

Расчет дозы облучения для некоторых компонентов пищевой цепочки пресноводной экосистемы реки Енисей в период деятельности предприятия ядерно-топливного цикла – Горно-химического комбината, г. Красноярск

В.Н. Ракитский, Л.Г. Бондарева, Н.Е. Федорова

Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Московская область, Россия

В работе исследованы уровни накопления техногенных радионуклидов некоторыми компонентами реки Енисей вблизи места сброса вод, содержащих значительный перечень техногенных радионуклидов и являющихся стоками Горно-химического комбината. Исследования проводились в период деятельности третьего атомного реактора, входящего в комплекс данного предприятия (2006–2009 гг.). Измерялось содержание гамма-излучающих техногенных и естественных радионуклидов. Гамма-спектрометрическим методом выявлены значительные количества техногенных радионуклидов активационного типа (^{24}Na – до 1950 Бк/кг, ^{51}Cr – до 2860 Бк/кг) в биологических объектах. При принятии ряда допущений при расчете мощности доз для изученных организмов наибольшие дозы выявлены (мкГр/сут): водные растения – до 39, хариус – 22,3, щука – 36,4. Эти значения значительно ниже принятой дозы радиационного облучения для водной биоты, которая составляет 10 мГр/сут [1].

Ключевые слова: река Енисей, гидробионты, мощность дозы, техногенные радионуклиды.

Введение

Река Енисей загрязнена техногенными радионуклидами в результате многолетней деятельности Горно-химического комбината (ГХК ГК Росатом), который расположен на правом берегу реки, в 60 км ниже по течению от г. Красноярск. Техногенные радионуклиды зарегистрированы во всех компонентах экосистемы, в том числе в ихтиофауне [2–6]. Ихтиофауна является ключевым звеном, связывающим пресноводные трофические цепочки с человеком, тем самым должна рассматриваться как потенциальный переносчик техногенных радионуклидов для населения, проживающего в пойме реки Енисей и употребляющего рыбу, выловленную в рассматриваемой реке.

В основе гипотезы обеспечения радиационной безопасности человека лежит допущение о стохастическом беспороговом действии ионизирующего излучения.

Один из первых критериев в регламентации радиационного воздействия на биоту был предложен в работах [1, 7–10], где полагалось, что мощность дозы хронического облучения, при которой обеспечивается радиационная безопасность водной биоты, не превышает 10 мГр/сут. В дальнейшем в качестве безопасного (порогового) уровня радиационного воздействия на биоту предлагалось использовать значения мощности дозы в диапазоне 1–10 мГр/сут [1, 11–13].

Цель исследования – оценка мощности дозы облучения компонентов пищевой цепочки р. Енисей в период деятельности третьего реактора Горно-химического комбината ГК Росатом.

Задачи исследования

1. Сбор и анализ данных по содержанию радионуклидов в исследуемых компонентах пищевой цепочки пресноводной экосистемы реки Енисей.
2. Расчет мощности дозы облучения водных организмов, с учетом источников излучения – воды и донных отложений.
3. Оценка радиационной составляющей в экологическом и гигиеническом риске среды обитания населения Красноярского края.

Материалы и методы

Объектами исследований служили пробы воды, донные отложения и водные организмы реки Енисей, отобранные в ближней зоне влияния ГХК, в районе с. Атаманово. Отбор проб проводили в период деятельности третьего реактора ГХК (2006–2009 гг.). Место отбора расположено у правого берега на расстоянии 5 км вниз по течению от места основного сброса сточных вод, содержащих радионуклиды.

Бондарева Лидия Георгиевна

Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана

Адрес для переписки: 141014, Мытищи, Московская обл., ул. Семашко, д. 2; E-mail: lydiabondareva@gmail.com

Отобранные образцы водной растительности принадлежали к трем основным видам погруженных водных растений: *Potamogeton lucens*, *Fontinalis antipiretica*, *Elodea canadensis*.

Пробы фитопланктона отбирались согласно рекомендациям при помощи батометра БМ-48 объемом 1,5 л воды с глубины 0,5 м от поверхности воды в фотическом слое воды. Определяли общее число видов, численность, биомассу. Альгофлора состояла из диатомовых, синезеленых, пиррифитовых и евгленовых водорослей. Средняя численность фитопланктона составляла $9,82 \pm 2,19$ млн клеток/л.

Все образцы зообентоса были собраны с помощью стандартной драги Экмана. Образцы зообентоса просеивали через сито 200 мкм. Места отбора зообентоса соответствовали пунктам отбора донных отложений и водных растений. После отбора зообентос тщательно промывали и немедленно замораживали в переносных морозильниках для последующих исследований в лаборатории. В общем составе зоопланктонного сообщества найдено 40 видов и групп организмов, из них Cladocera – 19, Sorepoda – 5, Rotatoria – 16.

Биомасса зоопланктона и фитопланктона не превышала 1 мг/л и в зависимости от сезона отбора составляла от 7 до 21% осадка взвешенного вещества в водном потоке.

