ^{137}Cs в почвах агроценозов и луговых биогценозов. В настоящее время плотность радиоактивного загрязнения почв Плавского пятна ^{137}Cs с учетом его радиоактивного распада на 2022 год составила в среднем 149 ± 16 кБк/м² (428 ± 62 Бк/кг). При этом коэффициент вариации (V) средних величин удельной активности ^{137}Cs почв пробных площадок составил 29%. Такая пространственная неоднородность уровней радиоактивного загрязнения почв, очевидно, связана с неравномерным характером чернобыльских выпадений и вторичным перераспределением ^{137}Cs в системе склоновых агроландшафтов (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры накопления ^{137}Cs в почвах агроценозов и луговых биогценозов Плавского радиоактивного пятна (n=3)

Агроценоз/ луговой биогценоз	Уд. активность ^{137}Cs		Плотность загрязнения ^{137}Cs	
	среднее \pm дов. интервал, Бк/кг	минимум – максимум, Бк/кг	среднее \pm дов. интервал, кБк/м ²	минимум – максимум, кБк/м ²
Пшеница яровая	380 \pm 8	372-385	138 \pm 10	132-148
Пшеница озимая	385 \pm 33	353-403	125 \pm 10	112-137
Ячмень яровой	319 \pm 60	285-380	132 \pm 25	111-155
Кукуруза	311 \pm 71	270-383	119 \pm 26	106-145
Соя	360 \pm 39	337-399	124 \pm 18	108-139
Горох	334 \pm 14	321-347	106 \pm 10	96-113
Картофель	342 \pm 16	327-456	130 \pm 36	108-153
Амарант	474 \pm 131	341-543	164 \pm 36	128-191
Гречиха	569 \pm 79	489-617	191 \pm 34	156-209
Горчица	421 \pm 114	310-506	164 \pm 53	111-200
Рапс	378 \pm 25	355-400	152 \pm 13	145-165
Подсолнечник	313 \pm 48	280-360	122 \pm 10	115-132
Травосмесь	497 \pm 17	284-513	155 \pm 5	152-159
Суходольный луг	638 \pm 46	597-678	204 \pm 19	189-222
Пойменный луг	698 \pm 27	671-715	205 \pm 24	183-226

Анализ вертикального распределения ^{137}Cs по профилю пахотных черноземов показал, что 98% запасов радионуклида сосредоточено в пределах верхнего 30-см слоя (в пахотном и староплахотном горизонтах). При этом распределение ^{137}Cs в 30-см слое пахотных почв было практически равномерным, что связано с регулярным механическим перемешиванием почвы при вспашке, а также проведенной в качестве реабилитационных мероприятий на данной территории глубокой вспашке в 1986-87 гг., что подтвердилось наличием в почвах всех исследованных агроценозов староплахотного горизонта. В целинных почвах суходольного и пойменного лугов профильное

распределение ^{137}Cs в пределах верхнего 30-см слоя имело регрессивно-аккумулятивный характер с четко выраженным убыванием удельной активности ^{137}Cs за пределами корнеобитаемого слоя мощностью ≈ 10 -12 см (рисунок 2), где сосредоточено до 60% запаса ^{137}Cs .

