



УДК: 551.510.72(282.251.2)

МИГРАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ (^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{60}Co) В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ Р. ЕНИСЕЙ (БЛИЖНЯЯ ЗОНА ВЛИЯНИЯ КРАСНОЯРСКОГО ГХК)

А. В. Чугуевский, М. С. Мельгунов, И. В. Макарова

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Выявлен характер распределения техногенных гамма-излучающих радионуклидов (^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{60}Co) в вертикальных колонках донных отложений р. Енисей, отобранных в ближней зоне влияния Красноярского ГХК. Показано, что минеральный состав донных отложений не меняется с глубиной и представлен главным образом кварцем, плагиоклазом и калиевым полевым шпатом, а также небольшим количеством амфибола, хлорита, слюды. Установлено, что в обменной и карбонатной формах в донных отложениях содержится в среднем 16 % ^{152}Eu , 22 % ^{137}Cs и 15 % ^{60}Co . Радионуклиды, представленные в этих формах, при стабильных естественных условиях могут переходить в водный раствор и вовлекаться во вторичную миграцию. Другие фракции поглощающего комплекса при отсутствии катастрофических изменений физико-химических условий в речной экосистеме в водный раствор не переходят, и перераспределение связанных с ними радионуклидов может осуществляться только при механическом переносе вещества.

Ключевые слова: техногенные радионуклиды, донные отложения, формы нахождения, вторичное перераспределение, Красноярский ГХК, Енисей.

MIGRATION OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES (^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{60}Co) IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE YENISEY RIVER (NEAR ZONE OF INFLUENCE OF THE KRASNOYARSK MCP)

A. V. Chuguevsky, M. S. Melgunov, I. V. Makarova

V.S.Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

The distribution nature of the artificial gamma-emitting radionuclides (^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{60}Co) in vertical columns of the Yenisei River bottom sediments selected in the near zone of influence of the Krasnoyarsk MCP was revealed. It is shown that the mineral composition of bottom sediments does not change with the depth and is mainly represented by quartz, plagioclase and potassium feldspar, with a small amount of amphibole, chlorite, mica. It was found that the exchangeable and carbonate forms contain, on average, 16% of ^{152}Eu , 22% of ^{137}Cs and 15% of ^{60}Co being found in bottom sediments. Radionuclides presented in these forms can pass into an aqueous solution and be involved in secondary migration under stable, natural conditions. Other fractions of the absorbing complex in the absence of catastrophic changes in physico-chemical conditions in the river ecosystem do not pass into an aqueous solution, and the redistribution of radionuclides associated with them can occur only with mechanical transfer of the matter.

Keywords: technogenic radionuclides, bottom sediments, occurrence forms, secondary redistribution, Krasnoyarsk MCP, Yenisey River.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-2-68-77

В течение более 30 лет Красноярский горно-химический комбинат (ГХК) был источником радиоактивного загрязнения поймы р. Енисей такими долгоживущими техногенными радионуклидами (ТРН), как ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{90}Sr и изотопы плутония [3, 6, 8, 9, 11, 13–15]. ^{137}Cs и ^{90}Sr фиксируются в донных отложениях вплоть до Карского моря [23, 25]. В воде и водных растениях наряду с перечисленными долгоживущими изотопами до 2010 г. (до остановки последнего прямого реактора) фиксировались короткоживущие $^{141,144}\text{Ce}$, ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{65}Zn и др. [4, 12]. Особенно сильному загрязнению подверглась ближняя зона влияния ГХК, которая выделяется достаточно условно (по фиксированию в воде короткоживущих ТРН) и представляет собой участок поймы протяженностью около 18 км от места сброса ГХК (60–78 км вниз по течению от Красноярска) до Балчуговской протоки.

Сброс радиоактивных отходов в последние полтора десятилетия существенно (в сотни – тысячи раз) сократился. Теперь основными источниками загрязнения экосистемы р. Енисей являются отстойники, расположенные на территории комбината, и аллювиальные отложения поймы (особенно в ближней зоне влияния ГХК), в которых уже накоплены значительные количества ТРН.

Пристальное внимание определению форм нахождения техногенных радионуклидов, депонированных в аллювиальных отложениях, и изучению их вторичного перераспределения начали уделять с начала 2000-х гг. Было проведено опробование несколько участков поймы на островах и правом берегу реки. В работах [3, 17, 18, 20, 21, 26] предложены различные методики проведения химического фракционирования для определения форм нахождения ТРН (^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$) в аллювиальных почвах и донных отложениях.



Сделан вывод о том, что сорбция радионуклидов на переносимых рекой взвесьях и ранее отложившихся частицах в верхних слоях осадков и механический их перенос – это доминирующий фактор миграции и накопления радиоизотопов в донных отложениях [1, 8, 9].

Показано, что большая часть ТРН приурочена к неподвижным и слабо подвижным формам нахождения, что препятствует их переходу в водные растворы. Вместе с тем в [17] сделан вывод о том, что при изменении физико-химических условий, например в процессе гумификации, подвижные формы радионуклидов переходят в неподвижные. В других случаях неподвижные формы могут трансформироваться в подвижные и становиться источником вторичного загрязнения радионуклидами поймы р. Енисей.

Актуальность работы обусловлена тем, что донные отложения – главная депонирующая среда наряду с аллювиальными почвами для техногенных радионуклидов, поступивших в окружающую среду в результате деятельности Красноярского ГХК. Это зависит не только от того, что общий объем осадков превосходит объем затопляемых аллювиальных почв береговой зоны и островов, но и от того, что донные отложения находятся в постоянном контакте с водами, переносящими радионуклиды, в том числе и сорбированные на взвесьях, из которых они в основном и формируются. В почвах же островов и береговых зон радионуклиды накапливаются только во время паводков. Донные отложения легче и в больших масштабах, чем обычно задернованные аллювиальные почвы островов и береговой зоны, вовлекаются в многократное переотложение. Наиболее подвержены этому верхние нелитифицированные их горизонты, а в высокие паводки мигрирует значительная их доля.

Донные отложения широко распространены в долине р. Енисей: в многочисленных старичных водоемах и протоках, а также в устьях островов и теневых частях выступов берегов реки и островов (мощность их колеблется от нескольких до десятков сантиметров). По литологическому и гранулометрическому составу и количеству органического материала они сильно различаются в зависимости от места их накопления, но в большинстве случаев представлены гомогенной массой гумусированного, пелитового, суглинистого и супесчаного гранулометрического состава с прослоями связного и рыхлого песка и включениями растительных остатков, корней, иногда гальки [3].

