

НАКОПЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ВОДНЫМ РАСТЕНИЕМ *ELODEA CANADENSIS* И
ВЫЯВЛЕНИЕ ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Научная статья

Болсуновский А.Я.^{1,*}, Трофимова Е.А.², Дементьева А.С.³²ORCID : 0000-0001-7511-4916;³ORCID : 0000-0003-1786-7893;^{1,2,3}Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Российская Федерация

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

Аннотация

Водная экосистема реки Енисей содержит повышенные концентрации техногенных радионуклидов в зоне радиоактивного загрязнения вблизи Горно-химического комбината (ГХК) (г. Железногорск). Цель данной работы – оценка накопления техногенных радионуклидов погруженным макрофитом *Elodea canadensis* и выявление возможных цитогенетических эффектов в растениях, отобранных в период после остановки последнего ядерного реактора ГХК. В работе приведены данные по удельной активности радионуклидов в донных отложениях и растениях, отобранных в разных районах реки. Проведено ранжирование коэффициентов накопления радионуклидов биомассой элодеи. Отмечена тенденция снижения доли клеток с цитогенетическими нарушениями в корнях элодеи для районов вблизи ГХК после остановки ядерного реактора. Анализ данных показал, что суммарный уровень цитогенетических нарушений и частота отдельных типов нарушений в клетках корней элодеи, отобранной из районов вблизи ГХК, достоверно отличались от аналогичных параметров элодеи из фоновых районов.

Ключевые слова: донные отложения, техногенные радионуклиды, *Elodea canadensis*, коэффициенты накопления, хромосомные аберрации.

ACCUMULATION OF ANTHROPOGENIC RADIONUCLIDES BY THE AQUATIC PLANT *ELODEA*
CANADENSIS AND DETECTION OF CYTOGENETIC EFFECTS

Research article

Bolsunovsky A.Y.^{1,*}, Trofimova E.A.², Dementyeva A.S.³²ORCID : 0000-0001-7511-4916;³ORCID : 0000-0003-1786-7893;^{1,2,3}Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

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

Abstract

The aquatic ecosystem of the Yenisei River contains elevated concentrations of anthropogenic radionuclides in the radioactive contamination zone near the mining and chemical plant (MCP) (Zheleznogorsk). The aim of this work is to evaluate the accumulation of anthropogenic radionuclides by the submerged macrophyte *Elodea canadensis* and to identify possible cytogenetic effects in plants sampled in the period after the shutdown of the last nuclear reactor of the MCP. The data on specific activity of radionuclides in bottom sediments and plants sampled in different areas of the river are presented in the work. The ranking of radionuclide accumulation coefficients by elodea biomass was carried out. A tendency of decrease in the share of cells with cytogenetic disorders in elodea roots for the areas near the MCP after the nuclear reactor shutdown was noted. The data analysis showed that the total level of cytogenetic disorders and the frequency of individual types of disorders in the cells of elodea roots sampled from areas near the MCP differed significantly from the similar parameters of elodea from background areas.

Keywords: bottom sediments, anthropogenic radionuclides, *Elodea canadensis*, accumulation factors, chromosomal aberrations.

Введение

Водные растения широко используются в биомониторинге водных экосистем, подверженных техногенному загрязнению. Среди водных растений особое внимание исследователей привлекают погруженные макрофиты [7], которые могут интенсивно накапливать поллютанты как из донных отложений, так и из воды. Погруженный макрофит элодея (*Elodea canadensis*) ранее использовался для целей биомониторинга [2], [5], [14], а также в токсикологических экспериментах [10], [13], [15]. В работах по радиоэкологическому мониторингу реки Енисей в зоне радиоактивного загрязнения вблизи Горно-химического комбината (ГХК) госкорпорации «Росатом» (г. Железногорск) отмечена высокая аккумулялирующая способность погруженных макрофитов, в биомассе которых регистрировали до 30 техногенных радионуклидов, характерных для сбросов ГХК [1], [8]. Пробы элодеи, отобранные в реке Енисей в период работы ядерного реактора ГХК, характеризовались не только высоким содержанием техногенных радионуклидов в биомассе, но и высоким уровнем цитогенетических нарушений в корневой меристеме, относительно образцов, произрастающих выше по течению от комбината [2], [4], [5], [8]. Увеличение частоты цитогенетических нарушений (аббераций) отражает отклик организма на воздействие экологических факторов различной природы, в том числе радиоактивного загрязнения [3], [11], [12].

