

На правах рукописи



КРОПАЧЕВА Марья Юрьевна

**ПОВЕДЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В
СИСТЕМЕ «АЛЛЮВИАЛЬНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ –
ПРИБРЕЖНЫЕ МАКРОФИТЫ»
В ПОЙМЕ РЕКИ ЕНИСЕЙ
(БЛИЖНЯЯ ЗОНА ВЛИЯНИЯ КРАСНОЯРСКОГО ГХК)**

25.00.09 – геохимия, геохимические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН).

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических наук
Сухоруков Федор Васильевич

Официальные оппоненты:

Бортникова Светлана Борисовна, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, заведующая лабораторией геоэлектрoхимии

Рихванов Леонид Петрович, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор кафедры геоэкологии и геохимии

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Учреждение Российской академии наук Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

Защита состоится 18 апреля 2012 г. в 10⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 003.067.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3.

Факс: (383) 333-27-92, e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН.

Автореферат разослан 16 марта 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор геол.-мин. наук



О.Л. Гаськова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Техногенные радионуклиды являются одними из наиболее информативных химических элементов с позиции биогеохимии и охраны окружающей среды не только в силу радиоактивности, но и потому, что присутствуют в биосфере менее века и ранее в природе не существовали. Работы по изучению геохимии техногенных радионуклидов, включая распределение их в основных компонентах биогеоценоза поймы Енисея, ведутся с 70-х годов XX века. Наиболее сильное загрязнение наблюдается в непосредственной близости от Красноярского Горно-химического комбината (ГХК), в так называемой ближней зоне его влияния (порядка 25 км ниже по течению от точки сброса охлаждающих вод реакторов), где загрязнению подвергаются все компоненты пойменного биогеоценоза (Сухоруков и др., 2004; Bolsunovsky et al., 2005). Два из трех реакторов комбината являются прямоточными и были остановлены в 1992 году, а третий реактор замкнутого цикла работал как источник тепла для г. Железногорска и был заглушен только в 2010 году. Значительные следы радиоактивного загрязнения Енисейской поймы прослеживаются вплоть до Карского моря (Носов и др., 1993; Кузнецов и др., 1994; Носов, 1997). По оценкам Вакуловского (Вакуловский и др., 2005), запас ^{137}Cs , обусловленный работой ГХК, в пойме Енисея протяженностью 1900 км на 1975 г. составлял порядка 540 Ки (18 ТБк); уменьшение запаса ^{137}Cs в непо потревоженных участках поймы происходит только за счет радиоактивного распада (Вакуловский и др., 2006; Тертышник, 2007). Таким образом, к настоящему времени запасы ^{137}Cs в пойме должны были снизиться в два раза. На момент остановки прямоточных реакторов плотность загрязнения пойменных почв ^{137}Cs вблизи ГХК составляла 260-350 кБк/м² (Носов и др., 1993; Линник и др., 2004). После остановки прямоточных реакторов удельная активность короткоживущих радионуклидов в сбросных водах комбината составляла не более 4 Бк/л, а долгоживущих — не более сотых долей Бк/л, что в 100-1000 раз меньше активностей этих радионуклидов до 1992 года (Носов и др., 1993, 1997). Тем не менее, продолжавшийся до последнего времени сброс радионуклидов подтверждался наличием в водных растениях короткоживущих изотопов (Сухоруков и др., 2004; Чугуевский и др., 2006, 2010).

Цели и задачи исследования. Цель работы заключается в исследовании миграции γ - и β -излучающих техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co , ^{90}Sr) в компонентах речного биогеоценоза (аллювиальная почва – растение), выявлении влияния ризосферы как

особого почвенно-растительного симбиотического комплекса на образование и перераспределение их форм нахождения, и в оценке роли растений в их вторичной миграции. В качестве модельного вида были выбраны растения рода Осока (*Carex* L.), как повсеместно распространенные в пойме Енисея.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- установление уровня содержаний техногенных радионуклидов в аллювиальных почвах островов и берегов ближней зоны влияния Красноярского ГХК;
- выявление распределения и поведения техногенных радионуклидов в теле растений, произрастающих на аллювиальных почвах поймы Енисея;
- оценка вклада ризосферы в миграцию техногенных радионуклидов в системе «аллювиальная почва – растение» и в водную миграцию в результате паводков;
- установление влияния ризосферы на формы нахождения техногенных радионуклидов в системе «аллювиальная почва – растение»;

Научная новизна. Впервые в комплексное изучение биогеоценоза Енисейской поймы, загрязненной техногенными радионуклидами, вовлечена ризосфера. Изучено поведение техногенных радионуклидов как в системе «аллювиальная почва - растение» в целом, так и в составляющих ее частях.

Установлено, что поведение радионуклидов в ризосфере отлично от их поведения в почве. Накопление во всех частях растений отмечается для ^{137}Cs и ^{90}Sr . Показана возможность повторного вовлечения радионуклидов в миграционные процессы из аллювиальных почв за счет жизнедеятельности растений на загрязненных территориях. Выявлены основные тенденции распределения удельных активностей радионуклидов по мере удаления от источника загрязнения. Основная доля радионуклидов концентрируется в самых тонких и самых грубых гранулометрических фракциях почв и ризосферы. Показано, что в современную миграцию техногенных радионуклидов заметный вклад вносят их водорастворимые формы. Экспериментально оценен процент выноса радионуклидов из почвы и материала ризосферы под влиянием паводков и вовлечение радионуклидов во вторичную миграцию под влиянием жизнедеятельности растений.

Практическая значимость работы. На основе полученных данных впервые дана оценка вовлечения искусственных радионуклидов, депонированных в пойме Енисея, в повторную миграцию вследствие

жизнедеятельности растений, а также раскрыта роль ризосферы в данном процессе. Полученные результаты показывают влияние гидрологического режима участка русла, содержания органического углерода и глинистой составляющей в аллювиальных почвах и других условий на поступление техногенных радионуклидов в живое вещество, и могут служить одним из оснований для дальнейших расчетов экологических рисков.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертации положен материал, собранный автором в полевые сезоны 2003-2011 гг. В целом было отобрано и изучено 60 образцов почвы и ризосферы и 70 образцов растительных проб. При исследовании удельных активностей и химического состава растений и почв было проделано около 1800 определений.

