

УДК 574.21: 574.633: 574.522

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ПЛУТОНИЯ И РАДИОЦЕЗИЯ В МЫШЦАХ РЫБ р. ЕНИСЕЙ

© 2022 г. Т. А. Зотина^{1,3,*}, М. С. Мельгунов², Д. В. Дементьев¹, Ю. В. Александрова¹

Представлено академиком РАН А.Г. Дегерменджи

Поступило 20.04.2022 г.

После доработки 20.05.2022 г.

Принято к публикации 20.05.2022 г.

В работе получены первые данные по содержанию плутония ($^{239+240}\text{Pu}$) в мышцах обыкновенной щуки (*Esox lucius*) и сибирского ельца (*Leuciscus baicalensis*), обитающих в среднем течении р. Енисей вблизи места поступления в реку радиоактивных сбросов Горно-химического комбината. Отмечено возрастание содержания $^{239+240}\text{Pu}$ и радиоцезия (^{137}Cs) в мышцах щуки вслед за увеличением объема контролируемых сбросов этих радионуклидов в 2018 г. Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в мышцах щуки (2–11 мБк/кг сух. веса) и ельца (1–4 мБк/кг сух. веса) р. Енисей попадает в диапазон величин, полученных другими авторами для ихтиофауны из водоемов, загрязненных сбросами АЭС и предприятий по переработке отработавшего ядерного топлива. Отношение удельных активностей $^{239+240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ в мышцах рыб по сравнению с аналогичным соотношением в других гидробионтах свидетельствует о значительно более низкой биологической доступности плутония для рыб.

Ключевые слова: радионуклиды, щука, елец, биомагнификация, биоиндикатор

DOI: 10.31857/S268673892205033X

Плутоний (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$) поступает в р. Енисей в составе контролируемых радиоактивных сбросов Горно-химического комбината (ГХК). Изотопы плутония в силу большого периода полураспада (87.7 лет для ^{238}Pu , 2.41×10^4 лет для ^{239}Pu и 6.54×10^3 лет для ^{240}Pu) накапливаются в экосистеме со временем и могут представлять опасность для биоты в долгосрочной перспективе как источник α -излучения. Недавние исследования показали, что содержание плутония в донных отложениях, представителях макрофитной растительности и зообентоса р. Енисей, возросло в ответ на увеличение сбросов плутония в реку [1, 2]. Биологически доступный плутоний способен переноситься в водных трофических сетях. Известно, что плутоний видоспецифично накапливается в тканях и органах морских и пресноводных рыб [3–7]. В настоящее время нет опубликованных данных по содержанию плутония в предста-

вителях ихтиофауны р. Енисей, несмотря на имеющиеся результаты оценки дозовой нагрузки для рыб [8]. Чтобы восполнить этот пробел, в данной работе мы оценивали содержание плутония в мышцах массовых промысловых рыб р. Енисей в период до и после увеличения контролируемых сбросов плутония. Данные результаты необходимы для сравнительной оценки индикаторного потенциала видов промысловых рыб и оценки относительной биодоступности плутония и радиоцезия для рыб, отличающихся типом питания.

Для исследования использовали щуку обыкновенную (*Esox lucius*) – представителя рыбацких рыб, и ельца сибирского (*Leuciscus baicalensis*) – представителя всеядных рыб. Визуальный анализ содержимого желудков щук показал, что елец входит в спектр питания щуки. Елец и щука относятся к числу массовых промысловых видов на среднем участке Енисея. Отлов рыб производился в р. Енисей вблизи с. Большой Балчуг (участок 2, рис. 1). Участок отлова рыб расположен на 90–95 км ниже по течению г. Красноярск и на 10–15 км ниже места радиоактивных сбросов ГХК. Фоновый участок отлова располагался на 100 км выше места поступления радиоактивных сбросов в р. Енисей, вблизи с. Овсянка (участок 1, рис. 1). Рыбы получены из уловов местных рыбаков. Пробы мышц, снятые с осевого скелета рыб, сушили и озоляли, как описано ранее [9, 10]. В одну пробу объединяли мышцы от 18–72 ельцов, от-

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

² Институт геологии и минералогии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

*e-mail: t_zotina@ibp.ru



Рис. 1. Карта отрезка р. Енисей с указанием мест отлова рыб: 1 – место отбора фоновых проб, 2 – место отлова рыб, расположенное на расстоянии около 15–20 км ниже радиоактивных сбросов Горно-химического комбината (ГХК). Для создания рисунка был использован фрагмент космического снимка из GoogleEarth.