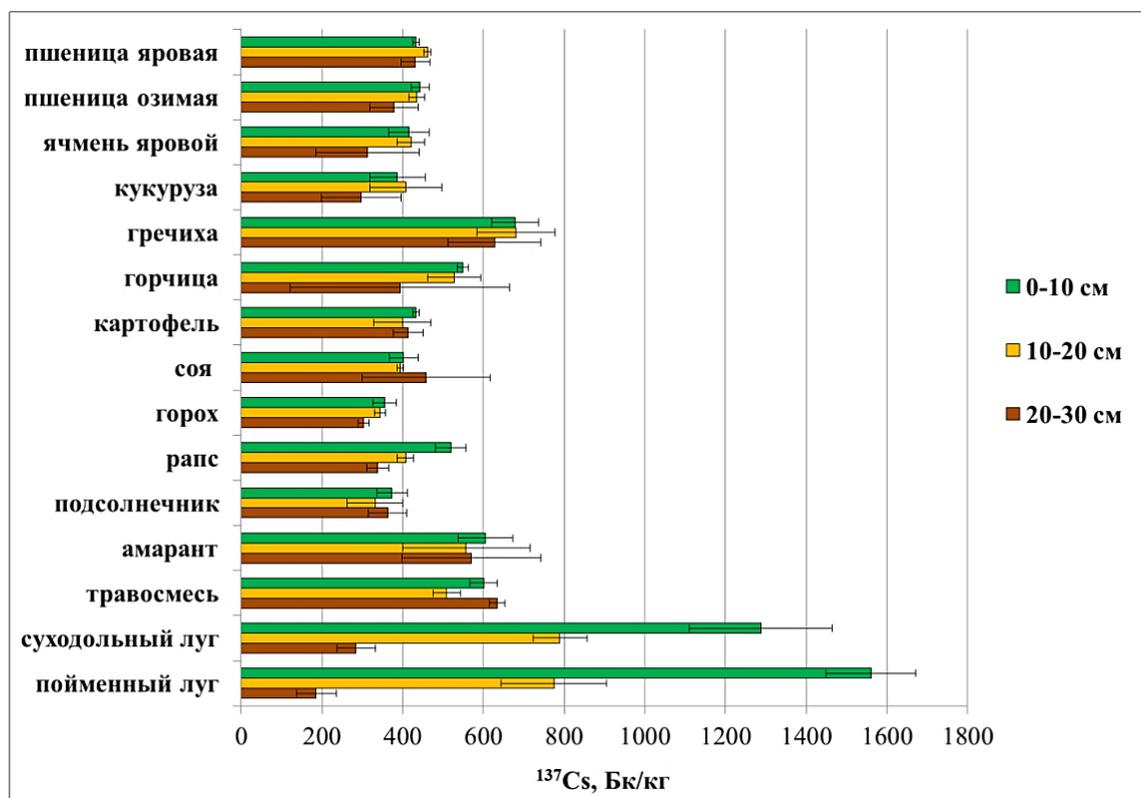


Рисунок 2 – Вертикальное распределение удельной активности ^{137}Cs в 30-см слое почв агроценозов и луговых биоценозов на территории Плавского радиоактивного пятна

5.2. Накопление ^{137}Cs в растениях агроценозов и луговых биоценозов.

Удельная активность ^{137}Cs в биомассе сельскохозяйственных культур и растений луговых биоценозов на территории Плавского радиоактивного пятна была на 1-2 порядка меньше, чем в почвах, и варьировала в пределах 15-50 Бк/кг.

5.3. Параметры перехода ^{137}Cs из почв в растения.

Оценка интенсивности миграции ^{137}Cs в системе «почва-растение» показала незначительный переход радионуклида в сельскохозяйственные культуры, а также в разнотравье и злаки лугов. Для оценки интенсивности корневого поглощения ^{137}Cs соответствующими видами растений был рассчитан коэффициент накопления цезия ($\text{КН}_{\text{Cs-137}}$) – отношение величин удельной активности ^{137}Cs в растениях и в корнеобитаемой (0-30 см) толще почв. Для всех исследованных растений средние значения $\text{КН}_{\text{Cs-137}}$ не превышали 0,2. По накопительной способности ^{137}Cs исследуемые виды растений различались более чем в 7 раз. Относительно повышенные величины КН отмечались в общей биомассе ячменя,

пшеницы яровой и озимой, злаков суходольного луга; наименьшее – в биомассе разнотравья лугов и картофеле (рисунок 3).

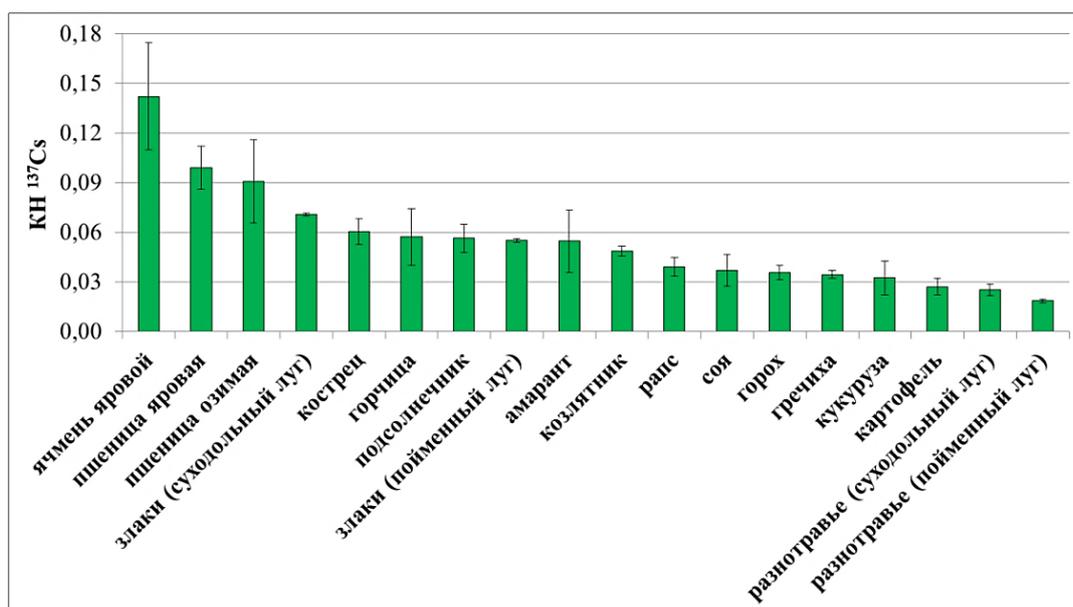


Рисунок 3 – Коэффициенты накопления ^{137}Cs в общей биомассе растений агроценозов и луговых биогеоценозов Плавского радиоактивного пятна

Разделение растений на надземную и подземную фракции биомассы позволило выявить существенные различия в интенсивности аккумуляции ^{137}Cs между корнями и побегами. Повышенные уровни накопления ^{137}Cs отмечались в корневой биомассе злаков, где КН были в 2-4 раза выше, чем в надземных органах. Для других культур характерно преимущественное накопление ^{137}Cs в надземной части растений, либо практически одинаковое в побегах и корнях (рисунок 4).