В исследовании использовались следующие методы анализа: γ -спектрометрический, β -радиометрический с радиохимической пробоподготовкой, спектрофотометрический, рентгеноструктурный. Все аналитические исследования проведены в аттестованных и аккредитованных лабораториях Института геологии и минералогии СО РАН и Института почвоведения и агрохимии СО РАН.

Апробация полученных результатов. Результаты исследований по теме диссертации представлены на четырех Международных и одной Всероссийской конференциях, одном Международном симпозиуме. Автором были сделаны доклады на: Третьей всероссийской конференции молодых ученых "Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии" (Томск, 2006); IV Международной научно-практической конференции «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде» (Семипалатинск, 2006); Международной конференции «Экоаналитика Центральной Азии» (Алма-Ата, 2007); Конференции молодых ученых СО РАН, посвященной М.А.Лаврентьеву (Новосибирск, 2007). По теме диссертации в период с 2007 по 2008 гг. был поддержан проект ВМТК ИГМ СО РАН «Биогеохимические аспекты миграции техногенных радионуклидов в пойме р. Енисей», возглавляемый соискателем.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 4 научных журналах (в том числе 2 статьи в журналах, определенных ВАК) и в материалах российских и международных конференций (13 тезисов).

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 149 страницах текста и состоит из введения, 5 глав, включающих 13 таблиц,

16 рисунков, и выводов. Список литературы содержит 210 наименований работ.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и проведенных исследований. Определены цели и задачи диссертационной работы, изложены основные результаты, показан вклад автора в исследования по данной тематике, обозначена научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проанализированы пути поступления техногенных радионуклидов в окружающую среду, история изучения содержаний техногенных радионуклидов в различных компонентах окружающей среды, приведена география исследований. В обзоре освещены различные факторы, определяющие распределение техногенных радионуклидов в почвах, а также их переход из почвы в растения. Большое внимание уделено исследованиям радиоактивного загрязнения таких компонентов Енисейской поймы, как вода, донные отложения, аллювиальные почвы, биота. Отдельно рассмотрено влияние ризосферы на геохимию техногенных радионуклидов.

Во второй главе приведены геоморфологическая и гидрологическая характеристики исследуемой территории Енисейской поймы, дана характеристика Красноярского ГХК как источника радиоактивного загрязнения, описаны пробоотбор, полевая и лабораторная пробоподготовка образцов, указаны методы анализа.

В третьей главе приведены содержания техногенных радионуклидов в почве и ризосфере, валовый минеральный состав проб и содержания органического углерода, показано превышение содержаний радионуклидов на изученной территории над фоновыми значениями.

В четвертой главе приведено распределение удельных активностей техногенных радионуклидов по гранулометрическим фракциям в двух наиболее различающихся по условиям образования аллювиальных почв точках.

Пятая глава посвящена распределению техногенных радионуклидов в теле растения — в корневой системе (в крупных и мелких корнях), в надземной части растений как целиком, так в различных частях, рассмотрены коэффициенты накопления относительно различных компонентов системы «аллювиальная почва – ризосфера – растение», оценен переход некоторых радионуклидов из почвы в растения.

В последней главе приведены **выводы** по результатам проведенных исследований.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Первое защищаемое положение. Удельные активности ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co и ^{90}Sr в почве и ризосфере распределяются неоднородно и значительно превышают значения глобальных выпадений. На накопление этих изотопов в почве и ризосфере оказывают влияние условия формирования аллювиальных почв, высота и интенсивность паводков, удаленность от источника загрязнения.

Схема района пробоотбора приведена на рисунке 1. На фоновом участке в почве и материале ризосферы значения удельной активности радионуклидов близки между собой и обусловлены глобальными выпадениями. Из всех рассматриваемых изотопов обнаружены только ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Для ^{137}Cs , изотопов Eu и частично ^{60}Co значительные удельные активности наблюдаются в самой ближней к источнику загрязнения

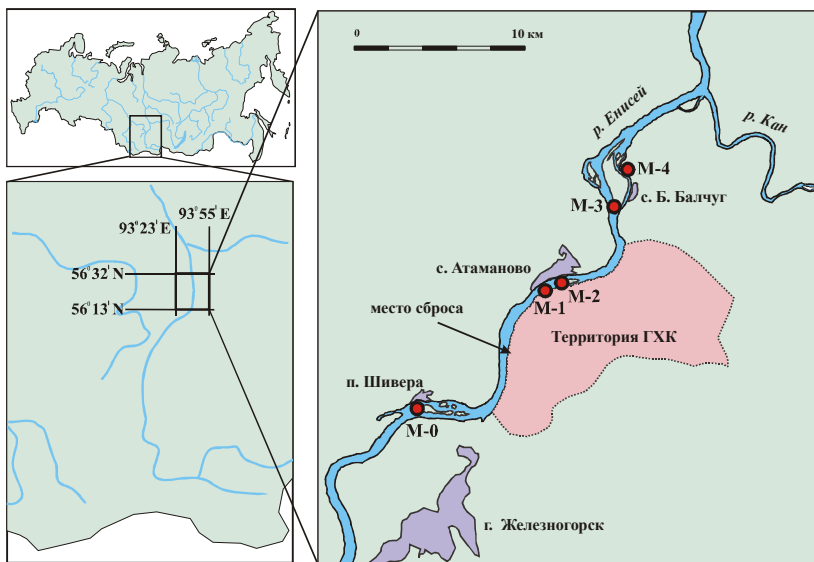


Рис. 1. Схема опробования ближней зоны влияния Красноярского ГХК. М-0 – фон, п. Шивера (6 км выше места сброса); М-1 – коса Атамановская (6 км ниже сброса); М-2 – о-в Атамановский (7 км ниже сброса); М-3 – о-в Березовый (15 км ниже сброса); М-4 – Балчуговская протока (18 км ниже сброса).

