

Функциональная значимость петрографо-минералогического состава аллювиальных почв в распределении и миграции радионуклидов в речных бассейнах

© 2017. Н. П. Чижикова¹, Е. М. Коробова², В. Г. Линник^{2,3}, Е. С. Чечетко¹,

¹ Почвенный институт им. В.В. Докучаева,
119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., 7/2,

² Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН,
119991, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, 19,

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Россия, Москва, Ленинские горы, стр. 52,
e-mail: chizhikova38@mail.ru

Минералогический состав аллювиальных почв, обследованных в двух геохимически контрастных речных бассейнах, загрязнённых техногенным изотопом Cs-137, рассмотрен в разрезе региональной специфики функциональной значимости глинистых минералов. Отбор образцов почв проводили в 1999–2000 гг. из почвенных разрезов, заложенных на островной и береговой пойме бассейнов рек Ипути и её притока Булдынки (Брянская область) и правосторонней пойме реки Енисей (Красноярский край). Для оптимизации точек отбора проб почвы проводили полевую гамма-спектрометрическую съёмку с помощью оригинального гамма-спектрометра КОРАД по ландшафтными профилям, секущим пойму. Учитывая специфику формирования аллювиальных почв, отбор проб проводили с учётом как морфологического строения по генетическим горизонтам, так и по отдельным аллювиальным слоям в пределах одного горизонта. Минералогический анализ илистой фракции, выделенной по Горбунову (1971), проводили для образцов с максимальной активностью Cs-137. Определение активности радиоцезия в этой фракции выполняли в лабораторных условиях на гамма-спектрометре Canberra с детектором из высокоочищенного германия. Установлены особенности и закономерности распределения радиоцезия в связи с гранулометрическим составом почвенных горизонтов и минералогическим составом илистой фракции пойменных почв. Подтверждено, что фиксация радиоцезия в почвах определяется главным образом сорбционными процессами, которые контролируются гранулометрическим и минеральным составом фракций. Показано, что образцы аллювиальных почв бассейна р. Ипуть относятся к слюда-сметитовому экоразряду, в то время как пробы из бассейна р. Енисей – к хлорит-вермикулитовому, что соответствует особенностям почвообразующих пород двух разных регионов и может привести к различному характеру и скорости вторичных процессов перераспределения радиоцезия в системе почва-вода в отдалённый период после загрязнения, что следует учитывать при радиоэкологическом мониторинге геохимически различных территорий.

Ключевые слова: петрографо-минералогическая экология, экоразряды, аллювиальные почвы, радиоцезий, слюда-сметиты, хлорит-вермикулиты.

The functional significance of petrographic and mineralogical composition of alluvial soil in distribution and migration of radionuclides in river basins

N. P. Chizhikova¹, E. M. Korobova², V. G. Linnik^{2,3}, E. S. Chechetko¹,

¹ V. V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7/2 Pyzhevskii Pereulok, Moscow, Russia 119017,

² V. I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS,
19 Kocygina St., Moscow, Russia, 119991,

³ Moscow State University,
52 Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991,
e-mail: chizhikova38@mail.ru

The main goal of the study was to study the role of particle size, petrographic and mineralogical composition of alluvial soils in Cs-137 fixation and to reveal its regional specificity by comparison of samples collected in floodplains of two rivers draining geochemically different areas.

Soil samples were taken in the period of 1999–2000 from soil pits located in riverside and island floodplain areas of the river Iput' (Bryansk region) and Yenisey (Krasnoyarsk region) after field gamma-spectrometry along landscape cross-sections. Silt and clay mineralogy was performed for selected specimens with a considerably higher Cs-137 activity. Field gamma-spectrometry was performed by the CORAD device developed in Kurchatov Institute. Laboratory measurements of Cs-137 activity were carried out by a Canberra gamma-spectrometer with an HP-Ge detector. Soil fine fractions were separated using Gorbunov technique (1971), mineralogical composition of fines was determined with an X-ray diffractometer (Carl-Zeiss Jena).

