

УДК 550.424.4

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РЕКИ ЕНИСЕЙ

© 2024 г. А. Я. Болсуновский^{1,*}, Р. В. Борисов^{1,2}, Д. В. Дементьев¹

Представлено академиком РАН А.Г. Дегерменджи 12.03.2024 г.

Поступило 12.03.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принято к публикации 22.04.2024 г.

Исследования показали, что в донных отложениях (ДО) реки Енисей в зоне влияния Горно-химического комбината (ГХК) Росатома после остановки ядерного реактора в 2010 г. продолжают регистрироваться техногенные радионуклиды (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{241}Am). В работе впервые приведены данные сравнительного анализа потенциальной мобильности техногенных радионуклидов в поверхностных и нижних слоях ДО реки Енисей спустя длительное время после остановки ядерного реактора ГХК. Мобильность радионуклидов оценивалась известным методом последовательного химического фракционирования ДО. Для ^{60}Co впервые показано увеличение потенциальной мобильности в нижних слоях (более ранних по времени образования) по сравнению с верхними. Радионуклид ^{137}Cs сохраняет высокую прочность связывания с минеральным веществом ДО (близкую к 100%) независимо от фактора времени. Долговременное сохранение высокой потенциальной мобильности радионуклидов ^{241}Am и ^{152}Eu в ДО, а также увеличение со временем потенциальной мобильности ^{60}Co впервые позволяет рассматривать эти радионуклиды как потенциально биодоступные в экосистеме реки Енисей.

Ключевые слова: донные отложения, река Енисей, техногенные радионуклиды, последовательное химическое фракционирование, мобильные формы радионуклидов, фактор времени

DOI: 10.31857/S2686739724080059

Река Енисей, одна из крупнейших рек мира, в среднем течении содержит техногенные радионуклиды, в результате деятельности Горно-химического комбината (ГХК) Росатома в г. Железногорск Красноярского края [1–7]. В составе комбината ранее работали реакторный завод с тремя ядерными реакторами и радиохимический завод для выделения урана, оружейного плутония и продуктов деления. Все реакторы были остановлены в 1992 и 2010 гг., радиохимический завод – в 2015 году. В настоящее время на комбинате организовано производство МОХ-топлива и переработка отработанного ядерного топлива, которое сопровождается поступлением радионуклидов в пойму р. Енисей по информации ГХК [8]. Донные отложения (ДО) и гидробионты

реки Енисей содержат техногенные радионуклиды, в том числе трансурановые, не только вблизи комбината, но и на значительном расстоянии по течению реки [2, 3, 5–7, 9]. Для изучения мобильности техногенных радионуклидов и их биодоступности в водной экосистеме, необходимо знать физико-химические формы радионуклидов в ДО. Методы последовательной экстракции широко применяются для определения форм нахождения радионуклидов в реальных природных объектах в радиоэкологии и геохимии [10–13]. Такие методы основаны на селективном переводе в раствор органических и неорганических соединений, присутствующих в донных отложениях, в составе которых могут находиться радионуклиды. Как правило, по уменьшению миграционной подвижности радионуклидов выделяют формы их нахождения – водорастворимая, обменная и необменная. Знания о формах нахождения радионуклидов позволяют прогнозировать их поведение в объектах окружающей среды (почвах, донных отложениях) и оценивать возможные пути миграции радионуклидов. Метод

¹Институт биофизики, Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской Академии наук, Красноярск, Россия

²Институт химии и химической технологии, Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской Академии наук, Красноярск, Россия

*E-mail: radecol@ibp.ru

последовательного химического фракционирования ранее использовали для оценки мобильности радионуклидов в ДО реки Енисей в зоне влияния ГХК [5, 6, 14–16]. Химическое фракционирование проб поверхностных слоев ДО р. Енисей показало разную степень потенциальной мобильности техногенных радионуклидов в водной экосистеме – от максимальной для ^{241}Am и изотопов европия, до минимальной для ^{60}Co и ^{137}Cs [5, 6, 15]. Однако эти исследования проводили только в период работы ядерного реактора на ГХК до 2010 года. Очевидно, что после остановки реактора под действием факторов окружающей среды техногенные радионуклиды в ДО со временем могут изменять свою физико-химическую форму и, следовательно, потенциальную мобильность [10–12]. Фактор времени может проявиться не только для поверхностных проб ДО, но и для проб в глубине кернов ДО.

