

**ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ
И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ**

**ECOLOGY, SOIL SCIENCE
AND NATURE MANAGEMENT**

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-980

УДК 574.64:58.084.5



Научная статья

**ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННОГО
СОДЕРЖАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ
РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ
РЕКИ ЕНИСЕЙ НА ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ
И РОСТОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОДНОГО РАСТЕНИЯ
*ELODEA CANADENSIS***

*А.Я. Болсуновский, Е.А. Трофимова,
Д.В. Дементьев, А.С. Дементьева*

Обоснование. Высокое содержание техногенных радионуклидов в донных отложениях реки Енисей (ДО) является основным источником радиационного облучения водных растений, что проявляется в возрастании хромосомных aberrаций (ХА) в корнях растений элодеи вблизи сбросов Горно-химического комбината (ГХК) по сравнению с фоновыми районами. Эти данные были получены в период работы ядерного реактора ГХК, но после остановки реактора отмечено снижение содержания радионуклидов в ДО и уровня ХА клеток элодеи.

Проведённые ранее лабораторные токсикологические эксперименты с радиоактивными ДО р. Енисей не выявили достоверного отклика цитогенетических и морфометрических параметров элодеи на повышенный уровень техногенных радионуклидов в ДО. Эти факты требуют проведения дополнительных исследований.

Цель исследований – оценка морфометрических параметров и цитогенетических нарушений в корнях водного растения *Elodea canadensis*, выросших на донных отложениях с разным уровнем загрязнения техногенными радионуклидами: полевые исследования и лабораторные эксперименты.

Материалы и методы. Пробы водных растений и ДО отбирали в р. Енисей как вблизи радиоактивных сбросов ГХК, так и выше сбросов ГХК в фоновых районах. Удельную активность радионуклидов ДО измеряли на гамма-спектрометре фирмы Canberra (США). Подготовку проб и учёт клеток с хромосомными aberrациями проводили по стандартной методике. Для лабораторных экспериментов в качестве тест-объекта использовали элодею (*E. canadensis*), которая была отобрана в фоновом районе р. Енисей. В экспериментах регистрировали морфометрические и цитогенетические параметры элодеи.

Результаты. В период 2014-2021 год после останковки ядерного реактора ГХК зарегистрировано снижение суммарного уровня хромосомных aberrаций (ХА) элодеи, отобранной вблизи ГХК по сравнению с периодом работы реактора. В 2021 году повышенный суммарный уровень ХА элодеи, включая aberrации типа «Фрагменты», вблизи сбросов ГХК достоверно отличался от уровня ХА в фоновом районе. Достоверные отличия суммарного уровня ХА элодеи из районов вблизи сбросов ГХК и фоновых районов были отмечены в интервале активности радионуклидов 520-1470 Бк/кг в ДО.

В лабораторных экспериментах фактор повышенной радиоактивности в ДО приводил к уменьшению длины корней элодеи по сравнению с контролем, но не влиял на рост побегов. В эксперименте при длительности облучения элодеи 11 суток наблюдалось достоверное увеличение уровня клеток с ХА и доли блуждающих хромосом относительно контроля.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют, что повышенное содержание техногенных радионуклидов в ДО р. Енисей может влиять на ростовые и цитогенетические параметры элодеи.

Ключевые слова: донные отложения; техногенные радионуклиды; *Elodea canadensis*; хромосомные aberrации; токсикологические эксперименты; морфометрические параметры

Для цитирования. Болсуновский А.Я., Трофимова Е.А., Дементьев Д.В., Дементьева А.С. Влияние повышенного содержания техногенных радионуклидов в донных отложениях реки Енисей на цитогенетические и ростовые показатели водного растения *Elodea canadensis* // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16, №5. С. 11-37. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-980

Original article

THE EFFECT OF INCREASED CONCENTRATIONS OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE YENISEI RIVER ON CYTOGENETIC AND GROWTH ENDPOINTS OF THE AQUATIC PLANT *ELODEA CANADENSIS*

*A.Y. Bolsunovsky, E.A. Trofimova,
D.V. Dementyev, A.S. Dementyeva*

Background. *The high content of artificial radionuclides in bottom sediments (BS) of the Yenisei River is the main source of radiation exposure of aquatic plants and, hence, increased levels of chromosomal aberrations (CAs) in roots of elodea plants close to the discharge site of the Mining-and-Chemical Combine (MCC) compared to the reference regions. These data were obtained when the MCC nuclear reactor was working, but after the reactor shutdown, radionuclide contents of the BS decreased and so did the levels of CAs in elodea cells. The previous laboratory toxicological experiments with the radioactive BS from the Yenisei River did not show any significant response of cytogenetic and morphometric parameters of elodea plants to the increased level of artificial radionuclides in the BS. These facts require further study.*

Purpose. *The purpose of this work was to assess morphometric parameters and cytogenetic abnormalities in the roots of the aquatic plant *Elodea canadensis* growing on bottom sediments with different levels of contamination by artificial radionuclides: in field studies and laboratory experiments.*

Material and methods. *Samples of plants and BS were collected from the Yenisei River, both close to the MCC discharge site and upstream, in the reference regions. Activity concentrations of BS radionuclides were measured using a Canberra gamma-spectrometer (U.S.). Sample preparation and detection of cells with chromosomal aberrations were carried out following conventional procedures. Laboratory experiments were performed with elodea (*E. canadensis*) plants collected in the reference region of the Yenisei River. The morphometric and cytogenetic elodea endpoints were recorded in experiments.*

Results. *From 2014 to 2021, after the shutdown of the nuclear reactor of the MCC, the total level of chromosomal aberrations (CAs) of elodea collected near the*

MCC was found to decrease compared to the time before the shutdown of the reactor. In 2021, the increased total level of CAs, including “Fragments”, in elodea near the MCC discharge site was significantly different from the level of CAs in the reference area. Significant differences in the total level of CAs between the elodea plants from areas near the MCC discharge site and from reference regions were found within the range of radionuclide activity concentrations in BS of 520-1470 Bq/kg.

In laboratory experiments, the factor of increased radioactivity in BS led to a decrease in the growth of elodea roots compared to the control but did not affect the shoot length growth. In the experiment with elodea irradiated for 11 days, a significant increase was observed in the number of cells with CAs and the proportion of vagrant chromosomes relative to the control.

Conclusion. The results obtained indicate that the increased concentrations of artificial radionuclides in the BS of the Yenisei River can affect the growth and cytogenetic parameters of elodea.

Keywords: bottom sediment; artificial radionuclides; *Elodea canadensis*; chromosomal aberrations; toxicological experiments; morphometric parameters

For citation. Bolsunovsky A.Y., Trofimova E.A., Demytyev D.V., Demytyeva A.S. The Effect of Increased Concentrations of Artificial Radionuclides in Bottom Sediments of the Yenisei River on Cytogenetic and Growth Endpoints of the Aquatic Plant *Elodea canadensis*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2024, vol. 16, no. 5, pp. 11-37. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-980

Введение

Река Енисей, одна из крупнейших рек мира, в среднем течении загрязнена техногенными радионуклидами, включая трансурановые элементы [1; 11; 17; 24; 28]. Начиная с 1958 года основным источником радиационного загрязнения р. Енисей являлись нормативные и аварийные сбросы вод реакторного и радиохимического заводов Горно-химического комбината (ГХК) госкорпорации «Росатом» (г. Железногорск). После остановки в 2010 году последнего реактора ГХК (АДЭ-2), радиационный фон поймы реки сохраняется на повышенном уровне по причине вовлечения накопившихся техногенных радионуклидов в геологические процессы (накопление осадков, их перемыв и переотложение), а также за счёт фильтрации и дренирования почв в местах расположения береговых бассейнов с радиоактивными отходами [9; 10].