точке (М-1) (рис. 2). С удалением от сброса их удельные активности уменьшаются (М-2 и М-3), но в самой удаленной точке (М-4) вновь значительно возрастают. Такое увеличение содержаний изотопов в объектах Балчуговской протоки (М-4) объясняется тем, что на данном участке складываются благоприятные условия для выпадения тонких взвесей (Линник и др., 2004, Linnk et al., 2005). Максимальные удельные активности ^{90}Sr наблюдаются вблизи сброса и стабильно уменьшаются с удалением от источника загрязнения, достигая в Балчуговской протоке значений, сравнимых со значениями с фонового участка. Поскольку ^{90}Sr устойчив в водной фазе, для него не характерно сорбирование на взвешах (Болсуновский и др., 1999).

Удельные активности техногенных радионуклидов, как в почве, так и в ризосфере, имеют значительный разброс значений, что подтверждает неравномерность их распределения, показанную предыдущими исследованиями (Vakulovsky et al., 1995; Носов, 1997; Кузнецов и др., 1999; Сухоруков и др., 2000, 2004; Вакуловский и др., 2005). На косе Атамановской (М-1) и островах Атамановском (М-2) и Березовом (М-3) различие в распределении удельных активностей γ -излучающих радионуклидов между почвой и ризосферой невелико. В Балчуговской протоке так же наблюдается разброс значений, однако четко прослеживается значительная разница между удельными активностями почвы и ризосферы (рис. 2). В среднем для всех точек удельные активности радионуклидов в ризосфере ниже, чем в почве, и даже в Балчуговской протоке, где в ризосфере присутствует наибольшее количество органического углерода (~3% органического углерода), накопление ^{137}Cs относительно почвы (~0,6% органического углерода) не наблюдается. Причиной такого распределения в случае ^{137}Cs является, скорее всего, как заметное поглощение радиоцезия, как химического аналога калия, растением, что приводит к уменьшению его содержания в ризосфере, так и вымывание из ризосферы водорастворимых форм радиоцезия. На распределение изотопов Eu оказывает влияние присутствие в ризосфере органики. Сорбции европия, как показано рядом исследователей (Корнилович и др., 1997; Veneš et al., 2003; Wang et al., 2011), препятствует образованию подвижных гуминовых комплексов. Таким образом, в ризосфере Балчуговской протоки содержание изотопов Eu снижается за счет вымывания из ризосферы их подвижных гуминовых комплексов, так как изотопы Eu в растениях не обнаружены.

Исключение представляет ^{60}Co , для которого в Балчуговской протоке средние удельные активности в ризосфере выше, чем в окружающей

почве. Известно, что поглощение растениями кобальта тем выше, чем больше его мобильных форм присутствует в почве (Кабата-Пендиас, 1989), и что кобальт высоко подвижен в болотистых (глеевых) почвах (Иванов В.В., 1996), подобие которых наблюдается в Балчуговской

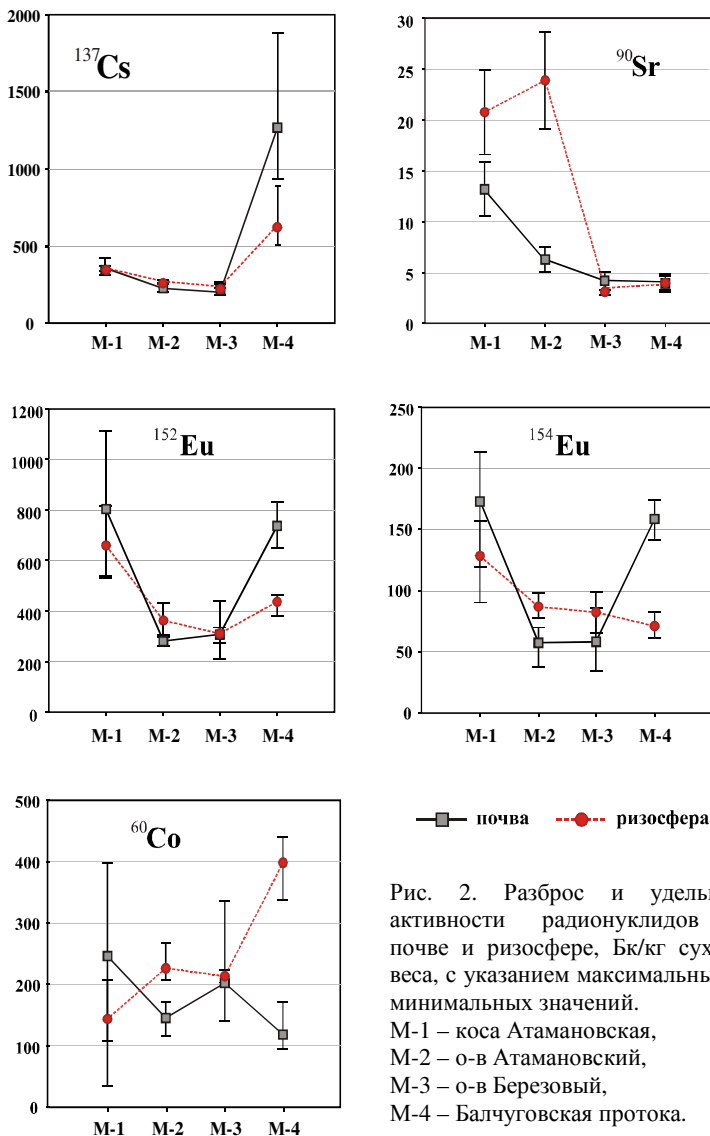


Рис. 2. Разброс и удельные активности радионуклидов в почве и ризосфере, Бк/кг сухого веса, с указанием максимальных и минимальных значений. М-1 – коса Атамановская, М-2 – о-в Атамановский, М-3 – о-в Березовый, М-4 – Балчуговская протока.

протоке. В случае связывания кобальта органическими хелатами, он становится легко доступным для растений (Кабата-Пендиас и др., 1989), однако верхние части изученных растений не поглощают ^{60}Co , и он обнаруживается только в корнях растений. Таким образом, ^{60}Co может как вымываться из почвы в виде водорастворимых форм, так и связываться с корневой системой растений, задерживаясь в ризосфере.

В случае β -излучающего ^{90}Sr в почве общий уровень удельных активностей ниже, чем в ризосфере. Известно, что в легких почвах ^{90}Sr весьма подвижен и легко поглощается растениями, а также сильно связывается с органическим веществом (Кабата-Пендиас и др., 1989; Kabata-Pendias et. al., 2001). Таким образом, подобное распределение ^{90}Sr на косе Атамановской (М-1) и острове Атамановском (М-2) может быть обусловлено вымыванием из почвы водорастворимых форм, в то время как в ризосфере, в которой несколько больший процент тонких гранулометрических фракций, происходит более сильная фиксация ^{90}Sr .

