

© В.Г. ЛИННИК, В.М. ШКИНЕВ, И.А. РОЩИНА,
А.П. БОРИСОВ, Т.В. ДАНИЛОВА

*linnik_53@mail.ru, vshkinev@mail.ru, roschina@geokhi.ru, aborisov@geokhi.ru,
danilova_tatiana@mail.ru*

УДК 631.445.2:631.414:543.3:535.8

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ПОЧВЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦАХ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ
В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЬСКОЙ АЭС***

АННОТАЦИЯ. Приведены данные о распределении ^{137}Cs и химических элементов в иллювиально-железистой почве и почвенных микрочастицах в районе влияния Кольской атомной станции. Данные по содержанию ^{137}Cs получены гамма-спектрометрическим методом с точностью не хуже 0,1 Бк/пробу. Содержание химических элементов в трех гранулометрических фракциях размером 0,14-0,071, 0,071-0,04 и <0,04 мм получены рентгенфлуоресцентным методом, который обеспечивает возможность проведения количественного определения концентраций элементов в диапазоне 10⁻⁴%-100%.

SUMMARY. The distribution of ^{137}Cs and chemical elements in the illuvial-ferrous soil and the soil microparticles in Kola NPP affected zone was investigated. The data of ^{137}Cs are obtained by gamma spectrometric method with the accuracy of about 0,1 to Bq/sample. The content of chemical elements in three granulometric fractions with dimensions of 0,14-0,071, 0,071-0,04 and <0,04 mm are obtained by the X-ray fluorescent method, which provides the possibility of the quantitative detection of elements in the range 10⁻⁴%-100%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Радионуклиды, почва, гранулометрический и геохимический анализ, микрочастицы, Кольская АЭС.

KEY WORDS. Radionuclides, soil, granulometric and geochemical analysis, microparticles, Kola NPP.

Введение. Техногенные радионуклиды и химические элементы, относимые к группе тяжелых металлов, считаются наиболее опасными веществами, загрязняющими биосферу. Для прогноза загрязнения окружающей среды этими веществами требуется детальное знание о миграционных механизмах и формах нахождения в природных компонентах, регулирующих их биогеохимическое поведение [1].

Миграционная способность элементов в природных и антропогенных ландшафтах определяется тремя группами факторов [2]: 1) биоклиматическими условиями, характеризующими интенсивность биогеохимического круговорота; 2) физико-химическими условиями миграции, обусловленными климатическим потенциалом и сочетанием окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий, что в целом определяется как классы водной миграции

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект №11-05-01156-а).

элементов; 3) интенсивностью механической миграции под действием гравитационных сил (эрозионные процессы).

Поставленные в данной работе задачи относятся к фундаментальной проблеме биогеохимии — анализу техногенных аномалий в результате антропогенного воздействия (на примере выпадения тяжелых металлов (ТМ) и радионуклидов), определению роли нано- и микрочастиц в трансформации техногенных потоков и формировании биогеохимических барьеров.

В настоящее время в недостаточной степени исследован фракционный состав миграционной фазы, который отражает всю специфику ландшафтно-геохимических условий в автоморфных, гидроморфных и аквальных ландшафтах. Поэтому исследование роли почвенных нано- и микрочастиц в геохимической миграции в различных ландшафтных условиях представляет актуальную задачу [3], [4].

Информация о гранулометрическом составе частиц размером менее 0,001 мм является достаточно важной с санитарно-гигиенических позиций, поскольку такие частицы обладают высокой проникающей способностью и могут проникать в различные ткани человека [5].

Принято считать, что гранулометрический состав характеризует распределение почвенных частиц по размерам, все элементы которых находятся в химической взаимосвязи [6].

Сорбция радионуклидов в почвах в значительной степени зависит от гранулометрического состава почв. Емкость поглощения почвы (ППК) зависит от содержания высокодисперсных частиц: микро- и наночастиц. Чем меньше размер почвенных частиц, тем выше способность почвы сорбировать химические элементы, как техногенные радионуклиды, так и тяжелые металлы. Почвы, содержащие большее количество высокодисперсных частиц (размером менее 0,001 мм), характеризуются максимальной емкостью поглощения.