Многочисленные работы по оценке радиационного загрязнения экосистемы реки Енисей выявили накопление искусственных радиоактивных изотопов в биомассе гидробионтов [2; 4; 12-13; 16; 30]. В период рабо-

ты последнего реактора ГХК была показана высокая аккумулирующая способность погруженных макрофитов, в которых регистрировали до 30 техногенных радионуклидов, характерных для сбросов ГХК [2; 16; 30]. Растения, отобранные в зоне сбросов ГХК до 2010 года, характеризовались высоким уровнем цитогенетических нарушений в корневой меристеме, относительно образцов, произраставших выше по течению [3; 7-8; 16]. Цитогенетические нарушения растительных клеток широко используются как индикаторы цито- и генотоксичности при оценке качества окружающей среды, как при натурных исследованиях, так и в лабораторных экспериментах [5; 22]. Увеличение частоты хромосомных aberrаций отражает отклик организма на воздействие экологических факторов различной природы, в том числе радиоактивного загрязнения [15; 20-21; 23; 27].

Выявленный ранее высокий уровень цитогенетических нарушений в корнях элодеи (*Elodea canadensis*) объяснялся увеличением дозы облучения растений, как за счёт внутреннего облучения (накопленные радионуклиды в биомассе), так и внешнего облучения (радионуклиды в донных отложениях) [3, 7, 16]. В связи с остановкой реактора АДЭ-2 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 (ДО) и биомассе растений р. Енисей [6, 16, 30]. Как следствие этого произошло уменьшение уровня цитогенетических нарушений в корнях элодеи, отобранной вблизи сбросов ГХК в первые годы после остановки реактора (2011-2012 гг) [7]. Наличие долгоживущих техногенных радионуклидов в ДО по течению реки от ГХК, достигающих категории низкоактивных радиоактивных отходов [17] позволяет считать их основным источником радиационного влияния на морфометрические и цитогенетические параметры укоренённых макрофитов. Проведённые ранее краткосрочные лабораторные экотоксикологические эксперименты с радиоактивными ДО реки Енисей не выявили достоверного отклика цитогенетических и морфометрических параметров элодеи на повышенный уровень содержания техногенных радионуклидов [29]. Вероятно, это связано с низкой активностью техногенных радионуклидов в используемых в экспериментах ДО.

Цель данной работы – оценка морфометрических параметров и цитогенетических нарушений в корнях водного растения *Elodea canadensis Michx*, выросших на донных отложениях с разным уровнем загрязнения техногенными радионуклидами: полевые исследования и лабораторные эксперименты.

Материалы и методики исследования

Пробы растений и ДО отбирали в р. Енисей на участке протяжённостью до 100 км вниз по течению реки от г. Красноярск до с. Б. Балчуг в период времени с 2014 по 2021 гг. (Рис.1). Данный участок включает ближнюю зону наблюдения ГХК, в рамках которой были выбраны следующие районы отбора проб: сёла Атаманово и Большой Балчуг в зоне влияния радиоактивных сбросов ГХК; г. Красноярск и с. Есаулово – фоновые районы, расположенные выше по течению от ГХК, характеризующиеся отсутствием загрязнений радиационной природы (Рис.1, Табл.1).

Пробы ДО отбирали из корнеобитаемого слоя глубиной до 20 см и высушивали до постоянной массы при 105°C. Удельную активность радионуклидов ДО 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. Для лабораторных экспериментов по биотестированию использовали ДО, отобранные в слое 9-12 см с аномальным содержанием ^{137}Cs (14500 Бк/кг, соответствующего категории низкоактивных радиоактивных отходов) на участке вблизи села Б. Балчуг.



Рис. 1. Карта-схема районов отбора проб донных отложений и биомассы *Elodea canadensis*.

Таблица 1.

Районы отбора проб растений и донных отложений р. Енисей

Населённый пункт	Расстояние от г.Красноярска, км*	Координаты точек отбора	Период отбора
г. Красноярск, (фоновый)	-16	55°58'18»N 92°38'19»E	2014-2016
г. Красноярск, (фоновый)	8	56°02'33»N 92°58'55»E	2016-2021
с. Есаулово, (фоновый)	45	56°08'43»N 93°16'51»E	2014-2018
с. Атаманово	88	56°23'47»N 93°39'03»E	2014-2021
с. Б. Балчуг	98	56°27'59»N 93°41'55»E	2014-2021

Примечание. * – расстояние приведено по лоции судоходных путей

Для оценки радиотоксичности использовали цитогенетические параметры корневой меристемы элодеи канадской *Elodea canadensis* Michx., отобранной в разных районах р. Енисей. Корни фиксировали в фиксаторе Кларка (3:1) в течение 24 часов, затем помещали в 1% ацетоорсеин на 24 часа. Окрашенные корни дважды промывали в 45% растворе уксусной кислоты от избытка красителя, мацерировали в том же растворе при температуре 60°C. Оптимальную длительность мацерации подбирали опытным путём в каждом конкретном случае. Меристему подготовленных корней отделяли скальпелем в капле 45% уксусной кислоты и готовили давлёный микропрепарат [19].

Учёт клеток с хромосомными aberrациями проводят при помощи светового микроскопа (Olympus CX31). Было проанализировано от 71 до 139 препаратов для каждого района отбора. Для учёта aberrантных клеток использовали корни с общим числом ана-телофазных клеток не менее 20, суммарно было просмотрено до 11300 клеток для каждого района отбора. Отмечались следующие типы аномалий: фрагменты и мосты (одинарные, двойные и множественные), блуждающие хромосомы, множественные нарушения (наличие в клетке нескольких нарушений разных типов) [25]. К категории «прочее» относили трудноклассифицируемые и редко встречающиеся нарушения (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.

По причине отсутствия проб элодеи из отдельных районов была произведена группировка и усреднение цитогенетических данных по временным интервалам: 2014-2015, 2016-2018 и 2021. Данные по содержанию техногенных радионуклидов в поверхностном слое ДО приведены как интервалы min-max значений за указанные периоды.

Лабораторные эксперименты по оценке токсичности радиоактивной пробы донных отложений (ДО) р. Енисей проводили с использованием биотеста (*E. canadensis*) в конце мая 2022 года. Элодея, используемая в эксперименте, была ранее отобрана в береговой зоне фонового района р. Енисей, адаптирована и на протяжении нескольких лет культивировалась в лабораторных условиях. Удельная активность техногенного радионуклида ^{137}Cs для аномальной пробы донных отложений (ДО-1) составляла 14500 Бк/кг сух. вес. В качестве контроля служили искусственные ДО (ДО-К), приготовленные согласно OECD Test Guideline 219 (8) [26] со следующим составом: 5% торф, 20% каолин, 75% песок, влажностью 30%, pH 7, без добавления питательной среды. Апикальные побеги элодеи длиной 5 см высаживали в контейнеры, заполненные ДО, по 13 штук на контейнер. Затем, контейнеры с высаженной в них элодеей помещали внутрь прозрачных пластиковых сосудов, заполненный профильтрованной через мембранный фильтр (Shleicher & Schuell, 0,45 μm) водопроводной водой. Тестовые сосуды выдерживали в течение 7 и 11 суток в климатической комнате с искусственным верхним освещением люминесцентными лампами ($3,0 \pm 0,1$ клк), с фотопериодом 16/8 ч, температура воды в сосудах составляла в среднем $20,6 \pm 0,2$ °C.

В лабораторных экспериментах оценивали цитогенетические параметры корневой меристемы элодеи. Пробоподготовку и учёт клеток корневой меристемы с хромосомными aberrациями на стадии ана-телофазы производили по описанной выше методике для природных проб элодеи. Помимо цитогенетического анализа в эксперименте проводили измерения морфометрических параметров. В качестве итоговых параметров оценивали: суммарную длину побегов элодеи (сумма основного побега и боковых); суммарную длину корней (сумма длин всех корней на одном растении); отношение суммарной длины корня к суммарной длине побега; сухую массу побегов.