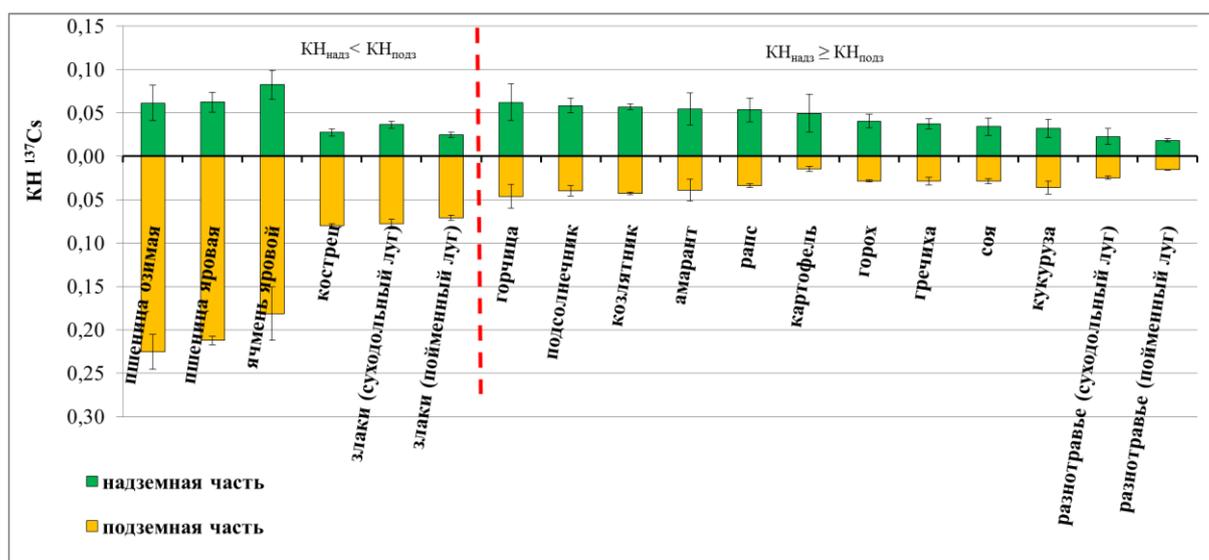


Рисунок 4 – Коэффициенты накопления ^{137}Cs в надземных и подземных компонентах агроценозов и луговых биогеоценозов Плавского радиоактивного пятна

Обобщая представленные данные, можно выделить три группы травянистых сельскохозяйственных культур и биологических групп дикорастущих видов по локализации ^{137}Cs в органах растений:

- 1) преобладание аккумуляции ^{137}Cs в корневой системе;
- 2) преобладание аккумуляции ^{137}Cs в надземных органах;
- 3) равномерная аккумуляция ^{137}Cs в надземных и подземных органах.

К первой группе относились однодольные растения, имеющие мочковатую корневую систему, представители *сем. Злаковые* (пшеница, ячмень, кострец, злаки суходольного и пойменного лугов). Вторая группа состояла из двудольных растений со стержневой корневой системой *сем. Гречишные* (гречиха), *Капустные* (горчица, рапс), *Сложноцветные* (подсолнечник), *Пасленовые* (картофель), *Бобовые* (козлятник, горох), *Амарантовые* (амарант). Третья группа включала представителя *сем. Бобовые* (соя), разнотравье лугов, а также кукурузу (*сем. Злаковые*), в которой зафиксирована низкая аккумуляция радиоцезия как в надземных, так и в подземных компонентах. Вероятно, это связано с биохимическими особенностями кукурузы, в том числе наличием фотосинтеза С4 типа. Помимо отличий в строении корневой системы, у однодольных растений отсутствует камбий, дающий начало вторичным проводящим тканям, стеблевые сосудистые пучки являются замкнутыми и беспорядочно расположены на поперечном срезе стебля (Якушкина, 2004). Таким образом, особенности корневого потребления и транслокации ^{137}Cs у растений классов однодольных и двудольных тесно связаны с их морфофизиологическими свойствами.

5.4. Содержание калия в почве и растениях. Среднее содержание валовой формы К в пахотных горизонтах почвы исследованной территории составляло 2,0% (Шопина и др., 2020) и характеризовалось меньшей пространственной изменчивостью ($V=6\%$) по сравнению с удельной активностью ^{137}Cs в почве Плавского радиоактивного пятна.