Наибольшей поглотительной способностью по отношению к микроколичествам радионуклидов, как и к макроэлементам, обладают минералы монтмориллонитовой группы и группы гидрослюд. Минералы каолинитовой группы и группы слюд характеризуются меньшей сорбционной способностью по отношению к макро- и микроколичествам катионов, находящихся в почве.

Миграция радионуклидов и тяжелых металлов происходит различными путями. Радионуклиды в водорастворимой и обменной форме передвигаются диффузионным путем. Эти же фракции участвуют в перемещении химических элементов с помощью корневых систем растений. Все формы радионуклидов в почвах, включая необменные и прочно фиксированные фракции, способны переноситься с коллоидными частицами.

Объекты и методы исследования

Район исследования. В настоящей работе проводится исследование распределения химических элементов и ^{137}Cs в гранулометрических фракциях почвы с целью выявления роли почвенных микрочастиц в концентрировании элементов. Почвообразующие породы района исследования представлены моренными грубозернистыми завалуненными песками, вершины гор сложены элювием коренных пород песчаного гранулометрического состава с большим количеством обломочного материала [7]. Исследования были проведены в районе влияния Кольской АЭС на удалении до 5 км. Ландшафты данной террито-

рии относятся к подзоне северной тайги с доминированием в I ярусе ели с сосной высотой 20-25 м, во II ярусе березы с преобладанием в наземном покрове зеленых мхов, черники и багульника.

Преобладающие почвы на исследованной территории по современной классификации относятся к иллювиально-железистым подзолам, сложенным с поверхности маломощным (до 5-7 см) грубогумусным перегнойным горизонтом с четко выраженным подзолистым (элювиальным) горизонтом (на глубине 5(7)-10(12) см), переходящим в иллювиальный горизонт. Мощность почвенного профиля на склоновых участках не превышает 50-60 см, ниже залегает элювий коренных пород.

Методика гранулометрического анализа. Под микрочастицами понимаются не только коллоидные вещества, но также и мелкодисперсные почвенные минералы. Для исследования распределения химических элементов в почвенных частицах (с размером менее 140 мкм) воздушно сухой образец почвы разделялся на фракции с использованием набора сертифицированных лабораторных сит С20/50 с виброприводом ВП-30 производства фирмы Вибротехник (г. Санкт-Петербург) [8].

Для настоящего исследования были выбраны следующие размеры сит: 140; 71; 40 мкм. Для оптимизации процесса сухого ситования выбирали время для получения постоянного веса фракций, которое составило 8-12 часов. Навески проб были менее 200 г., согласно паспорту сит. После ситования получены гранулометрические фракции размером: более 140 мкм; 140-71; 71-40 и менее 40 мкм. Химические и гамма спектрометрические измерения проводились для трех фракций размером 140-71; 71-40 и менее 40 мкм.

Для получения более точной информации о размерном распределении частиц в самой мелкой фракции (менее 40 мкм) использовали лазерный анализатора микрочастиц «ЛАСКА-1К» производства фирмы Люмекс (г. Санкт-Петербург). Для калибровки прибора использовали в качестве стандартного образца размера частиц образец SRM-1003 Glass Spheres с размером 20-50 мкм. Расчет функции распределения частиц по размерам осуществляли путем математической обработки результатов радиального распределения интенсивности света, рассеянного микрочастицами анализируемых образцов, находящихся в виде суспензий.

Лазерно-дифрактометрический метод определения функции размерного распределения частиц в отличие от седиментометрических методов, основанных на большом количестве приближений, позволяет получить представление об истинных линейных размерах частиц [6], [9], [10]. Кроме того, данный метод обладает рядом важных преимуществ перед «классическими» методами измерения, такими как рассев, седиментация или анализ по изображению: краткое время проведения анализа, хорошую воспроизводимость и точность результатов, простую калибровку, большой диапазон измерений [11].

Методика рентгенофлуоресцентного анализа. Определение химического состава проб выполнено рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре AXIOS Advanced (фирмы "PANalytical B.V.", Holland), который обеспечивает возможность проведения количественного определения концентраций широкого круга элементов от кислорода до урана в диапазоне 10⁻⁴%-100%. Данный метод широко используется для определения концентраций тяжелых металлов в почвах и растениях при биогеохимических исследованиях [12], [13], [14].