Накопление, корректировка, систематизация, статистический анализ экспериментальных данных и визуализация полученных результатов осуществлялись с помощью программ Microsoft Office Excel 2013 и PAST 4.11. С учётом размера выборок для оценки нормальности распределения

использовали критерий Шапиро-Уилка. Поскольку распределение данных цитогенетического анализа отличалось от нормального, наличие различий между сравниваемыми группами в пределах одного временного интервала определяли с помощью непараметрического критерия Краскела-Уоллиса. В случае обнаружения статистически значимых различий между выборками, проводилось попарное сравнение совокупностей при помощи U-критерия Манна-Уитни с поправкой Холма. Заданный уровень значимости составлял 0,05. В таблицах представлены средние значения со стандартной ошибкой $M \pm SE$, в скобках указан вклад каждого вида аберраций в общую долю аномалий.

Результаты исследования и обсуждение

Оценка цитогенетических нарушений в корнях водного растения *E. canadensis*, отобранной в разных районах р. Енисей. Ранее отмечали [7; 16], что спустя 2 года после остановки реактора ГХК в 2010 году произошло снижение доли клеток с хромосомными аберрациями (ХА) в корнях элодеи в районе сбросов ГХК с 25-30% до 8-14% (Табл.2). Это объяснялось, в основном, резким снижением содержания активационных техногенных радионуклидов в биомассе растений. При дальнейшем мониторинге цитогенетических параметров элодеи было отмечено снижение суммарного уровня ХА вблизи сбросов ГХК (район Б. Балчуг) в 2014-2015 и 2016-2018 годах до $6,3 \pm 0,7$ и $5,7 \pm 0,8\%$, соответственно (табл.2). Эти средние значения суммарного уровня ХА элодеи вблизи сбросов ГХК (5,7-6,3%) были несколько выше средних значений уровня ХА фоновых районов в этот период времени (3,5-5%), но статистический анализ не выявил достоверной разницы. Однако, учитывая довольно высокий уровень значимости по U-критерию для пары Б. Балчуг-Есаулово в 2014-2015 гг ($p = 0,04$) и для пары Б. Балчуг-Удачный в 2016-2018 гг ($p = 0,02$), можно говорить о тенденции роста уровня ХА в зоне влияния ГХК относительно данных контрольных районов в эти временные интервалы.

Мониторинг цитогенетических параметров элодеи в 2021 году (табл.2) показал стабилизацию значений ХА элодеи вблизи сбросов ГХК (район Б. Балчуг) за последние годы на уровне $6,1 \pm 1,2\%$ и это значение достоверно отличалось от уровня ХА в фоновом районе ($2,4 \pm 0,5\%$). Анализ спектра ХА показал доминирование доли клеток с аберрациями типа «Мосты» до 60-70%, от общего числа аберраций, как для районов вблизи сбросов ГХК, так и для фоновых районов (табл.2).

Таблица 2.

Частота встречаемости клеток с нарушениями разного типа в корнях *E. canadensis* р. Енисей после остановки последнего реактора ГХК

Район проботоотбора элоден	2012*	2014-2015	2016-2018	2021
Общее количество аномальных клеток, %				
(А) Красноярск	5,5 ± 0,6	5,0 ± 0,6	4,4 ± 1,4	2,4 ± 0,5
(В) Есаулово	6,8 ± 0,7	4,4 ± 0,5	3,5 ± 1,0	–
(С) Атаманово	13,6 ± 1,3^{А, В}**	4,2 ± 0,4	2,5 ± 0,5	3,8 ± 0,8
(D) Б. Балчуг	8,1 ± 0,8	6,3 ± 0,7	5,7 ± 0,8	6,1 ± 1,2^А
Мосты, %				
(А) Красноярск	2,2 ± 0,4 (40)	3,2 ± 0,5 (64)	2,5 ± 1,2 (58)	1,2 ± 0,4 (51)
(В) Есаулово	4,9 ± 0,7 (71)	3,6 ± 0,5 (80)	2,6 ± 0,8 (74)	–
(С) Атаманово	6,4 ± 0,7 (47)^А	2,7 ± 0,2 (62)	0,7 ± 0,4 (28)	1,7 ± 0,4 (45)
(D) Б. Балчуг	5,2 ± 0,6 (64)^А	3,8 ± 0,5 (61)	3,4 ± 0,5 (59)	1,4 ± 0,5 (23)
Блуждающие хромосомы, %				
(А) Красноярск	1,9 ± 0,5 (34)	0,8 ± 0,2 (15)	0,7 ± 0,2 (16)	0,9 ± 0,3 (36)
(В) Есаулово	1,4 ± 0,4 (20)	0,4 ± 0,2 (10)	0,4 ± 0,3 (12)	–
(С) Атаманово	4,4 ± 0,8 (32)_{А, В}	0,3 ± 0,1 (7)	0,7 ± 0,3 (27)	0,6 ± 0,2 (17)
(D) Б. Балчуг	1,1 ± 0,3 (14)	0,6 ± 0,2 (10)	0,8 ± 0,2 (13)	1,4 ± 0,6 (22)
Фрагменты, %				
(А) Красноярск	0 (0)	0,7 ± 0,1 (15)	0,4 ± 0,2 (9)	0,1 ± 0,1 (6)
(В) Есаулово	0,08 ± 0,08 (1)	0,3 ± 0,1 (6)	0,4 ± 0,2 (12)	–
(С) Атаманово	0,06 ± 0,06 (1)	0,8 ± 0,2 (20)^В	0,7 ± 0,3 (29)	1,3 ± 0,6 (33)^А
(D) Б. Балчуг	0 (0)	1,3 ± 0,3 (20)^В	1,0 ± 0,2 (17)^А	3,1 ± 0,8 (50)^А
Множественные, %				
(А) Красноярск	0 (0)	0,2 ± 0,1 (4)	0,1+0,1 (2)	0 (0)
(В) Есаулово	0,1 ± 0,1 (2)	0,1 ± 0,0 (1)	0,1 ± 0,1 (2)	–
(С) Атаманово	0,7 ± 0,2 (5)^А	0,2 ± 0,1 (6)	0,1 ± 0,1 (4)	0,2 ± 0,1 (5)
(D) Б. Балчуг	0,2 ± 0,1 (3)	0,3 ± 0,1 (5)	0,4 ± 0,1 (7)	0,3 ± 0,2 (5)
Прочее, %				
(А) Красноярск	1,4 ± 0,3 (26)	0,1 ± 0,1 (2)	0,6 ± 0,4 (15)	0,2 ± 0,2 (7)
(В) Есаулово	0,4 ± 0,1 (6)	0,1 ± 0,1 (3)	0 (0)	–
(С) Атаманово	2,1 ± 0,4 (15)^В	0,2 ± 0,1 (5)	0,3 ± 0,2 (12)	0 (0)
(D) Б. Балчуг	1,5 ± 0,4 (19)	0,2 ± 0,1 (4)	0,2 ± 0,1 (4)	0 (0)

Примечание. * Данные работы [7] по цитогенетике элодеи, отобранной в р. Енисей в 2011-2012 гг.

** Буквенными индексами (А, В) и жирным шрифтом отмечены средние значения частоты aberrаций у образцов элодеи, отобранных в пределах одного временного интервала в зоне влияния ГХК, достоверно превышающие значения из фоновых районов ($p < 0,05$).

