

УДК 539.16:614.876:504.7: 539.1.047:57.087

## ОЦЕНКА ДОЗЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ БИОТЫ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГОРНО-ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

© 2020 г. А. А. Бурякова<sup>1,\*</sup>, И. И. Крышев<sup>1</sup>, Т. Г. Сазыкина<sup>1</sup>,  
М. В. Ведерникова<sup>2</sup>, С. В. Панченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-производственное объединение “Тайфун”, Обнинск, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

\*E-mail: buryakova@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 06.03.2019 г.

После доработки 25.12.2019 г.

Принята к публикации 12.02.2020 г.

Выполнены оценки мощности дозы облучения и экологического риска на основе данных многолетнего мониторинга радиационной обстановки для гидробионтов р. Енисей и референтных организмов наземной биоты в период с 2000 по 2019 г. в районе расположения ФГУП “Горно-химический комбинат” (ГХК). Показано, что после вывода из эксплуатации последнего реактора весной 2010 г. дозовые нагрузки на референтные организмы речной биоты уменьшились и в 2011–2019 гг. были ниже, чем в 2000–2010 гг., для рыбы в 17 раз, для моллюсков в 3 раза. За период наблюдения 2011–2019 гг. по сравнению с 2000–2010 гг. дозы облучения референтных организмов наземной биоты практически не изменились. Дозовые нагрузки и их вклад в экологические риски для наземной биоты оказались значительно ниже, чем для гидробионтов реки Енисей в ближней зоне ГХК. Однако и для речной биоты в ближней зоне ГХК мощности дозы облучения и радиационные риски не превышали экологически безопасного уровня за рассматриваемые периоды эксплуатации ГХК.

**Ключевые слова:** Горно-химический комбинат, мониторинг, р. Енисей, дозы облучения, референтные организмы, гидробионты, наземная биота, экологический риск

DOI: 10.31857/S0869803120060156

Горно-химический комбинат расположен к северо-востоку от г. Красноярск, вдоль берега р. Енисей (рис. 1) [1]. Площадь промплощадки с санитарно-защитной зоной (СЗЗ) составляет 56 км<sup>2</sup>. Особенностью комбината является его размещение под землей в толще гранитных скал.

Комбинат вступил в строй в августе 1958 г. и достиг проектной мощности в 1969 г. Комплекс плутониевого производства включал три промышленных уран-графитовых реактора (типа АД, АДЭ-1, АДЭ-2). Первый промышленный прямоточный реактор комбината был введен в эксплуатацию в 1958 г., второй – в 1961 г., в 1964 г. осуществлен пуск третьего реактора с замкнутым контуром. В 1964 г. был введен в эксплуатацию радиохимический завод по переработке облученного топлива. В 1985 г. было сдано в эксплуатацию хранилище отработанных тепловыделяющих сборок атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Два реактора (АД и АДЭ-1) были остановлены в 1992 г., третий реактор – в 2010 г. В настоящее время в рамках ФЦП ЯРБ-2 проводятся работы по выводу их из эксплуатации по варианту захоронения на месте.

По сравнению с атмосферными выбросами ГХК более заметное воздействие на радиоэкологическую обстановку оказывали радиоактивные сбросы комбината [2–4]. Радиоактивный след ГХК был обнаружен летом 1971 г. на удалении около 2000 км от комбината при исследовании радиоактивного загрязнения континентального шельфа Карского моря экспедицией Института экспериментальной метеорологии (ныне ФГБУ «НПО “Тайфун”» Росгидромета). Были выявлены повышенные уровни содержания <sup>137</sup>Cs в донных отложениях Енисейского залива, достигающие 15 кБк/м<sup>2</sup>, что было в 4–8 раз выше уровней загрязнения, обусловленных глобальными выпадениями. Кроме этого, в донных отложениях было обнаружено также присутствие <sup>54</sup>Mn и <sup>65</sup>Zn. Эти факты свидетельствовали о наличии возможного источника радиоактивного загрязнения бассейна р. Енисей, что и подтвердилось дальнейшими исследованиями [2, 3]. Многолетние сбросы радионуклидов привели к загрязнению ими компонент экосистемы р. Енисей, включая ряд участков поймы.