В качестве источника, возбуждающего характеристическое излучение атомов пробы, используется рентгеновская трубка с родиевым анодом мощностью 3 kW. Измерения проводятся в вакууме. Для регистрации характеристического излучения спектрометр снабжен сканирующим каналом с кристаллами-анализаторами (PE-002-C, PX-1, Ge III-C, LIF-200, LIF-220), которые управляются гониометром, и детектирующим устройством, состоящим из проточного и запаянного пропорциональных счетчиков и сцинтилляционного кристалла с фотоумножителем, собранными в геометрии «на пролет». Спектрометр снабжен программным обеспечением, позволяющим производить измерения в сканирующем режиме и в режиме набора импульсов.

Пробы для анализа готовились из хорошо растертого (200 меш) исходного материала путем прессования его в таблетки диаметром 20мм с добавлением в качестве связующего вещества полистирола (С8Н8) в соотношении 5:1. Для расчета концентраций элементов, входящих в состав пробы, применена программа количественного анализа, при создании которой для калибровки спектрометра было использовано более 30 стандартных образцов самого разнообразного состава. В программе используются уравнения множественной регрессии, учитывающие взаимные влияния элементов, матричные эффекты и возможные наложения линий.

Точность использованной методики определения концентраций удовлетворяет требованиям, предъявляемым к анализам III категории (анализ массовых рядовых проб) в аналитической службе МПР РФ согласно ОСТ 41-08-205-04.

Результаты и обсуждение

Гранулометрический анализ почвенных частиц. Результаты гранулометрического анализа иллювиально-железистой почвы представлены на рис. 1. Рассматривались три почвенных горизонта: 1 — глубина 5-8 см (верхняя часть A_2); 2 — глубина 8-11 см (нижняя часть A_2); 3- глубина 20-25 см (горизонт В). В горизонте A_2 в пробах 1 и 2 наблюдается практически одинаковое распределение почвенных частиц по трем выделенным фракциям. Доля фракции менее 40 мкм в слое 5-8 см составляет 16,1%, в слое 8-11 см — 18,1%. Доля крупной фракции 71-140 мкм в указанных слоях равна соответственно 53% и 48,9%.



Рис. 1. Распределение гранулометрических почвенных фракций по глубине иллювиально-железистой почвы

В почвенном горизонте В (20-25 см) доля самой мелкой фракции <40 мкм снижается до 13,4% при этом соответственно доля крупной фракции размером 71-140 мкм возрастает до 59,1%.

Для получения более детального распределения по размерам фракции менее 40 мкм использовался лазерно-дифрактометрический метод. Пример гистограммы (4-х кратная повторность) распределения почвенных частиц в фракции <40 мкм в слое 5-8 см представлен на рис. 2.

Отмечено, что воспроизводимость результатов гранулометрического состава достаточно высокая. Медианное значение размера анализируемых частиц (D50) равно 6,87 мкм, т.е. анализируемые частицы этой фракции относятся к микро-частицам. Отметим, что распределение почвенных частиц в данной фракции хорошо согласуется с логнормальным законом распределения.