Цель работы – сравнительный анализ потенциальной мобильности долгоживущих техногенных радионуклидов в поверхностных и нижних слоях донных отложениях реки Енисей спустя длительное время после остановки ядерного реактора ГХК.

В качестве объектов исследования использовали два керна ДО (Е15-1 и Е15-2), отобранных в р. Енисей в 2022 году на удалении около 15 км от промплощадки ГХК, в протоке вблизи села Балчуг ($56^{\circ}27'56''$ с.ш., $93^{\circ}42'03''$ в.д.). Для проверки гипотезы о влиянии фактора времени (возраст образования слоя ДО) на мобильность техногенных радионуклидов в ДО для фракционирования использовали пробы верхних (0–7 и 7–10 см) и нижних (52–55 и 55–58 см) слоёв кернов Е15-1 и Е15-2. Во время работы реактора в 1997–2008, поверхностные пробы ДО из протоки возле села Балчуг уже исследовали с помощью химического фракционирования [5, 6, 15]. Вещественный и минеральный состав проб верхних (0–10 см) и нижних (52–61 см) слоёв ДО кернов Е15-1 и Е15-2, отобранных вблизи с. Балчуг в 2022 году, был определён методами рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового и химического (силикатного) анализов в 2023 году в Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск). Полученные значения концентраций основных элементов не отличались для нижних и верхних слоёв кернов ДО: доминировал кремний (57–60%), алюминий (13.0–13.7%), железо (5.0–5.7%); на уровне 2% были MgO , CaO , Na_2O и K_2O . Эти концентрации основных элементов совпадали с ранее полученными для ДО, отобранных вблизи с. Балчуг в 1997–2007 гг. [5].

За исследуемый период (1997–2022 гг.) отбора ДО можно отметить низкую вариабельность основных элементов проб ДО вблизи с. Балчуг.

Последовательное химическое фракционирование ДО проводили по общепринятой схеме Tessier [10] в модификации Semizhon [6]. Условия и реактивы для каждой стадии приведены в табл. 1. Путём последовательного квартования исходной пробы донных отложений, с контролем на содержание радионуклидов на каждой стадии, отбирали навеску 40 г. В этой навеске содержание основных измеряемых радионуклидов было идентичным исходной пробе и отсутствовали микрочастицы по данным гамма-спектрометрии. Пробу помещали в термостойкий стакан объёмом 2000 см^3 и добавляли 400 см^3 соответствующего свежеприготовленного экстрагирующего раствора (табл. 1). Суспензию механически перемешивали с использованием шейкера LOIP LS-110 в течение заданного времени (табл. 1), а затем разделяли фазы фильтрованием на обеззоленных фильтрах “синяя лента”. После каждой стадии осадок и фильтр промывали небольшими порциями горячей дистиллированной воды, доводя суммарный объём фракции до 500 см^3 . Извлечение органической фракции (фракция IV) проводили при нагревании до 85°C на шейкере при постоянном перемешивании путём добавления небольших порций пероксида водорода и азотной кислоты. Продолжительность стадии длилась не менее 3 ч. Выщелачивание радионуклидов, связанных с силикатами, проводили при нагреве осадка с 0.2 M раствором гидроксида натрия до 80°C и перемешивании в течение 1 ч. Нерастворимый осадок и фильтры сушили в сушильном шкафу и озоляли в муфельной печи при 400°C . После охлаждения осадок перетирали в фарфоровой ступке и помещали в геометрию для измерения.