ловленных в одну дату. Мышцы щук объединяли в одну пробу в 2011–2014 гг. по 4–7 особей на пробу, с 2015 г. мышцы щук анализировали индивидуально. Сырой вес тел щуки составлял 0.24–2.51 кг, ельца – 0.044–0.116 кг. Содержание γ -излучающих радионуклидов в пробах золы мышц измеряли с помощью гамма-спектрометра с полупроводниковым германиевым детектором GX2320 (Canberra), как описано ранее [9], в ИБФ СО РАН (Красноярск). Удельные активности рассчитывали на дату вылова рыб. Для анализа использовали только величины, превышающие предел обнаружения. Плутоний экстрагировали из проб золы растворителем и выделяли с помощью ионообменной смолы, как описано ранее [2]. Выделенный плутоний осаждали электролитически на мишень из нержавеющей стали. Содержание изотопов плутония ($^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu) измеряли на 8-канальном альфа-спектрометре ALPHA-ENSEMBLE-8-RM с низкофоновыми кремниевыми детекторами ENS-U300 (Ametek, “ORTEC”) в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск). Предел обнаружения изотопов плутония составлял 0.001 Бк. Удельные активности радионуклидов в пробах мышц приведены в Бк/кг сухого веса. В качестве ошибок результатов указаны погрешности измерения (стандартные отклонения), рассчитанные для случайных событий, описываемых распределением Пуассона как квадратный корень из среднего числа зарегистрированных импульсов.

Согласно опубликованным данным в исследованный нами период времени произошли изменения в производственной деятельности ГХК, что повлекло за собой возрастание ежегодных разрешенных сбросов плутония в открытую гид-

рографическую сеть [11]. Наиболее сильное увеличение сбросов плутония произошло в 2018 г., в 4.7 раза по сравнению с предыдущим годом для $^{239+240}\text{Pu}$. Данные о сбросах ^{238}Pu приведены в отчетах только в 2018 и 2019 гг. (рис. 2а). Данные о сбросе $^{239+240}\text{Pu}$ в 2019–2020 г. в ежегодных отчетах не представлены. В исследованные нами годы содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в пробах мышц ельца составляло 1–4 мБк/кг сух. веса, возрастания содержания плутония в пробах ельца после увеличения объема сбросов этого радионуклида не отмечено (рис. 2а). Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в мышцах щуки варьировалось в диапазоне 2–11 мБк/кг сух. веса. Максимальная величина, в 2.7–5.5 раза превышающая содержание плутония в другие годы, зарегистрирована в 2018 г. Следует отметить, что в 2018 г. была проанализирована самая крупная щука, весом 2.5 кг, возрастом не менее 7 лет, тогда как вес щук в других выборках не превышал 1.7 кг. Следовательно, в дальнейшей работе следует проверить наличие положительной зависимости между содержанием плутония в мышцах и размерно-весовыми характеристиками щук. Содержание ^{238}Pu в мышцах рыб не превышало пределов обнаружения этого изотопа.