Целью данной работы является оценка возможности растворения в водном потоке техногенных радионуклидов, депонированных в донных отложениях р. Енисей и вовлечения их во вторичную миграцию.

Решались следующие задачи:

1. Изучить минералого-геохимический состав загрязненных донных отложений р. Енисей в ближней зоне влияния Красноярского ГХК.

2. Установить характер вертикального распределения техногенных радионуклидов в изученных колонках донных отложений.

3. Определить химические формы нахождения ТРН и оценить возможность перехода их в водный раствор.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования была выбрана коса Атамановская (в настоящее время это остров), расположенная в 5 км вниз по течению от места сброса и отделенная от правого берега протокой шириной около 30 м (рис. 1). Коса покрыта редкой кустарниковой растительностью и густым травостоем. Во время весеннего половодья и катастрофических паводков она полностью затопливается водой, в результате чего на ней сформировался достаточно мощный (до 1,2 м) покров аллювиальных почв. В протоке, отделяющей косу от правого берега, на некоторых участках образовался небольшой (до 30 см) слой донных отложений.

В сентябре 2003 г. у правого берега косы Атамановской, напротив центральной ее части были отобраны три колонки донных отложений (Е02-1, Е02-2 и Е03, см. рис. 1). При отборе проб использовался цилиндрический пробоотборник с вакуумным затвором диаметром 84 мм и длиной 50 см, позволяющий извлекать илистые сильнообводненные и песчаные осадки. Полученный керн разделялся перпендикулярно оси на слои по 1 см. В лабораторных условиях пробы донных отложений доводились до воздушно-сухого состояния, тщательно перемешивались и взвешивались, после чего анализировались на содержание техногенных радионуклидов.

Минеральный состав донных отложений исследован рентгенофазовым анализом (метод порошковой дифрактометрии) на дифрактометре ДРОН-4, режим съемки 40 кВ, 24 мА, медное излучение (Cu- α).

Определение основных породообразующих оксидов в донных отложениях выполнено рентгенофлуоресцентным анализом на спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation). Для построения градуировочных графиков использованы следующие стандартные образцы состава горных пород: 313, Му-1, Му-3, Счт-1, Сду-1, Сг-1а, Сг-2, Сг-3. Сгд-1, Сгх-1, Сгхм-2, Сгхм-3, Си-1, Снс-1, Снс-2, Ст-1, а также химреактивы MgO (осч), Al₂O₃ (чда), SiO₂ (чда), CaSO₄ (чда), CaO (чда), TiO₂ (чда), Cr₂O₃ (чда), Fe₂O₃ (осч). Погрешность определения не превышает таковую для второй категории точности по ОСТ 41-08-205-99.

Изотопный состав и активность гамма-излучающих радионуклидов определялись гамма-спектрометрическим методом на коаксиальном Ge(Li) ППД ДГДК-100В (производство ИФТП, г. Дубна, с относительной эффективностью регистрации 10 % и разрешением по линии 1332–2,6 кэВ), с использованием периферийного спектрометрического оборудования, многоканального анализатора АЦП-



Рис. 1. Район проведения работ и схема пробоотбора

8K-2 в составе ПК IBM PC и программного комплекса ANGAMMA фирмы «АСПЕКТ» (Дубна).

С целью изучения распределения ТРН между компонентами поглощающего комплекса донных отложений был проведен эксперимент по фракционному разделению радионуклидов по методике Tessier [23], адаптированной Л. Н. Бондаревой с соавторами для искусственных радионуклидов в донных отложениях р. Енисей [10].

Фракционирование проводилось при соотношении образец:раствор = 1:10. Все жидкие фракции отфильтровывались через фильтр «синяя лента». Перед каждым следующим реагентом донные отложения дважды промывались дистиллированной водой при перемешивании и в стакане, и на фильтре. С фильтра донные отложения смывались следующим раствором реагента. Полученные растворы, твердые остатки, а также исходный материал анализировались на гамма-спектрометре.

Определение минерального состава донных отложений, измерения активности гамма-излучающих ТРН и фракционное разделение радионуклидов выполнялись в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН).

Минеральный и петрохимический состав донных отложений

Для определения минерального состава донных отложений проведен рентгенофазовый анализ некоторых слоев разреза из колонок Е02-1 и Е02-2 (рис. 2, 3).

Минеральный состав отложений одинаков в обеих колонках, не меняется с глубиной. Основными минералами, слагающими донные отложения, являются кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат. Содержатся небольшие количества амфибола, хлорита, слюды.

Минеральный состав колонок близок к составу аллювиальных отложений (почв и донных осадков), изученных ранее [3, 7, 20, 21], и типичен для ближней зоны влияния Красноярского ГХК.

В нескольких горизонтах колонок Е02-1 и Е02-2 полным силикатным анализом проведено определение содержаний основных породообразующих элементов (см. таблицу).

Химический состав донных отложений в обеих колонках практически не различается и не изменяется с глубиной. Основным компонентом является оксид кремния SiO_2 , содержания которого варьируют в пределах 67–70 %; вторым – оксид алюминия Al_2O_3 (12–13 %). Концентрация оксида кальция CaO 2,4–3,6 %. Потери при прокаливании составили 1,9–5,3 %.

Полученные результаты по содержанию основных оксидов близки к итогам изучения донных отложений ближней зоны влияния ГХК, представленным в работах [18, 20]. Исключение – более высокие (9–19 %) значения потерь при прокаливании, приведенные в [20]. По всей видимости, это обусловлено тем, что в составе ранее изученных образцов, отобранных в Балчуговской протоке, которая характеризуется иным, более застойным гидрологическим режимом, содержалось больше органического материала (растительных остатков).