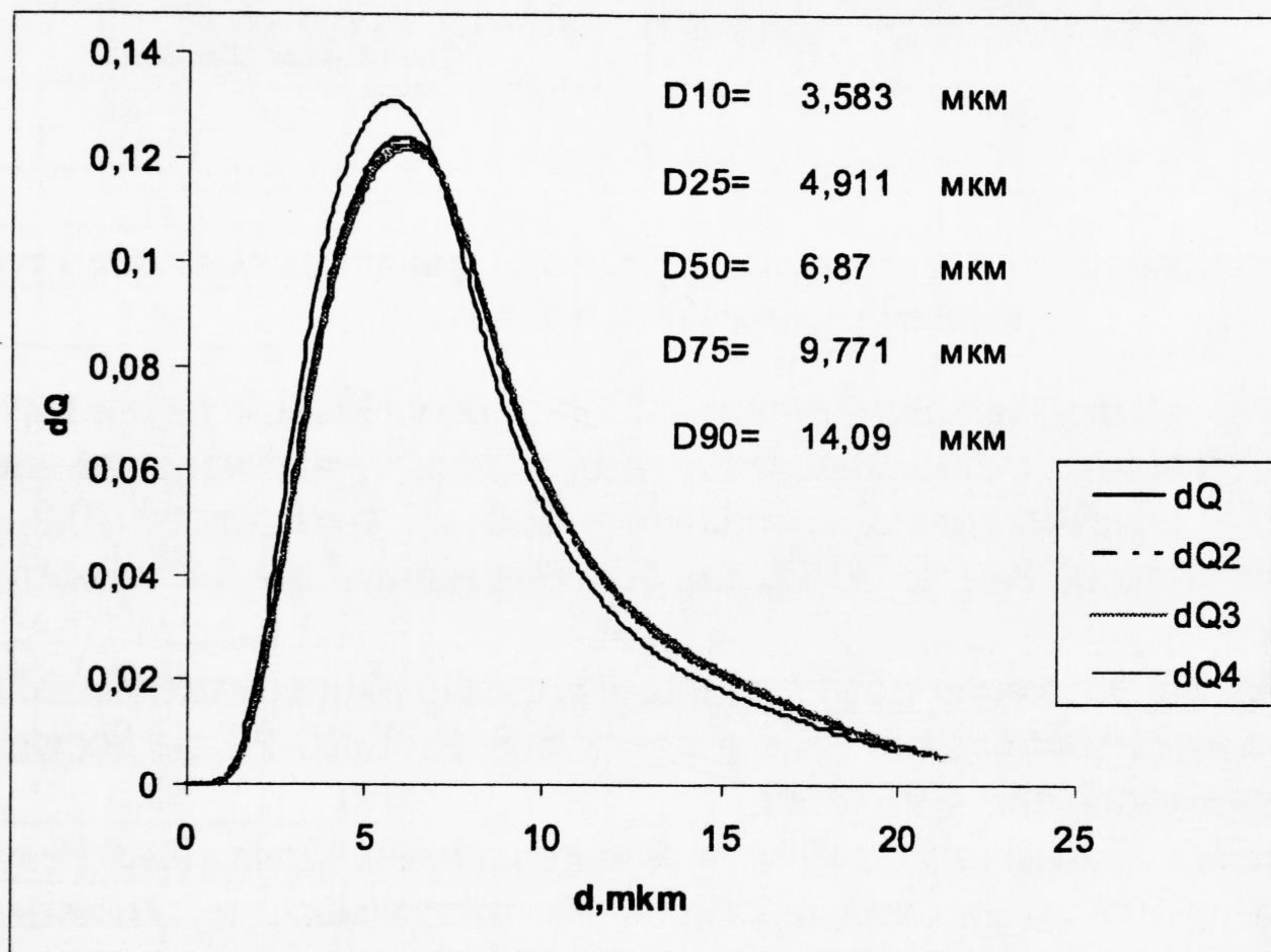


Рис.2. Гистограмма распределения почвенной фракции <40 мкм в слое 5-8 см, полученная лазерно-дифрактометрическим методом

По результатам лазерно-дифрактометрического анализа было получено, что логнормальное распределение характерно для всех фракций размером <40 мкм во всех трех анализируемых почвенных слоях. Логнормальный закон распределения для обломков горных пород впервые теоретически был предсказан А.Н. Коломогоровым еще в 1949 году.

Распределение ^{137}Cs в почвенных фракциях. Породы и почвы представляют собой сложные многокомпонентные системы, которые различаются по сродству к радионуклидам и тяжелым металлам. Ранее было предложено использовать в качестве конкурирующих катионов элементы-аналоги, максимально близкие по сорбционным свойствам [15]. Для ^{137}Cs элементом-аналогом является калий или аммоний. Поэтому предполагают корреляцию между содержанием калия и сорбцией ^{137}Cs . Предметом настоящего исследования является анализ распределения основных химических элементов и ^{137}Cs по гранулометрическим фракциям в генетических почвенных горизонтах.

Результаты анализа распределения ^{137}Cs по гранулометрическим фракциям в трех образцах иллювиально-железистой почвы, расположенных на глубине 5-8, 8-11 и 20-25 см, представлены на рис. 3.

