

## ГИДРОБИОЛОГИЯ/HYDROBIOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.61>

### ДОЛГОВРЕМЕННОЕ НАКОПЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ CS-137 И EU-152 ВОДНЫМИ РАСТЕНИЯМИ РЕКИ ЕНИСЕЙ В ЗОНЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Научная статья

Болсуновский А.Я.<sup>1,\*</sup>, Вахрушев В.И.<sup>2</sup>, Дементьев Д.В.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-7016-8592;

<sup>1, 2, 3</sup> Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (radecology[at]gmail.com)

#### Аннотация

Водная экосистема р. Енисей в зоне воздействия Горно-химического комбината (ГХК) ГК «Росатом» вблизи г. Железногорск Красноярского края содержит широкий перечень техногенных радионуклидов. Цель данной работы — анализ содержания радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в корнеобитаемом слое донных отложений (ДО) реки и в водных растениях, отобранных в зоне радиоактивного загрязнения вблизи ГХК в разные периоды времени с 2004 по 2022 год. Описана аппаратура и методика измерений. Показано, что максимальное накопление радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в биомассе водных растений в 2004 году обусловлено максимальной удельной активностью радионуклидов в корнеобитаемом слое ДО. По мере снижения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в корнеобитаемом слое ДО, отобранных в 2012 и 2022 годы, происходит снижение накопления радионуклидов биомассой растений. Рассчитанные коэффициенты накопления радионуклидов (КН) водными растениями показали, что КН  $^{137}\text{Cs}$  (0.04-0.05) больше КН  $^{152}\text{Eu}$  (0.02-0.03).

**Ключевые слова:** донные отложения, река Енисей, техногенные радионуклиды, водные растения, коэффициенты накопления.

### LONG-TERM ACCUMULATION OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES CS-137 AND EU-152 BY AQUATIC PLANTS OF THE YENISEY RIVER IN THE AREA OF RADIOACTIVE CONTAMINATION

Research article

Bolsunovsky A.Y.<sup>1,\*</sup>, Vakhrushev V.I.<sup>2</sup>, Dementyev D.V.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-7016-8592;

<sup>1, 2, 3</sup> Institute of Biophysics of SB RAS, Красноярск, Russian Federation

\* Corresponding author (radecology[at]gmail.com)

#### Abstract

The aquatic ecosystem of the Yenisei River in the area affected by the “Rosatom” State Corporation’s Mining and Chemical Complex (MCC) near Zhelezogorsk in the Krasnoyarsk Territory contains a wide range of man-made radionuclides. The aim of this study is to analyse the content of radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{152}\text{Eu}$  in the root zone of river bottom sediments (BS) and in aquatic plants collected in the area of radioactive contamination near the MCC at different times between 2004 and 2022. The equipment and measurement methods are described. It is shown that the maximum accumulation of radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{152}\text{Eu}$  in the biomass of aquatic plants in 2004 was due to the maximum specific activity of radionuclides in the root zone of bottom sediments. As the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{152}\text{Eu}$  in the root zone of BS, selected in 2012 and 2022, decreases, the accumulation of radionuclides by plant biomass decreases. The calculated radionuclide accumulation coefficients (AC) for aquatic plants showed that the AC for  $^{137}\text{Cs}$  (0.04–0.05) is greater than the AC for  $^{152}\text{Eu}$  (0.02–0.03).

**Keywords:** bottom sediments, Yenisei River, technogenic radionuclides, aquatic plants, accumulation coefficients.

#### Введение

Водная экосистема р. Енисей в зоне воздействия Горно-химического комбината (ГХК) ГК «Росатом» вблизи г. Железногорск Красноярского края содержит широкий перечень техногенных радионуклидов [1], [2], [5], [9]. Среди гидробионтов погруженные макрофиты наиболее интенсивно накапливают техногенные радионуклиды из воды и донных отложений (ДО). В период работы ядерных реакторов и радиохимического производства на ГХК в биомассе макрофитов регистрировали несколько десятков техногенных радионуклидов как цепной реакции, так и активационного происхождения [3]. По данным радиоэкологического мониторинга после остановки последнего ядерного реактора на ГХК в 2010 году масштаб радиационного воздействия на экосистему реки сократился. Об этом свидетельствует снижение удельной активности техногенных радионуклидов в пробах ДО и биомассе растений р. Енисей. В настоящее время в ДО и погруженных макрофитах по течению реки от ГХК отмечены такие гамма-излучающие техногенные радионуклиды как  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  [6], [7], [8]. Эти радионуклиды имеют относительно длительные периоды полураспада. Так, радионуклид  $^{60}\text{Co}$  имеет период полураспада 5,3 лет, для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  периоды полураспада — 30,2 и 13,5 лет, соответственно. Это значит, что как минимум десятки лет техногенные радионуклиды будут накапливаться укорененными водными растениями и бентосными организмами из ДО реки. Все это представляет потенциальную опасность для водной экосистемы.