В результате химического фракционирования ДО получали 5 жидких фракций (обменная, карбонаты, полуторные оксиды и гидроксиды металлов, органическое вещество, аморфные силикаты) и неразложившийся остаток (табл. 1). В обзоре методов химического фракционирования [13] отмечается, что в большинстве публикаций “биодоступным/мобильным пулом” радионуклидов являются все фракции химического фракционирования за исключением минерального остатка. Следовательно, в нашей работе оценка “биодоступного/мобильного пула” радионуклидов будет основана на первых пяти фракциях химического фракционирования. Авторы обзора [13] предлагают чаще использовать

Таблица 1. Схема последовательного химического фракционирования донных отложений

Фракции		Условия выщелачивания		
		Химические реагенты	Т, °С	Время, ч
I	Обменная	NH ₄ Ac (pH7)	25	24
II	Карбонаты	NH ₄ Ac (pH5)		8
III	Полуторные оксиды и гидроксиды Fe, Mn	NH ₂ OH·HCl в 25% HAc		3
IV	Органическое вещество	H ₂ O ₂ + HNO ₃ (до 0.05 M)	85	3
V	Аморфные силикаты	NaOH (0.2M)	80	1
VI остаток	Неразложившийся минеральный остаток	—	—	—

термин “потенциальная биодоступность” из-за влияния многих факторов (физических, химических и физиологических) на накопление радионуклидов живыми организмами.

Для измерения активности техногенных радионуклидов (включая трансурановый ²⁴¹Am) в исходных пробах и полученных фракциях ДО использовали гамма-спектрометр фирмы “Canberra” (США) со сверхчистым германиевым детектором. Время измерения проб варьировало от 40 000 до 90 000 секунд. Статистические расчёты проводили с помощью программы Excel MS Office. Относительная ошибка в определении активности радионуклидов в исходных пробах и полученных фракциях ДО после фракционирования была ≤30%.

Гамма-спектрометрический анализ проб ДО выявил наличие таких техногенных радионуклидов как ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ¹⁵²Eu и ²⁴¹Am, а также природный ⁴⁰K в пробах как верхних (0–7 и 7–10 см), так и нижних (52–55 и 55–58 см) слоях кернов (табл. 2). Удельная активность природного радионуклида ⁴⁰K существенно не меняется для верхних и нижних слоёв, что может свидетельствовать о близком минералогическом составе ДО по глубине кернов. Это согласуется с данными вещественного и минералогического анализа основных элементов ДО, как отмечалось ранее. При этом содержание техногенных радионуклидов в нижних слоях ДО многократно превышает содержание этих радионуклидов в верхних слоях. Удельная активность техногенных радионуклидов в верхних слоях ДО, отобранных в 2022 году (табл. 2), была существенно меньше активности радионуклидов в поверхностных пробах ДО, отобранных в 2008 году (до остановки реактора ГХК) [15]. Это свидетельствует о сокращении радиоактивных сбросов ГХК в р. Енисей после остановки реактора в 2010 году. Используя

изменение отношения активности радионуклидов ¹³⁷Cs/⁶⁰Co с глубиной кернов E15-1 и E15-2 были рассчитаны скорости осадконакопления, аналогично данным работы [17], и датировка слоёв этих кернов показала разницу в возрасте образования верхних (0–10 см) и нижних (52–58 см) слоёв приблизительно в 35 лет.

Детальное описание распределения радионуклидов по химическим фракциям верхних слоев кернов ДО (0–7 и 7–10 см) отбора 2022 года показало, что наибольшая доля ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs была в минеральном остатке (Фракция VI) – 80–100% (рис. 1). Минимальная доля экстрагируемого ¹³⁷Cs (1%) связана с карбонатами (Фракция II), а также с оксидами и гидроксидами металлов и органическим веществом (Фракции III и IV) – 2%. Для ⁶⁰Co суммарная доля радионуклида, связанного в ДО с оксидами и гидроксидами металлов и органическим веществом (Фракции III и IV) была значительно выше – до 20%. Ранее, в 2008 году проводили химическое фракционирование поверхностных слоёв ДО керна E15, отобранного вблизи с. Балчуг, и на рис. 1 представлены результаты распределения радионуклидов по фракциям [15]. Согласно этой работе, максимальная доля экстрагируемых ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs также была в минеральном остатке (Фракция VI) – 94% для ¹³⁷Cs и 88% для ⁶⁰Co (рис. 1), что совпадает с данными фракционирования ДО отбора 2022 года. При фракционировании ДО отбора 2008 года экстрагируемая доля мобильных форм ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co (Фракции I и II) была на уровне 1–2%, доля радионуклидов в потенциально мобильных формах (Фракции III и IV) – 3–7% [15]. Ранее в работе [6] отмечали низкую суммарную экстракционную способность ¹³⁷Cs (3–9%) и ⁶⁰Co (не более 20%) после пяти последовательных стадий фракционирования ДО реки Енисей. Таким образом, на основании настоящей работы и ранее опубликованных данных можно утверждать, что за