Корреляций между ^{137}Cs и стабильным изотопом Cs и между ^{90}Sr и стабильным Sr на изученных участках поймы не обнаружено. Распределение ^{137}Cs в почвах заметно отличается от распределения стабильного цезия из-за недостижения динамического равновесия между этими изотопами (Моисеев и др., 1975). Однако более вероятно, что отсутствие корреляции объясняется различными источниками поступления радионуклидов и их стабильных изотопов в изученную систему: стабильные изотопы входят в минеральный состав субстрата, в то время как радионуклиды поступают в систему в ионном виде или сорбированные на водных взвесах (Кузнецов и др., 1994, 1999). В целом концентрации стабильных цезия и стронция в почве и ризосфере не превышают их средние содержания в аллювиальных почвах (Reimann, Caritat, 1998; Kabata-Pendias, Pendias, 2001).

Второе защищаемое положение. Наиболее обогащены техногенными радионуклидами тонкие (сорбирование на глинистых минералах) и грубые (сорбирование гумусовым веществом и частичками неразложившейся органики) гранулометрические фракции аллювиальных почв. Во фракциях, содержащих легко мигрирующие с водным потоком коллоиды и взвеси, вынос радионуклидов достигает 3%, в раствор выходит до 9% (^{90}Sr).

Гранулометрический состав почв и ризосферы определялся только в самой ближней (М-1, коса Атамановская) и в самой дальней (М-4, Балчуговская протока) к источнику загрязнения точках, как в наиболее различающихся по условиям образования аллювиальных почв участках.

Пробы подвергались гранулометрическому фракционированию по стандартному методу (Новиков, 1952; Ковриго и др., 2000; Попов, 2006). Фракции $>0,25$ мм и $0,16-0,25$ мм отделялись мокрым рассеиванием на стандартных ситах. Фракция $>0,25$ мм состояла, в основном, из минеральных частиц, а также в ней присутствовал большой процент мелких остатков неразложившейся органики. Фракции $0,001-0,01$ мм и $0,01-0,16$ мм отделялись отмучиванием. Фракция $0,001-0,00022$ мм, представляющая собой илистые коллоиды и взвесь (Ковриго и др., 2000), отделялась фильтрованием (фильтр МФА-МА-№5 (МФАС-ОС-1), Владипор). Фильтрат $<0,00022$ мм содержал водорастворимые формы элементов. В каждой исследованной пробе присутствовали крупные остатки органики, которые были выделены в отдельную фракцию $>0,25$ мм «органика».

Распределения удельных активностей изотопов по фракциям почв и ризосферы показало в целом схожий характер для каждой пробы (рис. 3). Повышение удельных активностей наблюдается в грубых фракциях и в тонких фракциях, тогда как средние фракции обычно обеднены радионуклидами, хотя и преобладают по массе (рис. 4). Все изотопы в значительной степени присутствуют во фракции $>0,25$ мм и $>0,25$ мм «органика». В этих фракциях, судя по всему, происходит сорбция изотопов гумусовым веществом (Круглов и др., 1995). Кроме того, фиксация в крупных фракциях возможна из-за неполной диспергации водопрочных мелких почвенных агрегатов, образующихся при естественном осушении пойменных почв после паводков (Коробова и др., 2007).

Имеется тенденция к возрастанию содержаний изученных радионуклидов с уменьшением размера фракции (рис. 3). Это совпадает с данными других исследований (Моисеев и др., 1975; Круглов и др., 1995; Попов, 2006; Коробова и др., 2007), которые показывают, что основная доля радионуклидов в почве обычно связывается тонкими фракциями, содержащими глинистые и илистые частицы, и обогащенными слоистыми минералами групп монмориллонита, каолинита и гидрослюд. Во фракции $0,001-0,01$ мм на глинистые минералы приходится до 50% от валового состава пробы, а в Балчуговской протоке доля глинистых минералов превышает 50%, в то время как в более грубых фракциях доля глинистых минералов снижается до 30%.

Значительные удельные активности изотопов наблюдаются во фракции $0,001-0,00022$ мм, в которую входят илистые коллоиды и взвесь, на них может сорбироваться до 3% изотопов (^{90}Sr). В растворе, за