При сборе ихтиологического материала и его камеральной обработке руководствовались рекомендациями [14, 15]. В уловах рыб определяли численность, видовой состав. Численность рыб определяли методом прямого учета. Видовой состав определяли согласно справочникам и атласам [16].

В связи с тем, что в настоящей работе проведены расчеты для гамма-излучающих радионуклидов, удельную активность отобранных образцов проводили с использованием гамма-спектрометра фирмы Canberra (США) со сверхчистым германиевым детектором. Обработку гамма-спектров проводили с помощью программного обеспечения CANBERRAGINIE-PC и GENIE-2000 (США), позволяющим измерять гамма-спектр в диапазоне энергии от 30 до 3000 кэВ с разрешением 2 кэВ и регистрировать радионуклиды в пробах жидких и твердых фракций без дополнительной подготовки. Расчет удельных активностей радионуклидов в водных организмах проводили на дату отбора. Расчет содержания радионуклидов в воде проводили после предварительного концентрирования на сорбционном патроне, разработанном Л.Г. Бондаревой [17].

Общепринято использование рекомендаций МКРЗ [18, 19], но в настоящих исследованиях мы использовали

другие подходы, в том числе и на основе модели, предложенной И.И. Крышевым и А.И. Крышевым [1, 11, 12, 20].

Мощность поглощенной дозы внутреннего облучения (D_{int}) рассчитывали по содержанию радионуклидов в исследуемых организмах с использованием расчетных дозовых коэффициентов [20–24] по формуле:

$$D_{int} = \sum_i C_i^{int} \cdot DCC_{int,i}, \quad (1)$$

где C_i^{int} – средняя удельная активность i -го радионуклида в тканях организма (Бк/кг естественной влажности); $DCC_{int,i}$ – коэффициент преобразования дозы для внутреннего облучения, учитывающий соотношение между средней удельной активностью i -го радионуклида в исследуемом организме и поглощенной дозой для этого организма ($\text{мкГр час}^{-1}/\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ естественной влажности). Расчет мощности поглощенной дозы от внешнего облучения (D_{ext}) проводили согласно формуле:

$$D_{ext} = D_{wat} + D_{sed}, \quad (2)$$

где: D_{wat} – мощность поглощенной дозы от водной массы с взвешенным веществом (мкГр/ч), D_{sed} – мощность поглощенной дозы от донных отложений (мкГр/ч). Мощность поглощенной дозы от водной массы с взвешенным веществом рассчитывали по формуле:

$$D_{wat} = \sum_i C_i^{wat} \times DCC_{ext,i}, \quad (3)$$

где C_i^{wat} – средняя активность i -го радионуклида в водной массе (Бк/л); $DCC_{ext,i}$ – коэффициент преобразования дозы для внешнего облучения, учитывающий соотношение между средней удельной активностью i -го радионуклида в окружающей среде (водная масса, включающая взвешенные вещества) и поглощенной дозы для этого организма ($\text{мкГр} \cdot \text{ч}^{-1}/\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ естественной влажности).

Общую мощность поглощенной дозы (D_{total}) определяли как сумму внутренней и внешней доз:

$$D_{total} = D_{ext} + D_{int}, \quad (4)$$

где D_{ext} – суммарная внешняя поглощенная доза (мкГр/час); D_{int} – суммарная внутренняя поглощенная доза (мкГр/час).

Погрешность оценки дозовых нагрузок не превышала 30%.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены данные по содержанию радионуклидов в поверхностном слое донных отложений, отобранных в пункте отбора воды и биологических объектов.

Таблица 1

Содержание радионуклидов в воде и донных отложениях реки Енисей, Бк/кг

[Table 1

Content of radionuclides in water and benthic deposits of the Yenisei River, Bk/kg]

Вода [Water]												
²⁴ Na	⁴⁶ Sc	⁵¹ Cr	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁶⁵ Zn	⁷⁶ As	¹⁰⁶ Ru	¹³⁷ Cs	¹⁴⁰ La	¹⁵² Eu	²³⁹ Np	
92,4 ± 2,5	0,14 ± 0,02	0,4 ± 0,1	0,07 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,65 ± 0,37	0,14 ± 0,06	0,6 ± 0,3	0,12 ± 0,06	0,16 ± 0,03	0,06 ± 0,02	0,34 ± 0,04	
Донные отложения [Bottom sediments]												
⁴⁰ K		⁶⁰ Co		¹³⁷ Cs		¹⁵² Eu		¹⁵⁴ Eu		¹⁵⁵ Eu		²⁴¹ Am
466 ± 36		266 ± 11		1311 ± 67		637 ± 13		130 ± 5		29 ± 3		38 ± 7

Как видно из представленных результатов, в реку Енисей поступали следующие радионуклиды активационного происхождения: ^{24}Na , ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co и др.

Получены собственные данные по содержанию радионуклидов в исследуемых водных растениях (табл. 2), в фито- и зоопланктоне, рыбах (табл. 3).