В связи с остановкой реакторов и сокращением масштаба радиохимического производства на ГХК, уровень радиационного воздействия на пойму реки уменьшился, о чём свидетельствует снижение накопления радионуклидов в пробах воды, донных отложений и биомассе растений р. Енисей [8]. Вследствие этого произошло снижение уровня

цитогенетических нарушений в корнях элодеи, относительно уровня отмеченного в первые годы после остановки реактора (2011-2012 гг.) [4]. В настоящее время в донных отложениях по течению реки от ГХК отмечены долгоживущие техногенные радионуклиды, достигающие категории низкоактивных радиоактивных отходов [9], что позволяет считать их основным фактором радиационного влияния на цитогенетические параметры укоренённых макрофитов.

Цель данной работы – оценка накопления техногенных радионуклидов погруженным макрофитом *Elodea canadensis Michx* и выявление возможных цитогенетических эффектов в растениях, отобранных в период после остановки последнего ядерного реактора ГХК (после 2010 года).

Методы и принципы исследования

Пробы растений и донных отложений отбирали в р. Енисей на участке протяжённостью до 100 км вниз по течению реки от г. Красноярск до с. Балчуг в период с 2014 по 2023 гг. Данный участок включает ближнюю зону наблюдения ГХК, в рамках которой были выбраны следующие районы отбора проб: сёла Атаманово и Балчуг в зоне влияния радиоактивных сбросов ГХК; г. Красноярск, с. Есаулово и с. Шивера – фоновые районы, расположенные выше по течению от ГХК, характеризующиеся отсутствием загрязнений радиационной природы (Табл.1). Села Атаманово и Балчуг расположены на расстоянии 5 и 15 км по течению реки от района предполагаемого сброса ГХК. Ранее в 1999-2008 годах пробы водных растений, включая элодею, были отобраны вблизи этих двух сел и проанализированы на содержание радионуклидов [2], [8]. Пробы водных растений после отбора в лаборатории промывали водой, высушивали при комнатной температуре и измельчали. Для некоторых гамма-спектрометрических исследований пробы растений озоляли в муфельной печи при температуре 450°C. Пробы донных отложений отбирали из корнеобитаемого слоя глубиной до 20 см и высушивали до постоянной массы при 105°C. Удельную активность радионуклидов в биомассе элодеи и донных отложений измеряли на гамма-спектрометре со сверхчистым германиевым детектором (Canberra, США). Спектры анализировали с помощью программного обеспечения Genie-2000 (Canberra, США). Результаты приведены в Бк/кг сухой массы. На основании полученных данных по удельной активности радионуклидов были рассчитаны коэффициенты накопления радионуклидов биомассой водных растений из донных отложений ($KH = \text{Удельная активность радионуклида в растении} / \text{Удельная активность радионуклида в донных отложениях}$).

Таблица 1 - Районы отбора проб элодеи и донных отложений р. Енисей

Населённый пункт	Расстояние от г. Красноярск, км	Период отбора
г. Красноярск, (фоновый)	0	2014-2022
с. Есаулово, (фоновый)	45	2014-2018
с. Шивера, (фоновый)	80	2022
с. Атаманово	88	2014-2022
с. Балчуг	98	2014-2023

Для оценки радиотоксичности использовали цитогенетические параметры корневой меристемы элодеи канадской *Elodea canadensis Michx.*, отобранной в разных районах р. Енисей (Табл. 1). Корни фиксировали непосредственно после отбора в фиксаторе Кларка (3:1) в течение 24 часов, затем готовили давленные препараты и производили учёт клеток с цитогенетическими нарушениями по стандартной методике, описанной ранее [10]. Регистрировались следующие типы аномалий: фрагменты и мосты (одинарные, двойные и множественные), блуждающие хромосомы, множественные нарушения (наличие в клетке нескольких аномалий разных типов). К категории «прочее» относили трудноклассифицируемые и редко встречающиеся аномалии (микроядра, многополюсный митоз, асимметричное расхождение хромосом, агглютинация). Частоту клеток с цитогенетическими аномалиями оценивали как отношение числа aberrантных клеток к общему числу просмотренных ана-телофазных клеток. Долю клеток с определённым типом аномалий рассчитывали как отношение числа клеток с данным типом aberrаций к общему числу аномальных клеток. Данные по содержанию техногенных радионуклидов в поверхностном слое донных отложений и цитогенетические параметры элодеи для отдельных районов были усреднены по временным интервалам: 2016-2019, 2020-2023, 2012-2022.

Статистический анализ осуществляли с помощью программ Microsoft Office Excel 2013 и PAST 4.11. На основании распределения наличие различий между сравниваемыми группами в пределах одного временного интервала определяли с помощью критерия Краскела-Уоллиса. Парное сравнение совокупностей производили при помощи U-критерия Манна-Уитни с поправкой Холма. Заданный уровень значимости составлял 0,05. В таблицах представлены средние значения со стандартной ошибкой $M \pm SE$.

