

УДК 539.163:574.5:597

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ПЛУТОНИЯ И РАДИОЦЕЗИЯ В МЫШЦАХ ХАРИУСА (*Thymallus baicalensis*) р. ЕНИСЕЙ

© 2023 г. Т. А. Зотина^{1,3,*}, М. С. Мельгунов², Д. В. Дементьев¹, Ю. В. Александрова¹¹Институт биофизики, Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН, Красноярск, Россия²Институт геологии и минералогии Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия³Институт фундаментальной биологии и биотехнологии, Сибирский Федеральный университет, Красноярск, Россия

*E-mail: t_zotina@ibp.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022 г.

После доработки 24.08.2022 г.

Принята к публикации 07.09.2022 г.

В работе приводятся результаты измерения содержания плутония ($^{239,240}\text{Pu}$) в мышцах хариуса *Thymallus baicalensis*, обитающего в среднем течении р. Енисей вблизи места поступления в реку радиоактивных сбросов Горно-химического комбината, в 2011–2019 гг. Содержание $^{239,240}\text{Pu}$ в мышцах хариуса изменялось в диапазоне 7–32 мБк/кг сух. массы. Максимальная величина зарегистрирована в 2019 г., через год после увеличения объема контролируемых сбросов плутония в р. Енисей. Отношение удельных активностей $^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ в мышцах хариуса было на порядок ниже аналогичного соотношения в других гидробионтах, что свидетельствует о меньшей биологической доступности плутония для рыб.

Ключевые слова: техногенный радионуклид, плутоний, цезий, рыба, биоиндикатор

DOI: 10.31857/S0869803122060145, **EDN:** JVGCNY

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. Содержание плутония в донных отложениях, макрофитах и зообентосе р. Енисей возросло в последние годы в ответ на увеличение сбросов плутония в реку [1]. В настоящее время нет опубликованных данных по содержанию плутония в представителях ихтиофауны р. Енисей, несмотря на имеющиеся результаты оценки дозовой нагрузки для рыб [2]. Чтобы восполнить этот пробел, в данной работе мы оценивали содержание плутония в мышцах хариуса байкальского (*Thymallus baicalensis* Dybowski, 1874), который относится к числу массовых промысловых видов на среднем участке Енисея, в период до и после увеличения контролируемых сбросов плутония.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Рыб отлавливали в р. Енисей в августе–октябре 2011–2019 гг. на расстоянии 10–15 км ниже места

радиоактивных сбросов ГХК, и на фоновом участке реки, расположенном на 90 км выше ГХК [1, 3]. В одну пробу объединяли мышцы от 10–30 хариусов. Возраст рыб в выборках составлял 2–4 года. Пробы мышц, снятые с осевого скелета рыб, сушили при 105°C и озоляли, как описано ранее [3]. Содержание влаги в пробах мышц составляло $73 \pm 1\%$. Плутоний экстрагировали из проб золы растворителем и выделяли с помощью ионообменной смолы АВ-17-8 [1]. Содержание изотопов плутония ($^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu) в пробах 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, ^{137}Cs – 0.05 Бк. Содержание γ -излучающих радионуклидов в пробах золы измеряли с помощью гамма-спектрометра с германиевым детектором GX2320 (“Canberra”, США) [1, 3] в ИБФ СО РАН (Красноярск). Удельные активности радионуклидов в пробах мышц приведены в Бк/кг сухой массы на дату отлова рыб. В качестве ошибок результатов указаны погрешности измерения (стандартные отклонения), рассчитанные для случайных событий.