Содержание изотопов плутония в мышцах рыб с фонового участка р. Енисей не превышало пределов обнаружения, равно как и содержание радиоцезия. Анализ литературы показал, что удельные активности плутония в мышцах щуки и ельца из р. Енисей сопоставимы с величинами, зарегистрированными в мышцах морских и пресноводных рыб, обитающих вблизи радиоактивных сбросов предприятий ядерной промышленности [12, 13]. Например, в мышцах рыб из р. Рона (Rhône River), обитающих вблизи сбросов предприятия по переработке отработавшего ядерного топлива, содержание $^{239+240}\text{Pu}$ составляло 2–7 мБк/кг сух. веса [12], а в мышцах средиземноморских рыб вблизи АЭС Ванделлос (Vandellós NPP) – 7–31 мБк/кг сух. веса [13]. В целом следует отметить, что опубликованные данные по содержанию плутония в мышцах пресноводных рыб немногочисленны. Из публикаций известно, что содержание плутония в разных органах и тканях рыб может значительно различаться. Так, удельная активность плутония в мышцах рыб значительно ниже, чем в печени, гонадах и костях [3–7]. Например, удельная активность плутония в печени рыб из водоемов зоны отчуждения Чернобыльской АЭС на 1–3 порядка выше, чем в мышцах этих рыб [5], содержание плутония в печени морских рыб в 5–1000 раз превышает содержание в мышцах [3, 6, 7]. Также известно, что, помимо печени, плутоний имеет большее сродство к костным тканям, чем к мышечным, поэтому его удельная активность в костях рыб выше, чем в мышцах [3, 7]. Следовательно, при оценке дозовой нагрузки для ихтио-

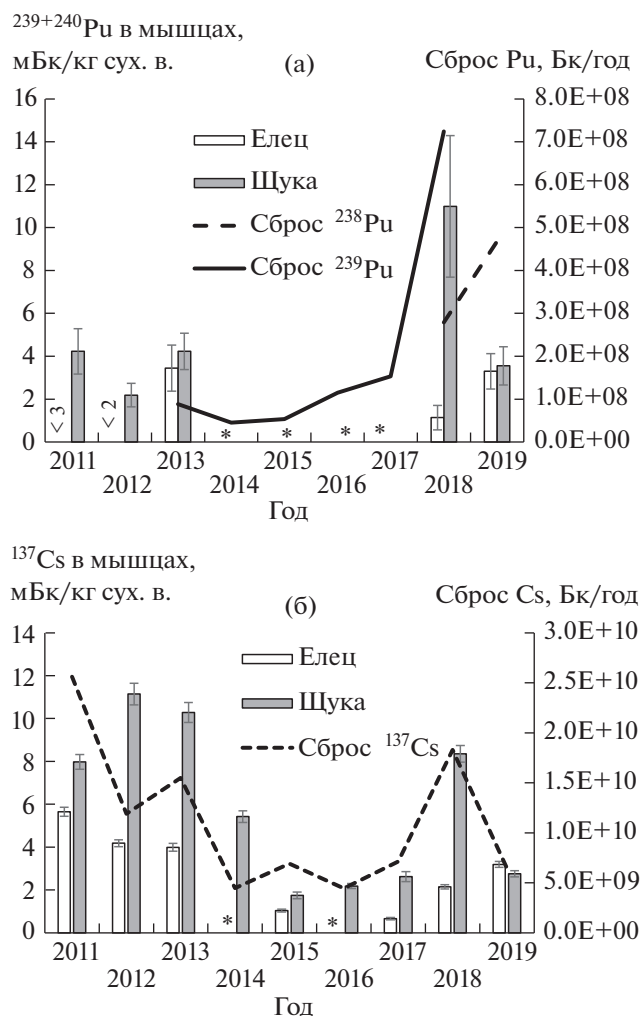


Рис. 2. Содержание плутония, $^{239+240}\text{Pu}$, (а) и радиоцезия, ^{137}Cs , (б) в мышцах ельца и щуки р. Енисей (гистограммы, Бк/кг сух. массы) и в ежегодных сбросах (графики, Бк/год). В отмеченные звездочками годы анализ проб не производился.

фауны и прогнозировании отдаленных биологических эффектов следует учитывать особенности накопления плутония в органах и тканях рыб.