A comparative analysis of radiocesium distribution in alluvial soils performed in the studied regions confirmed that its fixation in soils is defined mainly by sorption processes controlled by granulometric and mineral composition of soil fractions. It is shown that samples taken from the Iput' river basin belong to mica-smectite petro-mineralogical category while specimens collected in the Yenisey river basin appertain to chlorite-vermiculite category. The finding corresponds to difference in composition of the parent rocks and their weathering. This may lead to different character and rate of the long-term secondary processes of radiocesium redistribution in the soil-water system after the contamination event that should be accounted of in radioecological monitoring of geochemically different areas.

Keywords: petro-mineralogical ecology, petro-mineralogical categories, alluvial soils, radiocesium, mica-smectites, chlorite-vermiculites.

Введение

Техногенное загрязнение речных бассейнов – одна из актуальных проблем современного почвоведения. В работе «Экологическая петрография и минералогия почв» Б. П. Градусова, А. Г. Черныховского, Н. П. Чижиковой [4] представлено научное направление – петрографо-минералогическая экология. В основе этого направления лежат обобщения по петрографо-минералогическому составу почв, поверхностных (древних и современных) отложений, кор выветривания с выделением минералогических групп, регулирующих подвижность загрязняющих химических элементов, поступающих в почвы. Роль петрографо-минералогического состава в функционировании экосистем выражена в предлагаемом понятии «разряд экосистем» (экоразряд), под которым понимается часть экосистемы, компонент которой различается петрографо-минералогическим составом, реакциями и продуктами его изменений. А название экоразрядов дается по преобладающим минералам листового вещества.

Экоразряды выделяются на основе системы блоков минерало-кристаллохимических показателей [5], которые совершенствуются и дополняются как любая системная организация. На основе минералогических показателей была составлена карта «Петрографо-экологические экоразряды в зональных экосистемах», опубликованная в атласе «Природа и ресурсы Земли» (1998г.) [4]. Предлагается выделять восемь экоразрядов, каждому из которых соответствует определенный состав минералов, различающихся по своей структуре и кристаллохимии (табл. 1).

Объекты и методы исследований

Объектом исследований являлись аллювиальные почвы бассейнов двух рек,

подвергшихся загрязнению техногенными радионуклидами в результате деятельности Красноярского горно-химического комбината (р. Енисей) и Чернобыльской аварии 1986 г. (р. Ипуть). Отбор образцов почв проводился в 1990-2001 гг. из почвенных разрезов, заложённых на островной (разрезы с индексом КР (р. Енисей) и ОЕР (р. Ипуть) и береговой (разрезы с индексом МБП р. Енисей и Булд – р. Ипуть) пойме [2, 3, 9, 10, 11, 12].

Целью исследования является определение влияния минералогического состава почв разных гранулометрических фракций на поведение радионуклидов.

Выбор разрезов и образцов для более детальных исследований определялся по результатам полевой и лабораторной гамма-спектрометрии. Минералогический анализ выполнялся для образцов, наиболее загрязнённых радиоцезием. Гамма-спектрометрия образцов в лабораторных условиях выполнена с помощью гамма-спектрометра Canberra (США) с полупроводниковым детектором из сверхчистого германия. Минералогический состав определялся в илстой фракции, выделенной по методу Н.И. Горбунова [4] с помощью универсального рентген-дифрактометра фирмы Carl-Zeiss Jena (Германия). Анализировались ориентированные препараты, насыщенные магнием в 3-х состояниях: воздушно-сухом, после сольватации этиленгликолем, после прокаливания при 550 град. С в течение двух часов.

Результаты и их обсуждение

Определение минералогического состава илстых фракций, выделенных из аллювиальных почв позволило установить, что изученные объекты относятся в двум разным экоразрядам. Образцы, отобранные в бассейне

Петрографо-минералогические экоразряды почв [1]