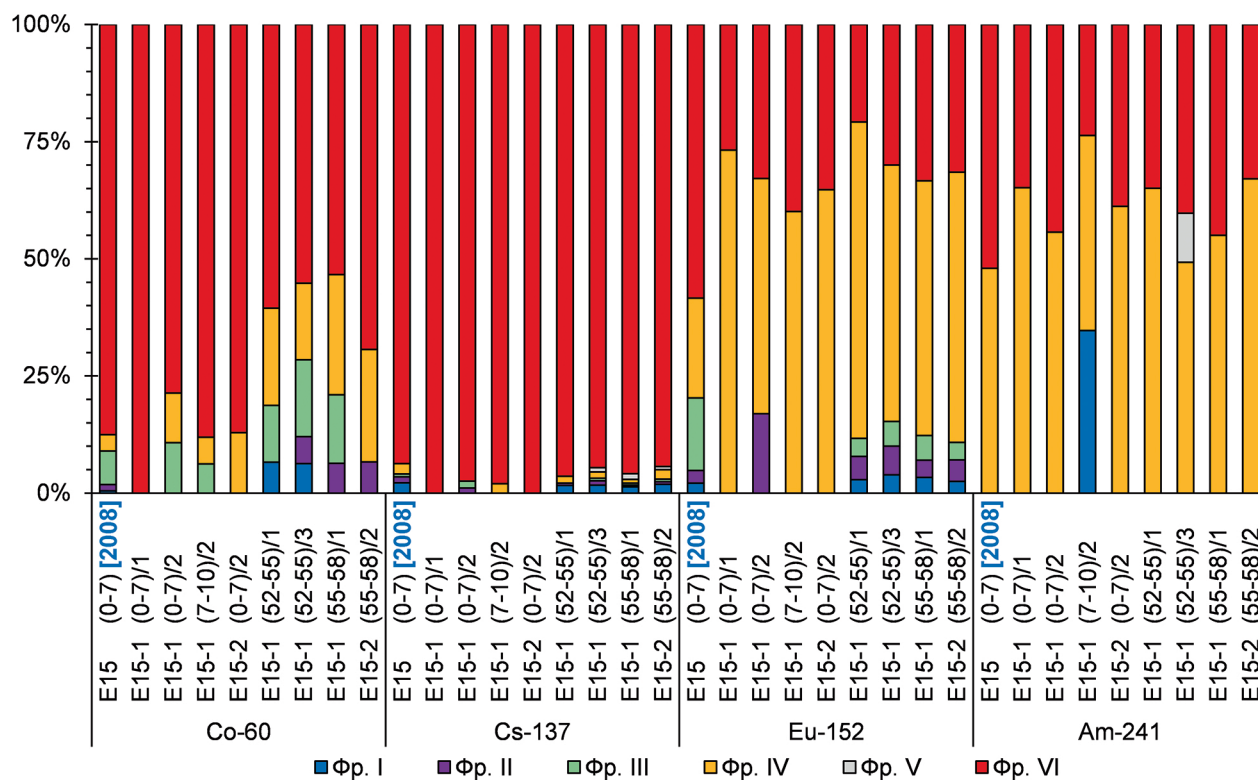


Рис. 1. Распределение радионуклидов по химическим фракциям (%) в верхних (0–7 и 7–10 см) и нижних (52–55 и 55–58 см) слоях кернов E15-1 и E15-2 ДО р. Енисей, отобранных в 2022 году вблизи села Балчуг. Для сравнения приведены данные работы [15] по фракционированию поверхностных проб ДО, отобранных в 2008 г. на этом же участке (кern E15, 2008).