Из техногенных радионуклидов в пробах биоты обнаружены активационные радионуклиды: ^{51}Cr ($T_{1/2} = 27,8$ сут), ^{54}Mn ($T_{1/2} = 312,3$ сут), ^{58}Co ($T_{1/2} = 70,82$ сут), ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,27$ лет), ^{65}Zn ($T_{1/2} = 243,9$ сут), ^{144}Ce ($T_{1/2} = 284,89$

сут), ^{152}Eu ($T_{1/2} = 13,5$ лет) и продукт ядерного распада ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,1$ лет).

В период работы реакторного производства наблюдалась высокая активность короткоживущих радионуклидов (^{24}Na , ^{51}Cr , ^{239}Np) во всех исследуемых организмах (см. табл. 2, 3).

Во всех биологических образцах, отобранных выше по течению от сбросов ГХК, присутствовали только техногенный ^{137}Cs , содержание которого соответствует фоновым значениям для исследуемого региона (~ 70 Бк/кг), и природные радионуклиды ^{40}K и ^7Be .

Таблица 2

Содержание радионуклидов (Бк/кг) в водных растениях реки Енисей, отобранных в возле с. Атаманово (5 км от места сброса вод ГХК)

[Table 2

Concentration of radionuclides (Bq / kg) in aquatic plants of the Yenisei River, sampled in the vicinity of the Atamanovo village (5 km from the water discharge site of the MCC)

Содержание радионуклидов, Бк/кг (+/-,%) [Concentration of radionuclides, Bq/kg (+/-, %)]											
<i>Fontinalis antipyretica</i>											
^{24}Na	^{46}Sc	^{51}Cr	^{54}Mn	^{58}Co	^{59}Fe	^{60}Co	^{65}Zn	^{76}As	^{95}Zr	^{95}Nb	^{103}Ru
1950 (22)	90 (6)	2680 (16)	50 (11)	90 (9)	40 (13)	420 (4)	540 (6)	340 (35)	6 (17)	30 (19)	13 (27)
^{106}Ru	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs	^{140}Ba	^{140}La	^{141}Ce	^{144}Ce	^{152}Eu	^{154}Eu	^{155}Eu	^{239}Np
7 (30)	21 (26)	1,5 (38)	100 (9)	70 (23)	60 (9)	40 (9)	25 (24)	23 (9)	7 (8)	4 (25)	800 (3)
<i>Elodea canadensis</i>											
^{24}Na	^{46}Sc	^{51}Cr	^{54}Mn	^{58}Co	^{59}Fe	^{60}Co	^{65}Zn	^{76}As	^{95}Zr	^{95}Nb	^{103}Ru
1250 (20)	40 (6)	1800 (7)	45 (6)	70 (6)	24 (12)	330 (4)	290 (6)	–	3 (38)	23 (14)	10 (17)
^{106}Ru	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs	^{140}Ba	^{140}La	^{141}Ce	^{144}Ce	^{152}Eu	^{154}Eu	^{155}Eu	^{239}Np
14 (17)	10 (27)	1,2 (16)	55 (7)	–	–	50 (13)	15 (26)	12 (13)	3 (9)	1,7 (18)	370 (8)
<i>Potamogeton lucens</i>											
^{24}Na	^{46}Sc	^{51}Cr	^{54}Mn	^{58}Co	^{59}Fe	^{60}Co	^{65}Zn	^{76}As	^{95}Zr	^{95}Nb	^{103}Ru
800 (30)	310 (5)	1970 (16)	80 (9)	120 (9)	78 (7)	790 (4)	330 (6)	330 (22)	17 (20)	38 (17)	21 (24)
^{106}Ru	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs	^{140}Ba	^{140}La	^{141}Ce	^{144}Ce	^{152}Eu	^{154}Eu	^{155}Eu	^{239}Np
22 (22)	35 (24)	8.4 (22)	350 (8)	85 (17)	106 (7)	85 (8)	80 (15)	68 (8)	16 (8)	4 (20)	1490 (3)

Таблица 3

Содержание радионуклидов в фито- и зоопланктоне, рыбе, Бк/кг

[Table 3

Concentration of radionuclides in phyto- and zooplankton, fish, Bq / kg]

Содержание радионуклидов, Бк/кг (+/-,%) [Concentration of radionuclides, Bq/kg (+/-, %)]				
Радионуклид [Radionuclides]	Фитопланктон [phytoplankton]	Зоопланктон [zooplankton]	Рыба [fish]	
			Хариус [grayling]	Щука [pike]
^{24}Na	478 (23)	67 (12)	89 (17)	105 (34)
^{40}K	27 (9)	340 (13)	127 (8)	374 (19)
^{46}Sc	–	97 (48)	–	–
^{51}Cr	1873 (24)	2227 (11)	1794 (17)	2584 (13)
^{54}Mn	–	21 (32)	–	–
^{60}Co	7,4 (3)	80 (5)	–	–
^{65}Zn	5,8 (5)	120 (8)	2,3 (15)	6,3 (12)
^{137}Cs	5,6 (2)	80 (7)	71 (10)	112 (15)
^{152}Eu	1,9 (14)	14 (21)	21 (12)	34 (11)

Расчет суммарных доз облучения некоторых компонентов пищевой цепочки пресноводной экосистемы Енисея

При расчете мощностей доз гамма-излучателей важно учитывать как размеры гидробионта, так и его геометрию. При рассмотрении фитопланктона и зоопланктона энергия рассеивается вне гидробионтов ввиду их малых размеров. Следовательно, вклад этого типа излучения на данные объекты можно не учитывать.