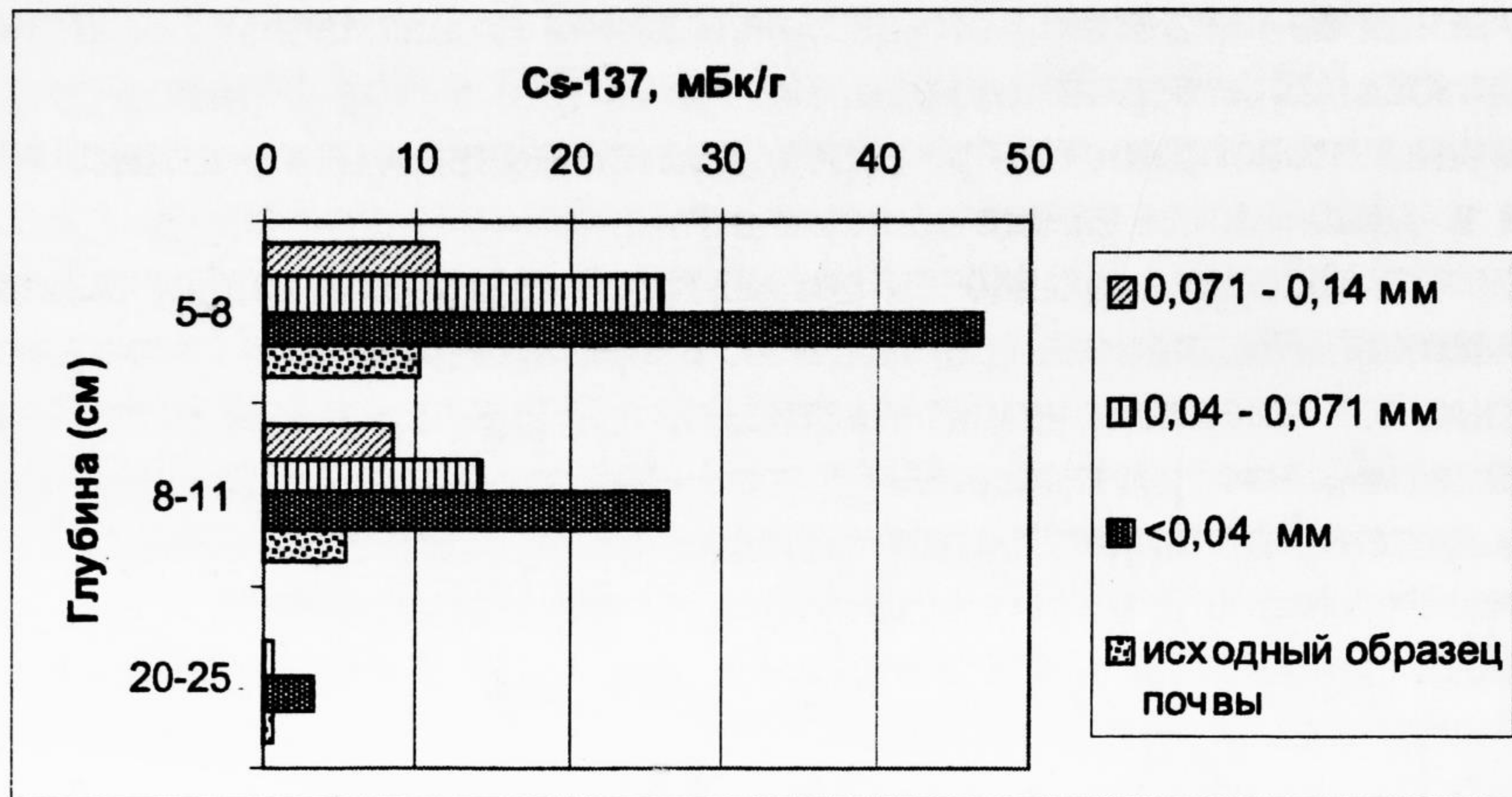


Рис. 3. Распределение ^{137}Cs по гранулометрическим фракциям почвы по глубине иллювиально-железистой почвы

Наблюдается общая закономерность снижения удельной активности ^{137}Cs с глубиной залегания почвы: максимальные значения загрязнения изотопом цезия исходного образца почвы в горизонте 5-8 см составляют 10,2 мБк/г, снижаясь в горизонтах 8-11 и 20-25 см соответственно до 5,3 мБк/г и 0,65 мБк/г.