Основные результаты

Оценка накопления техногенных радионуклидов в биомассе *Elodea canadensis*, отобранной в разных районах р. Енисей после остановки последнего реактора ГХК. В пробах донных отложений фоновых районов (Красноярск, Есаулово, Шивера), расположенных выше по течению реки относительно района размещения ГХК, из техногенных радионуклидов обнаружен только ^{137}Cs с удельной активностью не более 5 Бк/кг (табл. 2). Донные отложения в зоне влияния ГХК (Атаманово, Балчуг) содержали широкий спектр техногенных гамма-излучающих радионуклидов, среди которых основными являлись ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu и трансурановый радионуклид ^{241}Am . В этой зоне существенный вклад в суммарную активность техногенных радионуклидов вносил долгоживущий ^{137}Cs (табл. 2). Известно, что в период

совместной работы реакторного и радиохимического заводов ГХК до 2010 года общая активность техногенных радионуклидов в поверхностных слоях донных отложений вблизи сбросов комбината составляла 3200 Бк/кг [8], но в аномальных слоях донных отложений содержание ^{137}Cs достигало 26000 Бк/кг и соответствовало категории низкоактивных радиоактивных отходов [9]. В первые годы после остановки реактора ГХК средняя суммарная удельная активность техногенных радионуклидов в донных отложениях достигала 700 Бк/кг для районов вблизи ГХК (Табл. 2). С 2016 по 2019 год суммарное содержание техногенных радионуклидов в донных отложениях реки этих районов понизилось до 200-350 Бк/кг, но в 2020-2023 годы содержание техногенных радионуклидов в отдельных точках отбора увеличилось до 570 Бк/кг (Табл. 2). Увеличение активности техногенных радионуклидов в донных отложениях в 2020-2023 годы связано с увеличением масштаба работ с радионуклидами в последние годы на ГХК [6]. Следует отметить, что в последние годы, а также в период 2016-2019 год наблюдалась значительная вариабельность техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{241}Am) в поверхностном слое донных отложений вблизи ГХК. При этом содержание природного радионуклида ^{40}K в донных отложениях всех районов реки остается стабильным (500 ± 50 Бк/кг) (Табл. 2).

Таблица 2 - Содержание радионуклидов в пробах донных отложений, отобранных в фоновых районах р. Енисей, а также в районах вблизи ГХК в 2004-2023 гг

Район, дата отбора	Радионуклид, Бк/кг сух. массы				
	^{40}K	^{60}Co	^{137}Cs	^{152}Eu	^{241}Am
<u>Фоновые районы</u> Красноярск-Есаулово. 2004-2015*	500±50	-**	1-5	-	-
Красноярск-Есаулово-Шивера. 2016-2022	480±30	-	0.3-1.2	-	-
<u>Районы вблизи ГХК</u> Атаманово-Балчуг 2004-2008*	500±50	1000±70	1200±50	1000±150	4±1
Атаманово-Балчуг 2012-2015*	500±50	200±10	300±10	200±23	1,4±0,5
Атаманово-Балчуг 2016-2019	500±40	20±5	100-200	70-130	2-10
Атаманово-Балчуг 2020-2023	520±40	18±5	150-300	40-250	4-24

Примечание: * – данные работ [4], [8]; ** – содержание радионуклида в пробе меньше предела обнаружения

Водный макрофит элодея накапливает радионуклиды как из воды, так и донных отложений. В районе г. Красноярск и далее по течению реки до района сбросов ГХК содержание техногенного радионуклида ^{137}Cs в донных отложениях регистрируется на низком уровне глобальных выпадений – до 5 Бк/кг (табл.2) и содержание ^{137}Cs в биомассе элодеи не превышает 0.5 Бк/кг во все даты отбора (табл. 3). Вблизи сбросов ГХК в период до остановки последнего реактора ГХК в 2010 году в биомассе элодеи регистрировали около 15 техногенных радионуклидов, в основном активационного происхождения [8]. В этот период содержание долгоживущих техногенных радионуклидов (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{241}Am) в биомассе составило 185, 80, 20 и 4 Бк/кг, соответственно (табл. 3). В апреле 2010 года последний ядерный реактор ГХК был остановлен и ожидалось, что поступление техногенных радионуклидов в реку Енисей с водными сбросами ГХК будет прекращено. Однако как показали исследования, через 2-5 лет после остановки реактора в водных растениях, отобранных вблизи сбросов ГХК продолжали регистрироваться техногенные радионуклиды [4], [8]. В первые годы после остановки реактора (2012-2015 гг) содержание техногенных радионуклидов (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{241}Am) в биомассе элодеи составило 20, 20, 6 и 1.4 Бк/кг, соответственно (табл. 3). В последующие годы (2016-2023) удельная активность ^{60}Co уменьшилась на порядок до 1.6-2.0 Бк/кг, активность других радионуклидов почти не изменилась, по сравнению с периодом 2012-2015 год. Содержание природного радионуклида ^{40}K в биомассе элодеи, отобранной в фоновых районах реки и вблизи ГХК изменяется в небольшом диапазоне 1000–1480 Бк/кг, содержание другого природного радионуклида ^7Be – в диапазоне 50-110 Бк/кг (Табл. 3).