Для рыб в соответствии с рекомендациями, описанными в работах [21, 25], была предпринята попытка представить геометрию исследуемых организмов в виде цилиндров, поверхность которых однородна. Геометрический фактор и мощность дозы облучения, согласно рекомендациям, приведенным в работах [21, 26], были вычислены для центров изучаемого биологического материала.

Источниками внешнего облучения для гидробионтов являются вода и донные отложения. Тогда расчет мощности дозы для воды может быть проведен по формулам для бесконечно протяженного источника, а донные отложения могут быть представлены в виде блока, имеющего бесконечную толщину и протяженность [20].

Ввиду особенностей в физических свойствах различных видов ионизирующих излучений, основной вклад в мощность дозы внешнего облучения дают источники γ -излучения. Ввиду того, что размеры и строение изучаемых гидробионтов очень малы по сравнению с толщиной водного потока и слоем донных отложений, процессами поглощения и рассеяния энергии излучения гамма-квантов можно пренебречь. В соответствии с этим мощность дозы облучения от внешних источников может быть одинаковой для микроводорослей (фитопланктона и зоопланктона), для макрофитов и для рыб, находящихся на одном и том же расстоянии от источника излучения.

Для расчета мощности дозы внешнего облучения гидробионтов были использованы собственные данные по содержанию радионуклидов, находящихся в воде и донных отложениях (см. табл. 1). Результаты расчетов мощности дозы облучения гидробионтов от радионуклидов, присутствующих в воде и донных отложениях, представлены в таблице 4. Полученные результаты свидетельствуют о том, что основной вклад в мощность дозы внешнего облучения от радионуклидов, присутствующих в воде, дает активационный радионуклид ^{24}Na .

Доля суммарной мощности дозы природного радионуклида ^{40}K не превышает 10% для воды и ~ 1% для донных отложений.

При анализе полученных расчетов доз облучения гидробионтов от радионуклидов, присутствующих в донных отложениях (см. табл. 4), было обнаружено, что в этом случае мощность дозы превышает мощность дозы от радионуклидов, присутствующих в воде. При этом основной вклад дают техногенные радионуклиды.

Однако учитывая тот факт, что основная биомасса изучаемых макрофитов произрастает на расстоянии 50–100 см от поверхности дна, мощность дозы облучения от радионуклидов, присутствующих в донных отложениях, может быть сопоставимой с мощностью дозы облучения от воды.

Для фитопланктона и зоопланктона отсутствуют четкие границы их распределения в толще воды, т.е. равновероятно их присутствие и вблизи поверхности донных отложений, и на любом другом расстоянии от поверхности. При расчете мощности дозы облучения было сделано допущение об экспоненциальном характере убывания дозы облучения при удалении от дна. Тогда средняя мощность дозы облучения фито- и зоопланктона от радионуклидов, содержащихся в донных отложениях, составила 5,2 мкГр/сут при равновероятном распределении в толще воды.

Дозовые нагрузки на организм рыб формируются и за счет внешнего облучения – от воды и донных отложений, и за счет внутреннего – от инкорпорированных радионуклидов.

Для того чтобы определить сформированную за год поглощенную дозу внутреннего облучения рыб, достаточно иметь данные о среднегодовом содержании радионуклидов в организмах разных видов. Внешнее облучение от воды рассчитывают, исходя из среднегодовой концентрации радионуклидов в воде. При изменении удельного содержания радионуклида в организме или водных массах применяется средняя концентрация за период времени, в течение которого изменением концентрации можно пренебречь, затем суммируется доза, полученная организмом за такие периоды.

Поглощенная доза зависит также от миграционного поведения рыб [11, 12, 20, 26, 27]. Поведение рыб обусловлено рядом факторов. Пищевое поведение зависит от состава рациона и расположения кормовых объектов относительно донных отложений [26, 27]. Это значительно влияет на вертикальное распределение рыб разных видов в водных массах и, следовательно, на величину геометрического фактора облучения рыб. Время нахождения рыб в разных слоях водных масс зависит от способа добывания пищи, подвижности рыб, погодных условий и особенностей зимовки [26, 27].