Размер фракции определяет содержание ^{137}Cs : в фракции размером $<0,004\text{ мм}$ коэффициент концентрирования ^{137}Cs в слоях 5-8, 8-11, 20-25 см достигает соответственно значений 4,6, 4,96, 4,92.

Распределение химических элементов в почвенных фракциях. Результаты рентген-флуоресцентного анализа показали, что распределение основных породообразующих химических элементов Si, Al, Ca, P в пределах достоверной ошибки практически одинаково по гранулометрическим фракциям (табл. 1, 2, 3).

Таблица 1

**Валовой химический состав гранулометрических фракций (мм),
% от сухой навески (горизонт A_2 , слой 5-8 см)**

	0,14- 0,071	0,071- 0,040	<0,040		0,14- 0,071	0,071- 0,040	<0,040
O	45,72	47,78	46,4				
Na	2,93	2,97	3,07	Na ₂ O	3,83	4,01	4,09
Mg	0,5	0,48	0,23	MgO	0,79	0,8	0,37
Al	6,14	6,68	7,06	Al ₂ O ₃	11,14	12,66	13,12
Si	37	33,63	34,52	SiO ₂	75,23	72,24	72,36
P	0,021	0,021	0,031	P ₂ O ₅	0,045	0,049	0,068
S	0,03	0,04	0,03	S	0,03	0,041	0,03
K	0,38	1,05	1,21	K ₂ O	0,98	1,27	1,41
Ca	2,35	2,19	1,7	CaO	3,05	3,09	2,31
Ti	0,26	0,345	0,411	TiO ₂	0,4	0,585	0,665

Окончание табл. 1

Cr	0,018	<0,01	<0,01	Cr ₂ O ₃	0,025	<0,01	<0,01
Mn	0,044	0,039	0,023	MnO	0,052	0,051	0,029
Fe	1,74	1,5	0,93	FeO	2,06	1,94	1,16
Zn	0,01	<0,005	0,005	Zn	0,009	0,005	0,005
Rb	0,004	0,004	0,004	Rb	0,003	0,004	0,004
Sr	0,024	0,025	0,024	Sr	0,022	0,025	0,024
Zr	0,024	0,042	0,042	Zr	0,022	0,042	0,04
Ba	0,012	0,011	0,01	Ba	0,012	0,011	0,01
LOI	2,33	3,18	4,28	LOI	2,33	3,18	4,28

Таблица 2

Валовой химический состав гранулометрических фракций (мм),
% от сухой навески (горизонт А₂, слой 8-11 см).

	0,14- 0,071	0,071- 0,040	<0,040		0,14- 0,071	0,071- 0,040	<0,040
	%	%	%		%	%	%
O	44,71	49,66	46,55				
Na	2,98	2,81	2,84	Na ₂ O	3,87	3,92	3,81
Mg	0,69	0,62	0,45	MgO	1,1	1,06	0,74
Al	6,43	6,5	6,81	Al ₂ O ₃	11,55	12,83	12,79
Si	36,16	30,66	33,13	SiO ₂	72,64	69,2	70,29
P	0,22	0,077	0,087	P ₂ O ₅	0,46	0,19	0,2
S	0,03	0,05	0,03	S	0,03	0,058	0,03
K	0,91	1,08	1,27	K ₂ O	1	1,4	1,51
Ca	3,01	2,61	2,15	CaO	3,83	3,94	2,97
Ti	0,43	0,48	0,57	TiO ₂	0,65	0,86	0,94
Cr	0,021	0,028	0,018	Cr ₂ O ₃	0,028	0,044	0,026
Mn	0,035	0,048	0,046	MnO	0,041	0,067	0,058
Fe	2,78	2,57	2,24	FeO	3,22	3,61	2,85
Ni	0,01	0,006	0,007	Ni	0,009	0,007	0,007
Zn	0,009	0,009	0,01	Zn	0,008	0,01	0,01
Rb	<0,004	0,004	0,006	Rb	<0,004	0,005	0,006
Sr	0,026	0,025	0,026	Sr	0,023	0,027	0,025
Zr	0,029	0,037	0,042	Zr	0,026	0,04	0,042
Ba	0,013	0,013	0,014	Ba	0,012	0,014	0,014
LOI	1,51	2,71	3,73	LOI	1,51	2,71	3,73

Таблица 3

Валовой химический состав гранулометрических фракций (мм),
% от сухой навески (горизонт В, слой 20-25 см).