Вертикальное распределение обменных и необменных форм соединений К в пределах 0–30 см слоя почв в большинстве агроценозов относилось к аккумулятивно-регрессивному типу, что обуславливалось регулярным внесением в поверхностный слой почвы калийных удобрений, а также биогенностью К, определяющей ежегодный возврат поглощенного растениями элемента с растительными и пожнивными остатками в приповерхностный слой почвы (рисунок 5).

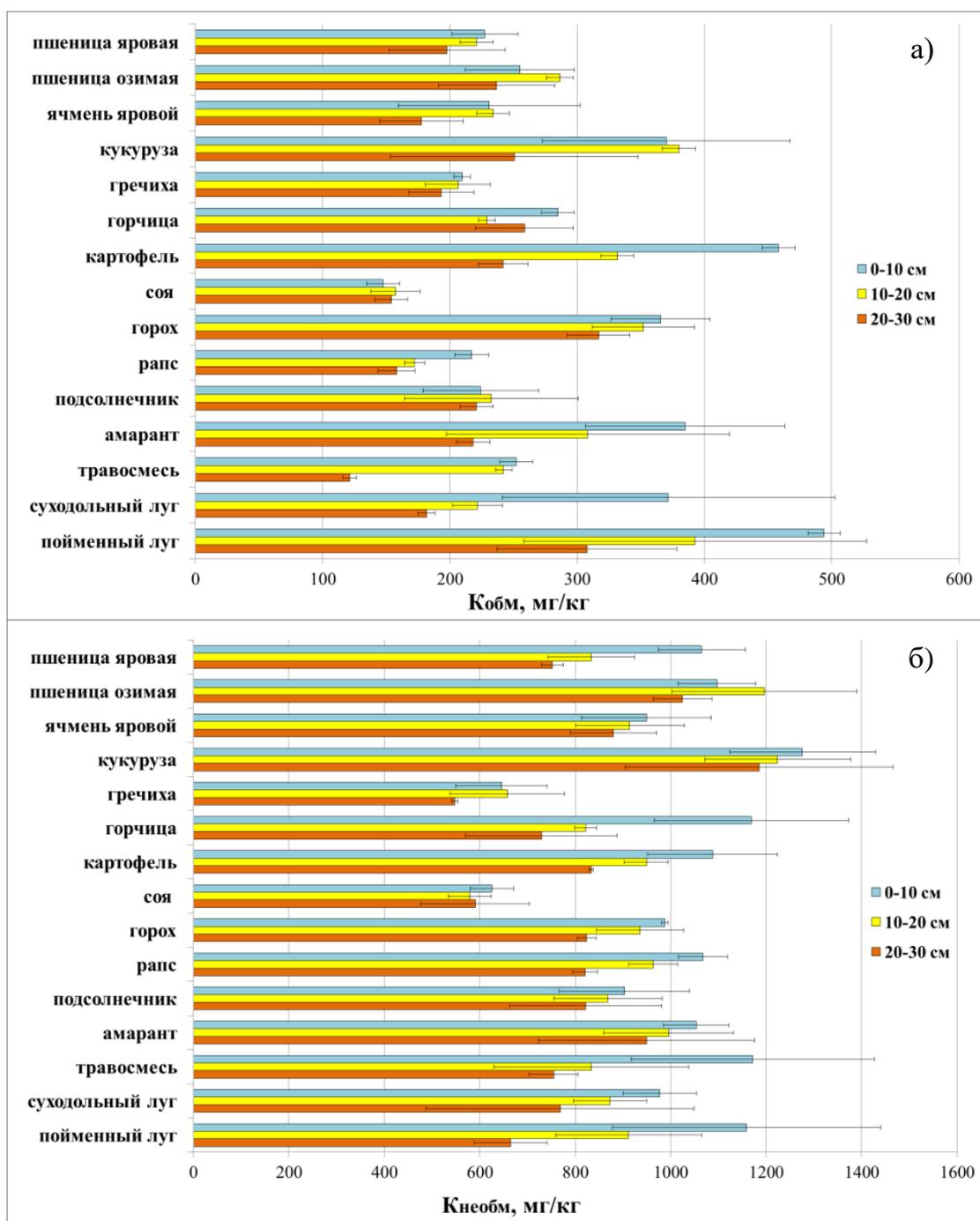


Рисунок 5 – Вертикальное распределение в пределах 30-см слоя пахотных и целинных почв Плавского радиоактивного пятна обменной (а) и необменной (б) форм соединений К

Содержание К в биомассе растений сельскохозяйственных культур варьировало в пределах 0,12 – 1,93%. Наибольшее содержание калия характерно для калиефильных растений: кукурузы, сои, картофеля, амаранта, подсолнечника, гречихи. В растениях природных биогеоценозов содержание К относительно низкое. При этом практически для всех исследованных видов содержание К в стеблях и листьях было выше, чем в корнях, что определяется его активным участием в регуляции углеводного и белкового обмена растений.