Таблица 3 - Содержание радионуклидов в биомассе *Elodea canadensis*, отобранной в фоновых районах р. Енисей, а также в районах вблизи ГХК в 2004-2023 гг

Район, дата отбора	Радионуклид, Бк/кг сух. массы					
	⁷ Be	⁴⁰ K	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu	²⁴¹ Am
Фоновые районы Красноярск -Есаулово. 2004-2008*	70±10	1100±120	-**	0,5±0,1	-	-
Красноярск -Есаулово. 2012-2015*	80±5	1480±340	-	0,3±0,1	-	-
Красноярск -Есаулово. 2016-2022	65±10	1400±200	-	0,3±0,1	-	-
Шивера, 2022	50±5	1000±100	-	0,5±0,2	-	-
Районы вблизи ГХК Атаманово- Балчуг 2004-2008*	70±12	1200±70	185±30	80±6	20±2	4±1
Атаманово- Балчуг 2012-2015*	110±14	1400±100	20±3	20±3	6±3	1,4±0,5
Атаманово- Балчуг 2016-2019	85±15	1450±150	2±1	6.5±2.5	4±2	0,5±0,2
Атаманово- Балчуг 2020-2023	80±14	1400±100	1,6±0,6	15±4	4±2	2±1

Примечание: * – данные работ [4], [8]; ** – содержание радионуклида в пробе меньше предела обнаружения

В период после остановки реактора, техногенные радионуклиды поступают в биомассу растений в основном из донных отложений. На основании полученных данных по удельной активности радионуклидов (табл. 2 и 3) были рассчитаны коэффициенты накопления (КН) как отношение удельной активности радионуклида в биомассе элодеи к удельной активности радионуклида в донных отложениях. Из данных таблицы 4 следует, что КН природного радионуклида ⁴⁰K достигает 2,9, что свидетельствует об активном накоплении радионуклида биомассой (КН>1). Для техногенных радионуклидов КН составил 1 только для трансуранового элемента ²⁴¹Am в период с 2004 по 2015 год, в другие периоды времени КН ²⁴¹Am биомассой элодеи не превышал 0.5. Коэффициент накопления ⁶⁰Co биомассой элодеи варьирует от 0.09 до 0.18 и превышает КН ¹³⁷Cs (<0.1). Для радионуклида ¹⁵²Eu КН в несколько раз меньше КН других радионуклидов. Это может быть объяснено тем, что ¹⁵²Eu не является биогенным элементом и не имеет элемента-аналога для растений. Трансурановый элемент ²⁴¹Am также не имеет биогенного элемента-аналога, но в отличии от ¹⁵²Eu может накапливаться биомассой растений (табл.4). Следовательно, КН радионуклидов биомассой элодеи могут быть ранжированы следующим образом:

- для периода времени 2004-2015 год – КН ⁴⁰K>²⁴¹Am>⁶⁰Co>¹³⁷Cs>¹⁵²Eu;
- для периода времени 2016-2023 год – КН ⁴⁰K>⁶⁰Co≈²⁴¹Am>¹³⁷Cs≈¹⁵²Eu.

Таблица 4 - Коэффициенты накопления радионуклидов (КН) в биомассе *Elodea canadensis*, отобранной в районах вблизи ГХК в 2004-2023 гг

Район, дата отбора	КН				
	⁴⁰ K	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu	²⁴¹ Am
Атаманово- Балчуг 2004- 2008*	2,4	0,18	0,07	0,02	1
Атаманово- Балчуг 2012- 2015*	2,8	0,1	0,07	0,03	1
Атаманово-	2,9	0,1	<0,07	<0,06	<0,3

Балчуг 2016-2019					
Атаманово-Балчуг 2020-2023	2,7	0,09	<0,1	<0,1	<0,5

Примечание: * – использованы данные работ [4], [8]