	0,14- 0,071	0,071- 0,040	<0,040		0,14- 0,071	0,071- 0,040	<0,040
	%	%	%		%	%	%
O	42,55	43,98	43,25				
Na	1,99	0,98	1,15	Na ₂ O	2,64	1,39	1,67
Mg	0,78	0,56	0,63	MgO	1,28	0,99	1,13

Окончание табл. 3

Al	10,68	12,45	11,62	Al ₂ O ₃	19,81	25,28	23,87
Si	27,66	19,35	18,52	SiO ₂	57,77	45,51	44,23
P	0,13	0,18	0,158	P ₂ O ₅	0,29	0,464	0,416
S	0,22	0,36	0,28	S	0,22	0,4	0,32
K	0,8	0,61	0,54	K ₂ O	0,93	0,83	0,75
Ca	2,4	2,08	1,93	CaO	3,24	3,3	3,13
Ti	0,26	0,28	0,27	TiO ₂	0,41	0,53	0,52
Cr	0,01	0,01	0,017	Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,03
Mn	0,04	0,029	0,032	MnO	0,049	0,042	0,049
Fe	3,62	4,36	4,4	FeO	4,49	6,46	6,67
Zn	0,008	0,011	0,009	Zn	0,008	0,012	0,01
Rb	<0,004	0,005	<0,004	Rb	<0,004	0,005	<0,004
Sr	0,024	0,018	0,017	Sr	0,023	0,021	0,021
Zr	0,018	0,024	0,012	Zr	0,017	0,028	0,015
Ba	0,016	0,016	0,01	Ba	0,015	0,018	0,012
LOI	8,82	14,7	17,15	LOI	8,82	14,7	17,15

Содержание Si, Al и Fe в почве соответствует зональным почвенным закономерностям. Максимум SiO₂ наблюдается в подзолистом горизонте A₂. В слое 5-8 см в разных фракциях содержится примерно одинаковое его количество (от 72 до 75%), в слое 8-11 см количество SiO₂ незначительно снижается по выделенным фракциям (от 69 до 72%). По имеющимся данным [7], содержание SiO₂ в иллювиально-железистых подзолах северной тайги составляет 73,2±1,1, что полностью соответствует полученным данным для слоя 5-8 см. В горизонте В (слой 20-25 см) содержание SiO₂ снижается до значений 44,2-57,8%, это ниже, чем приведено в обзоре В.Н. Переверзева [7], где данное содержание SiO₂ в слое BF оценивается в 66,6±1,5%.

Полученные нами данные показывают, что содержание Al₂O₃ в подзолистом горизонте в двух слоях 5-8 см и 8-11 см практически одинаково, наблюдается тенденция незначительного повышения содержания Al₂O₃ в тонкой фракции слоя 5-8 см (от 11,1% до 13,1%). В работе [7] в подзолистом горизонте этого типа почв приведены близкие значения содержания Al₂O₃ (11,4±0,4%). В иллювиальном горизонте наблюдается существенное увеличение содержания Al₂O₃ (до значений 19,8-25,3%).

Содержание окислов железа незначительно возрастает в слое 8-11 см (2,85-3-23%) по сравнению с концентрацией железа в слое 5-8 см (1,16-2,06%), причем в тонкой фракции сравниваемых двух слоев подзолистого горизонта содержание железа снижается по сравнению с крупной фракцией. В горизонте вымывания (20-25 см) отмечается существенное увеличение Fe, причем в тонкой фракции наблюдается его концентрирование (до 6,67%).

Для данной почвы характерным является то, что содержание таких элементов как Ti, K, Zr возрастает с уменьшением размера частиц фракции по всей горизонтам.