Таблица 4

Мощность дозы внешнего облучения гидробионтов от радионуклидов, содержащихся в речной воде и донных отложениях (P, мкГр/сут)

[Table 4

Dose rate of external exposure of hydrobionts from radionuclides in river water and bottom sediments]

	Радионуклиды [Radionuclides]										ΣP
	^{40}K	^{24}Na	^{51}Cr	^{54}Mn	^{59}Fe	^{60}Co	^{65}Zn	^{76}As	^{137}Cs	^{152}Eu	
$P_{\text{вода}} [P_{\text{water}}]$	0,021	0,169	0,0002	0,001	0,004	0,0003	0,001	0,004	0,0002	–	0,201
$P_{\text{дно}} [P_{\text{sediment}}]$	0,5	–	–	–	–	7,1	–	–	10,6	7,8	26,0

Проведена оценка уровня содержания некоторых радионуклидов (^{24}Na , ^{40}K , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{137}Cs , ^{152}Eu) в хариусе *Thymallus arcticus* Pallas, питанием которого является бентос и растения, и типичном хищнике – щуке *Esox Lucius* (см. табл. 3). Данные виды рыб не являются мигрирующими, следовательно, влияние радионуклидов может рассматриваться как хроническое.

В связи с тем, что содержание изотопа ^{90}Sr в настоящих исследованиях не определялось, были сделаны заключения по содержанию изотопа ^{137}Cs . Согласно СанПиН 2.3.2.1078-01 [28] и МУК 2.6.1.1194-03 [29], максимальное значение содержания радионуклида в рыбе не должно превышать значения 130 Бк/кг. В настоящих исследованиях содержание ^{137}Cs ниже допустимых значений, максимальное полученное значение выявлено для щуки – 112 Бк/кг. Следовательно, ^{137}Cs не является основным дозообразующим радионуклидом, на что указывают данные, приведенные в таблицах 2, 3. Полученные в исследованиях результаты указывают, что в исследуемых рыбах содержание обнаруженных радионуклидов не превышает установленных норм. Геометрический фактор и мощность дозы внутреннего облучения были вычислены для рыб, согласно рекомендациям, приведенным в работах [20, 30, 31]. Суммарная мощность дозы для хариуса составила 22,3 мкГр/сут, для щуки – 36,4 мкГр/сут. Полученные различия в суммарной мощности дозы для хищника и планктофага в 1,5 раза свидетельствуют о том, что происходит накопление радионуклидов по пищевой цепочке от жертвы к хищнику.

Итоговая суммарная мощность дозы облучения исследованных гидробионтов реки Енисей от внешних и внутренних источников излучения приведена в таблице 5.

Следует отметить, что на современном этапе, после остановки в 2010 г. последнего реактора ГХК, водные массы вносят в суммарную дозу облучения реки Енисей менее 0,1%. Вклад инкорпорированных радионуклидов в

суммарную дозу облучения рыб мирных видов составляет 1–14%, хищников – 2–24%. Таким образом, вклад водных масс в суммарную поглощенную за год дозу облучения половозрелых представителей промысловой ихтиофауны реки Енисей настолько незначителен, что им можно пренебречь.

Полученные в ходе настоящих исследований данные показывают, что радиационная составляющая пресноводной экосистемы реки Енисей невелика, так как полученные значения много ниже установленных норм радиационной безопасности и поэтому не вносят существенный вклад при оценке эколого-гигиенического риска среды обитания населения Красноярского края. С учетом того, что рыба, обитающая в реке Енисей, не является основным источником питания для населения, фактор радиационного воздействия на здоровье населения может не учитываться.

Выводы

1. Анализ воды, донных отложений, некоторых компонентов пищевой цепочки пресноводной экосистемы, отобранных в период деятельности Горно-химического комбината ГК Росатом, выявил значительный перечень техногенных радионуклидов (^{24}Na , ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co и др.), имеющих различное происхождение (активационные, осколочные), различные периоды полураспада (часы, сутки, годы) и различные физико-химические свойства.

2. На основании имеющихся рекомендаций проведена оценка мощности дозы облучения компонентов пищевой цепочки пресноводной экосистемы реки Енисей – фито- и зоопланктона, некоторых водных растений и для двух видов промысловых рыб: планктофаг – хариус, хищник – щука. Для фито- и зоопланктона суммарная мощность дозы составляет 6,5–8,5 мкГр/сут, для водных растений – 27,1–39,0 мкГр/сут, для исследуемых видов рыб:

Таблица 5

Суммарная мощность дозы облучения водных организмов реки Енисей

[Table 5

Total dose rate of aquatic organisms of the Yenisei River]

Организм [Organism]	Мощность дозы (P, мкГр/сут) [Dose rate (P, µGy/day)]				Суммарная мощность дозы [Total dose rate]
	Внутреннее облучение [Internal exposure]		Внешнее облучение [External exposure]		
	техногенное облучение [technogenic exposure]	естественное облучение [natural exposure]	вода [water]	донные отложения [sediments]	
<i>Potamogeton lucens</i>	27,1	4,6	0,2	0,2	32,1
<i>Elodea canadensis</i>	23,0	5,3	0,2	0,2	27,1
<i>Fontinalis antipyretica</i>	34,9	3,7	0,2	0,2	39,0
Фитопланктон [Phytoplankton]	3,1	0,03	0,2	5,2	8,5
Зоопланктон [Zooplankton]	1,1	0,02	0,2	5,2	6,5
<i>Thymallus arcticus</i> Pallas	15,9	1,01	0,2	5,2	22,3
<i>Esox Lucius</i>	27,4	3,6	0,2	5,2	36,4

для хариуса – 22,3 мкГр/сут, для щуки – 36,4 мкГр/сут. Содержание стронция не определялось. Полученное максимальное значение содержания ¹³⁷Cs для щуки 112 Бк/кг не превышает установленных содержаний радионуклида. Несмотря на это, показано, что большую долю мощности дозы создают техногенные радионуклиды, тогда как естественные (представленные преимущественно ⁴⁰K) дают не более 5,3%.