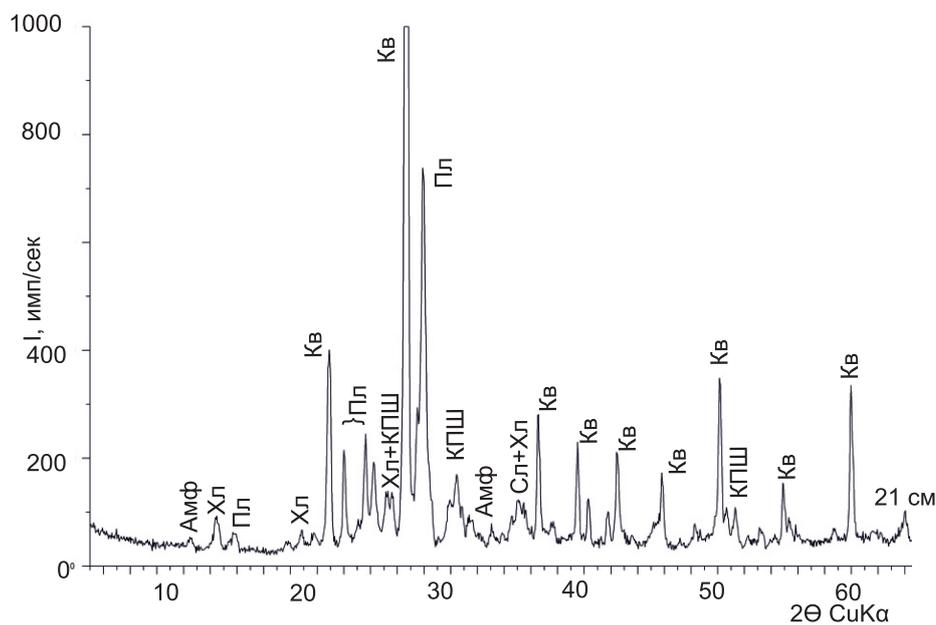
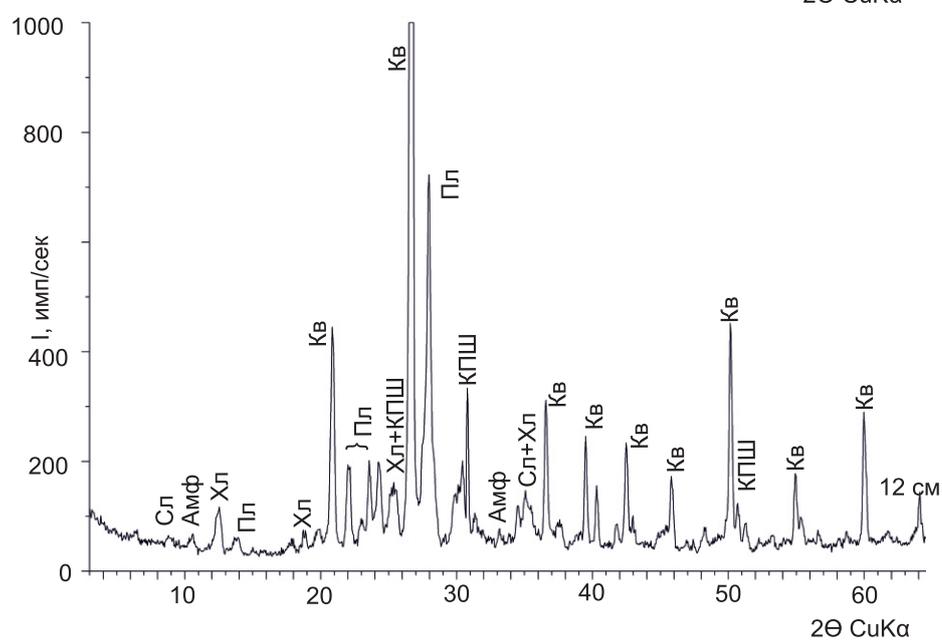
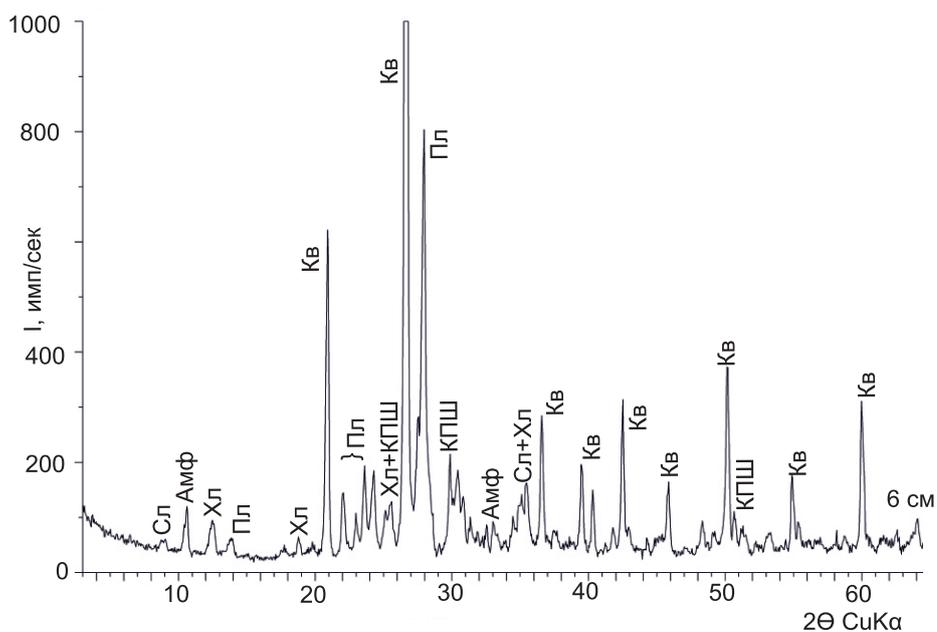


Рис. 2. Минеральный состав донных отложений (колонка E02-1) на разных глубинах (6, 12 и 21 см) по результатам рентгенофазового анализа (РФА)