По данным исследователей в период работы реакторного и радиохимического заводов ГХК до 2010 года содержание радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в поверхностных слоях ДО реки вблизи комбината составляло 1200 и 1000 Бк/кг, соответственно. В первые годы после остановки реактора ГХК (2012-2015 год) удельная активность

техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в ДО уменьшилась до величины 200–300 Бк/кг [6], [7]. Однако в последующие годы в период с 2016 по 2023 год наблюдалась значительная вариабельность этих радионуклидов в поверхностном слое ДО вблизи ГХК. Так, содержание  $^{137}\text{Cs}$  в поверхностных слоях ДО для двух районов отбора реки (вблизи сел Атаманово и Балчуг) изменялось от 100 до 300 Бк/кг, а  $^{152}\text{Eu}$  — от 40 до 250 Бк/кг. В этот период времени (2016–2023 год) содержание радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе погруженного макрофита *Elodea canadensis* (элодея канадская) для двух районов реки было в интервале от 6 до 15 Бк/кг, для  $^{152}\text{Eu}$  — 4 Бк/кг. Отмеченная значительная вариабельность содержания радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в поверхностных слоях ДО не позволяет получить надежные данные для коэффициентов накопления этих радионуклидов водным растением элодея [7], а также другими видами укорененных растений. Необходимо выяснить причину вариабельности содержания радионуклидов в поверхностных слоях, поскольку именно этот 20 см слой ДО является корнеобитаемым слоем. Также необходимы сравнительные данные по накоплению исследуемых техногенных радионуклидов в других видах водных растений, например, *Potamogeton lucens* (рдест блестящий).

Цель данной работы — анализ содержания техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в поверхностном корнеобитаемом слое донных отложений реки и в водных растениях, отобранных в зоне радиоактивного загрязнения вблизи ГХК в разные периоды времени с 2004 по 2022 год.

### Методы и принципы исследования

В результате многолетнего радиоэкологического мониторинга р. Енисей сотрудниками лаборатории радиоэкологии ИБФ СО РАН было отобрано значительное количество кернов донных отложений (ДО) как в ближней зоне влияния ГХК, так и в дальней зоне — на удалении сотен км от ГХК [5], [9]. В период с 2004 по 2022 год в ходе экспедиций были отобраны ДО и водные растения р. Енисей ниже по течению от ГХК вблизи села Балчуг, расположенного на расстоянии 98 км от г. Красноярска. Этот район отбора находится на расстоянии около 15 км по течению реки от места предполагаемого сброса ГХК. В отличие от предыдущих работ, где рассматривали только поверхностные ДО [6], [7], [8], в данном исследовании для анализа накопления радионуклидов водными растениями изучали керны ДО разной длины. Для отбора кернов ДО использовали стальные цилиндрические пробоотборники. Погруженные макрофиты были представлены двумя видами: \**Potamogeton lucens*\* (рдест блестящий) и \**Elodea canadensis*\* (элодея канадская). Эти виды ранее демонстрировали высокий уровень накопления техногенных радионуклидов в биомассе [3], [10], [11]. В работе, в дополнении к новым данным накопления растениями техногенных радионуклидов, включая  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$ , также использовали ранее опубликованные результаты накопления радионуклидов биомассой элодея [7] для двух районов отбора вблизи ГХК (села Атаманово и Балчуг).

Методика подготовки проб ДО и водных растений для аналитических исследований подробно приведена в работах [3], [5], [6]. Методика проведения гамма-спектрометрического анализа радионуклидного состава ДО и растений на спектрометре Canberra (США) описана в работах [7], [8], [9]. Время измерения проб доходило до 90000 секунд. На основании полученных данных по удельной активности радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  были рассчитаны коэффициенты накопления (КН) радионуклидов биомассой водных растений из донных отложений (КН = Удельная активность радионуклида в растении / Удельная активность радионуклида в поверхностном корнеобитаемом слое донных отложений). Статистические расчеты проводили с помощью программы Excel MS Office. Относительная ошибка в определении активности радионуклидов в пробах ДО была  $\leq 20\%$ .