Из гамма-излучающих техногенных радионуклидов в пробах мышц щуки и ельца, отловленных вблизи точки радиоактивных сбросов, зарегистрирован только радиоцезий (^{137}Cs). В исследованный в настоящей работе период наблюдалось снижение сбросов ^{137}Cs в Енисей с 2011 по 2014 г., а в 2018 г. произошло увеличение сбросов, аналогично увеличению сбросов плутония (рис. 2б). В 2018 г. отмечено возрастание содержания радиоцезия в мышцах щуки в 3.2 раза по сравнению с предыдущим годом и в 3.8 раза относительно предшествовавшего трехлетнего периода с низким уровнем сбросов цезия (рис. 2б), что согласуется с магнитудой возрастания активности цезия, поступившей в 2018 г. в Енисей со сбросами, в 2.6 и 3 раз соответственно. Временные тренды содер-

жания радиоцезия в мышцах рыб в целом согласуются с динамикой ежегодных сбросов этого радионуклида в Енисей, однако, статистически значимой корреляции между сбросами и содержанием радиоцезия в мышцах рыб выявить не удалось ($R = 0.64$, $p = 0.119$, $n = 9$ для щуки; $R = 0.70$; $p = 0.079$, $n = 7$ для ельца). Корреляционный анализ также не выявил статистически значимой зависимости между содержанием радиоцезия в мышцах ельца и мышцах щуки ($R = 0.68$, $p = 0.089$, $n = 7$), несмотря на схожие тренды.

Плутоний и радиоцезий, содержащиеся в мышцах рыб, представляют собой биологически доступную форму этих радионуклидов, которая ассимилировалась в мышцах из воды и/или пищи, и может быть перенесена в организмы потребителей рыбы. Сравнение с другими гидробионтами р. Енисей показало, что удельные активности $^{239+240}\text{Pu}$ (1–11 мБк/кг) в мышцах рыб были

значительно ниже, чем в биомассе двух видов макрофитов (84–25915 мБк/кг), накапливающих радионуклиды из воды, и телах амфипод (96–7551 мБк/кг), получающих радионуклиды преимущественно из пищи [2]. Отношение удельных активностей $^{239+240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ в мышцах щуки и ельца варьировались в диапазоне 0.0002–0.0013, что на 1–3 порядка ниже соотношения активностей этих изотопов в ежегодных сбросах ГХК (0.006–0.040), а также в других представителях биоты Енисея (0.011–0.719 в водном мхе, 0.004–0.211 в рдесте блестящем, 0.006–0.66 в амфиподах) [2]. Это свидетельствует о значительно более низкой эффективности накопления плутония в мышцах рыб по сравнению с радиоцезием, что согласуется с существующими представлениями о специфике биоаккумуляции этих радионуклидов в органах и тканях рыб [4, 14].

Содержание цезия в мышцах щук в 2011–2018 гг. в 1.4–4 раз превышало содержание цезия в мышцах ельца, что, вероятно, свидетельствует о биомагнификации радиоцезия в терминальном звене трофической цепи р. Енисей. Биомагнификация цезия в пресноводной трофической цепи – известное явление в радиоэкологии [9, 15], чего нельзя сказать о плутонии. Содержание плутония в мышцах енисейской щуки в 1.1–9.6 раза превышало содержание плутония в мышцах ельца, однако, для подтверждения биомагнификации плутония в пищевой цепи, необходимо собрать больше натуральных данных.