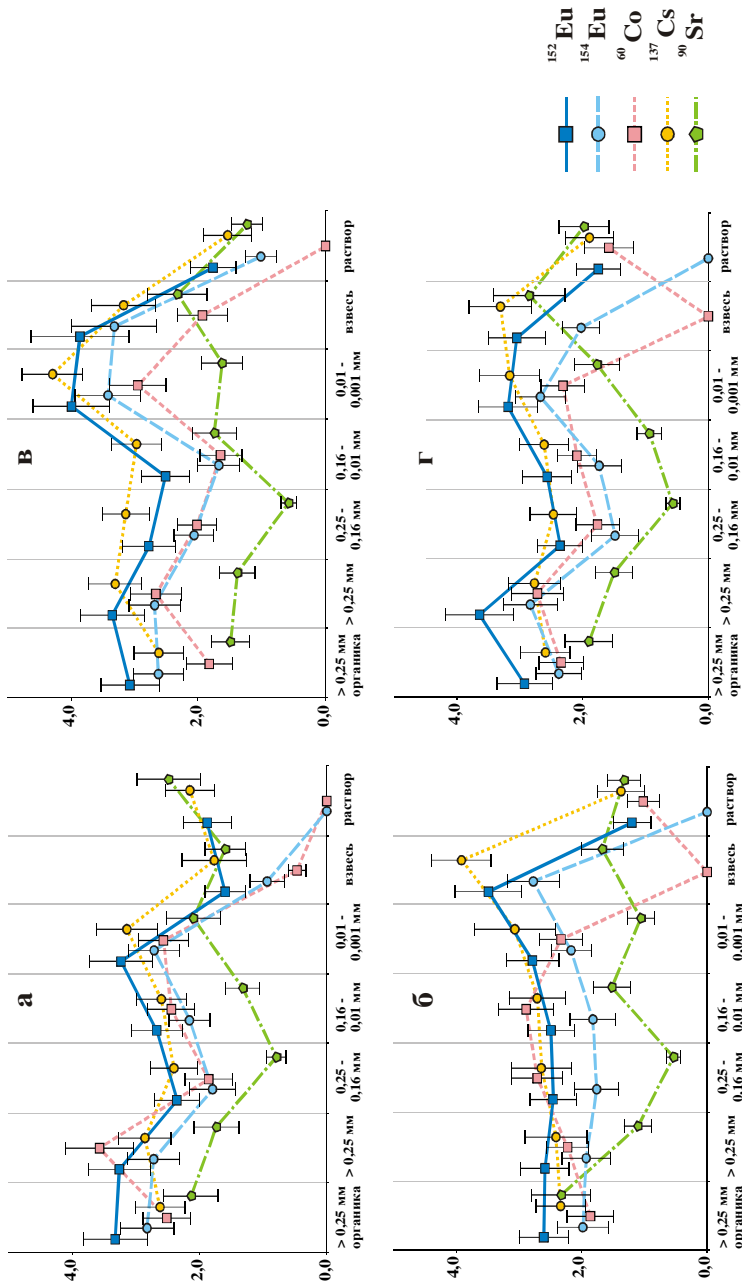


Рис. 3. Распределение удельных активностей по гранулометрическим фракциям почвы и ризосферы, взвеси и раствору, Ig Bq/kg .

а – почва с косы Атамановской; б – ризосфера с косы Атамановской; в – почва из Балчуговской протоки; г – ризосфера из Балчуговской протоки.

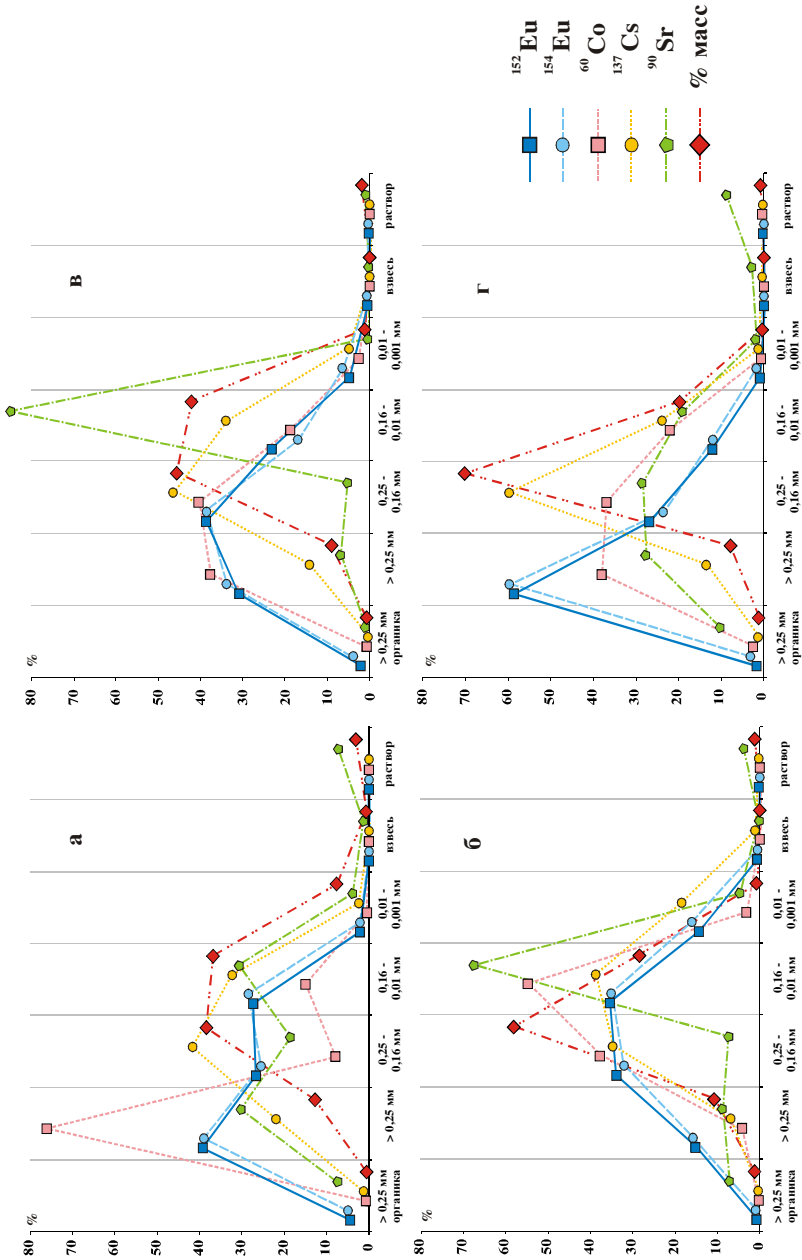


Рис. 4. Доля активностей изотопов в гранулометрических фракциях почвы и ризосферы, взвеси и растворе.
а – почва с косы Атамановской; б – ризосфера с косы Атамановской; в – почва из Балчугтовской протоки; г – ризосфера из Балчугтовской протоки.

небольшим исключением (^{154}Eu , ^{60}Co), присутствуют все изученные изотопы, и наибольший выход зафиксирован так же для ^{90}Sr , достигающий в случае ризосферы Балчуговской протоки почти 9 %. Следует отметить, что как фракция 0,001–0,00022 мм, так и раствор (<0,00022 мм), высокоподвижны и легко мигрируют с водным потоком. Процентное распределение активностей по гранулометрическим фракциям показывает, что в целом наибольшей активностью обладают средние фракции (0,25-0,16 мм и 0,16-0,01 мм), которые имеют наибольшую массовую долю (рис. 4). В то же время в почве косы Атамановской и в ризосфере Балчуговской протоки наблюдается заметное обогащение фракции >0,25 мм ^{60}Co (76%) и изотопами Eu (60%), причиной чего, судя по всему, является связывание органическим веществом.

Третье защищаемое положение. Растения поглощают радионуклиды избирательно. Уровни содержания изотопов в корневой системе растений увеличиваются с уменьшением размера корней. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr по тканям наземных частей растений и степень перехода из почвы в растение зависит от их содержания в субстрате и от режима обводнения на участке русла, где произрастают растения.