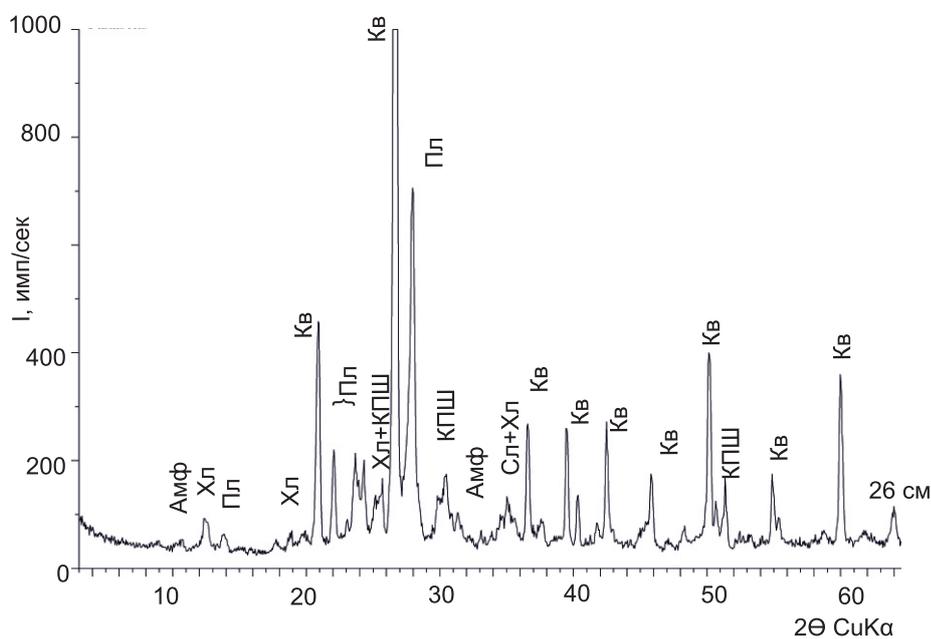
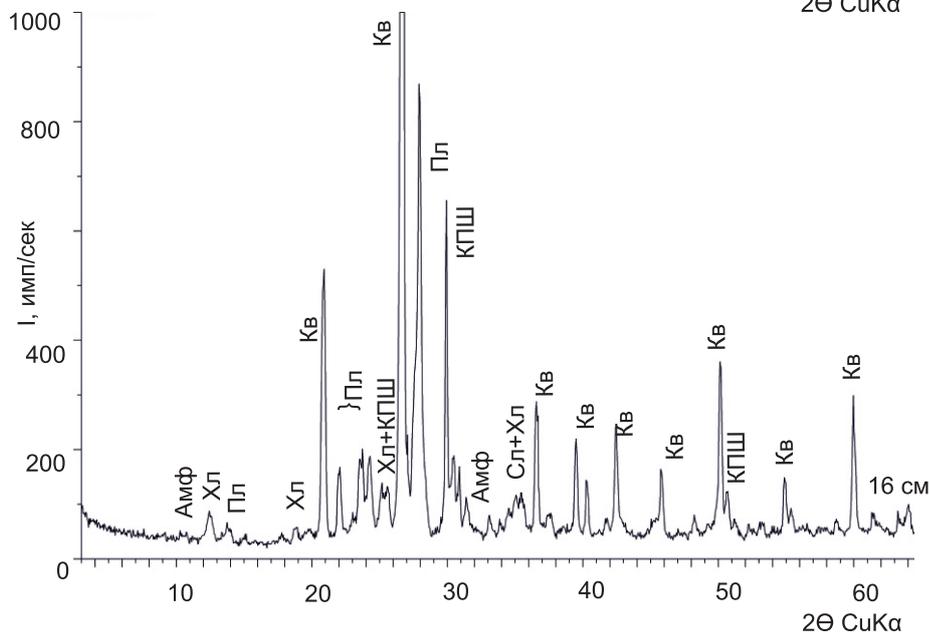
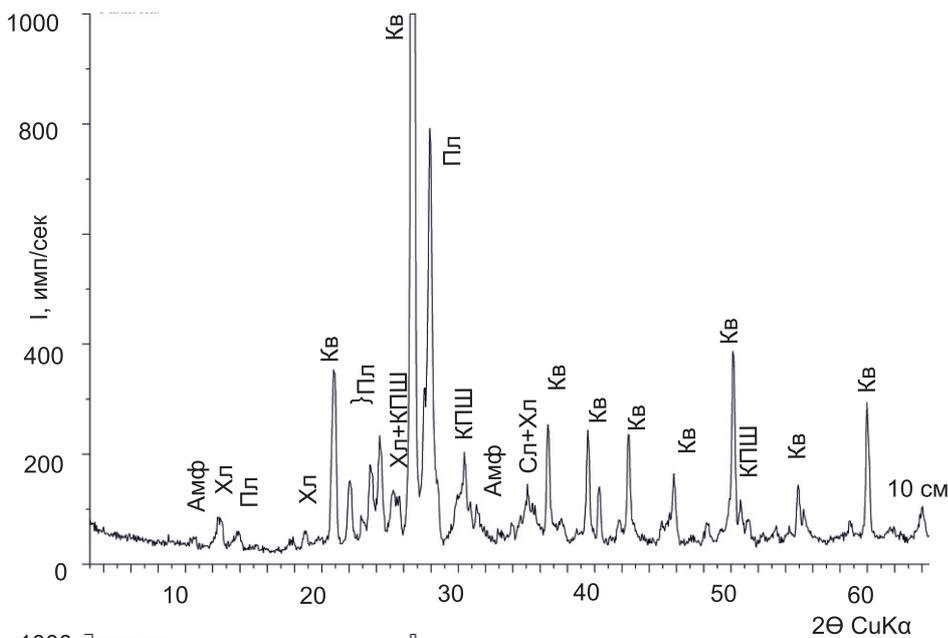


Рис. 3. Минеральный состав донных отложений (колонка E02-2) на разных глубинах (10, 16 и 26 см) по результатам рентгенофазового анализа (РФА)

Средний химический состав донных отложений (колонки E02-1 и E02-2)