5.5. Сравнительные особенности распределения ^{137}Cs и К в ризосферном пространстве травянистых растений. В ходе выполнения работы было проведено исследование по сравнению ^{137}Cs и обменной формы К в ризосферном пространстве почвы. На основе непараметрического критерия Вилкоксона показано отсутствие достоверных различий величин удельной активности ^{137}Cs в ближней и дальней зонах ризосферы ($p = 0,245$ при уровне значимости 0,05). В то же время, содержание $K_{\text{обм}}$ в ближней зоне ризосферы достоверно больше, чем в дальней ($p = 0,026$ при уровне значимости 0,05).

Расчет величин ризосферного коэффициента (РК) для ^{137}Cs подтвердил, что градиент величин удельной активности ^{137}Cs вблизи поверхности корней и в относительном удалении от них для всех культур не был выражен (РК 0,9–1,2), тогда как для величин содержания $K_{\text{обм}}$ РК составлял в среднем 1,3, варьируя от 1,1 до 2,0 (рисунок 6). Исключение представляли собой случаи обеднения обменным К ближней зоны ризосферы в агроценозах рапса (РК=0,6) и пшеницы яровой (РК=0,8), возможно, из-за торможения процессов реутилизации питательных элементов к концу вегетационного сезона этих культур.

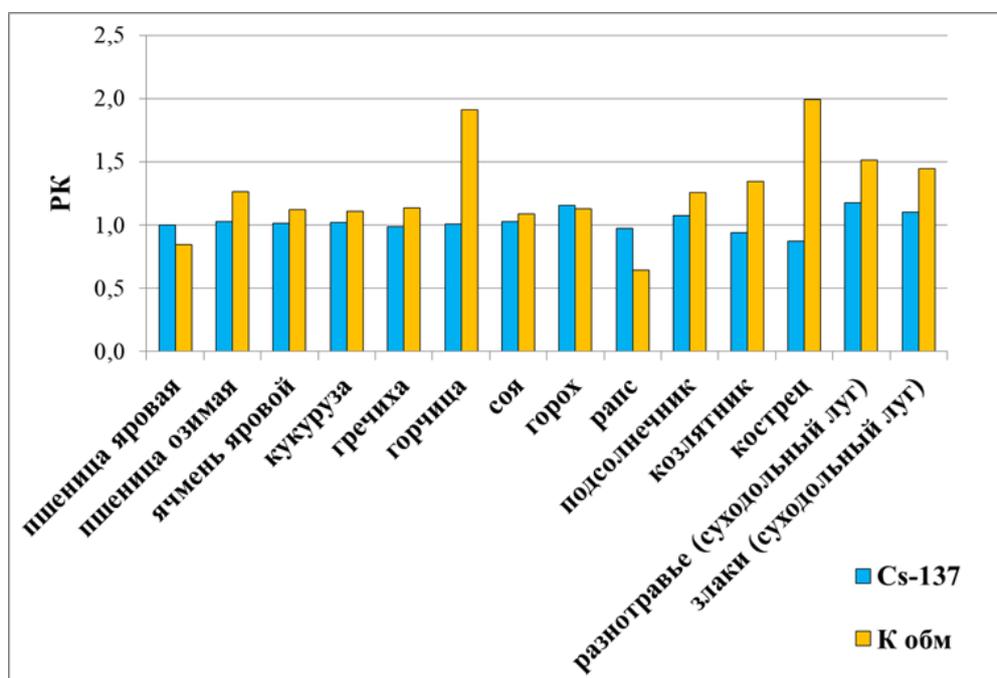


Рисунок 6 – Значения РК ^{137}Cs и $K_{\text{обм}}$ в ризосфере агроценозов и суходольного луга на территории Плавского радиоактивного пятна

Таким образом, градиент концентрации $K_{обм}$ в ближней и дальней зонах ризосферы более выражен по сравнению с ^{137}Cs , подтверждая высокую интенсивность потребления K растениями как одного из макроэлементов питания.

5.6. Сравнение поведения ^{137}Cs и K в биогеоценозах Плавского радиоактивного пятна. Для оценки интенсивности корневого поглощения K исследуемыми видами растений агроценозов и естественных лугов был рассчитан коэффициент ИКП (ИКП – соотношение содержания K в растениях к содержанию обменных и необменных форм K в 30 см слое почвы, соответственно). Средние величины ИКП $_{K_{обм}}$ и ИКП $_{K_{необм}}$ агрокультур и растительности лугов были выше 1, что подтверждало активное потребление K как макроэлемента, относящегося к элементам интенсивного биологического накопления (Перельман, 1975). Значения ИКП варьировали в широких пределах: 4,3-154,0 для ИКП $_{K_{обм}}$ и 1,2-50,8 для ИКП $_{K_{необм}}$, при этом ИКП $_{K_{обм}}$ и ИКП $_{K_{необм}}$ имели тесную корреляцию между собой (критерий Пирсона $r=0,97$ при $P=0,95$), отражая динамическое равновесие между данными формами соединений элемента.

Сравнение величин $КН_{Cs-137}$ и ИКП $_{K_{необм}}$, являющихся смысловыми аналогами, показало, что аккумуляция K в общей биомассе растений в среднем в ≈ 200 раз более интенсивна, чем для ^{137}Cs (рисунок 7).