### Основные результаты

Как уже отмечали, в настоящей работе для аналитических исследований были выбраны керны ДО, отобранные вблизи ГХК в районе с. Балчуг в период работы ядерного реактора ГХК (2004 год), а также после остановки реактора в 2012 и 2022 годы. В местах отбора этих кернов и в указанные даты также были отобраны пробы водных растений. Как следует из данных рис.1, керн ДО отбора 2004 года характеризуется по глубине двумя максимумами с удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  до 1600 Бк/кг. Один из этих максимумов  $^{137}\text{Cs}$  на глубине 10–15 см попадает в 20 см корнеобитаемый слой ДО. Керн ДО, отобранный в 2012 году, также характеризуется по глубине двумя максимумами с удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  до 1800 Бк/кг, аналогично керну 2004 года (рис.1). Но при этом ни один из этих максимумов  $^{137}\text{Cs}$  не попадает полностью в 20 см корнеобитаемый слой ДО. Только на границе корнеобитаемого слоя ДО на глубине 20 см в 2012 году отмечены повышенные значения  $^{137}\text{Cs}$ . Керн ДО, отобранный в 2022 году, является самым длинным, по сравнению с кернами отбора 2004 и 2012 года, и для него на глубине 46 см отмечен один максимум с удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  до 2200 Бк/кг (рис.1). Для этого керна содержание  $^{137}\text{Cs}$  в большинстве слоев ДО, включая корнеобитаемый слой, до глубины 35 см не превышает 200–300 Бк/кг. Следовательно, только в период работы последнего реактора ГХК в корнеобитаемом слое ДО было отмечено максимальное содержание  $^{137}\text{Cs}$  (рис.1). Уменьшение активности  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем корнеобитаемом слое ДО Енисея после остановки масштабных работ на ГХК логично объясняется двумя основными факторами: во-первых, снизилось поступление  $^{137}\text{Cs}$  в реку со взвешенными веществами, а во-вторых, процесс непрерывного осадконакопления приводит к тому, что вновь осаждённые слои с низкой активностью радионуклидов перекрывают «старые» слои с максимальной активностью  $^{137}\text{Cs}$  в ДО.

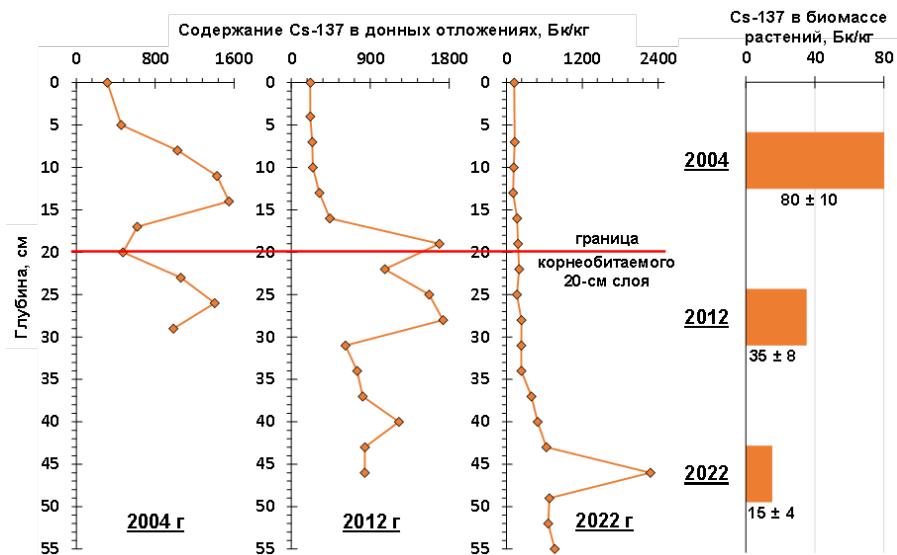


Рисунок 1 - Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в слоях ДО реки Енисей и накопление  $^{137}\text{Cs}$  биомассой водных растений на ближнем участке влияния ГХК (Балчуг) с 2004 по 2022 год