По данным работы [7] в 2012 году аберрации типа «Мосты» для районов вблизи ГХК были достоверно выше данного типа аберраций для фоновых районов (Табл.2). В другие годы цитогенетического мониторинга уровень аберраций типа «Мосты» не отличался для районов с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения ДО и фоновых районов. На втором месте по вкладу разных типов аберраций в общее число ХА для районов с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения в период с 2014 по 2021 год были аберрации типа «Фрагменты», которые составляли от 20 до 50% общего уровня ХА. Как следует из данных табл. 2, в период 2014-2021 год, повышенный уровень аберрации типа «Фрагменты» регистрировался для районов вблизи сбросов ГХК (Атаманово, Б. Балчуг) и достоверно отличался от значений для фоновых районов. На третьем месте по вкладу разных типов аберраций следует отметить блуждающие хромосомы, которые для разных районов варьировали от 10 до 30% общего уровня ХА (табл.2). По данным работы [7] в 2012 году уровень блуждающих хромосом района вблизи ГХК был достоверно выше данного типа аберраций для фоновых районов (Табл.2). Однако в другие годы нами не была выявлена достоверная разница в значениях уровня блуждающих хромосом элодеи из радиоактивных и фоновых районов реки Енисей. Возможно это связано с тем, что при микроскопировании клеток элодеи довольно сложно разделить хромосомные аберрации типа «Фрагменты» и блуждающие хромосомы. Другие типы ХА такие как «Множественные» и «Прочее» в среднем по каждой категории не превышали 15% от общего уровня ХА и более высокие достоверные значения этих типов ХА отмечены для районов вблизи сбросов ГХК только в 2012 году (табл. 2). В другие годы мониторинга аберрации типа «Множественные» и «Прочее» достоверно не отличались для всех исследованных районов р. Енисей.

Как уже отмечали, в период наших исследований (2014-2021 гг.) повышенный уровень аберрации типа «Фрагменты» для районов вблизи сбросов ГХК (Атаманово, Б. Балчуг) достоверно отличался от значений для фоновых районов. Но в этот же период (2014-2018 гг.) суммарный уровень ХА элодеи из районов вблизи сбросов ГХК достоверно не отличался от уровня ХА для фоновых районов (табл. 2). Возможно данный тип аберраций «Фрагменты» может считаться одним из параметров цитогенетического отклика элодеи на радиоактивное загрязнение ДО.

В пробах ДО фоновых районов (Красноярск, Есаулово), расположенных выше по течению реки относительно района радиоактивных сбросов ГХК, из техногенных радионуклидов обнаружен только ^{137}Cs с удель-

ной активностью не более 5 Бк/кг (табл. 3). Донные отложения в зоне влияния ГХК (Атаманово, Б. Балчуг) содержали широкий спектр техногенных гамма-излучающих радионуклидов, среди которых основными являлись ^{60}Co , ^{137}Cs , изотопы европия (^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu) и трансурановый радионуклид ^{241}Am . В этой зоне основной вклад в суммарную активность техногенных радионуклидов вносил долгоживущий ^{137}Cs (40-75% от суммарной активности) (табл. 3). Известно, что в период совместной работы реакторного и радиохимического заводов ГХК общая активность техногенных радионуклидов в поверхностных слоях ДО вблизи сбросов комбината составляла 3200 Бк/кг [16], но в аномальных слоях ДО содержание ^{137}Cs достигало 26000 Бк/кг и соответствовало категории низкоактивных радиоактивных отходов [17]. В первые годы после остановки реактора ГХК максимальная суммарная удельная активность техногенных радионуклидов в ДО достигала 1470 Бк/кг для района Атаманово и 520 Бк/кг для района Б. Балчуг (Табл.3). С 2014 по 2018 гг. содержание техногенных радионуклидов в ДО реки вблизи сбросов ГХК понизилось до 300-400 Бк/кг. В 2020-2021 год содержание техногенных радионуклидов в ДО районов вблизи сбросов ГХК увеличилось почти в 2 раза до 610-710 Бк/кг (табл. 3). Увеличение активности техногенных радионуклидов в ДО в 2020-2021 год связано с увеличением масштаба работ с радионуклидами в последние годы на ГХК и, соответственно, с увеличением сброса радионуклидов в р. Енисей [9; 10].

Таблица 3.

Удельная активность техногенных радионуклидов в донных отложениях р. Енисей в местах отбора проб корней *E. canadensis*

Период отбора	Суммарная удельная активность техногенных радионуклидов, Бк/кг сухой массы			
	Красноярск	Есаулово	Атаманово	Б. Балчуг
2011-2012*	1,0 (1,0)**	5,0 (5,0)	300-1470*** (90-750)	210-520 (170-280)
2014-2015	0,1-2,2 (0,1-2,2)	1,4-2,8 (1,4-2,8)	140-440 (110-250)	130-380 (70-140)
2016-2018	0,3 (0,3)	0,4 (0,4)	100-380 (70-140)	80-300 (60-200)
2020-2021	0,3 (0,3)	0,5-1,2 (0,5-1,2)	310-710 (200-300)	210-610 (160-460)

Примечание. * – данные работы [7]; ** – в скобках указана удельная активность ^{137}Cs ; *** – интервал min-max значений суммарной активности техногенных радионуклидов.

Из сравнения данных по уровню ХА в корнях элодеи (табл. 2) и максимального содержания техногенных радионуклидов в ДО (табл. 3) следует, что достоверные отличия суммарного уровня ХА элодеи из районов вблизи сбросов ГХК и фоновых районов были отмечены при максимальных активностях радионуклидов 520-1470 Бк/кг в 2011-2012 году и 610-710 Бк/кг в 2020-2021 году (табл. 3). При содержании радионуклидов менее 500 Бк/кг в ДО (300-400 Бк/кг в период 2014-2018 гг.) достоверных различий суммарного уровня ХА элодеи из районов вблизи сбросов ГХК и фоновых районов не было отмечено. Ранее в статье [16] отмечали повышенные уровни ХА элодеи, отобранной в 2012 и 2015 годах вблизи радиоактивной аномалии с повышенным содержанием ^{137}Cs до 8000 Бк/кг. Результаты настоящей работы (табл. 2 и 3) и ранее опубликованные данные [7; 16] свидетельствуют о влиянии повышенного содержания техногенных радионуклидов в ДО на суммарный уровень ХА элодеи в районах вблизи сбросов ГХК. Отмеченный выше интервал максимальной активности техногенных радионуклидов, вызывающий цитогенетические эффекты в природных условиях, является ориентировочным из-за возможного присутствия химических загрязнителей в ДО и синергического эффекта влияния радиационного и химического факторов на ХА элодеи. В работе Дементьева с соавторами [18] был сделан вывод об отсутствии токсичных концентраций тяжёлых металлов в ДО реки Енисей ниже сбросов ГХК.

Для фоновых районов реки выше ГХК мы регистрируем спонтанный уровень хромосомных аберраций (ХА) в клетках корневой меристемы элодеи, на который возможно оказывают влияние другие нерадиационные факторы, типичные для сбросов миллионного г. Красноярска с развитой промышленностью. Суммарный уровень ХА элодеи в фоновых районах реки варьировал в диапазоне от 2,4 до 5,0% после остановки реактора (табл.2) и не отличался достоверно от значений ХА для элодеи, отобранной в фоновых районах до остановки реактора в 2010 году [16] Подобные исследования по оценке ХА корней водного растения *Phragmites australis* проводили ранее в водоёмах Чернобыльской зоны аварии в 2006-2014 год [23]. Авторы вышеотмеченной работы выявили повышенный уровень ХА до 8% для корней *Phragmites australis*, отобранных в водоёмах с относительно высоким уровнем радиоактивного загрязнения, в то время как для фоновых водоёмов уровень ХА не превышал 2%. Согласно нашим данным (табл. 2), значения суммарного уровня ХА элодеи для всех районов исследований р. Енисей были несколько выше данных по многим Чернобыльским водоёмам, что связано с разными методами учёта типов

ХА. Для растения *Phragmites australis* авторы учитывали только aberrации типа «Мосты», «Фрагменты» и «Множественные нарушения» [23], в то время как для элодеи мы учитывали пять разных типов aberrаций (табл. 2). Исследования растений *Phragmites australis* в разных водоёмах Чернобыльской зоны [23] показали, что с ростом уровня радиоактивного загрязнения водоёма доминируют aberrации типа «Фрагменты» (40-60%) и «Множественные нарушения» (30-40%). Согласно нашим данным, aberrации типа «Фрагменты» в клетках элодеи, отобранной в 2021 году в районе с. Большой Балчуг вблизи ГХК составляли 50% и достоверно отличались от уровня aberrаций данного типа в фоновом районе (табл. 2).