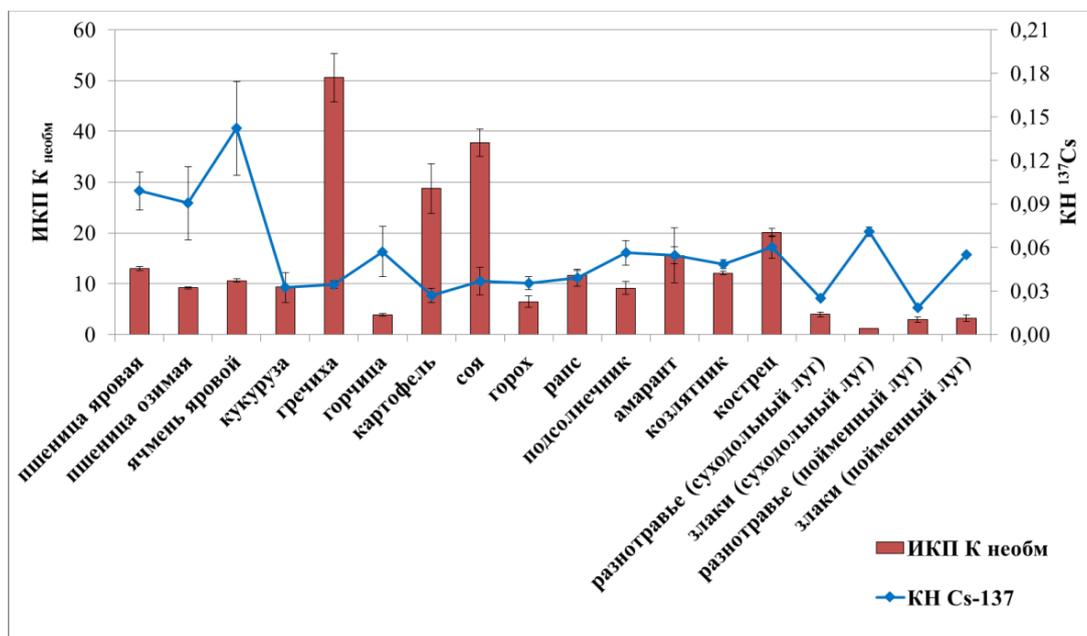


Рисунок 7 – Сравнение ИКП $_{K_{необм}}$ и $КН_{Cs-137}$ для растений агроценозов и луговых биогеоценозов Плавского радиоактивного пятна

Между количественными показателями индексов биологического поглощения ^{137}Cs и К не обнаруживалось статистически подтвержденной взаимозависимости варьирования по критерию Спирмена при уровне значимости 0,05 (таблица 3).

Таблица 3 – Корреляционный анализ взаимосвязи величин ИКП_{Кобм.}, ИКП_{Кнеобм.} и КН_{Сs-137} для растений Плавского радиоактивного пятна

Коэффициент	КН _{Сs-137} общ.	КН _{Сs-137} надз.	КН _{Сs-137} подз.
ИКП _{Кобм} общ	0,055	0,216	-0,056
ИКП _{Кобм} надз	0,038	0,204	-0,096
ИКП _{Кобм} подз	0,018	0,329	-0,094
ИКП _{Кнеобм} общ	0,038	0,173	-0,103
ИКП _{Кнеобм} надз	-0,034	0,124	-0,205
ИКП _{Кнеобм} подз.	-0,053	0,254	-0,180

Для К, в отличие от ^{137}Cs , было выявлено преимущественное накопление в надземных органах всех исследованных культур – коэффициент транслокации (КТ – отношение удельной активности ^{137}Cs в надземной и подземной частях растений) варьировал от 2 до 11 (рисунок 8).