3. Полученные в настоящих исследованиях дозы облучения для гидробионтов реки Енисей в период деятельности третьего атомного реактора ГХК значительно ниже дозы радиационного облучения для водной биоты – 10 мГр/сут.

4. Установлено, что вклад радиационной составляющей пресноводной экосистемы реки Енисей в техногенную нагрузку на среду обитания населения незначителен и, следовательно, может не учитываться при оценке эколого-гигиенического риска среды обитания населения Красноярского края.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00205.

Литература

1. Крышев, И.И. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учётом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 / И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22, № 1 – С. 47–61.
2. Носов, А.И. Радиоактивное загрязнение р. Енисей, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината / А.В. Носов, М.В. Ашанин, А.Б. Иванов, А.М. Мартынова // Атомная энергия. – 1993. – Т. 74, № 21. – С. 144–150.
3. Носов, А.В. Анализ радиационной обстановки на р. Енисее после снятия с эксплуатации прямоточных реакторов Красноярского ГХК / А.В. Носов, А.М. Мартынова // Атомная энергия. – 1996. – Т. 81, № 3. – С. 226–232.
4. Вакуловский, С.М. Накопление ³²P в рыбе Енисей и реконструкция дозы облучения населения / С.М. Вакуловский [и др.] // Атомная энергия. – 2004. – Т. 97, № 1. – С. 61–67.
5. Зотина, Т.А. Распределение техногенных радионуклидов в организмах рыб из р. Енисей (Россия) и водоемов зоны отчуждения Чернобыльской АЭС (Украина) / Т.А. Зотина [и др.] // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2010. – №1 (12). – С. 91–94.
6. Zotina T.A., Trofimova E.A., Bolsunovsky A.Ya. Artificial radionuclides in fish fauna of the Yenisei River in the vicinity of the Mining-and-Chemical Combine (Siberia, Russia). Radioprotection, 2011, Vol. 46, No. 6, pp. 75–78.
7. Кузин, А.М. Радиационная биохимия / А.М. Кузин. – Moscow, 1962.
8. Бак, З. Основы радиобиологии: пер. с англ. / З. Бак, П.А. Александер. – М.: Иностранная литература. – 1963.
9. Основы радиационной биологии. – М., 1964.
10. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. – Санкт-Петербург, 2009. – 100 с.
11. Крышев, И.И. Оценка воздействия на окружающую среду выбросов и сбросов радионуклидов / И.И. Крышев, А.И. Крышев, М.А. Скакунова // Атомная энергия. – 2013. – Т. 115, № 1.
12. Крышев, А.И. Динамическое моделирование переноса радионуклидов в гидробиоценозах и оценка последствий радиоактивного загрязнения для биоты и человека. Автореферат дисс. док биол наук / А.И. Крышев. – Обнинск, 2008. – 46 с.
13. Handbook for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment. Ed. by J. Brown, P. Strand, Al. Hosseini. Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT-2000-00102. Framework for Assessment of Environmental Impact, 2003.
14. Правдин, И.Ф. Руководство по изучению рыб / И.Ф. Правдин. – М.: Пищевая промышленность. – 1966. – 376 с.
15. Лукьяненко, В.И. Общая ихтиотоксикология / В.И. Лукьяненко. – М.: Легкая и пищ. пром-ть. – 1983. – 320 с.
16. Атлас «Пресноводные рыбы России» / под ред. Решетникова Ю. – М.: Наука, 2002.
17. Бондарева, Л.Г. Патент РФ № 2011149436 (РФ) от 07.12.2011 г. «Универсальное устройство для предварительной подготовки проб воды различного генезиса» / Л.Г. Бондарева, А.А. Шубин.
18. NCRP – National Council on Radiation Protection and Measurements. Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms. NCRP Report N 109. Bethesda, Maryland, USA, 1991. 115 p.
19. ICRP Publication 136: Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. Ann ICRP. 2017 Dec; 46(2):1-136. doi: 10.1177/0146645317728022.
20. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / под общ. ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
21. Крышев, И.И. Имитационные модели динамики экосистем в условиях антропогенного воздействия ТЭС и АЭС / И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина. – М.: Энергоиздат, 1990. – С. 51-64.
22. Soldat J.K., Robinson N.M., Buker D.A. Models and computer codes for evaluating environmental radiation doses BNWL-1754. Pacific Northwest National Laboratory. Richland, Washington, 1974.
23. NCRP. Report No. 109 – Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms, 1991.
24. UN – United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly, with annexes. – United Nations, New York, 2010.
25. Radiological Benchmarks for Screening Contaminants of Potential Concern for Effects on Aquatic Biota at OAK Ridge. National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. USA. BJC/OR, 1998, pp. 2-12.
26. Ивлев, В.С. Экспериментальная экология питания рыб / В.С. Ивлев. – К.: Наук. Думка, 1977. – 272 с.
27. Сабанеев, Л.П. Жизнь и ловля пресноводных рыб / Л.П. Сабанеев. – К.: Урожай, 1994. – 7-е изд., стер. – 608 с.
28. СанПиН 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов/ Дата актуализации: 01.01.2018.
29. МУК 2.6.1.1194-03 «Радиационный контроль. Стронций-90 и цезий-137. Пищевые продукты. Отбор проб, анализ и гигиеническая оценка»
30. Хайн, Дж. Радиационная дозиметрия / Дж. Хайн, Г. Браунелл. – Москва: Иностранная литература, 1958. – 758 с.
31. A Graded Approach for Evaluating Radiation Doses to Aquatic and Terrestrial Biota. – DOE-STD-1153-2002. – 2002. Washington DC: U.S.DOE, 2002. 234 p.