Проба	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	SO ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	NiO	LOI	SUM
E02-1ДО10	69,88	0,59	12,47	3,94	0,06	1,87	2,83	2,94	1,89	0,13	0,07	<0,03	0,01	0,01	0,01	3,18	99,88
E02-1ДО12	70,33	0,69	12,13	4,29	0,08	1,90	2,96	2,93	1,85	0,12	0,05	<0,03	0,02	0,02	0,01	1,88	99,23
E02-1ДО16	67,34	0,63	12,96	4,18	0,06	1,97	2,69	2,83	1,94	0,14	0,06	<0,03	0,02	0,01	0,01	5,26	100,09
E02-1ДО21	66,76	0,72	13,08	4,35	0,06	2,08	2,89	2,82	1,87	0,15	0,07	<0,03	0,02	0,01	0,01	5,16	100,06
E02-1ДО26	70,12	0,45	12,09	2,79	0,05	1,45	2,39	2,84	2,00	0,11	0,06	<0,03	0,01	0,01	0,01	5,31	99,70
E02-2ДО6	69,35	0,58	12,78	3,93	0,06	1,85	2,74	3,02	2,00	0,14	0,06	<0,03	0,01	0,01	0,01	3,11	99,66
E02-2ДО10	70,04	0,56	12,97	3,78	0,06	1,86	2,98	3,15	1,98	0,13	0,06	0,05	0,01	0,01	0,01	2,46	100,12
E02-2ДО12	66,47	0,94	12,85	5,77	0,09	2,33	3,64	2,95	1,78	0,17	0,06	0,09	0,02	0,02	0,01	2,91	100,13
E02-2ДО16	70,43	0,59	12,77	3,80	0,06	1,82	2,73	3,03	2,00	0,12	0,07	<0,03	0,01	0,01	0,01	2,61	100,08
E02-2ДО20	70,56	0,64	12,59	4,01	0,07	1,84	2,76	3,04	1,99	0,11	0,07	<0,03	0,02	0,01	<0,01	2,34	100,07
E02-2ДО21	69,79	0,82	12,30	4,94	0,09	1,87	2,88	2,95	1,90	0,11	0,06	<0,03	0,02	0,02	0,01	2,33	100,09

Вертикальное распределение радионуклидов в колонках донных отложений

Вертикальное распределение ТРН в колонках донных отложений, отобранных в протоке между косой Атамановской и правым берегом р. Енисей показано на рис. 4.

Основной вклад в общую активность вносят изотопы европия (главным образом ¹⁵²Eu). Такое рас-

пределение радионуклидов характерно для аллювиальных образований ближней зоны влияния ГХК [3, 15, 16, 26]. Средняя концентрация ¹⁵²Eu составляет 1800 Бк/кг (максимальное значение 10650 Бк/кг, проба E02-2ДО3), ¹⁵⁴Eu – 410 Бк/кг (3000 Бк/кг, проба E02-2ДО3), ¹⁵⁵Eu – 75 Бк/кг. Наблюдается закономерность в изменении концентраций изотопов европия – к слоям с большим содержанием ¹⁵²Eu приурочены также повышенные содержания

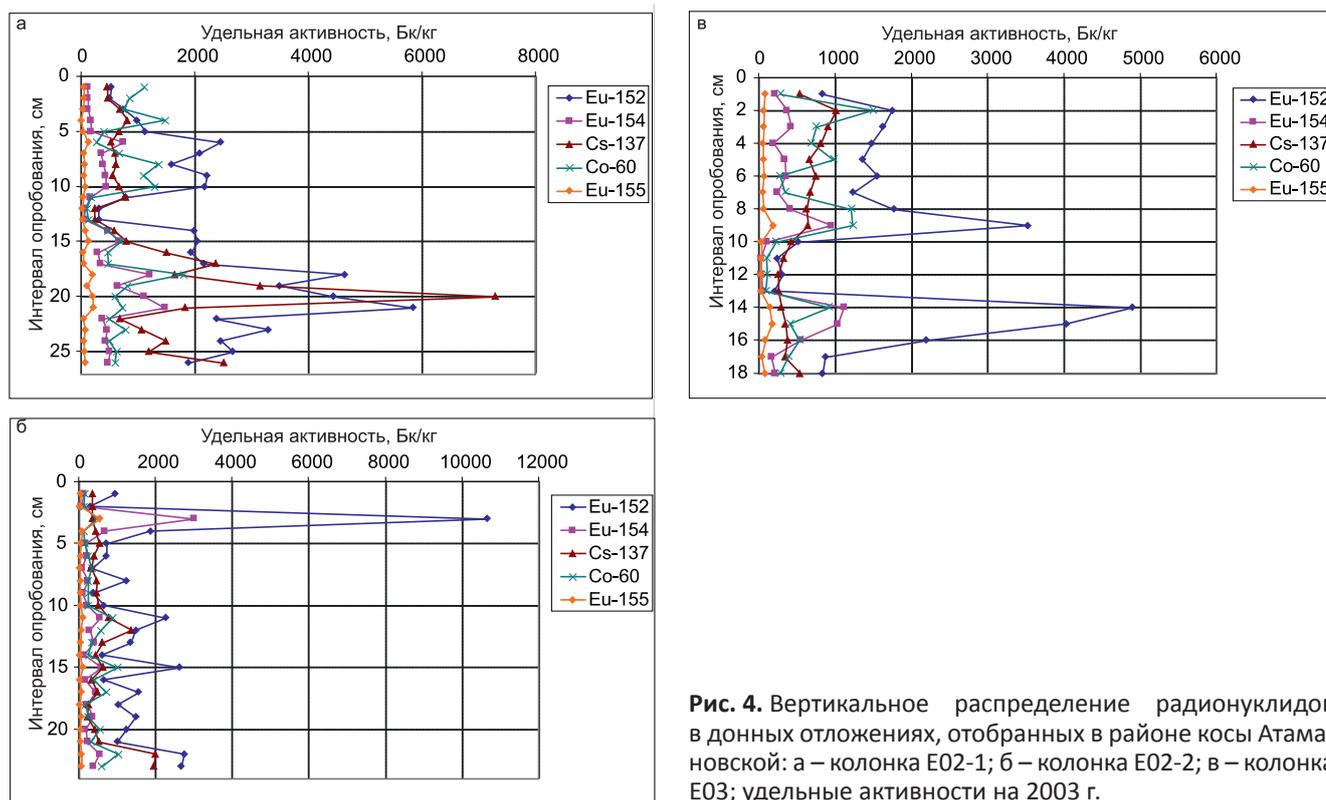


Рис. 4. Вертикальное распределение радионуклидов в донных отложениях, отобранных в районе косы Атамановской: а – колонка E02-1; б – колонка E02-2; в – колонка E03; удельные активности на 2003 г.

^{154}Eu и ^{155}Eu , что обусловлено, по всей видимости, наличием общего носителя активности. Средняя концентрация ^{137}Cs составляет 810 Бк/кг при максимальном значении 7300 Бк/кг в пробе E02-1Д020. Средние концентрации ^{60}Co – 570 Бк/кг, максимальное – 1800 Бк/кг в пробе E02-1Д018.