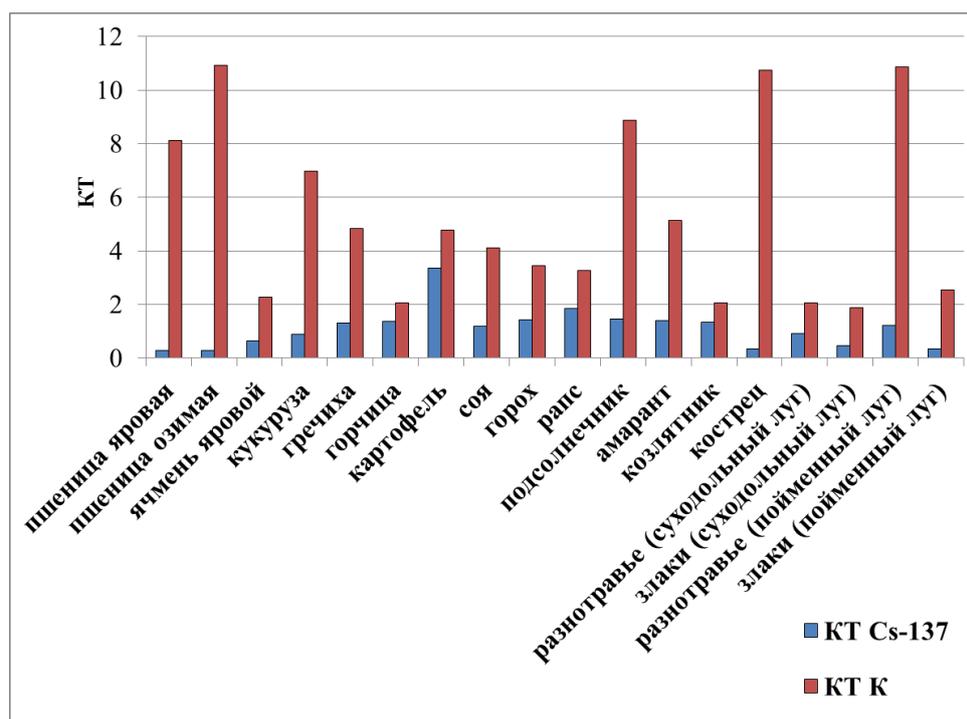


Рисунок 8 – Коэффициенты транслокации ^{137}Cs и К для растений агроценозов и луговых биогеоценозов Плавского радиоактивного пятна

5.7. Биологические особенности растений, влияющие на биогеохимический цикл ^{137}Cs в травянистых экосистемах. При поиске факторов, определяющих параметры миграции ^{137}Cs в системе «почва-растение» травянистых экосистем Плавского радиоактивного пятна, провели корреляционный анализ по критерию Спирмена, который не выявил достоверных взаимосвязей между величинами КН и

запасами биомассы растений ($r= 0,21$, $r= 0,39$, $r= -0,09$ для $n=18$ при $P=0,95$ для общей, надземной и подземной биомассы, соответственно), КН ^{137}Cs и зольностью растений ($r= -0,36$, $r= -0,62$, $r= -0,02$ для $n=18$ при $P=0,95$ для общей, надземной и подземной биомассы, соответственно), а также КН ^{137}Cs и поглотительной способности корней ($r= -0,06$, $r= -0,03$, $r= -0,09$ для $n=18$ при $P=0,95$ для общей, надземной и подземной биомассы, соответственно).

5.8. Параметры распределения ^{137}Cs в системе «почва-растение» Плавского радиоактивного пятна в отдаленный период после аварии. Оценка распределения ^{137}Cs в системе «почва-растение» показала, что в культурных и природных травянистых экосистемах более 99,9% запасов ^{137}Cs сосредоточено в почве, что свидетельствует о сильной фиксации радиоцезия твердой фазой почвы и дискриминации корневого потребления. Таким образом, переход ^{137}Cs в растительность незначительный. Накопление ^{137}Cs за вегетационный период как в однолетних, так и в многолетних растениях составило 0,01-0,03% от общих запасов радионуклида в системе «почва-растение». Еще меньше доля отчуждения ^{137}Cs с урожаем растений зерновых, технических и силосных культур, а также клубнями картофеля (0,002-0,006%), а возврат в почву с растительными остатками и опадом – 0,005%, в то время как скорость естественного распада радиоцезия в год – 2,2 %.

5.9. Радиэкологическая оценка современного состояния почв и качества растительной продукции, получаемой в пределах Плавского радиоактивного пятна. Во всех почвах исследованных агроценозов сохранилось превышение предельно допустимого уровня плотности радиоактивного загрязнения почв ^{137}Cs , равного 37 кБк/м² в 3-5 раз («О социальной защите граждан» ..., 1991). Таким образом, несмотря на более чем 35-летний период после аварии на ЧАЭС (первый цикл полураспада ^{137}Cs), общая радиэкологическая обстановка в районе Плавского радиоактивного пятна остается неудовлетворительной.

Однако при сопоставлении содержания в ^{137}Cs в сельскохозяйственных культурах, выращенных на данной территории, с нормами СанПиН 2.3.2.1078-01 и ВП 13.5.13/06-01 (действовали до 2016г.) было установлено, что продукция растениеводства соответствовала допустимым уровням удельной активности ^{137}Cs в ней. В зерне злаковых культур и гречихе средняя удельная активность ^{137}Cs составила $6,2 \pm 1,5$ Бк/кг, в семенах и стручках горчицы, подсолнечника, рапса и гороха – $9,1 \pm 2,8$

Бк/кг при допустимом уровне накопления 60 Бк/кг, в картофеле – $4,9 \pm 0,4$ Бк/кг при допустимом уровне накопления 80 Бк/кг, в зеленой биомассе кормовых растений (соя, амарант, травосмесь) – $29,0 \pm 9,5$ Бк/кг при допустимом уровне накопления 100 Бк/кг.