Оценка уровня и спектра цитогенетических нарушений в корнях водного растения *Elodea canadensis*, отобранного в разных районах р. Енисей после остановки последнего реактора ГХК. Во введении отмечали, что пробы элодеи, отобранные в реке Енисей вблизи ГХК в период работы ядерного реактора, характеризовались не только высоким содержанием техногенных радионуклидов в биомассе, но и высоким уровнем цитогенетических нарушений в корневой меристеме. Так, в 2004–2006 годах в пробах элодеи из фонового района (г. Красноярск) частота цитогенетических нарушений составляла $3.0 \pm 0.5\%$, а в районах вблизи ГХК частота возрастала до $33 \pm 4\%$ [8]. В 2012 году, спустя 2 года после остановки реактора ГХК, произошло снижение доли клеток с цитогенетическими нарушениями в корнях элодеи вблизи ГХК с 33% до 14% для района Атаманово и до 8% для района Балчуг. Это объяснялось, в основном, резким снижением содержания активационных техногенных радионуклидов в биомассе растений [8]. При этом в 2012 году, а также в период с 2012 по 2022 год суммарная частота цитогенетических нарушений в фоновых районах (Красноярск, Есаулово, Шивера) составила 4% и статистически не отличалась от данных для фонового района в период 2004–2006 год ($3.0 \pm 0.5\%$). При дальнейшем мониторинге цитогенетических параметров элодеи в 2014-2018 и 2021-2022 годах было отмечено снижение суммарного уровня цитогенетических нарушений вблизи сбросов ГХК до 4–6% (рис. 1). Проведенный статистический анализ показал, что в отдельные периоды времени после остановки реактора ГХК суммарный уровень цитогенетических нарушений элодеи из зоны вблизи ГХК достоверно отличался от частоты нарушений элодеи из фоновых районов (рис. 1).

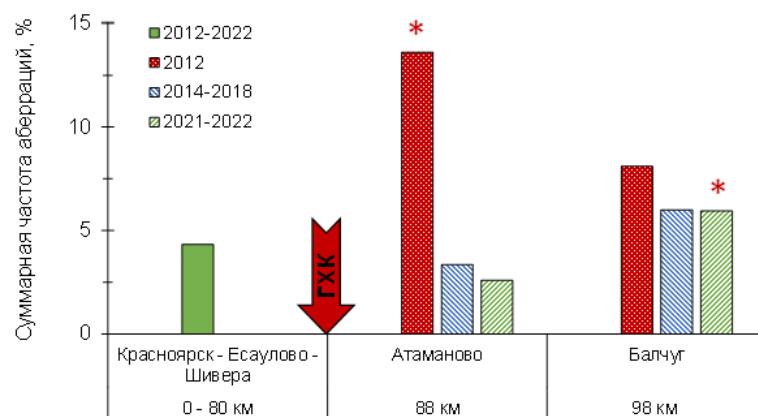


Рисунок 1 - Распределение суммарной частоты цитогенетических нарушений в корнях *Elodea canadensis*, отобранных по течению р. Енисей после остановки реактора (2012-2022)

Примечание: данные по цитогенетике элодеи, отобранной в р. Енисей в 2012 г., приведены из работы [4]; * – суммарная частота цитогенетических нарушений данного района достоверно отличается от частоты для фонового района. Расстояние от Красноярска в км

Анализ спектра цитогенетических нарушений показал доминирование доли клеток с абберациями типа «Мосты» до 50-70%, от общего числа аббераций, как для районов вблизи сбросов ГХК, так и для фоновых районов. По данным работы [4] в 2012 году абберации типа «Мосты» для районов вблизи ГХК были достоверно выше данного типа аббераций для фоновых районов. В другие годы цитогенетического мониторинга уровень аббераций типа «Мосты» не отличался для районов с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения донных отложений и фоновых районов. На втором месте по вкладу разных типов аббераций в общее число хромосомных нарушений для районов с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения в период с 2012 по 2022 год были абберации типа «Фрагменты», которые составляли от 20 до 40% общего уровня цитогенетических нарушений. Как следует из данных Рис. 2, в период 2012-2022 год, повышенный уровень абберации типа «Фрагменты» регистрировался для районов вблизи сбросов ГХК (Атаманово, Балчуг) и достоверно отличался от значений для фоновых районов. На третьем месте по вкладу разных типов аббераций следует отметить блуждающие хромосомы, частота которых достоверно не отличалась для элодеи из радиоактивно загрязненных и фоновых районов реки Енисей. Для цитогенетических аббераций типа «Множественные» повышенный уровень регистрировался для районов вблизи сбросов ГХК (Атаманово, Балчуг), который достоверно отличался от значений для фоновых районов (рис. 2). Следует отметить, что в период после остановки реактора ГХК суммарный уровень цитогенетических нарушений элодеи из зоны вблизи ГХК не всегда

достоверно отличался от суммарной частоты нарушений элодеи из фоновых районов (рис. 1). Однако частота двух типов цитогенетических нарушений «Фрагменты» и «Множественные» в клетках корней элодеи, отобранной из районов вблизи ГХК в период 2012-2022 год, достоверно отличалась от частоты этих типов нарушений для элодеи из фоновых районов. Возможно, данные типы аберраций «Фрагменты» и «Множественные» могут считаться параметрами цитогенетического отклика элодеи на радиоактивное загрязнение донных отложений.