период с 2008 по 2022 год доля необратимо связанного ^{137}Cs и ^{60}Co с минеральным веществом верхних слоев ДО реки Енисей не изменилась и остаётся высокой (рис. 1). В работе Манахова с соавторами [18] проводили последовательное фракционирование почв Чернобыльской зоны аварии по схеме Tessier [10] и получили 91% ^{137}Cs в минеральном остатке. Всё это доказывает прочное связывание ^{137}Cs и ^{60}Co в почвах и поверхностных слоях ДО.

Распределение ^{152}Eu по фракциям верхних слоёв кернов ДО существенно отличается от такового для ^{137}Cs и ^{60}Co (рис. 1). Во-первых, доля необратимо связанного ^{152}Eu в минеральном остатке (Фракция VI) кратно меньше – 30–40% и во-вторых, значительно возросла доля ^{152}Eu связанного с органическим веществом (Фракция IV) – до 70%. В одной из проб доля экстрагируемого ^{152}Eu в мобильной Фракции II составила 16% (рис. 1). По данным фракционирования поверхностных слоёв ДО отбора 2008 года [15], доля необратимо связанного ^{152}Eu во Фракции VI составляла 55%. При этом суммарная доля экстрагированного ^{152}Eu

в мобильных формах (Фракции I и II) была на уровне 5%, а доля ^{152}Eu связанного в ДО с оксидами и гидроксидами металлов и органическим веществом (Фракции III и IV) суммарно доходила до 35% (рис. 1). Аналогичные результаты были опубликованы ранее [6] для ДО р. Енисей до остановки реактора – доля связанного с органическим веществом ^{152}Eu доходила до 53%. Следовательно, за период с 2008 по 2022 г. доля прочно связанного ^{152}Eu в минеральном остатке ДО р. Енисей мало изменилась с 55 до 30–40%, но при этом увеличилась доля ^{152}Eu связанного с органическим веществом с 22 до 60–70%. Ранее проведённые исследования [5, 6, 15] по фракционированию проб ДО реки Енисей в 2004–2008 гг. показали близкую потенциальную мобильность ^{241}Am и ^{152}Eu . Доля необратимо связанного ^{241}Am с минеральным веществом ДО, согласно этим публикациям, варьировала от 20 до 50%, и была близка к доле связанного ^{152}Eu . В настоящей работе фракционирование верхних слоёв проб ДО, отобранных в 2022 году, показало долю ^{241}Am в минеральном остатке (Фракция VI) в интервале 25–45%, что совпадает

Таблица 2. Содержание радионуклидов в верхних (0–7 и 7–10 см) и нижних (52–55 и 55–58 см) слоях кернов E15-1 и E15-2 ДО р. Енисей, отобранных в 2022 году вблизи села Балчуг и используемых для химического фракционирования

Код пробы, слой в см	K-40, Бк/кг	Co-60, Бк/кг	Cs-137, Бк/кг	Eu-152, Бк/кг	Am-241, Бк/кг
E15 (0–7 см) (2008)*	500±28	200±12	200±15	128±4	6±1
E15-1 (0–7 см)/1	540±29	23±1	120±5	29±1	2.8±0.4
E15-1 (0–7 см)/2	520±28	15±1	110±5	28±1	5.8±0.5
E15-2 (0–7 см)/2	450±27	13±1	85±4	23±1	3.8±0.4
E15-1 (7–10 см)/2	495±30	41±2	110±5	40±2	2.7±0.5
E15-1 (52–55 см)/1	545±31	43±2	630±27	310±5	13±2
E15-1 (52–55 см)/3	520±29	40±2	590±26	255±5	28±2
E15-1 (55–58 см)/1	485±26	29±1	595±26	185±4	13±1
E15-2 (55–58 см)/2	530±29	37±1	520±23	255±5	17±1

Примечание. * – данные работы [15] по фракционированию ДО, отобранных в 2008 г вблизи с. Балчуг.