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.61.1>

Распределение  $^{152}\text{Eu}$  по глубине керна ДО, отобранного в 2004 году (рис.2), выглядит аналогичным распределению  $^{137}\text{Cs}$  по глубине в этом керне 2004 года (рис.1). Максимум  $^{152}\text{Eu}$  на глубине 12–18 см, как и  $^{137}\text{Cs}$ , попадает в 20 см корнеобитаемый слой ДО. При этом максимальная удельная активность  $^{152}\text{Eu}$  достигает 900 Бк/кг и существенно ниже активности  $^{137}\text{Cs}$  для этого керна (1600 Бк/кг). Для керна, отобранного в 2012 году, максимум  $^{152}\text{Eu}$ , как и для  $^{137}\text{Cs}$ , не попадает полностью в корнеобитаемый слой и только на границе этого слоя на глубине 20 см в 2012 году отмечены повышенные значения  $^{152}\text{Eu}$  (рис.2). Для этого керна отбора 2012 года максимальная удельная активность  $^{152}\text{Eu}$  также более низкая (700 Бк/кг), чем для  $^{137}\text{Cs}$  (1800 Бк/кг). Для длинного керна, отобранного в 2022 году, на глубине 50–53 см отмечен один максимум с удельной активностью  $^{152}\text{Eu}$  до 300 Бк/кг (рис.2). Для этого керна отбора 2022 года, как и для предыдущих кернов отбора 2004 и 2012 года, в распределении радионуклидов  $^{152}\text{Eu}$  и  $^{137}\text{Cs}$  по глубине наблюдается хорошее соответствие (рис.1 и 2). Так, для района отбора ДО вблизи ГХК (с. Балчуг) в период работы последнего реактора ГХК в верхнем корнеобитаемом слое ДО отмечены максимальные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$ . Спустя длительное время для керна, отобранного в 2022 году, эти слои максимальной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  логично были отмечены на глубине 46–50 см, поскольку были перекрыты вновь осаждёнными слоями ДО с низкой активностью радионуклидов. При этом максимальная активность  $^{137}\text{Cs}$  во всех кернах отбора с 2004 по 2022 год оставалась почти на одном уровне 1600–2200 Бк/кг, а для  $^{152}\text{Eu}$  максимальная активность в ДО в период с 2004 по 2022 год снизилась с 700–900 Бк/кг до 300 Бк/кг. Снижение активности  $^{152}\text{Eu}$  более чем в 2 раза за 18-летний период в глубоких слоях ДО возможно связано с естественным распадом радионуклида ( $T_{1/2} = 13,5$  лет). Для  $^{137}\text{Cs}$  вкладом естественного распада радионуклида в глубоких слоях ДО за этот период можно пренебречь, поскольку период полураспада  $^{137}\text{Cs}$  составляет 30,2 лет.

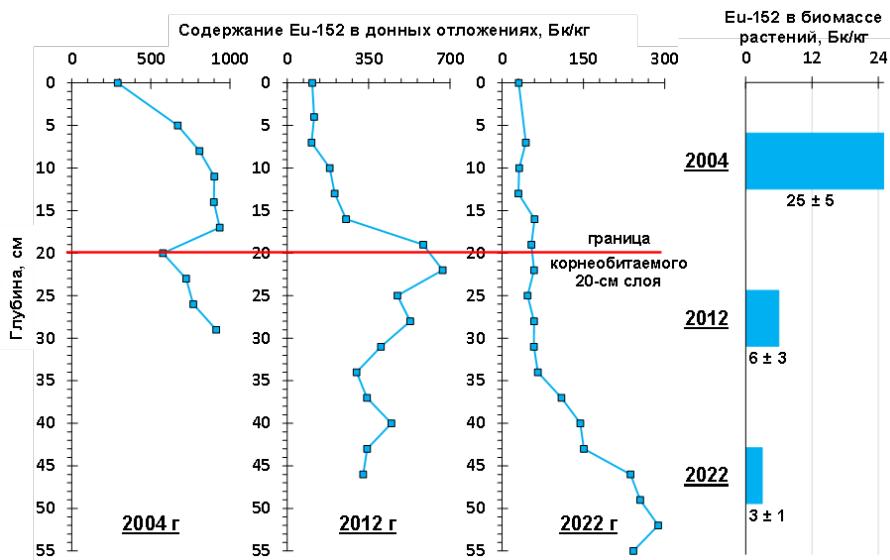


Рисунок 2 - Распределение удельной активности  $^{152}\text{Eu}$  в слоях ДО реки Енисей и накопление  $^{152}\text{Eu}$  биомассой водных растений на ближнем участке влияния ГХК (Балчуг) с 2004 по 2022 год