На фоновом участке в корнях регистрируется присутствие только ^{137}Cs и ^{90}Sr из глобальных выпадений. Ниже точки сброса распределение радионуклидов в крупных корнях имеет тот же характер, что и в ризосфере и почве (рис. 5, а). Максимальные удельные активности изотопов наблюдаются вблизи сброса (М-1, коса Атамановская), при удалении активности падают, особенно для радиоцезия, и затем вновь возрастают в Балчуговской протоке (М-4). Значительные удельные активности ^{60}Co в корнях осоки на о-ве Березовом, скорее всего, объясняются налипанием на корни «активной» частицы, так как в 2008 году в этой точке были обнаружены монокобальтовые «горячие» частицы (Чугуевский и др., 2010).

Особое внимание обращает на себя содержание радионуклидов в мелких корнях, присутствующих во всех пробах почвы и ризосферы (рис. 5, б). В случае радиоцезия, в них содержится до 8% всего радиоцезия пробы. Наиболее заметно присутствие в мелких корнях ^{152}Eu . Подобное преобладание стабильного Eu в мелких корнях и корневых волосках растений различных видов отмечено и другими исследователями (Kelley et al., 1999; Fellows et al., 2003), которые указывали, что наибольшие концентрации Eu наблюдаются в наименее дифференцированных тканях корневого волоска. Примечательно, что в

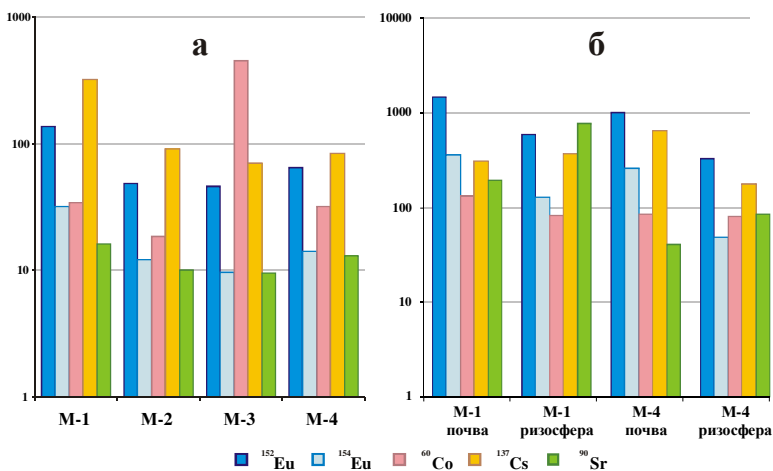


Рис. 5. Удельные активности техногенных радионуклидов в крупных (а) и мелких (б) корнях, Бк/кг сухого веса.

М-1 – коса Атамановская, М-2 – о-в Атамановский, М-3 – о-в Березовый, М-4 – Балчуговская протока.

верхних частях растений изотопов Eu не обнаружено. Заметная разница в накоплении техногенных радионуклидов мелкими корнями, обнаруженных в почве в ризосфере, может объясняться разницей pH субстрата. В ризосфере и косы Атамановской, и Балчуговской протоки условия значительно более кислые (pH 5,3–5,4), чем в почве (pH 7,2–7,5). Это влечет за собой изменение в сорбционных механизмах, а, следовательно, изменение содержаний доступных растениям форм (Beneš et al., 2003; Wang et al., 2011).

Исследования надземных частей изученных растений показали, что в них также присутствуют только ^{137}Cs и ^{90}Sr . Распределение для обоих радионуклидов при удалении от источника загрязнения совпадает. На косе Атамановской наблюдаются наибольшее их количества и максимальное превышение над фоном. С удалением от точки сброса удельные активности снижаются. В Балчуговской протоке, несмотря на повышение удельных активностей во всех других компонентах системы «почва – ризосфера – растение», рост содержаний ^{137}Cs и ^{90}Sr в надземных частях растений не происходит. Для ^{137}Cs такая ситуация объясняется тем, что содержание органического вещества в аллювиальной почве и ризосфере Балчуговской протоки недостаточно высоко (0,59 и 2,99%), чтобы обеспечить повышенный переход радиоцезия в растения, что обычно имеет место при гораздо более

высоких содержаниях органического вещества в почве (Бондарь и др., 2003). Динамика уменьшения удельных активностей имеет практически одинаковый характер.

Доля активности ^{137}Cs в I растительной фракции (вакуолярный сок и сок проводящих пучков надземной части макрофитов) снижается при удалении от источника загрязнения, и в точке М-1 составляет 22%, в точке М-2 — 10% (рис. 6). В застойных условиях точки М-4, где радиоцезий концентрируется в корнях растений, доля активности первой растительной фракции равна 5%. Доля, приходящаяся на II растительную фракцию (водорастворимые соединения протоплазмы) во всех точках остается равной 5%. Распределения долей общей активности ^{90}Sr в верхних частях растений в I и II растительных фракциях с удалением от точки сброса имеют схожую динамику. Почти во всех точках доля активности во II растительной фракции выше, чем в I растительной фракции. Изменение данных долей при удалении от точки сброса ГХК носит неравномерный характер. Показано, что ^{90}Sr концентрируется в водорастворимых соединениях протоплазмы и его активности во II растительной фракции слабо зависят от удельных активностей в субстрате.

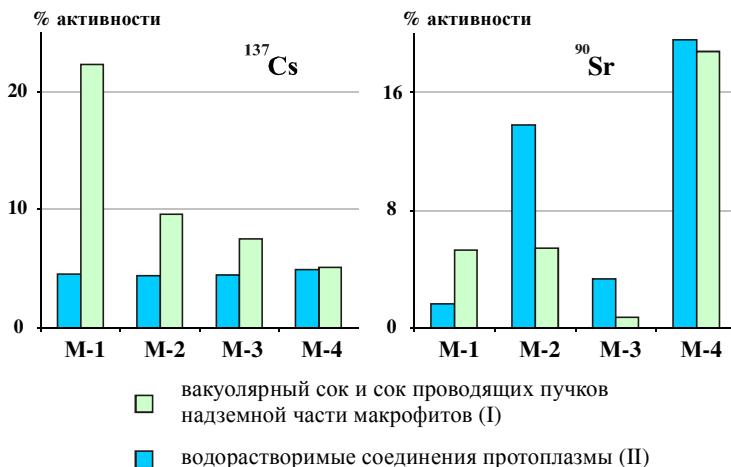


Рис. 6. Изменение процента активности ^{137}Cs и ^{90}Sr при удалении от источника загрязнения.