№ п/п	Эдафические компоненты биосферы (экоразряды)	Петрографическая характеристика пород	Породообразующая илистая составляющая
1	Пеплово-аллофановый	<i>Кайнотипные вулканогенные породы:</i> базальты, андезиты, пирокласты, среднего и основного состава и связанные с ними консолидированные и неконсолидированные полимиктовые вулканогенно-осадочные отложения	Отсутствуют
2	Хлорит-сметитовый	<i>Средние и основные палеотипные магматические породы:</i> габбро, диабаз, порфирит и их консолидированные и неконсолидированные полимиктовые осадочные дериваты	Хлорит, хлорит-вермикулит, хлорит-сметит, триоктаэдрический смектит
3	Хлорит-гидрослюдистый	<i>Кислые и средние магматические и метаморфические породы:</i> граниты, гнейсы, кристаллические сланцы и их консолидированные и неконсолидированные полимиктово-олигомиктовые осадочные дериваты	Гидрослюды ди- и триоктаэдрические, хлориты триоктаэдрические
4	Гидрослюдисто-сметитовый	Олигомиктовые карбонатные и бескарбонатные супесчано-суглинисто-глинистые отложения, в том числе покровные суглинки и лессы	Гидрослюды диоктаэдрические, слюда-сметиты диоктаэдрические, хлориты триоктаэдрические, каолинит
5	Сметитовый	Полимиктовые карбонатные и бескарбонатные глинистые и песчано-глинистые отложения	Сметиты и слюда-сметиты диоктаэдрические
6	Каолинит-гетит-гиббситовый	Элювиальные и хемогенно-осадочные железистые латериты и бокситы и продукты их переотложения и цементации	Гетит, гиббсит, каолинит
7	Каолинит-пальгорскитовый	Мономиктовые карбонатные и бескарбонатные глинистые пески и песчаные глины	Каолинит, пальгорскит, гидрослюды диоктаэдрические, слюда-сметиты, хлориты
8	Каолинитовый	Мономиктовые глины и песчаные глины	Каолинит, гидрослюды диоктаэдрические, хлориты триоктаэдрические, гетит, гиббсит

р. Ипуть относятся к слюда-сметитовому экоразряду, в то время, как пробы почв из бассейна р. Енисей – к хлорит-вермикулитовому, что соответствует особенностям почвообразующих пород двух разных регионов. В бассейне р. Енисей распространены средние и основные палеотипные магматические породы; габбро, диабазы, порфириты и их консолидированные и неконсолидированные полимиктовые осадочные дериваты. Илистая фракция представлена хлоритами, хлорит-вермикулитами, хлорит-сметитами, гидрослюдами.

Бассейн р. Ипути сложен бескарбонатными и карбонатными песчано-супесчаными и суглинисто-глинистыми моренными и флю-

виогляциальными отложениями. В илистой фракции преобладают гидрослюды двух типов, в основном диоктаэдрические с примесью триоктаэдрических, слюда-сметитовые образования с различным сочетанием пакетов слюдистого и сметитового типа. Содержание хлоритов и каолинита незначительно.

Известно, что фиксация радиоцезия в почвах определяется главным образом сорбционными процессами, которые контролируются гранулометрическим и минералогическим составом фракций [6, 7, 8 и др.]. Наши исследования подтвердили связь концентрирования радиоцезия с гранулометрическим составом аллювиальных почв (рис. 1, 2)