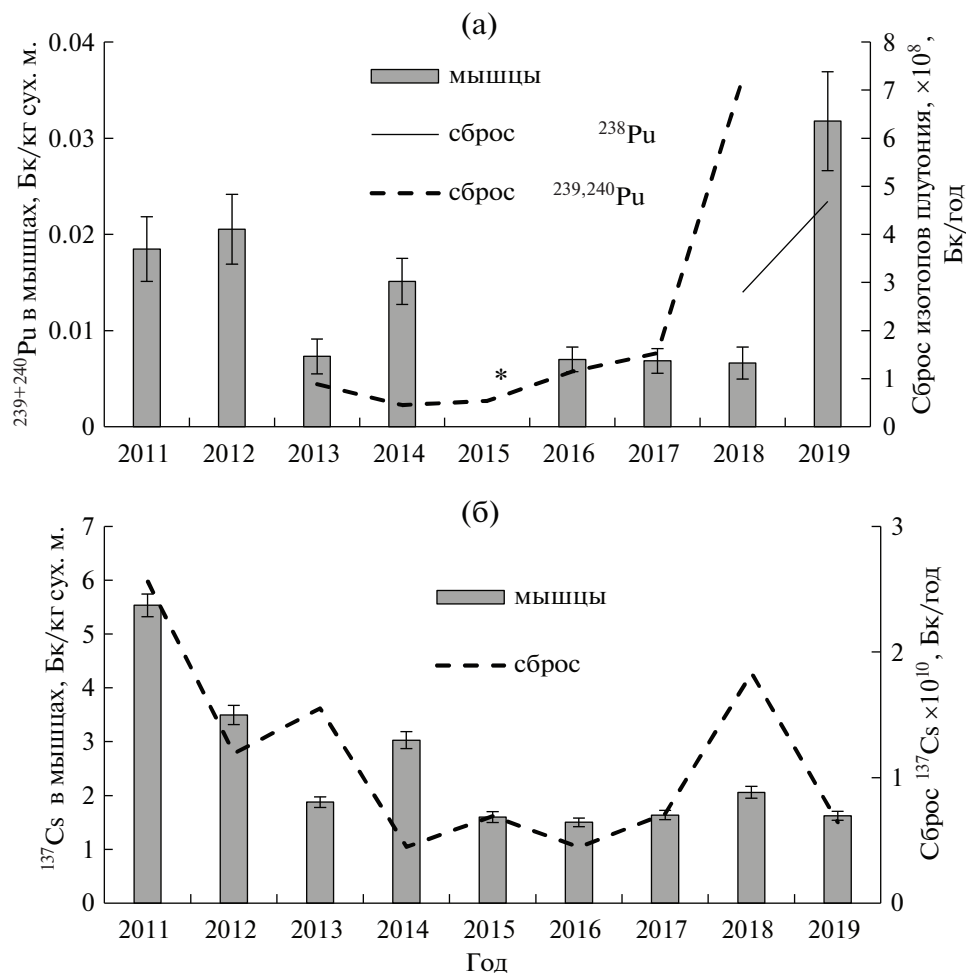


Рис. 1. Содержание плутония $^{239,240}\text{Pu}$ (А) и радиоцезия ^{137}Cs (Б) в мышцах хариуса р. Енисей (гистограммы, Бк/кг сух. массы) и в ежегодных сбросах в открытую гидрографическую сеть (графики, Бк/год). В отмеченный звездочкой год анализ проб не производился. Данные о сбросах радионуклидов получены из отчета Росгидромета [4].

Fig. 1. The content of plutonium $^{239,240}\text{Pu}$ (A) and radiocesium ^{137}Cs (B) in the muscles of the grayling of the Yenisei River (histograms, Bq/kg dry weight) and in annual discharges to the Yenisei (graphs, Bq/year). Samples were not analyzed in the year marked with an asterisk. Data on discharges of radionuclides were obtained from the report of Roshydromet [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 2011–2019 гг. содержание $^{239,240}\text{Pu}$ в пробах мышц хариуса составляло 7–32 мБк/кг сух. массы. Максимальная величина зарегистрирована через год после увеличения ежегодных контролируемых сбросов плутония ГХК в открытую гидрографическую сеть (рис. 1, а) [4]. 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 их обнаружения, равно как и содержание ^{137}Cs . Удельные активности $^{239,240}\text{Pu}$ в мышцах хариуса р. Енисей сопоставимы с величинами, зарегистрированными в мышцах рыб, обитающих вблизи радиоактивных сбросов предприятий ядерной промышленности. Например, в мышцах рыб из р. Рона (Rhône River), обитающих вблизи сбросов предприятия по переработке отработавшего ядерного топлива, содержа-

ние $^{239,240}\text{Pu}$ составляло 2–7 мБк/кг сух. массы [5], а в мышцах средиземноморских рыб вблизи АЭС Ванделлос (Vandellós NPP) – 7–31 мБк/кг сух. массы [6]. В целом следует отметить, что опубликованные данные по содержанию плутония в мышцах пресноводных рыб немногочисленны. Из публикаций известно, что удельная активность плутония в мышцах рыб значительно ниже, чем в печени, гонадах и костях [7, 8]. Поэтому при оценке дозовой нагрузки и прогнозировании отдаленных биологических эффектов для ихтиофауны следует учитывать особенности накопления плутония в органах и тканях рыб.