М-1 – коса Атамановская; М-2 – о-в Атамановский, М-3 – о-в Березовый, М-4 – Балчуговская протока.

По массовым процентам и долям активности были рассчитаны коэффициенты концентрации для I и III растительной фракции (целлюлоза и органеллы, ассоциированные с клеточной стенкой растения) по формуле $K_k = (\%_{\text{активности}}) / (\%_{\text{массы}})$, где $\%_{\text{активности}}$ — активность в I или III растительных фракциях по отношению к общей активности растения; $\%_{\text{массы}}$ — масса I или III растительных фракций по отношению к общей сырой массе растения (рис. 6). Если данный коэффициент равен 1, это означает, что удельная активность отдельной части растения равна удельной активности всего растения. Не рассматривалась II растительная фракция, так как для нее не были известны массы.

Для ^{137}Cs изменение данных коэффициентов с удалением от источника загрязнения носит обратный характер. Если коэффициент для I растительной фракции с увеличением расстояния уменьшается с 0,7 до 0,2, то для III растительной фракции коэффициент увеличивается с 1,1 до 1,3 (рис. 7). Для ^{90}Sr изменение коэффициентов не подчиняется строгой закономерности. В III растительной фракции значения коэффициента концентрации практически равны на косе Атамановской и в Балчуговской протоке, хотя, как отмечалось ранее, гидрологические и

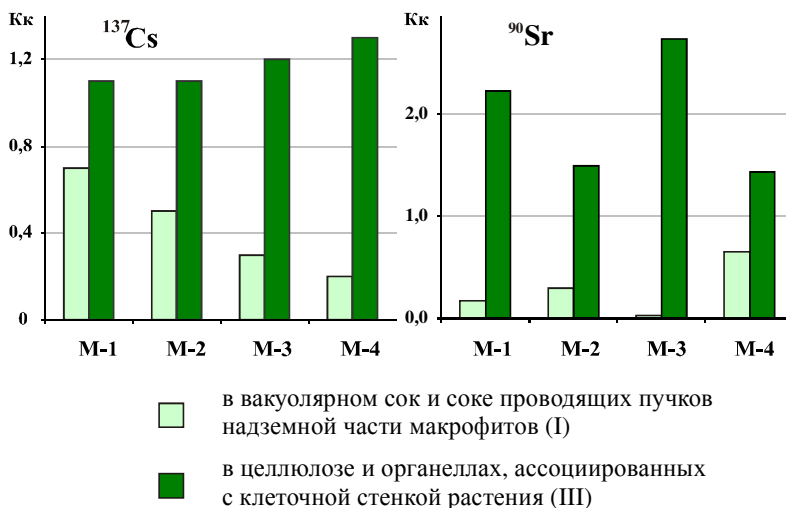


Рис. 7. Изменение коэффициентов концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr при удалении от источника загрязнения.
 М-1 – коса Атамановская; М-2 – о-в Атамановский, М-3 – о-в Березовый, М-4 – Балчуговская протока.

почвенные условия в этих точках весьма отличаются. В целом, как и для ^{137}Cs , коэффициент концентрации в III растительной фракции выше, чем в I, где коэффициент концентрации меньше единицы, и, следовательно, удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в I растительной фракции ниже, чем таковые для целого растения.

По полученным данным был оценен переход ^{90}Sr и ^{137}Cs в верхние части растения в системе «почва – растение». При расчетах перехода ^{90}Sr и ^{137}Cs из почвы в верхние части растения допускалось, что в растения поступают радионуклиды только из исследованного корнеобитаемого слоя почвы мощностью 40 см. При загрязнении только от глобальных выпадений (М-0, п. Шивера) процент активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в верхних частях растений составляет соответственно 4 и 10 % от общего содержания в системе «почва – растение» (рис. 8). При увеличении содержаний радионуклидов в почве процент активности в верхних частях растений достигает 23-24% для ^{90}Sr и 6-11% для ^{137}Cs

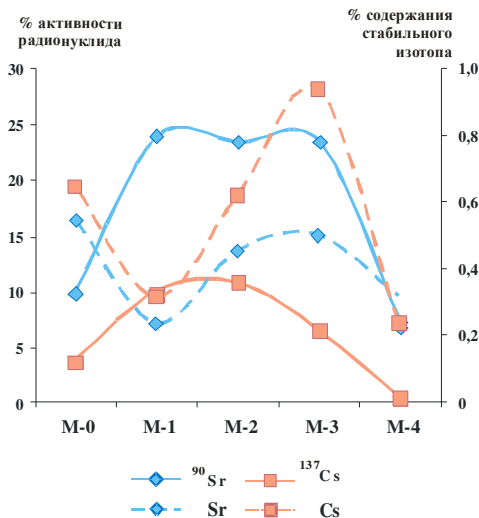


Рис. 8. Процент активности ^{137}Cs и ^{90}Sr и процент содержания стабильных изотопов Cs и Sr в верхних частях растений относительно системы «почва – растение». М-0 – фон, п. Шивера; М-1 – коса Атамановская; М-2 – о-в Атамановский, М-3 – о-в Березовый, М-4 – Балчуговская протока.

(М-1, М-2 и М-3). Затем, несмотря на рост содержаний ^{137}Cs в почве и ризосфере, в точке М-4 доля активности в верхних частях растений падает до 0,4%. Хотя удельные активности ^{90}Sr в почве и верхних частях растений в т. М-4 значительно меньше удельных активностей ^{137}Cs , процент активности радиостронция в этой точке заметно выше и достигает 7%.

Поступление ^{90}Sr в верхние части растений происходит гораздо активнее, чем поступление ^{137}Cs , что связано, судя по всему, с тем, что ^{90}Sr находится в субстрате в основном в растворенном виде. Поведение изотопов заметно отличается от поведения

стабильных Cs и Sr, и как уже упоминалось ранее, причиной этого является различие в их источниках поступления в систему (рис. 9).