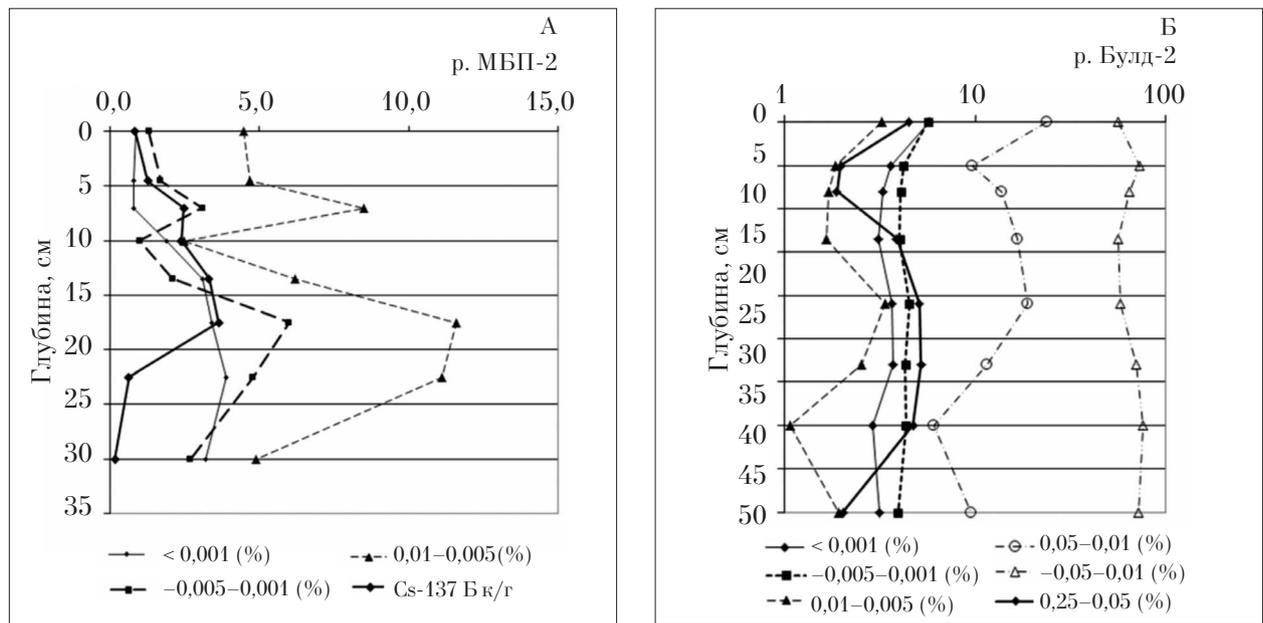


Рис. 1. Вертикальное распределение фракции разной размерности (%) и активности ¹³⁷Cs (Бк/г), в разрезах аллювиальной дерновой иловато-песчаной почвы на средней пойме р. Енисей (А, р. МБП-2) и аллювиальной дерново-глеевой на низкой пойме р. Булдынки (Б, р. Булд-2)

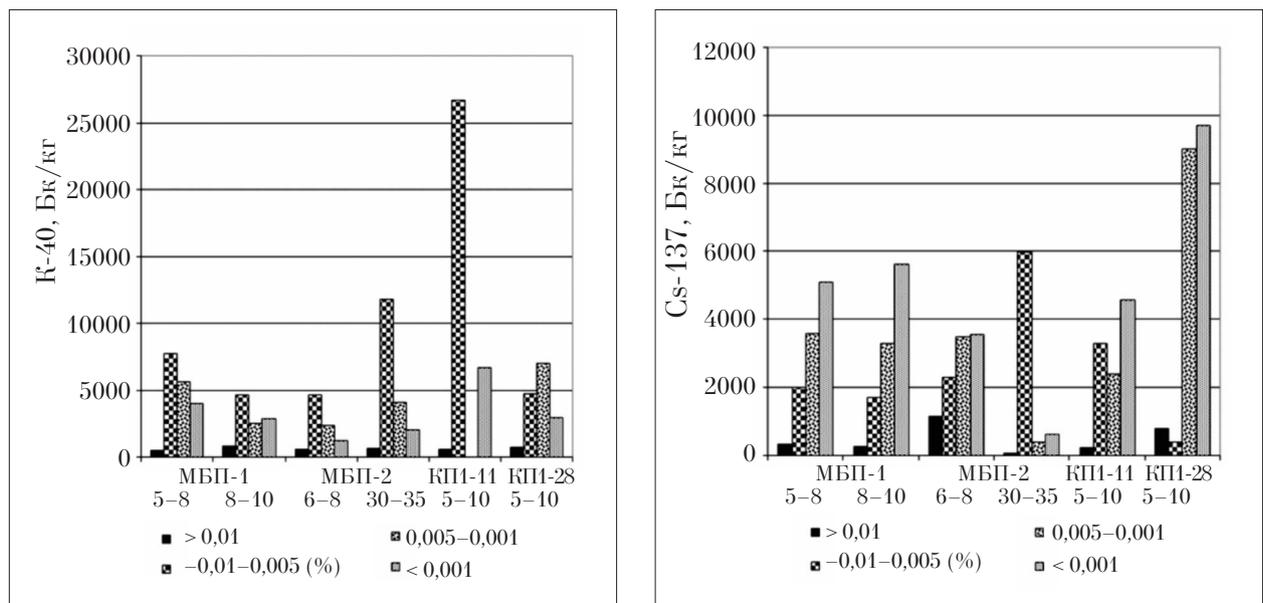


Рис. 2. Распределение радионуклидов калия-40 и цезия-137 в тонких фракциях пойменных почв (размер фракций указан в легенде в мм)