с долей прочно связанного ^{152}Eu в минеральном остатке – 30–40% (рис. 1), а также с долей ^{241}Am в этой же фракции ДО отбора 2008 года – 50% (рис. 1). При этом ^{241}Am , как и ^{152}Eu , в основном был связан с органическим веществом – от 40 до 65% и только в одном случае ^{241}Am был отмечен в мобильной обменной Фракции I (35%). Для понимания тесной связи ^{241}Am и ^{152}Eu с органическим веществом необходимо проводить исследование форм органического углерода в пробах ДО. Химическое фракционирование проб верхних слоёв ДО отбора 2022 года, по сравнению с фракционированием поверхностных проб 2004–2008 годов, не выявило существенного изменения доли необратимо связанных радионуклидов (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{241}Am) в минеральном остатке, но показало долговременное сохранение высокой потенциальной мобильности таких радионуклидов как ^{241}Am и ^{152}Eu .

Для нижних слоёв кернов ДО (52–55 и 55–58 см) доля ^{137}Cs в минеральном остатке (Фракция VI) была 94–96% и почти не изменилась по сравнению с долей ^{137}Cs в этой фракции для верхних слоёв (0–7 и 7–10 см) – 98–100% (рис. 1). Доля экстрагируемого ^{137}Cs в мобильных фракциях (I и II) не превышала 2%, а суммарная доля ^{137}Cs в потенциально мобильных фракциях (III, IV и V) также была на низком уровне 3%. В отличие от ^{137}Cs , доля ^{60}Co в минеральном остатке нижних слоёв ДО существенно уменьшилась до 50–70%, по сравнению с долей ^{60}Co в верхних слоях (80–100%). Уменьшение доли ^{60}Co в минеральном остатке нижних слоёв ДО связано с возрастанием доли ^{60}Co в мобильных фракциях (I и II) до 10%, а также возрастанием ^{60}Co в потенциально мобильной органической фракции

IV и фракции III (оксиды и гидроксиды металлов) до 25 и 15%, соответственно (рис. 1).

Распределение ^{152}Eu по фракциям в нижних слоях кернов ДО не отличается существенно от верхних слоёв (рис. 1). Так, доля прочно связанного ^{152}Eu в минеральном остатке проб нижних слоёв была 25–35%, что близко к ^{152}Eu в этой фракции в верхнем слое (30–40%). Максимальные доли ^{152}Eu связанного с органическим веществом (Фракция IV) для нижних и верхних слоёв кернов ДО составляли 65 и 70%, т.е. практически совпадали. Следует отметить, что в нижних слоях, в отличие от верхних слоёв кернов, несколько увеличилась доля ^{152}Eu в мобильных фракциях (I и II) до 7–10%. Это может свидетельствовать об увеличении мобильности ^{152}Eu в нижних слоях кернов. Но для ^{152}Eu , в отличие от ^{60}Co , эффект увеличения мобильности в нижних слоях не столь значителен и требует продолжения исследований. Распределение ^{241}Am по фракциям нижних слоёв кернов ДО также не отличается существенно от распределения ^{241}Am для верхних слоёв, аналогично данным для ^{152}Eu (рис. 1). Доля прочно связанного ^{241}Am в минеральном остатке проб нижних слоёв ДО была 35–45%, что близко к ^{241}Am в этой фракции верхнего слоя (25–45%). Основная доля экстрагируемого ^{241}Am в нижних слоях, как и в верхних слоях, была связана с органическим веществом ДО. При этом, в отличие от ^{152}Eu , для которого несколько увеличилась доля мобильных форм в нижних слоях керна ДО, для ^{241}Am – такой закономерности не наблюдалось. Это может быть связано с проблемой регистрации в мобильных фракциях ДО низкой активности ^{241}Am , которая была ниже предела обнаружения гамма-спектрометра.