Наблюдаемая неравномерность распределения радионуклидов, в том числе наличие ярко выраженных максимумов (изотопы Eu в горизонтах E02-1Д03, E02-2Д014 и ^{137}Cs в слое E03-Д020), скорее всего, связана с широким распространением в аллювиальных отложениях ближней зоны влияния ГХК тонкодисперсных активных частиц различной природы [2, 3, 5, 16, 24].

Распределение техногенных радионуклидов по химическим фракциям донных отложений

Подвижность техногенных радионуклидов, депонированных в донных отложениях и аллювиальных почвах, определяется прочностью их фиксации компонентами поглощающего комплекса. Для определения форм нахождения ТРН в донных отложениях косы Атамановской был проведен эксперимент по фракционному разделению. Для этого с разных глубин было отобрано семь образцов из колонки E02-1. Результаты эксперимента для ^{152}Eu , ^{137}Cs и ^{60}Co приведены на рис. 5.

Наличие обменной фракции ^{152}Eu отмечено в трех образцах из семи, причем если в двух ее долях составляет первые проценты, то в третьей (проба E02-1Д012) она возрастает до 20 %. Доля карбонатной фракции также невелика – 3,2–11,7 %, в среднем 7,3 %. Оксиды Fe и Mn и органическая фракция присутствуют во всех изученных образцах и являются основными носителями ^{152}Eu . С оксидами связано в среднем 26 % ^{152}Eu (15–42 %), с органикой – в среднем 51 % (максимум до 78 %). В двух образцах вся активность европия связана с этими двумя фракциями. В остальных пробах от 15 до 35 % ^{152}Eu содержится в аморфных силикатах и твердом остатке.

Количество обменной фракции ^{137}Cs примерно одинаково для шести образцов (колеблется в пределах 14–21 %), и лишь в одном случае (проба E02-1Д012) достигает 51,7 %. Доля карбонатной фракции ^{137}Cs , выявленной в средней и нижней частях колонки, составляет в среднем 6,9 % (3,5–7,6 %). Наличие радиоцезия в оксидах и гидроксидах Fe и Mn установлено только в одном образце (0,8 %). С органической фракцией связано 11,5 % (3,2–20,7 %) ^{137}Cs , с нерастворимыми аморфными силикатами – 10 % (8–12 %). В твердом остатке содержится основная часть ^{137}Cs – в среднем 56 % (28,5–75 %).

Распределение ^{60}Co характеризуется ярко выраженной неравномерностью для разных исследованных образцов с чередованием вниз по колонке (см. рис. 5, в). Так, в некоторых (E02-1Д06, E02-1Д012, E02-1Д020 и E02-1Д025) представлены

все фракции в примерно равных соотношениях (15–20 %), а в других (E02-1Д010, E02-1Д016, E02-1Д021) резко преобладает ^{60}Co , связанный с твердым остатком (75–95 %).

На основании полученных в результате эксперимента по фракционному разделению данных можно сделать выводы о возможности выноса техногенных радионуклидов из донных осадков косы Атамановской. Согласно работе [10] к подвижным формам относятся обменная, карбонатная форма и оксиды и гидроксиды Fe и Mn. К слабо подвижным – связанные с органикой и аморфные силикаты. Вместе с тем принято считать, что оксиды и гидроксиды железа и марганца становятся подвижными только в восстановительных условиях, а в рассматриваемом случае условия окислительные. Поэтому в данной работе к подвижным формам отнесены обменная и карбонат-

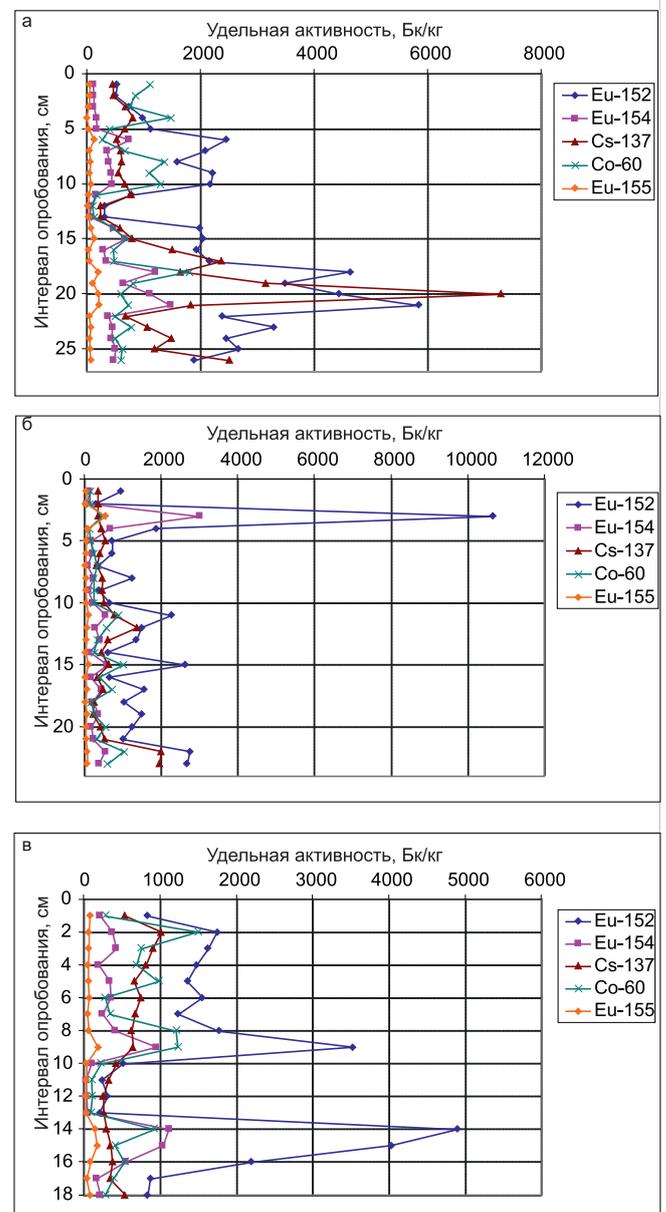


Рис. 5. Результаты фракционного разделения (колонка E02-1, коса Атамановская): а – ^{152}Eu , б – ^{137}Cs , в – ^{60}Co



ная фракции, условно-подвижным – три остальные.

Выводы

Минеральный и петрохимический состав донных отложений, отобранных у косы Атамановской, типичен для загрязненных аллювиальных отложений ближней зоны влияния Красноярского ГХК.