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.61.2>

Ранее отмечали, что в местах отбора кернов ДО и в указанные даты также были отобраны пробы водных растений. Погруженные макрофиты были представлены двумя видами *Potamogeton lucens* (рдест блестящий) и *Elodea canadensis* (элодея канадская), которые ранее показали высокий уровень накопления техногенных радионуклидов в биомассе [3], [6], [8], [11]. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в биомассе рдеста, отобранного в 2004 году в районе с. Балчуг, составило  $100 \pm 10$  и  $30 \pm 4$  Бк/кг, соответственно. После остановки реактора на ГХК в биомассе рдеста, отобранного в 2012 году, содержание радионуклидов уменьшилось —  $^{137}\text{Cs}$  до  $50 \pm 5$  Бк/кг и  $^{152}\text{Eu}$  до  $10 \pm 2$  Бк/кг. Для проб рдеста, отобранного в 2022 году, содержание  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  составило  $20 \pm 3$  и  $3 \pm 1$  Бк/кг, соответственно. В ранее опубликованной нашей работе приведены данные накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в биомассе элодеи, отобранный в двух районах вблизи ГХК (села Атаманово и Балчуг) в разные периоды времени (2004-2008, 2012-2015 и 2016-2023 г). Согласно результатам этой работы [7], удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в биомассе элодеи несколько ниже вышеуказанных данных для рдеста в периоды времени до остановки реактора и в первые годы после остановки реактора. В периоды времени отбора проб (2016–2023 годы) для элодеи и для рдеста (2022 год) — накопление  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в биомассе разных видов почти не отличалось. Незначительные различия в содержании радионуклидов в биомассе двух видов позволили нам интегрально оценить данные по максимальному накоплению  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$ , чтобы получить более общую картину динамики накопления радионуклидов в разные периоды времени. Как следует из рис.1, интегральное содержание  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе двух видов растений, отобранных в 2004 году, составило  $80 \pm 10$  Бк/кг. Для проб растений, отобранных в 2012 и в 2022 годы, интегральное содержание  $^{137}\text{Cs}$  было  $35 \pm 8$  Бк/кг и  $15 \pm 4$  Бк/кг, соответственно (рис.1). Из представленных на рис.1 данных следует, что максимальное накопление  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе растений обусловлено максимальной удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  в корнеобитаемом слое ДО. По мере снижения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в корнеобитаемом слое ДО, отобранных в 2012 и 2022 годы, происходит снижение накопления  $^{137}\text{Cs}$  биомассой растений.

Интегральное содержание  $^{152}\text{Eu}$  в биомассе двух видов растений, отобранных в 2004 году, составило  $25 \pm 5$  Бк/кг (рис.2), что было значительно ниже данных для  $^{137}\text{Cs}$  ( $80 \pm 10$  Бк/кг) в этот период на рис.1. Для проб растений, отобранных в 2012 и в 2022 годы, интегральное содержание  $^{152}\text{Eu}$  было  $6 \pm 3$  Бк/кг и  $3 \pm 1$  Бк/кг, соответственно (рис.2). Как и в случае с накоплением  $^{137}\text{Cs}$ , максимальное накопление  $^{152}\text{Eu}$  в биомассе растений обусловлено максимальной удельной активностью  $^{152}\text{Eu}$  в корнеобитаемом слое ДО. По мере снижения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в корнеобитаемом слое ДО, отобранных в 2012 и 2022 годы, происходит снижение накопления радионуклидов биомассой растений (рис.1 и 2).