Следовательно, высказанная гипотеза о влиянии фактора времени (разница в возрасте образования нижних и верхних слоёв кернов ДО составила 35 лет) на потенциальную мобильность радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am в ДО не получила достоверного подтверждения. Для ^{152}Eu эта гипотеза частично подтвердилась результатами увеличения мобильных форм (Фракции I и II) в нижних слоях кернов ДО. Высказанная гипотеза может быть справедлива только для ^{60}Co , поскольку в нижних более ранних по времени образования слоях ДО было выявлено как уменьшение доли ^{60}Co в минеральном остатке (Фракция VI), так и значительное увеличение доли ^{60}Co в мобильных и потенциально мобильных формах (Фракции I–IV) (рис. 1). Однако механизм трансформации формы ^{60}Co в неразложившемся минеральном остатке ДО спустя длительное время и переход ^{60}Co в мобильные и потенциально мобильные формы неизвестен и требует дополнительных исследований. Отмеченные случаи 100% доли радионуклидов ^{60}Co и ^{137}Cs в неразложившемся минеральном остатке (Фракция VI) верхних слоёв (рис. 1) могут быть объяснены присутствием труднорастворимых радиоактивных частиц, которые ранее были обнаружены в пойме реки Енисей [19]. Факт существенной разницы в удельной активности радионуклидов (^{241}Am , ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{60}Co) между верхними и нижними слоями кернов ДО (табл. 2), а также между поверхностными слоями ДО одного района отбора спустя 14 лет (табл. 2) не повлиял существенно на характер распределения радионуклидов по фракциям и потенциальную мобильность (рис. 1). Долговременное сохранение высокой потенциальной мобильности таких радионуклидов как ^{241}Am и ^{152}Eu , а также увеличение со временем потенциальной мобильности ^{60}Co в ДО позволяет рассматривать эти радионуклиды как потенциально биодоступные в экосистеме реки Енисей.

Таким образом, в результате использования метода последовательного химического фракционирования ДО получены новые оценки потенциальной мобильности техногенных радионуклидов (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{241}Am) в поверхностных и нижних слоях кернов ДО р. Енисей спустя 12 лет после остановки реактора. Высокая потенциальная мобильность радионуклидов ^{241}Am и ^{152}Eu сохраняется длительное время как для поверхностных слоёв кернов ДО, так и для нижних более возрастных слоёв ДО. Для ^{60}Co впервые показано увеличение его потенциальной мобильности в нижних более ранних по времени образования слоях ДО, по сравнению

с верхними слоями. Для радионуклида ^{137}Cs высокая прочность связывания с минеральным веществом ДО (близкая к 100%) не изменяется во времени. Сохранение длительное время высокой потенциальной мобильности отдельных техногенных радионуклидов в ДО, независимо от их удельной активности, необходимо учитывать при прогнозе биодоступности радионуклидов в экосистеме реки Енисей.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена частично за счёт средств гранта Российского научного фонда № 24-27-20003, Красноярского краевого научного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vakulovsky S. M., Kryshch I. I., Nikitin A. I., Savitsky Y. V., Malyshev S. U., Tertyshnik E. G.* Radioactive contamination of the Yenisei River // *J. Environ. Radioactivity*. 1995. V. 29. P. 225–236.
2. *Болсуновский А. Я., Ермаков А. И., Мясоедов Б. Ф., Новиков А. П., Соболев А. И.* Новые данные по содержанию трансурановых элементов в донных отложениях реки Енисей // *ДАН*. 2002. Т. 387. № 2. С. 233–236.
3. *Сухоруков Ф. В., Дегерменджи А. Г., Белолуцкий В. М., Болсуновский А. Я., Ковалев С. И., Косолапова Л. Г., Мельгунов М. С., Панута В. Ф.* Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал “Гео”, 2004. 286 с.
4. *Linnik V. G., Brown J. E., Dowlall M., Potapov V. N., Nosov A. V., Surkov V. V., Sokolov A. V., Wright S. M., Borghuis S.* Patterns and inventories of radioactive contamination of island sites of the Yenisey River, Russia // *J. Environ. Radioactivity*. 2006. V. 87. P. 188–208.
5. *Bolsunovsky A.* Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River // *Chemistry and Ecology*. 2010. 26 (6). P. 401–409.
6. *Semizhon T., Röllin S., Spasova, Y., Klemt E.* Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment // *J. Environ. Radioactivity*. 2010. V. 101, P. 385–402.
7. *Болсуновский А. Я., Дементьев Д. В., Вахрушев В. И.* Масштабный перенос техногенных радионуклидов по течению реки Енисей во время экстремального паводка 1966 года // *ДАН. Науки о земле*. 2021. Т. 498. № 2. С. 189–194.