Вертикальное распределение и уровни содержания изотопов Eu, ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co в колонках донных отложений также является характерным для загрязненных аллювиальных отложений поймы. Ярко выраженная неравномерность распределения ТРН в значительной степени определяется наличием в ближней зоне влияния ГХК большого количества активных частиц.

В ходе лабораторного эксперимента по фракционному разделению радионуклидов установлено, что в подвижных формах, которые в естественных условиях могут переходить в водный раствор, присутствует в среднем 16 % ¹⁵²Eu, 22 % ¹³⁷Cs и 15 % ⁶⁰Co. Перенос остальной части радионуклидов при отсутствии катастрофических изменений физико-химических условий в речной экосистеме происходит в сорбированном состоянии в составе взвесей.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН; аналитическая работа – в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуловский С. М., Тертышник Э. Г., Кабанов А. И. Перенос радионуклидов в р. Енисей // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105, № 5. – С. 285–291.
2. «Горячие» частицы 2-го рода в пойменных почвах реки Енисей / З. Г. Гритченко, Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин и др. // Радиохимия. – 2001. – Т. 43, № 6. – С. 563–565.
3. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Ф. В. Сухоруков, А. Г. Дегерменджи, В. М. Белолипецкий и др.; науч. ред. акад. РАН Ф. В. Шабанов, чл-кор. РАН А. Г. Дегерменджи. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. – 286 с.
4. Зотина Т. А. Распределение техногенных радионуклидов в биомассе макрофитов реки Енисей / Радиационная биология. Радиозэкология. – 2009. – Т. 49, № 6. – С. 729–737.
5. Исследование высокоактивных проб почв и горячих частиц поймы реки Енисей / А. Я. Болсуновский, В. О. Черкезян, К. В. Барсукова, Б. Ф. Мясоедов // Радиохимия – 2000. – Т. 42, № 6. – С. 560–564.
6. К оценке вклада реки Енисей в общую радиоактивную загрязненность Карского моря / Ю. В. Кузнецов, Ю. А. Ревенко, В. К. Легин и др. // Радиохимия. – 1994. – Т. 36, вып. 6. – С. 546–559.
7. Линник В. Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов. – М.: Изд-во РАН, 2018. – 372 с.
8. Носов А. В. Исследование механизмов миграции радиоактивных веществ в пойме Енисея // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 12. – С. 84–91.
9. Носов А. В., Мартынова А. М. Анализ радиационной обстановки на р. Енисей после снятия с эксплуатации прямооточных реакторов Красноярского ГХК // Атомная энергия. – 1996. – Т. 81, вып. 3. – С. 226–232.
10. Оценка миграционной способности трансурановых радионуклидов (²⁴¹Am, изотопов плутония) и ¹⁵²Eu в донных отложениях реки Енисей / Л. Г. Бондарева, А. Я. Болсуновский, Ф. В. Сухоруков и др. // Радиохимия. – 2005. – Т. 47, № 4. – С. 289–294.
11. Радиоактивное загрязнение р. Енисей, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината / А. В. Носов, М. В. Ашанин, А. Б. Иванов, А. М. Мартынова // Атомная энергия. – 1993. – Т. 74, вып. 2. – С. 144–150.
12. Радиозэкологический мониторинг реки Енисей и цитогенетические характеристики водного растения *Elodea canadensis* / А. Я. Болсуновский, Е. Н. Муратова, А. Г. Суковатый и др. // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2007. – Т. 47, № 1. – С. 63–73.
13. Тимофеев В. А. Техногенное радиоактивное загрязнение аллювиальных отложений Енисея // Сб. докл. II Междунар. радиозкол. конф. – Красноярск, 1995. – С. 165–171.
14. Трансурановые элементы в пойменных отложениях реки Енисей / Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, А. Е. Шишлов и др. // Радиохимия. – 2000. – Т. 42, вып. 5. – С. 470–477.
15. Bolsunovsky A. Radionuclide speciation in sediments of the Yenisei River // Radioprotection. – 2011. – Vol. 46, no. 6. – P. 195–198.
16. Bolsunovsky A., Melgunov M. Study of sediments and radioactive particles of the Yenisei River using a variety of analytical methods // Journal of Geoscience and Environment Protection. – 2014. – No. 2. – P. 153–158.
17. Bondareva L., Artamonova S. The relationship of mineral and geochemical composition to artificial radionuclide partitioning in Yenisei river sediments downstream from mining-and-chemical combine Rosatom // Natural Science. – 2011. – Vol. 3, no. 7. – P. 517–529.
18. Bondareva L.G., Bolsunovskii A. Ya. Speciation of artificial radionuclides ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ¹⁵²Eu, and ²⁴¹Am in bottom sediments of the Yenisei river // Radiochemistry. – 2008. – Vol. 50, no. 5. – P. 475–480.
19. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils / E. M. Korobova, V. G. Linnik, N. P. Chizhikova, et al. // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – No. 142. – P. 49–59.



20. **Korobova E. M., Linnik V. G., Brown J.** Distribution of artificial radioisotopes in granulometric and organic fractions of alluvial soils downstream from the Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine (KMCC), Russia // *Journal of Soils and Sediments*. – 2016. – Vol. 16, no. 4. – P. 1279–1287.

21. **Speciation** and Migration Behavior of Pu and Am in Floodplain Soils and Bottom Sediments of the Yenisei River / F. I. Pavlotskaya, T. A. Goryachenkova, I. E. Kazinskaya, et al. // *Radiochemistry*. – 2003. – Vol. 45, no. 5. – P. 524–531.

22. **Tessier A., Cambell P. G., Bisson M.** Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Analytical chemistry*. – 1979. – Vol. 151 – P. 232–258.

23. **Transport** and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment / T. Semizhon, S. Rollin, Y. Spasova, E. Klemt // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2010. – No. 101. – P. 385–402.

24. **Unique** diversity of radioactive particles found in the Yenisei river floodplain / A. Bolsunovsky, M. Melgunov, A. Chuguevskii, et al. // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7, no. 1. – P. 111–132.

25. **Vakulovskii S. M., Tertyshnik E. G., Kabanov A. I.** Radionuclide transport in the Yenisei river // *Atomic Energy*. – 2008. – Vol. 105, no. 5. – P. 367–375.

26. **Vertical** distribution of anthropogenic radionuclides in cores from contaminated floodplains of the Yenisey River / J. E. Brown, M. Dowdall, E. M. Korobova, et al. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2009. – No. 100. – P. 1109–1120.