Поступила: 22.05.2018 г.

Ракитский Валерий Николаевич – академик РАН, профессор, и.о. директора Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, Федеральная служба по надзору в свете защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Россия

Бондарева Лидия Георгиевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, Федеральная служба по надзору в свете защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 141014, Мытищи, Московская обл., ул. Семашко, д. 2; E-mail: lydiabondareva@gmail.com

Федорова Наталия Евгеньевна – доктор биологических наук, заведующая отделом «Аналитические методы контроля» Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, Федеральная служба по надзору в свете защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Россия

Для цитирования: Ракитский В.Н., Бондарева Л.Г., Федорова Н.Е. Расчет дозы облучения для некоторых компонентов пищевой цепочки пресноводной экосистемы реки Енисей в период деятельности предприятия ядерно-топливного цикла – Горно-химического комбината, г. Красноярск // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 22-29. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-22-29

Calculation of the irradiation dose for some components of the food chain of the freshwater ecosystem of the Yenisei River, during the operation of the nuclear fuel cycle enterprise – the Mining and Chemical Combine, Krasnoyarsk

Valeriy N. Rakitsky, Lydiya G. Bondareva, Nataliya E. Fedorova

Federal Scientific center of Hygiene named after F.F. Erisman, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Mytishchi, Moscow region, Russia

This study is focused on the evaluation of the levels of accumulation of the man-made radionuclides by several components of Yenisei River close to the water discharge spot of the Mining and chemical plant containing a significant amount of man-made radionuclides. The study was performed during the period of activity of the third nuclear reactor, belonging to this facility and included measuring the concentration of the gamma-emitting man-made and natural radionuclides. Gamma-spectrometry indicated significant amounts of man-made activation radionuclides (^{24}Na – up to 1950 Bk/kg, ^{51}Cr – up to 2860 Bk/kg) in biological objects. With some assumptions at the dose rate assessment, the highest doses were estimated for the following organisms (mkGy/day): water plants – up to 39, fish – grayling 22,3 and pike 36,4. These values are significantly lower compared to the accepted dose from ionizing radiation for the water biota – 10 mkGy/day.

Key words: Yenisei River, hydrobiont, dose rate, man-made radionuclides.

References

1. Kryshev I.I., Sazykina T.G. Radiation safety of the environment: a demand for harmonization of Russian and international legislation considering the requirements of the federal legislation and new international basic safety norms ONB-2011. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*, 2013, Vol. 22, No. 1, pp. 47-61. (In Russian)
2. Nosov A.V., Ashanin M.V., Ivanov A.B., Martynova A.M. Radioactive contamination of the Yenisei river due to the discharges of Krasnoyarsk mining-chemical plant. *Atomnaya energiya = Atomic energy*, 1993, Vol. 74, No. 21, pp. 144-150. (In Russian)
3. Nosov A.V., Martynova A.M. Evaluation of the radiation situation on the Yenosey river after decommissioning of the once-through reactors of the Krasnoyarsk CMP., 1996, Vol. 81, No. 3, pp. 226-232. (In Russian)
4. Vakulovsky S.M. [et al.] Accumulation of ^{32}P in the Yenisey fish and reconstruction of the population dose. *Atomnaya energiya = Atomic energy*, 2004, Vol.97, No. 1, pp. 61-67. (In Russian)
5. Zotina T.A. [et al.] Distribution of the man-made radionuclides in the fish from Yenisey river (Russia) and basins of the exclusion zone of the Chernobyl NPP (Ukraine). *Problemy biogeokhimii i geokhimicheskoy ekologii = Problems of the biogeochemistry and geochemical ecology* 2010, No.1 (12), pp. 91-94. (In Russian)
6. Zotina T.A., Trofimova E.A., Bolsunovsky A.Ya. Artificial radionuclides in fish fauna of the Yenisei River in the vicinity of the Mining-and-Chemical Combine (Siberia, Russia). *Radioprotection*, 2011, Vol. 46, No. 6, pp. 75-78.
7. Kuzin A. M., *Radiatsionnaya biokhimiya = Radiation biochemistry*, Moscow, 1962. (In Russian)