В пяти из шести образцов, отобранных в бассейне р. Енисей, максимальная удельная активность ¹³⁷Cs обнаружена в наиболее тонкой илистой фракции (табл. 2), в то время, как ⁴⁰K наиболее активно концентрируется средней и тонкой пылью. С учетом вклада каждой фракции в образец основная часть радиоцезия (47–73%) содержится в почвах во фракциях ила и тонкой пыли за исключением двух песчаных образцов МБП-2, (с глубины 6–8 см) и КПИ-11, где основная часть радионуклида

находится в доминирующих грубозернистых фракциях. С последними связано также от 53 до 92% ⁴⁰K (рис. 2).

Минералогическое различие нашло отражение в характере распределения радиоцезия по истым фракциям, выделенных из почвенных образцов на разных глубинах (рис. 1) и в преобладании минералов определённого состава (табл. 2, 3). В бассейне р. Ипуть максимальное накопление радиоцезия ассоциировано с преобладанием в илистой фрак-

МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Таблица 2

Соотношение основных минеральных фаз фракции < 1 мкм и содержание Cs-137 в почвах р. Енисей

Местоположение разреза, почва (индекс)	Глубина, см	Содержание Cs-137			Минералы илистой фракции, %		
		общ., Бк/г	ил. фр., Бк/г	ил. фр., %	каолинит + хлорит	гидро-слоуды	смешанно-слоистые образования**
Молодая прирусловая пойма р. Енисей у пос. Б. Балчуг, дерновая глееватая песчано-суглинистая (БП4-45=МБП-1)	5-8	1,01	5,09	45,7	18	33	50
	8-10	0,94	5,62	53,0	17	48	35
Там же, средняя пойма, дерновая иловато-песчаная (БП4-1=МБП-2)	6-8	1,73	3,54	31,5	17	40	43
	30-35	0,41	0,60	14,2	32*	54	23
Высокая пойма о. Казачий, дерновая песчаная (КП1-11)	5-10	0,36	4,55	16,4	33*	49	18
Средняя пойма о. Казачий, дерновая песчаная (КП1-28)	5-10	1,96	9,71	47,5	19*	55	26

Примечание: * – преобладает хлорит, ** – хлорит-вермикулиты (сметиты).

Таблица 3

Соотношение основных минеральных фаз фракции < 1 мкм и содержание Cs-137 и $C_{орг}$ в аллювиальных почвах р. Ипуть (индекс профилей ОЕП) и её притока р. Булдынка (индекс профилей – Булд)

Индекс профиля	Индекс горизонта	Глубина, см	Каолинит + хлорит, %	Гидро-слоуда, %	Сметиты, %	¹³⁷ Cs в илистой фракции, Бк/кг	$C_{орг}$ в илистой фракции, %
ОЕП-2	AD	0-2	12	39	49	12,8	7,8
	ADA1	2-4	19	62	19	не опр.	8,7
	A1	4-6	9	46	45	80,2	8,7
ОЕП-1	AD	0-3	7	53	40	18,3	7,7
	ADA1	3-6	17	68	15	34,1	9,1
	A1	6-10	11	54	35	221,9	10,23
	A1G	10-14	24	49	27	97,4	10,2
Булд-1	A1CaSi	1-3	40	60	не опр.	38,8	8,9
	A1Ca	3-5	20	51	29	50,8	10,1
	A1G	5-7	13	53	34	не опр.	10,5
	A1G	7-9	19	53	28	не опр.	не опр.
Булд-2	A1	2-4	28	60	12	37,5	11,1
	A1	4-10	27	25	48	не опр.	8,4
	A1	13-16	17	30	53	92,1	12,1
	A1	21-26	15	33	52	75,1	10,5
	A1CG+AL	26-30	8	20	72	20,3	8,6
	A1CG	30-40	16	41	43	17,9	13,1
	A1CG+AL	40-50	15	54	31	22,1	11,6
Отложения р. Булдынка	Гумусированный илистый горизонт	0-8	15	35	51	17,5	9,5
	Донные отложения, песчаный горизонт	50-55	16	26	58	7,5	6,4

ции смектитовой фазы (смешаннослойные слюда-смектитовые образования с высоким содержанием смектитовых пакетов) (табл. 3), в то время, как в енисейских образцах – с гидрослюдистой и хлоритовой. Такое различие соответствует особенностям почвообразующих пород двух разных регионов и может привести к разному характеру и скорости вторичных процессов перераспределения радиоцезия в системе почва-вода в отдаленный период после загрязнения. Полученные результаты следует учитывать при организации и проведении радиоэкологического мониторинга геохимически различных территорий.