На основании полученных данных по удельной активности радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в корнеобитаемом слое ДО и в биомассе растений (рис.1 и 2) были рассчитаны коэффициенты накопления радионуклидов (КН). Из данных таблицы 1 следует, что КН  $^{137}\text{Cs}$  водными растениями, отобранными в разные периоды времени с 2004 по 2022 год, почти не меняется и составляет 0,04-0,05. Рассчитанный КН  $^{152}\text{Eu}$  водными растениями, отобранными в разные периоды времени с 2004 по 2022 год, также почти не меняется и составляет 0,02-0,03 (табл.1). Более низкий КН  $^{152}\text{Eu}$  водными растениями, по сравнению с КН  $^{137}\text{Cs}$ , может объясняться тем, что  $^{152}\text{Eu}$  не является для растений биогенным элементом и не имеет элемента-аналога как в случае с  $^{137}\text{Cs}$ . В настоящей работе наблюдается соответствие (табл.1) между КН интегрального  $^{152}\text{Eu}$ , полученным для биомассы двух исследованных видов растений, и КН  $^{152}\text{Eu}$ , рассчитанным для биомассы элодеи. Однако приведенные в работе [7] и в табл.1 данные по КН  $^{137}\text{Cs}$  для элодеи из районов Атаманово-Балчуг оказались выше (0,07), в сравнении с нашими данными для биомассы двух видов растений (КН  $^{137}\text{Cs} = 0,04-0,05$ ). Следует отметить, что содержание  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе рдеста превышало содержание  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе элодея, и поэтому КН  $^{137}\text{Cs}$  для рдеста должен быть выше КН  $^{137}\text{Cs}$  для элодеи, но не наоборот. Для периода времени 2020-2023 год в отобранный биомассе элодея не удалось получить точные значения КН  $^{137}\text{Cs}$  и КН  $^{152}\text{Eu}$  (<0,1 в табл.1), однако наши расчеты КН  $^{137}\text{Cs}$  и КН  $^{152}\text{Eu}$  для растений 2022 года дают надежные значения (табл.1). За

длительный период времени отбора проб растений и ДО с 2004 по 2022 год коэффициенты накопления радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  биомассой водных растений остаются почти неизменными (табл.1), что свидетельствует о правильном подходе при расчете КН с использованием фиксированного уровня корнеобитаемого слоя ДО. Ранее наблюдаемая вариабельность содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в поверхностных слоях ДО после остановки реактора (см. [7]) может быть обусловлена погрешностью в установлении глубины отбора ДО относительно корнеобитаемого слоя (0–20 см).

Таблица 1 - Максимальные коэффициенты накопления (КН) техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в биомассе водных растений, отобранных в ближней зоне влияния ГХК в разные периоды с 2004 по 2023 год

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.61.3>

Район, дата отбора	Дата отбора	КН	
		$^{137}\text{Cs}$	$^{152}\text{Eu}$
Балчуг	2004	0,05	0,03
Атаманово-Балчуг*	2004-2008*	0,07	0,02
Балчуг	2012	0,04	0,02
Атаманово-Балчуг*	2012-2015*	0,07	0,03
Балчуг	2022	0,05	0,03
Атаманово-Балчуг*	2020-2023*	<0,1	<0,1

Примечание: \* – использованы данные по КН для элодеи из работы [7]

Ранее водные растения (макрофиты) использовали для мониторинга радиоактивного загрязнения водоемов. Так, в работе авторов [10] для мониторинга водной экосистемы пруда-охладителя Игналинской АЭС (Литва) использовали 9 видов растений (*Cladophora sp.*, *Nittelopsis obtuse*, *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton lucens*, *Potamogeton crispus*, *Elodea canadensis*, *Nuphar luteum*). Среди отмеченных выше растений, активно накапливающих  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , были и макрофиты р. Енисей (*Potamogeton lucens* и *Elodea canadensis*). Для одной из рек в Греции интенсивность накопления  $^{137}\text{Cs}$  шестью водными растениями была ранжирована следующим образом: *Ceratophyllum demersum* > *Myriophyllum spicatum* > *Paspalum pasalodes* > *Cladophora glomerata* > *Cyperus longus* > *Potamogeton nodosus*. В этих работах не приводятся коэффициенты накопления (КН)  $^{137}\text{Cs}$  и других радионуклидов из донных отложений. На основании приведенных в работе [11] значений активности  $^{137}\text{Cs}$  в растениях (стебли и листья) и донных отложениях водоемов можно рассчитать коэффициенты КН  $^{137}\text{Cs}$ , которые составили 0,05 для стеблей и 0,1 для листьев водных растений. В наших исследованиях не было разделения растений на разные части, но полученные нами КН  $^{137}\text{Cs}$  биомассой растений редст и элодея р. Енисей (0,04–0,07) не отличаются значительно от данных используемой выше работы. Это служит дополнительным подтверждением того, что наш подход к расчету КН с фиксированным уровнем корнеобитаемого слоя ДО оказался правильным.