8. Отчет по экологической безопасности ГХК за 2021 год. Железногорск. 48 с. https://sibghk.ru/images/pdf/eco/ghk_corep_2021.pdf
9. *Bolsunovsky A., Dementyev D., Trofimova E.* Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants // *J. Environ. Radioactivity*. 2020. V. 211. Art. № 106100.
10. *Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M.* Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Analytical Chemistry*. 1979. V. 51 (7). P. 844–851.
11. *Salbu B., Lind O. C., Skipperud L.* Radionuclide speciation and its relevance in environmental impact assessments // *J. Environ. Radioactivity*. 2004. V. 74. Issues 1–3. P. 233–242.
12. *Hlavay J., Prohaska T., Weisz M., Wenzel W. W., Stingeder G. J.* Determination of trace elements bound to soil and sediment fractions (IUPAC Technical Report) // *Pure and Applied Chemistry*. 2004. V. 76. No 2. P. 415–442. <https://doi.org/10.1351/pac200476020415>
13. *Bacon J. R., Davidson C. M.* Is there a future for sequential chemical extraction? // *Analyst*. 2008. V. 133. P. 25–46. DOI: 10.1039/b711896a.
14. *Skipperud L., Brown J., Fifield L. K., Oughton D. H., Salbu B.* Association of plutonium with sediments from the Ob and Yenisey rivers and estuaries // *J. Environ. Radioactivity*. 2009. V. 100. P. 290–300.
15. *Болсуновский А. Я., Дегерменджи А. Г.* Сравнение миграционной способности урана и техногенных радионуклидов в донных отложениях реки Енисей // *ДАН*. 2013. Т. 448. № 5. С. 571–575.
16. *Павлоцкая Ф. И., Горяченкова Т. А., Казинская И. Е., Новиков А. П., Кузнецов Ю. В., Легин В. К., Струков В. Н., Шишкунова Л. В., Мясоедов Б. Ф.* Формы нахождения и миграционное поведение Pu и Am в пойменных почвах и донных отложениях реки Енисей // *Радиохимия*. 2003. Т. 45. № 5. С. 471–478.
17. *Вахрушев В. И., Болсуновский А. Я., Деметьев Д. В.* Использование радиоизотопных методов для хронологии поступления Cs-137 в донные отложения реки Енисей // *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. 2023. Т. 33. Вып. 2. С. 178–190.
18. *Manakhov D. V., Emelyanov A. M., Karpukhin M. M., Lipatov D. N., Agapkina G. I., Mamikhin S. V.* Comparison of methods for assessment of radionuclide speciation in soils // *Biology Bulletin*. 2019. V. 46. P. 1671–1678.
19. *Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A., Lind O. C., Salbu B.* Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain // *Scientific Reports*. 2017. 7. Art. № 11132. P. 1–10.

NEW DATA ON POTENTIAL MOBILITY OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE YENISEI RIVER

A. Ya. Bolsunovsky^{a,#}, R. V. Borisov^{a,b}, D. V. Dementyev^a

^a*Institute of Biophysics, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center” Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^b*Institute of Chemistry and Chemical Technology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center” Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: radecol@ibp.ru*

The present study shows that after the shutdown of the nuclear reactor at the Mining-and-Chemical Combine (MCC) of Rosatom in 2010, artificial radionuclides (⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ¹⁵²Eu, and ²⁴¹Am) are still detected in the bottom sediments (BS) of the Yenisei River in the MCC affected area. The paper, for the first time, reports results of the study comparing potential mobility of artificial radionuclides in the surface and lower layers of the Yenisei BS long after the shutdown of the MCC nuclear reactor. The mobility of radionuclides was estimated using the well-known procedure of sequential extraction of BS. A new finding is that potential mobility of ⁶⁰Co is higher in the lower (older) BS layers compared with the upper ones. Radionuclide ¹³⁷Cs is strongly bound with mineral solids of BS (approaching 100%) regardless of the time factor. The new data showing that ²⁴¹Am and ¹⁵²Eu retain their high potential mobility in the BS over long periods and that ⁶⁰Co potential mobility increases over time suggest potential bioavailability of these radionuclides in the Yenisei River ecosystem.

Keywords: bottom sediments, the Yenisei River, artificial radionuclides, sequential extraction procedure, mobile forms of radionuclides, time factor