ВЫВОДЫ

1. В настоящее время плотность радиоактивного загрязнения почв на территории Плавского пятна Тульской области в среднем составила 149 ± 16 кБк/м², что превышает предельно допустимый уровень содержания ¹³⁷Cs (37 кБк/м²) более чем в 4 раза. При этом продукция растениеводства, получаемая в настоящее время на данной территории, полностью соответствует санитарно-гигиеническим нормам.

2. Основной запас ¹³⁷Cs (более 98%) сосредоточен в пределах агротурбированных горизонтов агрочерноземов. В целинных черноземах и аллювиальных темногумусовых почвах отмечается резкое убывание содержания ¹³⁷Cs с глубиной, причем до 60% запасов радионуклида находится в пределах корнеобитаемого слоя (до 10-12 см).

3. В ризосфере исследуемых травянистых растений концентрация $K_{обм}$ в непосредственной близости от корней растений выше, чем на удалении 1-2 см от них. Для ¹³⁷Cs градиента значений удельной активности в «ближней» и «дальней» зонах ризосферы не отмечается.

4. В распределении ¹³⁷Cs между надземной и подземной фракциями биомассы растений выявлено, что у большего числа исследованных видов накопление ¹³⁷Cs в надземных побегах выше, чем в корнях. У представителей *сем. Злаковые* (пшеница, ячмень, коострец, злаки лугов) отмечается сравнительно повышенное депонирование ¹³⁷Cs в корнях и низкая интенсивность транслокации радионуклида в надземные органы.

5. Интенсивность корневого поглощения K и распределение его содержания в надземной и подземной частях растений биогеоценозов Плавского радиоактивного пятна не обнаруживают-значимых корреляций с параметрами биологической миграции ¹³⁷Cs.

6. В исследуемых травянистых биогеоценозах вынос ¹³⁷Cs растениями из почвы за год варьирует от 0,01 до 0,03% от общих запасов радионуклида в системе «почва-растение». Доля отчуждения ¹³⁷Cs с урожаем растений полевых и кормовых севооборотов, а также с укосом сена с лугов составляет в среднем 0,004%, а возврат в почву с растительными остатками и опадом – 0,005%. Таким образом, снижение уровня радиоактивного загрязнения агрогенных и природных травянистых экосистем

черноземной зоны со временем в основном определяется естественным распадом ^{137}Cs , скорость которого составляет 2,2% в год.

7. В настоящее время в травянистых экосистемах на территории Плавского радиоактивного пятна около 99,9% запасов ^{137}Cs в биогеоценозах сосредоточено в почве, что определяется как прочной фиксацией радиоцезия твердой фазой почв, так и низкой интенсивностью его корневого потребления. В этой связи емкость и интенсивность биологического круговорота ^{137}Cs в травянистых экосистемах на черноземах незначительны.

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.5.15 – Экология (биологические науки)

1. **Комиссарова О.Л.**, Парамонова Т.А., Кузьменкова Н.В., Турыкин Л.А., Павлов К. В., Щеглов А.И. Сравнительный анализ биологической миграции цезия-137 и стабильного калия в агроценозах черноземной зоны // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2022. – № 4. – С. 20-30. ИФ РИНЦ – 0,453, 1,3 п.л., личный вклад – 0,7 п.л.

2. **Комиссарова О.Л.**, Парамонова Т.А., Денисова О.Е., Кузьменкова Н.В., Турыкин Л.А. Особенности накопления цезия-137 в кукурузе, на радиоактивно загрязненных землях // Плодородие. – 2022. – № 5. – С. 76-79. DOI: [10.25680/S19948603.2022.128.19](https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.128.19). ИФ РИНЦ (2021) – 0,722, 0,5 п.л., личный вклад – 0,2 п.л.

3. Шопина О.В., Семенков И.Н., Парамонова Т.А., **Комиссарова О.Л.** Баланс элементов в системе «агрочернозем глинисто-иллювиальный – сельскохозяйственные растения» на Плавском плато (Тульская область России) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2020. – Т. 105. – С. 91-108. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-105-91-108](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-91-108) ИФ РИНЦ (2021) – 0,835, 1,0 п.л., личный вклад – 0,2 п.л.

4. **Komissarova O.**, Paramonova T. Land use in agricultural landscapes with chernozems contaminated after Chernobyl accident: Can we be confident in radioecological safety of plant foodstuff? // International Soil and Water Conservation Research. – 2019. – V. 7. № 2. – p. 158-166. DOI: [10.1016/j.iswcr.2019.03.001](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.03.001), CGR (2022) – 1,696, 1,0 п.л., личный вклад – 0,5 п.л.

5. Пармонова Т.А., Шамшурина Е.Н., Беляев В.Р., **Комиссарова О.Л.** Сравнительный анализ поступления Cs-137 в луговую растительность районов черноземной зоны, в различной степени загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2017 – Т. 57 – № 4 – с. 429-439. DOI: 10.7868/S0869803117040087, ИФ РИНЦ (2021) – 0,656, 1,2 п.л., личный вклад – 0,2 п.л.

Полный список публикаций размещен на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА» по адресу: <https://istina.msu.ru/profile/Komissarova-O.L.>