Рисунок 2 - Распределение частоты двух типов цитогенетических нарушений (фрагменты и множественные) в корнях *Elodea canadensis*, отобранных по течению р. Енисей после остановки реактора (2012-2022)

Примечание: * – частота данного типа цитогенетических нарушений этого района достоверно отличается от частоты для фонового района; расстояние от Красноярска в км

Обсуждение

Согласно результатам, представленным в таблицах 2 и 3 очевидно, что накопление техногенных радионуклидов биомассой элодеи после остановки реактора ГХК определяется удельной активностью радионуклидов в поверхностном слое донных отложений реки Енисей. В период после 2010 года содержание радионуклидов ^{137}Cs и ^{152}Eu в донных отложениях районов вблизи ГХК достигает сотни Бк/кг, ^{60}Co – десятки Бк/кг, ^{241}Am – единицы Бк/кг. В последние годы (2020-2023 гг) отмечено увеличение активности техногенных радионуклидов в донных отложениях и растениях, что связано с увеличением масштаба работ с радионуклидами на ГХК. Содержание техногенного радионуклида ^{137}Cs в донных отложениях и растениях фоновых районов регистрируется на низком уровне в течение всего периода наблюдения, начиная с 2004 года. Удельные активности природных радионуклидов ^{40}K и ^7Be остаются стабильными в донных отложениях и растениях для всех районов и периодов отбора (2004-2023). Анализ таблицы 4 показал, что коэффициент накопления (КН) природного радионуклида ^{40}K биомассой является максимальным, а КН ^{152}Eu – минимальным среди всех радионуклидов. Известно, что ^{152}Eu , как и трансуранный элемент ^{241}Am , не имеет биогенного элемента-аналога для растений. Проведенное ранжирование радионуклидов по КН позволяет прогнозировать разную миграционную способность радионуклидов по трофическим уровням водной экосистемы.

Снижение содержания техногенных радионуклидов в донных отложениях и растениях после остановки ядерного реактора ГХК привело к снижению доли клеток с цитогенетическими нарушениями в корнях элодеи районов Атаманово-Балчуг до 8-14% в 2012 году и до 4-6 % в 2021-2022 годах (рис. 1). Для элодеи из фоновых районов реки выше по течению от ГХК суммарная частота цитогенетических нарушений не превышала в среднем 4% за все годы наблюдения. Статистический анализ данных показал, что в отдельные временные периоды суммарный уровень цитогенетических нарушений элодеи из зоны вблизи ГХК достоверно отличался от частоты нарушений элодеи из фоновых районов. При этом частота двух типов цитогенетических нарушений «Фрагменты» и «Множественные» клеток корней элодеи, отобранной из районов вблизи ГХК в период 2012-2022 год, также достоверно отличалась от частоты этих типов для элодеи из фоновых районов (рис. 2). Можно предположить, что данные типы аберраций «Фрагменты» и «Множественные» могут считаться параметрами цитогенетического отклика элодеи на радиоактивное загрязнение донных отложений. Для водных растений *Phragmites australis* из Чернобыльской зоны отчуждения ранее регистрировали повышенный уровень цитогенетических нарушений 5-8%, по сравнению с уровнем нарушений растений из фоновых районов (2%) [12]. В этой работе отмечали доминирование трех типов хромосомных нарушений (мосты, фрагменты и множественные), что согласуется с нашими данными.

Заключение

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы:

Накопление техногенных радионуклидов биомассой элодеи после остановки реактора ГХК определяется содержанием радионуклидов в поверхностном слое донных отложений реки Енисей, удельная активность которых составляет десятки и сотни Бк/кг. При этом содержание техногенного радионуклида ^{137}Cs в донных отложениях и растениях фоновых районов регистрируется на низком уровне в течение всего периода наблюдения (единицы и менее Бк/кг). Удельные активности природных радионуклидов ^{40}K и ^7Be остаются стабильными в донных отложениях и растениях для всех районов и периодов отбора (2004-2023).

Проведено ранжирование коэффициентов накопления (КН) радионуклидов биомассой элодеи. Коэффициент накопления природного радионуклида ^{40}K является максимальным среди всех радионуклидов. Для техногенных радионуклидов коэффициенты накопления более чем на порядок ниже КН ^{40}K , что характеризует низкую миграционную способность данной категории радионуклидов в водной экосистеме.