Таким образом, в данной работе впервые оценено содержание плутония в съедобных мышечных тканях обыкновенной щуки и сибирского ельца, обитающих в среднем течении Енисея вблизи места поступления в реку радиоактивных сбросов. Удельные активности плутония в мышцах рыб попадают в диапазон величин, полученных другими авторами для ихтиофауны из водоемов, загрязненных радиоактивными сбросами АЭС и предприятий по переработке отработавшего ядерного топлива. Соотношение удельных активностей плутония и радиоцезия в мышцах рыб по сравнению с аналогичным соотношением в других гидробионтах свидетельствует о более низкой биологической доступности плутония для рыб. На основании полученных предварительных результатов обыкновенную щуку можно рассматривать как более перспективный, по сравнению с сибирским ельцом, индикатор биологически доступного плутония в р. Енисей. Полученные в данной работе результаты могут быть использованы для оценки отдаленных биологических эффектов у рыб, а также для разработки мер реабилитации загрязненных участков реки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят П.Ю. Андрущенко (ИБФ СО РАН) за помощь при подготовке проб.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии известных им конфликтов интересов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Грант РФФИ и Правительства Красноярского края совместно с Красноярским краевым Фондом поддержки научной и научно-технической деятельности № 20-44-240004; госзадание ИБФ СО РАН и ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зотина Т.А., Мельгунов М.С., Дементьев Д.В. и др.* // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 2. С. 53–55.
2. *Zotina T.A., Melgunov M.S., Dementyev D.V., et al.* // J. Environ. Radioactiv. 2021. V. 237. P. 106723.
3. *Skwarzec B., Struminska D.I., Borylo A.* // J. Environ. Radioactiv. 2001. V. 55 (2). P. 167–78.
4. *Ikaheimonen T.K., Saxen R.* // Boreal Environment Research. 2002. V. 7. P. 99–104.
5. *Lerebours A., Gudkov D., Nagorskaya L., et al.* // Environ. Sci. Technol. 2018. V. 52 (16). P. 9442–9450.
6. *Johansen M.P., Child D.P., Cresswell T., et al.* // Sci. Total Environ. 2019. V. 691. P. 572–583.
7. *Kim S.H., Lee H.M., Hong G.H., et al.* // J. Environ. Radioactiv. 2020. V. 217. P. 106191.
8. *Бурякова А.А., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. и др.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60 (6). С. 661–670.
9. *Zotina T.A., Trofimova E.A., Dementyev D.V.* // J. Environ. Radioactiv. 2019. V. 208–209. P. 106028.
10. *Зотина Т.А., Трофимова Е.А., Дементьев Д.В.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59 (3). С. 321–328.
11. *Шершаков В.М., Булгаков В.Г., Крышев И.И. и др. (ред.)* Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2010–2020 году. Ежегодник. Обнинск: НПО “Тайфун”, 2011–2021.
12. *Eyrolle F., Claval D., Gontier G., et al.* // J. Environ. Monit. 2008. V. 10. P. 800–811.
13. *Sanchez-Cabeza J.A., Molero J.* // J. Environ. Radioactiv. 2000. V. 51 (2). P. 211–228.
14. *Johansen M.P., Child D.P., Cresswell T., et al.* // Sci. Total Environ. 2019. V. 15 (691). P. 572–583.
15. *Pinder J.E. 3rd, Hinton T.G., Taylor B.E., et al.* // J. Environ. Radioactiv. 2011. V. 102. P. 283–293.

COMPARATIVE STUDY OF PLUTONIUM AND RADIOCESIUM IN MUSCLE OF FISH OF THE YENISEI RIVER

T. A. Zotina^{a,c,#}, M. S. Melgunov^b, D. V. Dementyev^a, and Yu. V. Alexandrova^a

^a Institute of Biophysics, Krasnoyarsk Science Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

^b Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

^c Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

[#]e-mail: t_zotina@ibp.ru

Presented by Academician of the RAS A.G. Degermendzhi

In this work, the first data on the content of plutonium ($^{239+240}\text{Pu}$) in the muscle tissues of the Northern pike (*Esox lucius*) and Siberian dace (*Leuciscus leuciscus baicalensis*) inhabiting the middle reaches of the Yenisei River in the vicinity of the radioactive discharge site, were obtained. An increase in the content of $^{239+240}\text{Pu}$ and radiocesium (^{137}Cs) in pike muscles followed an increase in the volume of controlled discharges of these radionuclides to the Yenisei in 2018. The content of $^{239+240}\text{Pu}$ in the muscles of pike (2–11 mBq/kg dry weight) and dace (1–4 mBq/kg dry weight) of the Yenisei fall within the range of values obtained by other authors for the ichthyofauna from water bodies contaminated with radioactive discharges from nuclear power plants and spent nuclear fuel processing plants. The ratio of the activity concentrations $^{239+240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ in fish muscles, compared with the similar ratios in other hydrobionts, indicates a significantly lower bioavailability of plutonium for fish. The obtained preliminary results make it possible to consider the Northern pike as a more prospective indicator of biologically available plutonium in the Yenisei than the dace.

Keywords: radionuclide, Northern pike, Siberian dace, bioindicator, biomagnification