В период нашего исследования содержание радиоцезия в мышцах хариуса составляло 1.5–5.5 Бк/кг сух. массы (рис. 1, б). Содержание ^{137}Cs в мышцах хариусов снижалось в период с 2011 по 2015 г. вслед за снижением контролируемых сбросов этого радионуклида в открытую гидрографи-

ческую сеть (рис. 1, б). Отношение удельных активностей $^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ в мышцах хариуса варьировалось в диапазоне 0.003–0.020, что сопоставимо с соотношением в ежегодных сбросах ГХК (0.006–0.040), но на порядок ниже, чем 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) [1], что свидетельствует о более низкой биологической доступности плутония для рыб.

Таким образом, удельные активности плутония в мышцах хариуса из р. Енисей попадают в диапазон величин, характерных для ихтиофауны из водоемов, загрязненных радиоактивными сбросами. 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. Полученные результаты могут быть использованы для оценки доз и отдаленных биологических эффектов у рыб и их потребителей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантом РФФИ и Правительства Красноярского края совместно с Красноярским краевым Фондом поддержки научной и научно-технической деятельности № 20-44-240004; госзаданием ИБФ СО РАН и ИГМ СО РАН. Авторы благодарят анонимных рецензентов за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zotina T.A., Melgunov M.S., Dementyev D.V. et al. A comparative study of biota and sediments as monitors of plutonium in the Yenisei River (Siberia, Russia) // J. Environ. Radioactiv. 2021. V. 237. P. 106723. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106723>
2. Бурякова А.А., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. и др. Оценка дозы и экологического риска для объектов биоты в районе расположения Горно-химического комбината // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60. № 6. С. 661–670. [Buryakova A.A., Kryshch I.I., Sazykina T.G. et al. Assessment of dose and environmental risk to biota in the area of Mining and Chemical Combine // Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya. 2020. V. 60. № 6. P. 661–670. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0869803120060156>
3. Zotina T.A., Trofimova E.A., Dementyev D.V. Time-dependent trends of artificial radionuclides in biota of the Yenisei River (Siberia, Russia) // J. Environ. Radioactiv. 2019. P. 208–209: 106028. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106028>
4. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2012–2020 гг.: Ежегодники Росгидромета. Обнинск, НПО “Тайфун”. [Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2000–2019 gg.: Ezhegodniki Rosgidrometa. (Radiation situation in Russia and neighboring countries in 2000–2019. Yearbooks of Roshydromet). Obninsk, NPO “Tajfun”. (In Russ.)]
5. Eyrolle F., Claval D., Gontier G. et al. Radioactivity levels in major French rivers: summary of monitoring chronicles acquired over the past thirty years and current status // J. Environ. Monitor. 2008. V. 10. P. 800–811. <https://doi.org/10.1039/b805752b>
6. Sanchez-Cabeza J.A., Molero J. Plutonium, americium and radiocaesium in the marine environment close to the Vandellós I nuclear power plant before decommissioning // J. Environ. Radioactiv. 2000. V. 51. № 2. P. 211–228. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(00\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00018-7)
7. Skwarzec B., Struminska D.I., Borylo A. Bioaccumulation and distribution of plutonium in fish from Gdansk Bay // J. Environ. Radioactiv. 2001. V. 55. № 2. P. 167–78. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(00\)00190-9](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00190-9)
8. Kim S.H., Lee H.M., Hong G.H. et al. Distribution of $^{239,240}\text{Pu}$ in marine products from the seas around the Korean Peninsula after the Fukushima nuclear power plant accident // J. Environ. Radioactiv. 2020. V. 217. P. 106191. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106191>

Comparative Estimate of Plutonium and Radiocesium in Muscle of Grayling (*Thymallus baicalensis*) of the Yenisei River

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

^aInstitute of Biophysics, Krasnoyarsk Science Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

^bInstitute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

^cInstitute of Fundamental Biology and Biotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

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

The paper presents the data on the content of plutonium ($^{239,240}\text{Pu}$) in the muscles of the Baikal grayling *Thymallus baicalensis*, inhabiting the middle reaches of the Yenisei River in the vicinity of the radioactive discharge point of the Mining and Chemical Combine, in 2011–2019. The content of $^{239,240}\text{Pu}$ in grayling muscles varied within 7–32 mBq/kg dry weight. Highest value was recorded in 2019, a year after the increase in the volume of controlled plutonium discharges. The ratio of activity concentrations $^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ in grayling muscles compared to the similar ratio in other hydrobionts of the Yenisei indicates a lower bioavailability of plutonium for fish.

Keywords: artificial radionuclide, plutonium, cesium, fish, biomonitor