Отмечено снижение доли клеток с цитогенетическими нарушениями в корнях элодеи из районов вблизи ГХК после остановки ядерного реактора до 8-14% в 2012 году и до 4-6% в 2021-2022 годах. Однако, статистический анализ данных показал, что суммарный уровень цитогенетических нарушений, как и частота двух типов нарушений «Фрагменты» и «Множественные» клеток корней элодеи, отобранной из районов вблизи ГХК в период 2012-2022 год, все же достоверно отличались от частоты аналогичных параметров элодеи из фоновых районов. Высказано предположение, что абберации типа «Фрагменты» и «Множественные» могут считаться параметрами цитогенетического отклика элодеи на радиоактивное загрязнение донных отложений.

Финансирование

Работа выполнена 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 No. 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. Радиоактивное загрязнение водных организмов реки Енисей в зоне влияния Горно-химического комбината / А.Я. Болсуновский, А.Г. Суковатый // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2004. — Т. 44. — № 3. — С. 393-398.
2. Болсуновский А.Я. Радиоэкологический мониторинг реки Енисей и цитогенетические характеристики водного растения *Elodea canadensis* / А.Я. Болсуновский, Е.Н. Муратова, А.Г. Суковатый [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2007. — Т. 47. — № 1. — С. 63-73.
3. Даев Е.В. Цитогенетические методы индикации экологической напряженности в водных и наземных биосистемах / Е.В. Даев, А.В. Дукельская, Л.В. Барабанова // Экологическая генетика. — 2014. — Т.1. — № 2. — С.4-12.
4. 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.
5. Муратова Е.Н. Цитогенетическое изучение водных растений акватории Енисея в зоне радиационного загрязнения / Е.Н. Муратова, О.В. Горячкина, М.Г. Корнилова [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. — 2014. — № 5. — С. 510-517.
6. Отчет по экологической безопасности ГХК за 2021 год. — Железногорск, 2022. — 48 с. — URL: https://sibghk.ru/images/pdf/eco/ghk_ecorep_2021.pdf (дата обращения: 10.06.2024)
7. Arts G.H.P. Sensitivity of submerged freshwater macrophytes and endpoints in laboratory toxicity tests / G.H.P. Arts, J.D.M. Belgers, C.H. Hoekzema [et al.] // Environ. Pollut. — 2008. — Vol. 153. — P. 199-206. — DOI: 10.1016/j.envpol.2007.07.019
8. Bolsunovsky A. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants / A. Bolsunovsky, D. Demytyev, E. Trofimova // Journal of environmental radioactivity. — 2020. — Vol. 211. — № 106100. — P.1-12.
9. Bolsunovsky A. Ya. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event / A. Ya. Bolsunovsky, D.V Demytyev, V.I. Vakhrushev // Doklady Earth Sciences. — 2021. — Vol. 498, — Part 2. — P. 514-518.
10. Bolsunovsky A. The use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess the effects of low-dose gamma irradiation / A. Bolsunovsky, E. Trofimova, A. Zueva [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — 2023. — V. 264. — No. 107203.
11. Geras' kin S. Plants as a tool for the environmental health assessment / S. Geras' kin, T. Evseeva, A. Oudalova // In Encyclopedia of environmental health. — 2011. — P. 239-248.
12. Gudkov D.I. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone / D.I. Gudkov, N.L. Shevtsova, N.A. Pomortseva [et al.] // Journal of environmental radioactivity. — 2016. — Vol. 151. — P. 438-448.
13. Mosoarca G. Adsorption, bioaccumulation and kinetics parameters of the phytoremediation of cobalt from wastewater using *Elodea canadensis* / G. Mosoarca, C. Vancea, S. Popa [et al.] // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. — 2018. — Vol. 100. — P. 733-739.
14. Samecka-Cymerman A. Biomonitoring of water pollution with *Elodea canadensis*. A case study of three small Polish rivers / A. Samecka-Cymerman, A.J. Kempers // Water, Air, and Soil Pollution. — 2003. — V. 145. — P. 139-153.
15. Zotina T.A. Use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess toxicity and genotoxicity of Yenisei River sediments / T.A. Zotina, E.A. Trofimova, M.Yu. Medvedeva [et al.] // Environmental Toxicology and Chemistry. — 2015. — Vol. 34. — No. 10. — P. 2310-2321. DOI: 10.1002/etc.3057