### Заключение

Проведенный анализ содержания двух техногенных радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$ ) в кернах донных отложений (ДО) р. Енисей, отобранных вблизи ГХК в разные периоды времени показал, что максимальная активность  $^{137}\text{Cs}$  во всех кернах отбора с 2004 по 2022 год оставалась на одном уровне 1600–2200 Бк/кг, а для  $^{152}\text{Eu}$  максимальная активность в ДО в период с 2004 по 2022 год снизилась с 700–900 Бк/кг до 300 Бк/кг. При этом максимумы удельной активности двух радионуклидов в период работы последнего реактора на ГХК в 2004 году были в верхнем (корнеобитаемом) слое ДО (0–20 см), но спустя длительное время (в 2022 году) максимумы радионуклидов были отмечены в нижней части кернов на глубине 45–50 см. Уменьшение активности  $^{137}\text{Cs}$  в корнеобитаемом слое ДО р. Енисей в периоды 2012 и 2022 годы (после остановки масштабных работ на ГХК) обусловлено процессом перекрытия «старых» слоев с максимальным содержанием  $^{137}\text{Cs}$  вновь аккумулированными менее радиоактивными осадками.

Максимальное накопление радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  ( $80 \pm 10$  Бк/кг) и  $^{152}\text{Eu}$  ( $25 \pm 5$  Бк/кг) в биомассе водных растений в 2004 году обусловлено максимальной удельной активностью радионуклидов в корнеобитаемом слое ДО. По мере снижения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в корнеобитаемом слое ДО, отобранных в 2012 и 2022 годы, происходит снижение накопления радионуклидов биомассой растений. Рассчитанные коэффициенты накопления радионуклидов (КН) водными растениями показали, что КН  $^{137}\text{Cs}$  (0,04–0,05) больше КН  $^{152}\text{Eu}$  (0,02–0,03). В разные периоды времени с 2004 по 2022 год коэффициенты накопления радионуклидов водными растениями почти не меняются. В дальнейшем ограничение отбора проб ДО только корнеобитаемым слоем (0–20 см) позволит повысить достоверность определения коэффициентов накопления радионуклидов водными растениями.

## Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0024).

## Конфликт интересов

Не указан.

## Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

## Funding

The study was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FWES-2024-0024).

## Conflict of Interest

None declared.

## Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

## Список литературы / References

1. Болсуновский А.Я. Новые данные по содержанию трансурановых элементов в донных отложениях реки Енисей / А.Я. Болсуновский, А.И. Ермаков, Б.Ф. Мясоедов [и др.] // Доклады Академии наук. — 2002. — Т. 387. — № 2. — С. 233–236.
2. Сухоруков Ф.В. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Ф.В. Сухоруков, А.Г. Дегерменджи, В.М. Белолипецкий [и др.]. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео», 2004. — 287 с.
3. Болсуновский А.Я. Радиоактивное загрязнение водных организмов реки Енисей в зоне влияния Горнохимического комбината / А.Я. Болсуновский, А.Г. Суковатый // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2004. — Т. 44. — № 3. — С. 393–398.
4. Semizhon T. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment / T. Semizhon, S. Röllin, Y. Spasova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — 2010. — Vol. 101. — P. 385–402.
5. Bolsunovsky A. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River / A. Bolsunovsky // Chemistry and Ecology. — 2010. — Vol. 26. — № 6. — P. 401–409.
6. Bolsunovsky A. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants / A. Bolsunovsky, D. Dementyev, E. Trofimova // Journal of Environmental Radioactivity. — 2020. — Vol. 211. — № 106100. — P. 1–12.
7. Болсуновский А.Я. Накопление техногенных радионуклидов водным растением *Elodea canadensis* и выявление цитогенетических эффектов / А.Я. Болсуновский, Е.А. Трофимова, А.С. Дементьева // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 8 (146). — С. 1–9.
8. Медведева М.Ю. Цитогенетические нарушения у водного растения *Elodea canadensis* в зоне техногенного загрязнения р. Енисей / М.Ю. Медведева, А.Я. Болсуновский, Т.А. Зотина // Сибирский экологический журнал. — 2014. — Т. 21. — № 4. — С. 561–572.
9. Bolsunovsky A.Ya. Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River / A.Ya. Bolsunovsky, V.I. Vakhrushev, D.V. Dementyev // Limnology and Freshwater Biology. — 2024. — № 4. — P. 274–279.
10. Nedveckaite T. Exposure of biota in the cooling pond of Ignalina NPP: hydrophytes / T. Nedveckaite, V. Filistovic, D. Marciulioniene [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — 2007. — Vol. 97. — P. 137–147.
11. Sawidis T. Cesium-137 concentrations in sediments and aquatic plants from the Pinios River, Thessalia (Central Greece) / T. Sawidis, D. Bellos, L. Tsikritzis // Water, Air, & Soil Pollution. — 2011. — Vol. 221. — P. 215–222.