References

1. Vakulovskiy S.M., Tertyshnik E.G., Kabanov A.I. [Radionuclide transport in the Yenisei River]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2008, vol. 105, no. 5, pp. 285–291. (In Russ.).

2. Gritchenko Z.G., Kuznetsov Yu.V., Legin V.K., et al. [Hot Particles of the Second Kind in Flood Lands of the Yenisei River]. *Radiokhimiya – Radiochemistry*, 2001, vol. 43, no. 6, pp. 563–565. (In Russ.).

3. Sukhorukov F.V., Degermendzhy A.G., Belolipetsky V.M., et al. *Zakonomernosti raspredeleniya i migratsii radionuklidov v doline reki Yenisey* [Distribution and migration of radionuclides in the Yenisei Plain]. Novosibirsk, Publ. House of SB RAS Geo Branch, 2004. 286 p. (In Russ.).

4. Zotina T.A. [The distribution of artificial radionuclides in the biomass of macrophytes of the Yenisei River]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2009, vol. 49, no. 6, pp. 729–737. (In Russ.).

5. Bolsunovsky A.Ya., Cherkezyan V.O., Barsukova K.V., Myasoedov B.F. [Investigation of high-activity soil samples and hot particles of the Yenisei River floodplain]. *Radiokhimiya – Radiochemistry*, 2000, vol. 42, no. 6, pp. 560–564. (In Russ.).

6. Kuznetsov Yu.V., Revenko Yu.A., Legin V.K., et al. [To assess the contribution of the Yenisei River to the total radioactive contamination of the Kara Sea]. *Radiokhimiya – Radiochemistry*, 1994, vol. 36, no. 6, pp. 546–559. (In Russ.).K

7. Linnik V.G. *Landshaftnaya differentsiatsiya tekhnogennykh radionuklidov* [Landscape Differentiation of Technogenic Radionuclides]. Moscow, RAS Publ., 2018. 372 p. (In Russ.).

8. Nosov A.V. [Investigation of the Migration Mechanisms of Radioactive Substances in the Yenisei Floodplain]. *Meteorologiya i gidrologiya – Russian Meteorology and Hydrology*, 1997, no. 12, pp. 84–91. (In Russ.).

9. Nosov A.V., Martynova A.M. [Analysis of the radiation environment on the Enisei river after decommissioning of straight through reactors at the Krasnoyarsk mining chemical complex]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 1996, vol. 81, issue 3, pp. 226–232. (In Russ.).

10. Bondareva L.G., Bolsunovsky A.Ya., Sukhorukov F.V., et al. Model assessment of the migration capability of transuranium radionuclides (²⁴¹Am and Pu isotopes) and ¹⁵²Eu in the system of bottom sediments – Yenisei River water by chemical fractionation technique. *Radiochemistry*, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 415–421.

11. Nosov A.V., Ashanin M.V., Ivanov A.B., Martynova A.M. [Radioactive contamination of the River Enisey due to discharges from Krasnoyarsk Mining and Chemical Corporation]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 1993, vol. 74, issue 2, pp. 144–150. (In Russ.).

12. Bolsunovsky A. Ya., Muratova E.N., Sukovaty A.G., et al. [Radioecological Monitoring of the Yenisei River and Cytological Characterization of a Submerged Aquatic Plant *Elodea canadensis*]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2007, vol. 47, no. 1, pp. 63–73. (In Russ.).

13. Timofeev V.A. [Technogenic radioactive contamination of alluvial deposits of the Yenisei River]. *Sbornik dokladov II mezhdunarodnoy radioekologicheskoy konferentsii* [Proceedings of the 2nd International Radioecological Conference]. Krasnoyarsk, 1995, pp. 165–171. (In Russ.).

14. Kuznetsov Yu.V., Legin V.K., Shishlov A.E., et al. [Transuranium elements in flood-land deposits of the Yenisei river]. *Radiokhimiya – Radiochemistry*, 2000, vol. 42, issue 5, pp. 470–477. (In Russ.).

15. Bolsunovsky A. Radionuclide speciation in sediments of the Yenisei River. *Radioprotection*, 2011, vol. 46, no. 6, pp. 195–198.

16. Bolsunovsky A., Melgunov M. Study of sediments and radioactive particles of the Yenisei River using a variety of analytical methods. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2014, no. 2, pp. 153–158.

17. Bondareva L., Artamonova S. The relationship of mineral and geochemical composition to artificial radionuclide partitioning in Yenisei river sediments downstream from mining-and-chemical combine Rosatom. *Natural Science*, 2011, vol. 3, no. 7, pp. 517–529.



18. Bondareva L.G., Bolsunovsky A.Ya. Speciation of artificial radionuclides ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , and ^{241}Am in bottom sediments of the Yenisei river. *Radiochemistry*, 2008, vol. 50, no. 5, pp. 475–480.
19. Korobova E.M., Linnik V.G., Chizhikova N.P., et al. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisei floodplain soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, no. 142, pp. 49–59.
20. Korobova E.M., Linnik V.G., Brown J. Distribution of artificial radioisotopes in granulometric and organic fractions of alluvial soils downstream from the Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine (KMCC), Russia. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 1279–1287.
21. Pavlotskaya F.I., Goryachenkova T.A., Kazinskaya I.E., et al. Speciation and Migration Behavior of Pu and Am in Floodplain Soils and Bottom Sediments of the Yenisei River. *Radiochemistry*, 2003, vol. 45, no. 5, pp. 524–531.
22. Tessier A., Cambell P.G., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*, 1979, vol. 15, pp. 232–258.
23. Semizhon T., Rollin S., Spasova Y., Klemt E. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2010, no. 101, pp. 385–402.
24. Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A., et al. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei river floodplain. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 111–132.
25. Vakulovskii S.M., Tertyshnik E.G., Kabanov A.I. Radionuclide transport in the Yenisei river. *Atomic Energy*, 2008, vol. 105, no. 5, pp. 367–375.
26. Brown J.E., Dowdall M., Korobova E.M., et al. Vertical distribution of anthropogenic radionuclides in cores from contaminated floodplains of the Yenisei River. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, no. 100, pp. 1109–1120.

© А. В. Чугуевский, М. С. Мельгунов,
И. В. Макарова, 2022