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bolsunovskij A.YA. Radioaktivnoe zagryaznenie vodnyh organizmov reki Enisej v zone vliyaniya Gorno-himicheskogo kombinata [Radioactive contamination of aquatic organisms of the Yenisei River in the zone of influence of the Mining and Chemical Plant] / A.YA. Bolsunovskij, A.G. Sukovatj // Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya [Radiation biology. Radioecology]. — 2004. — V. 44. — № 3. — P. 393-398 [in Russian].
2. Bolsunovskij A.YA. Radioekologicheskij monitoring reki Enisej i citogeneticheskie harakteristiki vodnogo rasteniya *Elodea canadensis* [Radioecological monitoring of the Yenisei River and cytogenetic characteristics of the aquatic plant *Elodea canadensis*] / A.YA. Bolsunovskij, E.N. Muratova, A.G. Sukovatj [et al.] // Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya [Radiation biology. Radioecology]. — 2007. — V. 47. — № 1. — P. 63-73 [in Russian].
3. Daev E.V. Citogeneticheskie metody indikacii ekologicheskoy napryazhennosti v vodnyh i nazemnyh biosistemah [Cytogenetic methods for indicating environmental stress in aquatic and terrestrial biosystems] / E.V. Daev, A.V. Dukel'skaya, L.V. Barabanova // Ekologicheskaya genetika [Environmental genetics]. — 2014. — V.1. — № 2. — P. 4-12 [in Russian].
4. Medvedeva M.YU. Citogeneticheskie narusheniya u vodnogo rasteniya *Elodea canadensis* v zone tekhnogennogo zagryazneniya r. Enisej [Cytogenetic disorders in the aquatic plant *Elodea canadensis* in the zone of anthropogenic pollution of the river. Yenisei] / M.YU. Medvedeva, A.YA. Bolsunovskij, T.A. Zotina // Sibirskij ekologicheskij zhurnal [Siberian Ecological Journal]. — 2014. — V. 21. — № 4. — P. 561-572 [in Russian].
5. Muratova E.N. Citogeneticheskoe izuchenie vodnyh rastenij akvatorii Eniseya v zone radiacionnogo zagryazneniya [Cytogenetic study of aquatic plants of the Yenisei water area in the radiation pollution zone] / E.N. Muratova, O.V. Goryachkina, M.G. Kornilova [et al.] // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya biologicheskaya [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological series]. — 2014. — № 5. — P. 510-517 [in Russian].
6. Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti GHK za 2021 god [GHK Environmental Safety Report for 2021]. — ZHeleznogorsk, 2022. — 48 p. — URL: https://sibghk.ru/images/pdf/eco/ghk_ecorep_2021.pdf (accessed: 10.06.2024) [in Russian]
7. Arts G.H.P. Sensitivity of submerged freshwater macrophytes and endpoints in laboratory toxicity tests / G.H.P. Arts, J.D.M. Belgers, C.H. Hoekzema [et al.] // Environ. Pollut. — 2008. — Vol. 153. — P. 199-206. — DOI: 10.1016/j.envpol.2007.07.019
8. Bolsunovsky A. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants / A. Bolsunovsky, D. Demytyev, E. Trofimova // Journal of environmental radioactivity. — 2020. — Vol. 211. — № 106100. — P.1-12.
9. Bolsunovsky A.Ya. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event / A.Ya. Bolsunovsky, D.V Demytyev, V.I. Vakhrushev // Doklady Earth Sciences. — 2021. — Vol. 498, — Part 2. — P. 514-518.
10. Bolsunovsky A. The use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess the effects of low-dose gamma irradiation / A. Bolsunovsky, E. Trofimova, A. Zueva [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — 2023. — V. 264. — No. 107203.
11. Geras' kin S. Plants as a tool for the environmental health assessment / S. Geras' kin, T. Evseeva, A. Oudalova // In Encyclopedia of environmental health. — 2011. — P. 239-248.
12. Gudkov D.I. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone / D.I. Gudkov, N.L. Shevtsova, N.A. Pomortseva [et al.] // Journal of environmental radioactivity. — 2016. — Vol. 151. — P. 438-448.
13. Mosoarca G. Adsorption, bioaccumulation and kinetics parameters of the phytoremediation of cobalt from wastewater using *Elodea canadensis* / G. Mosoarca, C. Vancea, S. Popa [et al.] // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. — 2018. — Vol. 100. — P. 733-739.
14. Samecka-Cymerman A. Biomonitoring of water pollution with *Elodea canadensis*. A case study of three small Polish rivers / A. Samecka-Cymerman, A.J. Kempers // Water, Air, and Soil Pollution. — 2003. — V. 145. — P. 139-153.
15. Zotina T.A. Use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess toxicity and genotoxicity of Yenisei River sediments / T.A. Zotina, E.A. Trofimova, M.Yu. Medvedeva [et al.] // Environmental Toxicology and Chemistry. — 2015. — Vol. 34. — No. 10. — P. 2310-2321. DOI: 10.1002/etc.3057