Lydiya G. Bondareva

Federal Scientific center of Hygiene named after F.F. Erisman

Address for correspondence: Semashko str., 2, Mytishchi, Moscow region, 141014; E-mail: lydiabondareva@gmail.com

8. Bak Z., Aleksander P.A. Basics of radiobiology, Translation from English. Moscow, Inostrannaya literatura = Foreign literature, 1963. (In Russian)
9. Basics of radiation biology, Moscow, 1964. (In Russian)
10. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009): Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Moscow, Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009, 100 p. (In Russian)
11. Kryshev I.I., Kryshev A.I., Skakunova M.A. Assessment of the impact of the discharges of radionuclides on the environment. Atomnaya energiya = Atomic energy, 2013, Vol.115, No. 1. (In Russian)
12. Kryshev A.I. Dynamic modelling of the radionuclide transfer in hydrobiocenoses and assessment of the consequences of radioactive contamination for the biota and human. Abstract of doctoral thesis. Obninsk, 2008, 46 p. (In Russian)
13. Handbook for assessment of the exposure of biota to ionizing radiation from radionuclides in the environment. Ed. By J. Brown, P. Strand, Al. Hosseini. Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT-2000-00102. Framework for Assessment of Environmental Impact, 2003.
14. Pravdin I.F. Manual on the fish evaluation / Правдин И.Ф. – М.: Pishchevaya promyshlennost = Food industry, 1966, 376 p. (In Russian)
15. Lukyanenko V.I. Common ichthyotoxicology. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost = Light and food industry, 1983, 320 p. (In Russian)
16. Atlas «Freshwater fish of Russia». Ed. By Reshetnikov Yu. Moscow, Nauka = Science, 2002. (In Russian)
17. Bondareva L.G., Shubin A.A. Patent of the Russian Federation № 2011149436 (Ru) from 07.12.2011 «Universal device for the preparation of the water samples of different genesis». (In Russian)
18. NCRP – National Council on Radiation Protection and Measurements. Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms. NCRP Report N 109. Bethesda, Maryland, USA, 1991. 115 p.
19. ICRP Publication 136: Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. Ann ICRP. 2017 Dec; 46(2):1-136. Doi: 10.1177/0146645317728022.
20. ICRP – International Commission on Radiological Protection, 2007. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP, Vol. 37, No. 2–4. (In Russian)
21. Kryshev I.I., Sazykina T.G. Imitational models of the ecosystem dynamics in the environment of the anthropogenic exposure of CPP and NPP. Moscow, Energoizdat, 1990, pp. 51-64. (In Russian)
22. Soldat J.K., Robinson N.M., Buker D.A. Models and computer codes for evaluating environmental radiation doses B-NWL-1754. Pacific Northwest National Laboratory. Richland, Washington, 1974.
23. NCRP. Report No. 109 – Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms. –1991.
24. UN – United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York, 2010.
25. Radiological Benchmarks for Screening Contaminants of Potential Concern for Effects on Aquatic Biota at OAK Ridge. National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. USA. BJC/OR, 1998, pp. 2-12.
26. Ivlev V.S. Experimental ecology of fish nutrition. Nauk. Dumka, 1977, 272 p. (In Russian)
27. Sabaneyev L.P. Life and fishing of the freshwater fish. Urozhay, 1994, 608 p. (In Russian)
28. SanPiN 2.3.2.1078-01 Hygienic requirements on the safety and nutrition of the food products. Actual on: 01.01.2018. (In Russian)
29. MUK 2.6.1.1194-03 «Radiation control. Strontium-90 and Caesium-137. Foodproducts. Sampling, analysis and hygienic assessment» (In Russian)
30. Khayn Dzh., Braunell G. Radiation dosimetry. Moscow, Foreign literature, 1958, 758 p. (In Russian)
31. A Graded Approach for Evaluating Radiation Doses to Aquatic and Terrestrial Biota. – DOE-STD-1153-2002. – 2002.Washington DC: U.S.DOE, 2002. 234 p.

Received: May 22, 2018

Valeriy N. Rakitsky – Academic of Russian Academy of sciences, acting head of the Federal scientific center of hygiene after F.F. Erisman, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Mytishchi, Moscow region, Russia

For correspondence: Lydiya G. Bondareva – PhD, senior scientist, the Federal scientific center of hygiene after F.F. Erisman, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Semashko str., 2, Mytishchi, Moscow region, 141014; E-mail: lydiabondareva@gmail.com)

Nataliya E. Fedorova – Doctor of biological sciences, head of the «Analytical methods of control» department, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Mytishchi, Moscow region, Russia

For citation: Rakitsky V.N., Bondareva L.G., Fedorova N.E. Calculation of the irradiation dose for some components of the food chain of the freshwater ecosystem of the Yenisei River, during the operation of the nuclear fuel cycle enterprise – the Mining and Chemical Combine, Krasnoyarsk. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2018, Vol. 11, No. 3, pp. 22-29. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-22-29