Результаты биотестирования аномальной радиоактивной пробы донных отложений реки Енисей. Проведённые исследования цитогенетических параметров элодеи, вегетирующей на разных участках реки Енисей (табл. 2, 3), позволяют считать содержание техногенных радионуклидов в ДО основным фактором, провоцирующим повышение уровня хромосомных нарушений. В связи с тем, что радиоактивные изотопы имеют неравномерный характер распределения по площади и глубине залегания в пойме р. Енисей, а также затруднительно установить длительность облучения корней растений в природе, нами были проведены лабораторные эксперименты с пробой ДО известной активности, соответствующей категории низкоактивных радиоактивных отходов по ^{137}Cs (14500 Бк/кг) для дополнительного доказательства влияния радиоактивности ДО на жизнедеятельность элодеи.

Анализ морфометрических параметров *E. canadensis* в биотесте разной длительности (7 и 11 суток) с радиоактивной пробой ДО-1 представлен на рис. 2. В эксперименте длительностью облучения 7 суток не было получено достоверных отличий в изменении суммарной длины побегов (рис. 2-а) и суммарной длины корней элодеи (рис. 2-в) при росте на радиоактивной пробе ДО-1 по сравнению с контрольной пробой (ДО-К). Для отношения средней длины корня к средней длине побега установлено достоверное снижение этого параметра при росте на радиоактивной пробе ДО-1 по сравнению с контролем ($p = 0,008$) (рис. 2-г). Так же для растений, выросших на пробе ДО-1 установлены значимые отличия от контроля для сухой массы побегов ($p = 0,043$).

В эксперименте длительностью облучения 11 суток было отмечено достоверное увеличение средних значений суммарной длины побегов элодеи при росте на радиоактивной пробе ДО-1 по сравнению с контролем (рис. 2-а). Однако по параметру «сухая масса побегов» не было отмечено достоверной разницы между радиоактивной пробой ДО-1 и контролем (рис.

2-б), что объясняет увеличение длины побегов при росте на радиоактивных ДО вытягиванием без увеличения массы. В эксперименте длительностью 11 суток, в отличие от эксперимента длительностью 7 суток, средняя суммарная длина корней достоверно уменьшалась при росте на радиоактивных ДО-1 по сравнению с контролем ($p = 0,013$). Так же были получены достоверные отличия от контроля параметра «отношение средней длины корня к средней длине побега» при росте на радиоактивных ДО-1 (рис. 2-г). Следовательно, рост и облучение элодеи на радиоактивных ДО приводит к снижению роста корней, как следует из уменьшения параметров «средняя суммарная длина корней» и «отношение средней длины корня к средней длине побега» по сравнению с контролем.

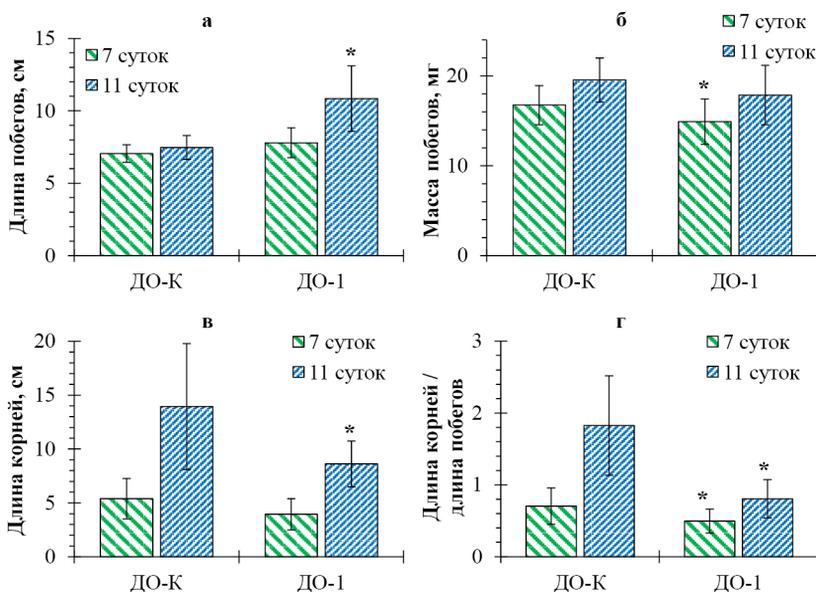


Рис. 2. Морфометрические показатели *Elodea canadensis* в биотесте разной длительности (7 и 11 суток) с радиоактивной пробой донных отложений (ДО-1) и контрольной пробой (ДО-К): **а** – суммарная длина побегов, **б** – сухая масса побегов; **в** – суммарная длина корней, **г** – отношение суммарной длины корней к суммарной длине побегов. * – значимые различия между контрольными (ДО-К) и облучёнными за счёт ^{137}Cs (ДО-1) образцами.

При этом на рост длины побегов элодеи фактор повышенной радиоактивности в ДО не проявился. Ранее отмечалось, что побеги растений

обладают меньшей радиационной чувствительностью по сравнению с корнями [14, 29].

Результаты цитогенетических исследований корневой меристемы *E. canadensis* в экспериментах разной длительности облучения за счёт радиоактивной пробы ДО-1 представлены в таблице 4. Среднее количество клеток с хромосомными aberrациями (ХА) в контроле (ДО-К) в экспериментах длительностью 7 и 11 суток составило $3.8 \pm 0.7\%$ и $4.7 \pm 0.5\%$, соответственно (табл.4). Эти значения уровня ХА не превышали природного фонового уровня ХА для элодеи (табл. 2). В облучённых корнях элодеи за счёт роста на радиоактивных ДО количество клеток с ХА возрастала и варьировала от $6.1 \pm 1.5\%$ до $6,8 \pm 0,6\%$ для временных интервалов облучения 7 и 11 суток, соответственно (табл. 4).

Таблица 4.

Частота встречаемости ана-телофазных клеток корневой меристемы *E. canadensis* с аномалиями митоза в экспериментах с радиоактивными донными отложениями

Хромосомные aberrации	7 суток		11 суток	
	ДО-К	ДО-1	ДО-К	ДО-1
Общее количество аномальных клеток, %	$3,8 \pm 0,7$	$6,1 \pm 1,5$	$4,7 \pm 0,5$	$6,8 \pm 0,6^*$
Фрагменты	$1,95 \pm 0,5$ (52%)	$1,3 \pm 0,5$ (21%)	$1,26 \pm 0,4$ (27%)	$1,36 \pm 0,4$ (20%)
Блуждающие хромосомы	$0,21 \pm 0,1$ (6)	$2,3 \pm 0,7$ (38)*	$1,7 \pm 0,3$ (36)	$3,0 \pm 0,3$ (44)*
Мосты	$0,7 \pm 0,3$ (19)	$1,4 \pm 0,3$ (23)	$0,7 \pm 0,2$ (14)	$1,12 \pm 0,2$ (17)
Множественные	$0,8 \pm 0,4$ (21)	$1,0 \pm 0,4$ (17)	$1,0 \pm 0,2$ (22)	$1,3 \pm 0,4$ (19)
Прочее	$0,1 \pm 0,1$ (2)	$0,1 \pm 0,1$ (1)	$0,1 \pm 0,1$ (1)	0,0 (0)
Фрагменты + блуждающие хромосомы	$2,2 \pm 0,5$ (58%)	$3,6 \pm 1,0$ (59%)	$3,0 \pm 0,5$ (63%)	$4,4 \pm 0,4$ (64%)

Примечание. * – Статистически значимое отличие частоты ХА от контрольного уровня ($p < 0,05$).