## Список литературы на английском языке / References in English

1. Bolsunovsky A.Y. Novye dannye po soderzhaniyu transuranovykh ehlementov v donnykh otlozheniyakh reki Enisej [New data on the content of transuranic elements in bottom sediments of the Yenisei River] / A.Y. Bolsunovsky, A.I. Ermakov, B.F. Myasoedov [et al.] // Doklady Akademii nauk [Reports on Earth Sciences]. — 2002. — Vol. 387. — № 2. — P. 233–236. [in Russian]
2. Sukhorukov F.V. Zakonomernosti raspredeleniya i migrantsii radionuklidov v doline reki Enisej [Distribution and migration of radionuclides in the Yenisei River Valley] / F.V. Sukhorukov, A.G. Degermendzhy, V.M. Belolipetsky [et al.]. — Novosibirsk: Publishing House SB RAS. Branch «Geo», 2004. — 287 p. [in Russian]
3. Bolsunovsky A.Y. Radioaktivnoe zagryaznenie vodnykh organizmov reki Enisej v zone vliyaniya Gorno-khimicheskogo kombinata [Radioactive contamination of aquatic organisms of the Yenisei River in the area affected by the activity of the mining-and-chemical combine] / A.Y. Bolsunovsky, A.G. Sukovaty // Radiatsionnaya biologiya. Radioehkologiya [Radiation biology. Radioecology]. — 2004. — Vol. 44. — № 3. — P. 393–398. [in Russian]
4. Semizhon T. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment / T. Semizhon, S. Röllin, Y. Spasova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — 2010. — Vol. 101. — P. 385–402.
5. Bolsunovsky A. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River / A. Bolsunovsky // Chemistry and Ecology. — 2010. — Vol. 26. — № 6. — P. 401–409.
6. Bolsunovsky A. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants / A. Bolsunovsky, D. Dementyev, E. Trofimova // Journal of Environmental Radioactivity. — 2020. — Vol. 211. — № 106100. — P. 1–12.
7. Bolsunovsky A.Y. Nakoplenie tekhnogennykh radionuklidov vodnym rasteniem *Elodea canadensis* i vyyavlenie tsitogeneticheskikh effektov [Accumulation of anthropogenic radionuclides by the aquatic plant *Elodea canadensis* and

detection of cytogenetic effects] / A.Y. Bolsunovsky, E.A. Trofimova, A.S. Dementyeva // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2024. — № 8 (146). — P. 1–9. [in Russian]

8. Medvedeva M.Yu. Tsitogeneticheskie narusheniya u vodnogo rasteniya Elodea canadensis v zone tekhnogenennogo zagryazneniya r. Enisej [Cytogenetic abnormalities in aquatic plant Elodea canadensis in anthropogenic contamination zone of Yenisei River] / M.Yu. Medvedeva, A.Y. Bolsunovsky, T.A. Zotina // Sibirskij ekologicheskij zhurnal [Siberian Ecological Journal]. — 2014. — Vol. 21. — № 4. — P. 561–572. [in Russian]

9. Bolsunovsky A.Ya. Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River / A.Ya. Bolsunovsky, V.I. Vakhrushev, D.V. Dementyev // Limnology and Freshwater Biology. — 2024. — № 4. — P. 274–279.

10. Nedveckaite T. Exposure of biota in the cooling pond of Ignalina NPP: hydrophytes / T. Nedveckaite, V. Filistovic, D. Marciulioniene [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — 2007. — Vol. 97. — P. 137–147.

11. Sawidis T. Cesium-137 concentrations in sediments and aquatic plants from the Pinios River, Thessalia (Central Greece) / T. Sawidis, D. Bellos, L. Tsikritzis // Water, Air, & Soil Pollution. — 2011. — Vol. 221. — P. 215–222.