Результаты анализа распределения тяжелых металлов, таких как Ni, Zn, Mn, Cr показали, что концентрирование как по глубине почвы, так и почвенным фракциям не наблюдается.

Выводы

1. Наблюдается общая закономерность снижения удельной активности ^{137}Cs с глубиной залегания почвы: от 10,2 мБк/г в слое 5-8 см до 0,65 мБк/г на глубине 20-25 см. В тонкой фракции происходит накопление ^{137}Cs : коэффициент концентрирования во фракции <0,04 мм равен 4,6-4,96.

2. Содержание Si, Al и Fe в иллювиально-железистой почве соответствует зональным почвенным закономерностям. Максимум SiO_2 наблюдается в подзолистом горизонте A_2 . Экспериментально определенный максимум Fe выявлен в иллювиальном горизонте, причем в тонкой фракции наблюдается концентрирование этого элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004. 648 с.
2. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000. 1999. 763 с.
3. Линник В.Г., Волосов А.Г., Коробова Е.М., Борисов А.П., Потапов В.Н., Сурков В.В., Боргуис А., Браун Дж., Алексеева Т.А. Распределение техногенных радионуклидов в аллювиальных отложениях и фракциях почв в ближней зоне Красноярского ГХК // Радиохимия. 2004. Т. 46. № 5. С. 471-476.
4. Коробова Е.М., Чижикова Н.П., Линник В.Г. Распределение ^{137}Cs по гранулометрическим фракциям и в профиле аллювиальных почв поймы р. Ипуть и ее притока р. Булдынка (Брянская область) // Почвоведение. 2007. № 4. С.404-417.
5. Методические рекомендации по выявлению наноматериалов, представляющих потенциальную опасность для здоровья человека. Методические рекомендации МР 1.2.2522-09. М., 2009. 35 с.
6. Федотов Г.Н., Шеин Е.В., Путляев В.И., Архангельская Т.А., Елисеев А.В., Милановский Е.Ю. Физико-химические основы различий седиментометрического и лазерно-дифракционного методов определения гранулометрического состава почв // Почвоведение. 2007. № 3. С. 310-317.
7. Переверзев В.Н. Зональные особенности альфагумусового почвообразования на моренных породах Кольского полуострова // Почвоведение. 2007. № 1. С. 5-11.
8. ООО ВИБРОТЕХНИК Формуляр ВТ-246.00.000 ФО ВИБРОПРИВОД ВП-30 СПб., 2006.
9. Stefano, C., di Ferro, V., Mirabile, S. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods // Biosystems Engineering 106 (2010), pp. 205-215.
10. Eshel, G., Levy, G.J., Mingelgrin, U., Singer, M.J. Critical Evaluation of the Use of Laser Diffraction for Particle-Size Distribution Analysis // Soil Sci. Soc. Am. J. 68:736-743 (2004).
11. Блохин А.Н., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Характеристика гранулометрического и агрегатного составов почв северной части ареала черневой тайги Кузнецкого Алатау с использованием параметров вероятностных функций // Вестник Томского государственного университета. 2010 № 2(10). Биология. С. 7-18.
12. Рощина И.А. Применение рентгенофлуоресцентного анализа в биогеохимических исследованиях // М-лы Второй российской школы «Геохимическая экология и биогеохимическое районирование биосферы». М.: ГЕОХИ РАН, 1999. С. 221-222.
13. Рощина И.А., Кузьмина Т.Г., Богданова И.В. Рентгено-спектральный флуоресцентный анализ проб растительного происхождения // Заводская лаборатория. 2010. т. 76. № 9. С. 22-26.
14. Хохлова И.В., Рощина И.А., Кузьмина Т.Г., Ромашова Т.В. Определение концентраций тяжелых металлов в почвах и растениях рентгенофлуоресцентным методом // Фундаментальные и инновационные аспекты биогеохимии: М-лы VII междунар. Биогеохимической школы. М.: ГЕОХИ РАН, 2011. С. 279-282.
15. Kopolev, A.V., Bulgakov, A.A., Popov, V.E., Bobovnikova, Ts.I. (1992) Behaviour of Long-Lived Chernobyl Radionuclides in a Soil-Water System // Analyst, 117. Pp. 1041-1047.