Выводы

1. Техногенное загрязнение радиоцезием в результате деятельности Красноярского горно-химического комбината (аллювиальные почвы бассейна р. Енисей) и после Чернобыльской аварии (аллювиальные почвы бассейна реки Ипать с её притоками) анализировалось с позиции различий в их гранулометрическом и минералогическом составе.

2. Минералогический состав аллювиальных почв бассейна реки Ипать и её притоки реки Булдынки относится к гидрослюдисто-смектитовому экоразряду, основными компонентами, которых являются гидрослюды и смешаннослойные слюда-смектитовые образования с различным сочетанием слюдистых и смектитовых пакетов, обладающих высокой сорбционной способностью и необменной межслоевой фиксацией Cs-137. Последнее затрудняет процессы десорбции радиоцезия из почвенной массы и требует специальных мероприятий по его захоронению.

3. Минералогический состав аллювиальных почв бассейна реки Енисей относится к хлорит-гидрослюдистому экоразряду, основными компонентами которого являются хлориты и гидрослюды. Хлориты по своим кристаллохимическим параметрам неспособны к межслоевой фиксации катионов. При выветривании-почвообразовании изменяется дисперсность хлорита и происходят его трансформационные превращения в хлорит-вермикулитовые (смектитовые) образования, структура которых, помимо поверхностной сорбции, частично способна к межслоевой фиксации. Однако этот процесс менее активен, чем в минералах смектитового типа.

4. Различия соответствует особенностям почвообразующих пород двух разных регионов и приводит к разному характеру и скорости процессов перераспределения радиоцезия

в системе почва-вода в отдаленный период после загрязнения. Полученные результаты следует учитывать при организации и проведении радиоэкологического мониторинга геохимически различных территорий.

Литература

1. Градусов Б.П., Черняховский А.Г., Чижикина Н.П. Экологическая петрография и минералогия почв // Сборник научных трудов: Проблемы почвоведения в Сибири. Академия наук СССР, Сибирское отделение. Институт Почвоведения и агрохимии. 1990. С. 13–34.
2. Коробова Е.М., Чижикина Н.П., Линник В.Г. Распределение радиоцезия по гранулометрическим фракциям и в профиле аллювиальных почв поймы р. Ипать и её притока р. Булдынки // Почвоведение. 2007. № 4. С. 404–412.
3. Коробова Е.М., Чижикина Н.П. Исследование связи распределения и подвижности радиоцезия в аллювиальных почвах поймы р. Ипать и ее притока р. Булдынка с минералогическим составом илистой фракции и физико-химическими параметрами почв // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1190–1204.
4. Черняховский А.Г., Градусов Б.П., Чижикина Н.П. Карта «Петрографо-минералогические типы зональных экосистем суши» / Атлас «Природа и ресурсы земли». Из-во АН СССР, 1998.
5. Чижикина Н.П. Преобразование минералогического состава почв в процессе агрогенеза: Дисс. ... доктора с.-х. наук. М. 1992. 679 с.
6. Comans R.N.J., Yaller M., Peter De Peter. Sorption of cesium on illite: Non-equilibrium behaviour and reversibility // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 433–440.
7. Cornell R.V. Adsorption of cesium on minerals: a review // Journ. of Anal. and Nuclear chem. 1993. V. 171. № 2. P. 483–500.
8. Kohut C.K., Warren C.J., Chlorites. In Dixon J.B., Schulze D.G. (Ed) Soil Mineralogy with Environmental Application. Madison, Wisconsin, USA. 2002. P. 531–553.
9. Korobova E., Linnik V. and Chizhikova N. The History of the Chernobyl 137Cs Contamination of the flood plain soils and its relation to physical and chemical properties of the soil horizons (a case study) // Journal of Geochemical Exploration. 2008. V. 96. № 2–3. P. 236–255.
10. Korobova E.M., Chizhikova, N.P., Linnik V.G. Distribution of radiocesium in granulometric fractions of the Iput' floodplain soils contaminated after the Chernobyl accident // II Regional Symposium Chemistry and the Environment. Proc. Published by Serbian Chemical Society. Beograd, 2003. P. 359.
11. Korobova E.M., Chizhikova N.P., Volosov A.G. Fine particle control of radiocesium accumulation in contaminated flood plain soils // Abstracts of the 2nd Int. Meeting Clay

in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. Tours, Andra, France. 2005. P. 613–614.