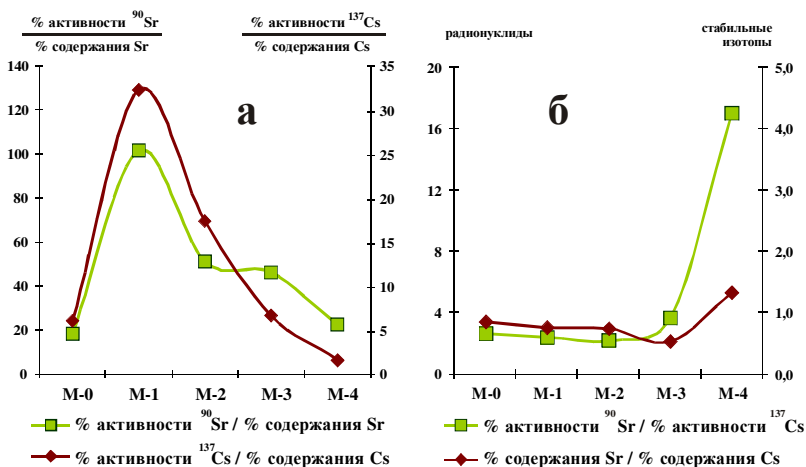


Рис. 9. Отношения радионуклидов и стабильных изотопов в верхних частях растений в системе «почва – растение»: а) отношение процента активности радионуклида к процентному содержанию стабильного изотопа; б) отношения процентов активности радионуклидов и процентов содержаний стабильных изотопов.

М-0 – фон, п. Шивера; М-1 – коса Атамановская; М-2 – о-в Атамановский, М-3 – о-в Березовый, М-4 – Балчуговская протока.

Отношения процента активности радионуклидов к проценту содержания стабильного изотопа в верхних частях растений в системе «почва – растение» имеют практически одинаковую тенденцию изменения с увеличением расстояния от источника загрязнения.

Отношение процента активности ^{90}Sr к проценту активности ^{137}Cs примерно одинаково для фонового участка и для косы Атамановской и острова Атамановского (2,2–2,6) (рис. 9). На острове Березовом соотношение заметно увеличивается (3,6) и достигает максимума в Балчуговской протоке (17,0). Изменения этого отношения для процентов содержания стабильных Sr и Cs имеют в целом тот же характер, что и для радионуклидов.

ВЫВОДЫ

В ближней зоне влияния ГХК распределение удельных активностей техногенных радионуклидов в почве и ризосфере крайне неравномерно. В застойных условиях отмечена заметная разница в содержании ^{137}Cs , изотопов Eu и в определенной степени ^{60}Co в почве и ризосфере, и в среднем в ризосфере их содержания ниже, чем в почве. В проточных условиях различие между удельными активностями отмечено для ^{90}Sr .

Наибольшие удельные активности техногенных радионуклидов наблюдаются как в тонких гранулометрических фракциях (сорбирование на глинистых минералах), так и в грубых гранулометрических фракциях (сорбирование гумусовым веществом и частичками неразложившейся органики). Во фракции, содержащей легко мигрирующие с водным потоком коллоиды и взвеси, вынос радионуклидов достигает 9%.

Накопление всех изученных радионуклидов в корневой системе растений увеличивается при уменьшении размеров корней. В верхних частях растений присутствует лишь ^{137}Cs и ^{90}Sr . Накопление ^{137}Cs происходит в первую очередь в вакуолярном соке и соке проводящих пучков, а ^{90}Sr — в водорастворимых соединениях протоплазмы, т.е. в компонентах, которые легче всего вовлекаются в повторную миграцию, и зависит как от содержаний изотопов в субстрате, так и от режима обводнения на участке русла, на которых произрастают растения. Эти же факторы влияют и на степень перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в верхние части растений из почвы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах:

Кропачева М.Ю., Чугуевский А.В., Мельгунов М.С., Богуш А.А. Поведение ^{137}Cs в системе почва – ризосфера – растение на примере поймы реки Енисей // Сибирский экологический журнал. – 2011. – №5. – С. 719–727. (из перечня ВАК)

Kropatcheva M., Chuguevskiy A., Melgunov M. Distribution of ^{152}Eu and ^{154}Eu in the ‘alluvial soil – rhizosphere – plant roots’ system // Journal of Environmental Radioactivity. – 2012. – V. 106. – P. 58–64. (из перечня ВАК).

Кропачева М.Ю., Чугуевский А.В., Макарова И.В., Сухоруков Ф.В. Распределение ^{90}Sr в почве, ризосфере и растениях ближней зоны влияния Красноярского ГХК // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2008. – Т. 8. – № 4. – С. 146–151.

Кропачева М.Ю., Чугуевский А.В., Мельгунов М.С., Лазарева Е.В. ^{137}Cs в системе «почва – ризосфера – растение» // Вестник КазНУ. – 2007. – Т. 49. – № 5. – С. 82–83.

Тезисы докладов международных конференций:

Кропачева М.Ю., Мельгунов М.С., Чугуевский А.В., Сухоруков Ф.В. Cs-137 в береговых макрофитах (*Carex L.*) ближней зоны влияния Красноярского ГХК // Международная конференция "Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий", Москва, 2005. – С. 136–140.

Кропачева М.Ю., Мельгунов М.С., Чугуевский А.В., Сухоруков Ф.В., Лазарева Е.В. Техногенные радионуклиды и тяжелые металлы в почве, ризосфере и корнях макрофитов ближней зоны влияния Красноярского ГХК // IV Международная научно-практическая конференция "Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде", Семипалатинск, 2006. – Т.2. – С. 209–215.

Кропачева М.Ю., Чугуевский А.В., Макарова И.В., Сухоруков Ф.В. Распределение ^{90}Sr в почве, ризосфере и растениях ближней зоны влияния Красноярского ГХК // V Международная научно-практическая конференция "Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде", Семипалатинск, Казахстан, 2008. – Т.2. – С. 235–241.

Кропачева М.Ю., Чугуевский А.В., Макарова И.В., Мельгунов М.С. Радиоцезий и радиостронций в системе «аллювиальная почва – ризосфера прибрежно-водных растений» // Материалы III Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», Томск, 2009. – С. 293–295.