В экспериментах с различным временем экспозиции цитогенетических анализ показал повышение уровня клеток с ХА у растений, выращенных на радиоактивных ДО относительно контрольных образцов, однако статистическая значимость различий подтвердилась только на 11 сутки.

В экспериментах разной длительности в спектре ХА элодеи доминировали aberrации типа «Мосты», «Фрагменты», «Множественные нарушения» и «Блуждающие хромосомы» (табл.4). При этом были обнаружены изменения вклада отдельных типов ХА от длительности облучения радиоактивными ДО-1. Показано достоверное увеличение доли блуждающих хромосом у облучённых образцов элодеи до $2,3 \pm 0,7\%$ и $3,0 \pm 0,3\%$, по сравнению с контрольными пробами на 7 и 11 сутки. В то же время aberrации типа «Фрагменты» в клетках облучённых растений статистически значимо не отличалась от контрольных значений, что не согласуется с ранее отмеченным достоверным увеличением данной категории aberrаций при анализе спектра ХА элодеи, произрастающей на радиоактивных ДО реки Енисей вблизи сбросов ГХК (табл. 2). Следует отметить, что суммарный вклад двух aberrаций типа «Фрагменты + блуждающие хромосомы» в проведённых экспериментах был на уровне 60%. Ранее отмечали, что при микроскопировании клеток элодеи довольно сложно разделить хромосомные aberrации типа «Фрагменты» и «Блуждающие хромосомы». Среди других типов ХА можно отметить увеличение среднего уровня aberrаций типа «Мосты» до $1,4 \pm 0,3\%$ для облучённых корней, по сравнению с контролем ($0,7 \pm 0,3\%$), но разница была статистически недостоверна (табл.4). В остальных случаях значимые различия типов ХА отсутствовали. Принимая во внимание достоверное увеличение доли блуждающих хромосом в экспериментах с радиоактивными ДО и достоверное увеличение уровня фрагментов при анализе спектра ХА элодеи, произрастающей на радиоактивных ДО реки Енисей, а также учитывая методические сложности раздельного учёта этих типов ХА, можно принять суммарный уровень aberrаций типа «Фрагменты + Блуждающие хромосомы» одним из параметров цитогенетического отклика элодеи на радиоактивное загрязнение ДО.

В результате проведённых экспериментов показано влияние радиоактивной пробы ДО реки Енисей на морфометрические и цитогенетические параметры элодеи. Следует отметить, что в тестируемой пробе ДО содержание техногенных радионуклидов (14500 Бк/кг) на порядок превышало максимальное содержание техногенных радионуклидов в ДО реки вблизи сбросов ГХК (1470 Бк/кг), в местах отбора проб элодеи (табл. 3). Однако в природных условиях корни элодеи могут получать радиоактивное облучение длительностью десятки дней и месяцы, в отличие от краткосрочных лабораторных экспериментов длительностью 7-11 дней.

Ранее в 2013 году подобные эксперименты по оценке токсичности ДО реки Енисей с использованием элодеи в качестве биотеста проводила Зо-

тина с соавторами [29]. Эти эксперименты по биотестированию ДО методически (включая время экспозиции, которое составляло 10 суток) были близки к условиям наших экспериментов (длительностью 7-11 суток). В вышеотмеченных экспериментах [29] для такого ростового параметра как побеги элодеи была получена противоречивая информация: длина побегов элодеи для отдельных проб ДО отличалась от средней длины побегов в контроле как в сторону увеличения, так и уменьшения длины, но при этом сухая масса побегов достоверно не отличалась от сухой массы побегов в контроле. Аналогичный случай был отмечен и в наших экспериментах (рис. 2). Минимальная средняя длина корней (в два раза меньше длины корней в контроле) отмечена при биотестировании пробы ДО с максимальным содержанием техногенных радионуклидов на уровне 1000 Бк/кг [29], что возможно связано с ингибированием роста корней за счёт радиационного фактора. В этой работе отмечено, что длина корней элодеи является более чувствительным параметром к действию токсических факторов, чем длина побегов. Однако корреляционный анализ не выявил зависимости всех ростовых параметров, а также суммарного уровня хромосомных aberrаций от содержания техногенных радионуклидов в пробах ДО. Возможно это связано с тем, что из 9 тестируемых проб ДО [29] только одна содержала техногенные радионуклиды на уровне 1000 Бк/кг, 4 пробы были фоновые (0.5 Бк/кг) и 4 пробы ДО содержали техногенные радионуклиды на уровне близко к фоновым (48-114 Бк/кг). На основании вышерассмотренных экспериментов, можно предположить влияние содержания техногенных радионуклидов в ДО на морфометрические параметры элодеи только при уровнях 1000 Бк/кг и выше, что согласуется с данными наших экспериментов (рис. 2).

Заключение

Повышенное содержание техногенных радионуклидов в донных отложениях (ДО) вниз по течению реки от Горно-химического комбината (ГХК) ГК Росатом, достигающее на отдельных участках категории низкоактивных радиоактивных отходов, является основным источником радиационного облучения укоренённых водных растений. Остановка последнего ядерного реактора в 2010 году и сокращение масштаба радиоактивных сбросов ГХК в р. Енисей привело к снижению регистрируемого суммарного уровня хромосомных aberrаций (ХА) в корневой меристеме *E. canadensis*, произрастающей вблизи ГХК в период 2014-2021 гг. В 2021 году повышенный суммарный уровень ХА элодеи, отобранной вблизи

сбросов ГХК, достоверно отличался от уровня ХА у растений из фоновых районов, аналогично ранее опубликованным данным для 2012 года. Среди разных типов ХА повышенный уровень аберраций типа «Фрагменты» для районов вблизи сбросов ГХК достоверно отличался от значений для фоновых районов в период наших исследований. Из сравнения данных по уровню ХА в клетках корневой меристемы элодеи и максимального содержания техногенных радионуклидов в ДО реки следует, что достоверные отличия суммарного уровня ХА элодеи из районов вблизи сбросов ГХК и фоновых районов были отмечены в диапазоне максимальной активности радионуклидов 520-1470 Бк/кг.

Фактор повышенной радиоактивности ДО (14500 Бк/кг) в лабораторных экспериментах приводил к уменьшению длины корней элодеи по сравнению с контролем, но не влиял на рост побегов. В эксперименте при длительности облучения элодеи 11 суток за счёт радиоактивных ДО наблюдалось достоверное увеличение уровня клеток с ХА и доли блуждающих хромосом относительно контроля. Учитывая методическую сложность в дифференциации аберраций типа «Фрагменты» и «Блуждающие хромосомы» для клеток элодеи, можно принять суммарный уровень их сочетания за один из параметров цитогенетического отклика элодеи на радиоактивное загрязнение ДО в лабораторном эксперименте и в природных условиях. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о влиянии удельного содержания техногенных радионуклидов в ДО р. Енисей выше определенного уровня на морфометрические и цитогенетические параметры элодеи.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0024).

Conflict of interest statement. The authors have no conflicts of interest to declare.

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).