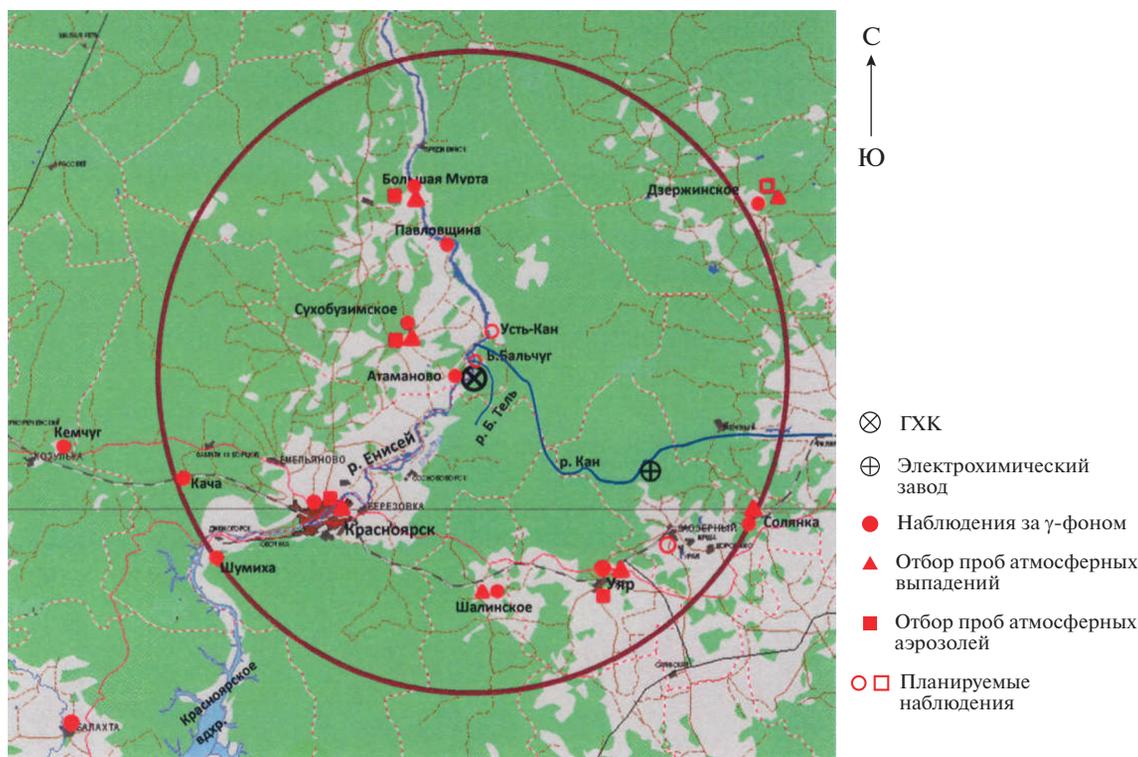


Рис. 1. Расположение пунктов радиационного мониторинга Росгидромета в 100-километровой зоне вокруг ГХК.

Fig. 1. Location of Roshydromet radiation monitoring points in the 100-km zone around the Mining and Chemical Combine.

Данные о сбросах ГХК в 2000–2019 гг. для радионуклидов, регистрируемых в воде р. Енисей, приведены в табл. 1 [1].

При работе всех трех реакторов ГХК сбросы радионуклидов были заметно выше современных уровней [1–5]. В настоящее время основными источниками поступления радиоактивных веществ в окружающую среду является радиохимический завод по переработке облученного топлива, цех хранения отработавших тепловыделяющих сборок, цех по переработке радиоактивных отходов.

До остановки АДЭ-2 существенный вклад в активность жидких сбросов в регионе ГХК вносили короткоживущие радионуклиды:  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$  [1]. По данным контроля в 2000–2010 гг. величины их сбросов составляли для  $^{32}\text{P}$  – 39.2%, для  $^{24}\text{Na}$  – 30.8% от величины разрешенных сбросов (ДС). Для коррозионных радионуклидов сбросы составляли 2–11% от ДС. Величины сбросов долгоживущих радионуклидов ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) не превышали 17–21% ДС.

За последние десятилетия выполнен значительный объем исследований воздействия сбросов ГХК на радиоактивность компонент экосистемы р. Енисей (вода, донные отложения, почва поймы, рыба, моллюски, макрофиты) [2–4, 6–13]. Результаты мониторинга радиационной обстановки в регионе ГХК регулярно обобщаются и

публикуются в Ежегодниках Росгидромета [1]. В работах [5, 14–18] представлены оценки дозы облучения биоты и населения в регионе ГХК в разные периоды деятельности комбината.

Настоящая работа посвящена изучению динамики мощности дозы облучения и экологического риска для организмов биоты в районе расположения ГХК в период с 2000 по 2019 г. на основе актуализированных данных многолетнего мониторинга радиационной обстановки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Оценки мощности дозы на биоту в регионе ГХК проводились в соответствии с методическими рекомендациями [19–21].