12. Korobova E.M., Linnik V.G., Chizhikova N.P., Alekseeva T.N, Shkinev V.M., Brown J., Dinu M.I. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 142. P. 49–59.

13. Korobova E.M., Linnik V.G., Chizhikova N.P., Alekseeva, T.N, Shkinev, V.M., Brown, J., Dinu, M.I. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 142. P. 49–59.

References

1. Gradusov B.P, Chernyakhovsky A.G, Chizhikova N.P. Ecological petrography and mineralogy of soil // *Problems of soil science in Siberia*. Akademiya nauk SSSR, Sibirskoye otdelenie, Institut pochvovedeniya i agrokhimii, 1990. P. 13–34 (in Russian).

2. Korobova E.M. Chizhikova N.P., Linnik V.G. Distribution of radiocesium in granulometric fractions and in the profile of alluvial soil in the Iput' floodplain soils and in its tributary the Buldynka river // *Pochvovedeniye*. 2007. № 4. P. 404–412 (in Russian).

3. Korobova E.M., Chizhikova N.P. The research of the connection of distribution and mobility of radiocesium in the alluvial soil of the Iput' floodplain and in its tributary the Buldynka river with the mineralogical content of sediment fraction and with physical-chemical parameters of soil // *Pochvovedeniye*. 2007. № 10. P. 1190–1204 (in Russian).

4. Chernyakhovsky A.G., Gradusov B.P., Chizhikova N. P. Map "Petrographic and mineralogical types of zonal ecosystems" / Atlas "Nature and resources of the earth". Izd-vo AN SSSR Academy of Sciences, 1998 (in Russian).

5. Chizhikova N.P. Transformation of soil mineralogy due to agrogenetic impact: Diss. ... doktora s.-kh. nauk. M., 1998. 648 p. (in Russian).

6. Comans R.N.J., Yaller M., Peter De Peter. Sorption of cesium on illite: Non-equilibrium behaviour and reversibility // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. P. 433–440.

7. Cornell R.V. Adsorption of cesium on minerals: a review // *Journ. of Anal. and Nuclear chem*. 1993. V. 171. № 2. P. 483–500.

8. Kohut C.K., Warren C.J., Chlorites. In Dixon J.B., Schulze D.G. (Ed) *Soil Mineralogy with Environmental Application*. Madison. Wisconsin. USA. 2002. P. 531–553.

9. Korobova E., Linnik V. and Chizhikova N. The History of the Chernobyl 137Cs Contamination of the flood plain soils and its relation to physical and chemical properties of the soil horizons (a case study) // *Journal of Geochemical Exploration*. 2008. V. 96. № 2–3. P. 236–255.

10. Korobova E.M, Chizhikova, N.P., Linnik V.G. Distribution of radiocesium in granulometric fractions of the Iput' floodplain soils contaminated after the Chernobyl accident // *II Regional Symposium Chemistry and the Environment*. Proc. Published by Serbian Chemical Society. Beograd, 2003. P. 359.

11. Korobova E.M, Chizhikova N.P., Volosov A.G. Fine particle control of radiocesium accumulation in contaminated flood plain soils // *Abstracts of the 2nd Int. Meeting Clay in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Tours, Andra, France. 2005. P. 613–614.

12. Korobova E.M., Linnik V.G., Chizhikova N.P., Alekseeva T.N, Shkinev V.M., Brown J., Dinu M.I. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 142. P. 49–59.

13. Korobova E.M., Linnik V.G., Chizhikova N.P., Alekseeva, T.N, Shkinev, V.M., Brown, J., Dinu, M.I. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 142. P. 49–59.