Список литературы

1. 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 // Доклады Академии наук. 2002. Т. 387, № 2. С. 233-236.
2. Болсуновский А.Я., Суковатый А.Г. Радиоактивное загрязнение водных организмов реки Енисей в зоне влияния Горно-химического комбината // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 3. С. 393-398.
 3. Болсуновский А.Я., Муратова Е.Н., Суковатый А.Г., Пименов А.В., Санжараева Е.А., Зотина Т.А., Корнилова М.Г. Радиоэкологический мониторинг реки Енисей и цитогенетические характеристики водного растения *Elodea canadensis* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т.47, № 1. С. 63-73.
 4. Болсуновский А.Я., Трофимова Е.А., Дементьев Д.В., Карпов А.Д. Интенсивность накопления урана-238 представителями разных экологических уровней экосистемы р. Енисей // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2016. № 2. С.161-171. <https://doi.org/10.17223/19988591/34/11>
 5. Даев Е.В., Дукельская А.В., Барабанова Л.В. Цитогенетические методы индикации экологической напряженности в водных и наземных биосистемах // Экологическая генетика. 2014. Т.12, № 2. С.4-12.
 6. Лунёва К.В., Крышев А.И. Анализ радиоэкологического воздействия Красноярского горно-химического комбината на объекты речной биоты в 2000-2012 гг. // Радиация и риск. 2014. Т. 23. № 1, С. 89-96.
 7. Медведева М.Ю., Болсуновский А.Я., Зотина Т.А. Цитогенетические нарушения у водного растения *Elodea canadensis* в зоне техногенного загрязнения р. Енисей // Сибирский экологический журнал. 2014. Т.21, № 4. С.561-572.
 8. Муратова Е.Н., Горячкина О.В., Корнилова М.Г., Пименов А.В., Седельникова Т.С., Болсуновский А.Я. Цитогенетическое изучение водных растений акватории Енисея в зоне радиационного загрязнения // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2014. № 5. С.510-517. <https://doi.org/10.7868/S0002332914050099>
 9. Отчет по экологической безопасности ГХК за 2021 год. Железногорск, 2022. 48 с. https://sibghk.ru/images/pdf/eco/ghk_corep_2021.pdf
 10. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году. Ежегодник. Росгидромет, ФГБУ «НПО «Тайфун». Обнинск. 2021. 329 с. https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/187/ezhegodnik_ro_2020.pdf
 11. Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белолипецкий В.М., Болсуновский А.Я., Ковалев С.И., Косолапова Л.Г., Мельгунов М.С., Рапута В.Ф. Зако-

- номерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск, Изд-во СО РАН. Филиал “Гео”. 2004. 286 с.
12. Трофимова Е.А., Зотина Т.А., Болсуновский А.Я. Оценка переноса техногенных радионуклидов в трофических сетях реки Енисей // Сибирский экологический журнал. 2012. №4. С.497-504.
 13. Трофимова Е.А., Зотина Т.А., Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я. Накопление техногенных радионуклидов хищными и мирными рыбами реки Енисей // Вопросы радиационной безопасности. 2014. № 4. С. 55-61.
 14. Arts G.H.P., Belgers J.D.M., Hoekzema C.H., Thissen J.T.N.M. Sensitivity of submerged freshwater macrophytes and endpoints in laboratory toxicity tests // Environ. Pollut. 2008. Vol.153. P. 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.019>
 15. Bolsunovsky A., Demytyev D., Trofimova E., Iniatkina E., Kladko Yu., Petrichenkov M. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation // Journal of environmental radioactivity. 2019. Vol. 207. P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014>
 16. Bolsunovsky A., Demytyev D., Trofimova E. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants // Journal of environmental radioactivity. 2020. Vol. 211. № 106100. P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106100>
 17. Bolsunovsky A.Ya., Demytyev D.V., Vakhrushev V.I. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event // Doklady Earth Sciences. 2021. Vol. 498, Part 2. P. 514-518. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21060052>
 18. Demytyev D.V., Bolsunovsky A.Y., Borisov R.V., Trofimova E.A. Concentrations of heavy metals in bottom sediments of the Yenisei River near Krasnoyarsk // Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng. 2015. Vol. 326, № 5. P. 91-98. <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1578/1431>
 19. Fukui Kiichi, Nakayama Shigeki. Plant Chromosomes: Laboratory Methods. 1996, 288 p.
 20. Geras'kin S., Evseeva T., Oudalova A. Plants as a tool for the environmental health assessment // Encyclopedia of environmental health. 2011. P. 239-248.
 21. Geras'kin S.A., Oudalova A.A., Kim J.K., Dikarev V.G., Dikareva N.S. Cytogenetic effect of low dose γ -radiation in *Hordeum vulgare* seedlings: non-linear dose-effect relationship // Radiat. Environ. Biophys. 2007. Vol. 46. P. 31-41. <https://doi.org/10.1007/s00411-006-0082-z>
 22. Grant W.F. Chromosome aberrations in plants as a monitoring system // Environmental Health Perspectives. 1978. Vol. 7. P. 37-43. <https://doi.org/10.1289/ehp.782737>

23. Gudkov D.I., Shevtsova N.L., Pomortseva N.A., Dzyubenko E.V., Kaglyan A.E., Nazarov A.B. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone // Journal of environmental radioactivity. 2016. Vol. 151. P. 438-448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.004>
24. Nosov A.V. Analysis of the radiation environment on the Enisei River after decommissioning of straight-through reactors at the Krasnoyarsk mining-chemical complex // Atom. Energy. 1996. Vol. 81. P. 670-674. <https://doi.org/10.1007/BF02407062>
25. Rank J. The method of *Allium* anaphase-telophase chromosome aberration assay // Ekologija. 2003. Vol.1. P. 38-42.
26. Sediment-water chironomid toxicity test using spiked water. Test Guideline No. 219. Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. 2004. OECD Publishing, Paris.
27. Shevtsova N.L., Gudkov D.I., Cytogenic effects of long-term radiation on higher aquatic plants within the Chernobyl accident Exclusion Zone // Radioprotection. 2009. Vol. 44. P. 937-940. <https://doi.org/10.1051/radiopro/20095167>
28. Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I., Savitsky Y.V., Malyshev S.U., Tertyschnik E.G. Radioactive contamination of the Yenisey River // Journal of environmental radioactivity. 1995. Vol. 29. P. 225-236. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(95\)00033-7](https://doi.org/10.1016/0265-931X(95)00033-7)
29. Zotina T.A., Trofimova E.A., Medvedeva M.Yu., Demytyev D.V., Bolsunovsky A.Ya. Use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess toxicity and genotoxicity of Yenisei River sediments // Environmental Toxicology and Chemistry. 2015. Vol. 34, No. 10. P. 2310-2321. <https://doi.org/10.1002/etc.3057>
30. Zotina T.A., Trofimova E.A., Demytyev D.V. Time-dependent trends of artificial radionuclides in biota of the Yenisei River (Siberia, Russia) // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 208-209. № 106028. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106028>

References

1. Bolsunovsky A.Ya., Ermakov A.I., Myasoedov B.F., Novikov A.P., Sobolev A.I. New data on the content of transuranic elements in bottom sediments of the Yenisei River. *Reports of the Academy of Sciences*, 2002, vol. 387, no. 2, pp. 233-236.
2. Bolsunovsky A.Ya., Sukovaty A.G. Radioactive contamination of aquatic organisms of the Yenisei River in the zone of influence of the Mining-Chemical Combine. *Radiation Biology. Radioecology*, 2004, vol. 44, no. 3, pp. 393-398.
3. Bolsunovsky A.Ya., Muratova E.N., Sukovaty A.G., Pimenov A.V., Sanzharaeva E.A., Zotina T.A., Kornilova M.G. Radioecological monitoring of the Yenisei

- River and cytogenetic characteristics of the aquatic plant *Elodea canadensis*. *Radiation Biology. Radioecology*, 2007, vol. 47, no. 1, pp. 63-73.
4. Bolsunovsky, A.Ya.; Trofimova, E.A.; Dementiev, D.V.; Karpov, A.D. Intensity of uranium-238 accumulation by representatives of different ecological levels of the Yenisei River ecosystem. *Bulletin of Tomsk State University. Biology*, 2016, no. 2, pp. 161-171. <https://doi.org/10.17223/19988591/34/11>
 5. Daev E.V., Dukelskaya A.V., Barabanova L.V. Cytogenetic methods of ecological tension indication in aquatic and terrestrial Biosystems. *Ecological Genetics*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 4-12.
 6. Luneva, K.V.; Kryshev, A.I. Analysis of radioecological impact of Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine on the river biota objects in 2000-2012. *Radiation and Risk*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 89-96.
 7. Medvedeva M.Yu., Bolsunovsky A.Ya., Zotina T.A. Cytogenetic disorders in the aquatic plant *Elodea canadensis* in the zone of anthropogenic pollution of the Yenisei River. *Siberian Ecological Journal*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 561-572.
 8. Muratova E.N., Goryachkina O.V., Kornilova M.G., Pimenov A.V., Sedelnikova T.S., Bolsunovsky A.Ya. Cytogenetic study of aquatic plants of the Yenisei water area in the zone of radiation contamination. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*, 2014, no. 5, pp. 510-517. <https://doi.org/10.7868/S0002332914050099>
 9. MCC Environmental Safety Report for 2021. Zheleznogorsk, 2022, 48 p. https://sibghk.ru/images/pdf/eco/ghk_ecorep_2021.pdf
 10. *Radiation situation on the territory of Russia and neighboring countries in 2020*. Roshydromet, NPO 'Typhoon'. Obninsk, 2021, 329 p. https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/187/ezhegodnik_ro_2020.pdf
 11. Sukhorukov F.V., Degermendzhi A.G., Belolipetsky V.M., Bolsunovsky A.Ya., Kovalev S.I., Kosolapova L.G., Melgunov M.S., Raputa V.F. *Regularities of distribution and migration of radionuclides in the valley of the Yenisei River*. Novosibirsk, Izd-vo SO RAS. Geo Branch. 2004. 286 c.
 12. Trofimova E.A., Zotina T.A., Bolsunovsky A.Ya. Assessment of the transfer of anthropogenic radionuclides in the trophic networks of the Yenisei River. *Siberian Ecological Journal*, 2012, no. 4, pp. 497-504.
 13. Trofimova E.A., Zotina T.A., Dementiev D.V., Bolsunovsky A.Ya. Accumulation of anthropogenic radionuclides by predatory and peaceful fish of the Yenisei River. *Voprosy Radiation Safety*, 2014, no. 4, pp. 55-61.
 14. Arts G.H.P., Belgers J.D.M., Hoekzema C.H., Thissen J.T.N.M. Sensitivity of submerged freshwater macrophytes and endpoints in laboratory toxicity tests.

- Environ. Pollut.*, 2008, vol. 153, pp. 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.019>.
15. Bolsunovsky A., Demytyev D., Trofimova E., Iniatkina E., Kladko Yu., Petrichenkov M. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation. *Journal of environmental radioactivity*, 2019, vol. 207, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014>
 16. Bolsunovsky A., Demytyev D., Trofimova E. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants. *Journal of environmental radioactivity*, 2020, vol. 211, no. 106100, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106100>
 17. Bolsunovsky A.Ya., Demytyev D.V., Vakhrushev V.I. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 498, part 2, pp. 514-518. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21060052>
 18. Demytyev D.V., Bolsunovsky A.Y., Borisov R.V., Trofimova E.A. Concentrations of heavy metals in bottom sediments of the Yenisei River near Krasnoyarsk. *Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng.*, 2015, vol. 326, no. 5, pp. 91-98. <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1578/1431>
 19. Fukui Kiichi, Nakayama Shigeki. *Plant Chromosomes: Laboratory Methods*, 1996, 288 p.
 20. Geras'kin S., Evseeva T., Oudalova A. Plants as a tool for the environmental health assessment. *Encyclopedia of environmental health*, 2011, pp. 239-248.
 21. Geras'kin S.A., Oudalova A.A., Kim J.K., Dikarev V.G., Dikareva N.S. Cytogenetic effect of low dose γ -radiation in *Hordeum vulgare* seedlings: non-linear dose-effect relationship. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2007, vol. 46, pp. 31-41. <https://doi.org/10.1007/s00411-006-0082-z>
 22. Grant W.F. Chromosome aberrations in plants as a monitoring system. *Environmental Health Perspectives*, 1978, vol. 7, pp. 37-43. <https://doi.org/10.1289/ehp.782737>
 23. Gudkov D.I., Shevtsova N.L., Pomortseva N.A., Dzyubenko E.V., Kaglyan A.E., Nazarov A.B. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone. *Journal of environmental radioactivity*, 2016, vol. 151, pp. 438-448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.004>
 24. Nosov A.V. Analysis of the radiation environment on the Enisei River after decommissioning of straight-through reactors at the Krasnoyarsk mining-chemical complex. *Atom. Energy*, 1996, vol. 81, pp. 670-674. <https://doi.org/10.1007/BF02407062>
 25. Rank J. The method of *Allium* anaphase-telophase chromosome aberration assay. *Ekologija*, 2003, vol. 1, pp. 38-42.

26. Sediment-water chironomid toxicity test using spiked water. Test Guideline No. 219. Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. 2004. OECD Publishing, Paris.
27. Shevtsova N.L., Gudkov D.I., Cytogenic effects of long-term radiation on higher aquatic plants within the Chernobyl accident Exclusion Zone. *Radioprotection*, 2009, vol. 44, pp. 937-940. <https://doi.org/10.1051/radiopro/20095167>
28. Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I., Savitsky Y.V., Malyshev S.U., Tertyschnik E.G. Radioactive contamination of the Yenisey River. *Journal of environmental radioactivity*, 1995, vol. 29, pp. 225-236. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(95\)00033-7](https://doi.org/10.1016/0265-931X(95)00033-7)
29. Zotina T.A., Trofimova E.A., Medvedeva M.Yu., Demytyev D.V., Bolsunovsky A.Ya. Use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess toxicity and genotoxicity of Yenisei River sedim ents. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, vol. 34, no. 10, pp. 2310-2321. <https://doi.org/10.1002/etc.3057>
30. Zotina T.A., Trofimova E.A., Demytyev D.V. Time-dependent trends of artificial radionuclides in biota of the Yenisei River (Siberia, Russia). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 208-209, no. 106028. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106028>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Болсуновский Александр Яковлевич, д-р биол. наук, заведующий лабораторией радиоэкологии

Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация

radecology@gmail.com

Трофимова Елена Александровна, м.н.с. лаборатории радиоэкологии

Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
e.trofimova11@yandex.ru

Дементьев Дмитрий Владимирович, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории радиоэкологии

Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
dementyev@gmail.com

Дементьева Алена Сергеевна, ведущий инженер лаборатории радиоэкологии

Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
aileenpetrova@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alexander Ya. Bolsunovsky, Dr. Sc. (Biology), Head of Radioecology Laboratory

Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS
50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation
radecology@gmail.com
SPIN-code: 1611-7686
Researcher ID: P-8028-2015
Scopus Author ID: 6602465853

Elena A. Trofimova, Junior Researcher, Radioecology Laboratory

Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS
50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation
e.trofimova11@yandex.ru
SPIN-code: 7291-7039
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7511-4916>
Scopus Author ID: 42662341100

Dmitry V. Dementyev, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Radioecology Laboratory

*Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS
50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation
dementyev@gmail.com
SPIN-code: 4626-1423
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7016-8592>
Researcher ID: S-4807-2017
Scopus Author ID: 6507497346*

Alena S. Dementyeva, Leading Engineer, Radioecology Laboratory
*Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS
50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation
aileenpetrova@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1786-7893>
Researcher ID: K-8244-2018*

Поступила 05.03.2024

После рецензирования 20.05.2024

Принята 27.05.2024

Received 05.03.2024

Revised 20.05.2024

Accepted 27.05.2024