Суммарную мощность дозы облучения  $j$ -го объекта биоты  $D_j$  определяли путем суммирования мощности дозы облучения этого объекта от всех рассматриваемых радионуклидов  $i$ :

$$D_j = \sum_i (D_{i,j}^{\text{внутр}} + D_{i,j}^{\text{внеш}}), \quad (1)$$

где  $D_{i,j}^{\text{внутр}}$  – мощность дозы внутреннего облучения  $j$ -го объекта биоты от радионуклида  $i$ , инкорпорированного в ткани организма, мкГр/сут;  $D_{i,j}^{\text{внеш}}$  – суммарная мощность дозы внешнего

облучения  $j$ -го объекта биоты от радионуклида  $i$ , содержащегося в объектах окружающей среды, мкГр/сут.

Мощность дозы внутреннего облучения рассчитывали по формуле:

$$D_{i,j}^{\text{внутр}} = F_{i,j}^{\text{внутр}} C_{i,j}, \quad (2)$$

где  $F_{i,j}^{\text{внутр}}$  – фактор дозовой конверсии для внутреннего облучения  $j$ -го объекта биоты от  $i$ -го радионуклида, (мкГр/сут)/(Бк/кг сырого веса) [19–21];  $C_{i,j}$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида в организме  $j$ -го объекта биоты, Бк/кг сырого веса.

Удельную активность определяли из данных наблюдений за содержанием радионуклидов в объектах биоты или по формуле:

$$C_{i,j} = F_{i,j,k} A_{i,k}, \quad (3)$$

где  $F_{i,j,k}$  – коэффициент накопления радионуклида  $i$  в организме  $j$ -го объекта биоты из объекта окружающей среды  $k$  (почва, вода);  $A_{i,k}$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида в объекте окружающей среды  $k$ , Бк/кг.

Суммарную мощность дозы внешнего облучения  $j$ -го объекта биоты от  $i$ -го радионуклида, содержащегося внутри абиотических объектов окружающей среды  $k$  (почва, вода, донные отложения и др.), рассчитывали по формуле:

$$D_{i,j}^{\text{внеш}} = \sum_k F_{i,j,k}^{\text{внеш}} A_{i,k} \alpha_{j,k}, \quad (4)$$

где  $F_{i,j,k}^{\text{внеш}}$  – фактор дозовой конверсии для внешнего облучения  $j$ -го объекта биоты от  $i$ -го радионуклида, содержащегося в абиотическом объекте окружающей среды  $k$  (мкГр/сут)/(Бк/кг);  $A_{i,k}$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида в объекте окружающей среды  $k$ , Бк/кг или Бк/м<sup>2</sup>;  $\alpha_{j,k}$  – доля времени контакта  $j$ -го организма с рассматриваемым объектом окружающей среды  $k$  [19].

Показатель экологического риска [22–24] количественно оценивали по формуле:

$$R_j = D_j / RD, \quad (5)$$

где  $D_j$  – мощность дозы облучения  $j$ -го референтного объекта биоты, Гр/сут;  $RD$  – контрольный уровень радиоэкологически безопасного облучения организмов биоты, равный 0.001 Гр/сут для млекопитающих, позвоночных животных и сосны, и 0.01 Гр/сут для организмов растительного мира (кроме сосны) и беспозвоночных животных [19, 20].

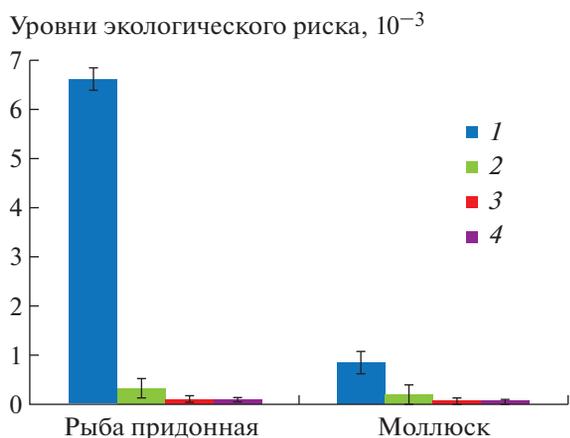
Показатель  $R_j$  считается информативным для количественной оценки экологического риска, хотя и не полностью его характеризует. Следует отметить, что современная концепция оценки радиоэкологического риска для биоты основана на эмпирическом принципе порогового действия

**Таблица 1.** Обобщенные данные о радиоактивных сбросах в р. Енисей в период эксплуатации (2000–2010 гг.) и после остановки (2011–2019 гг.) последнего ядерного реактора ГХК (в скобках – интервал изменений), Бк/год  
**Table 1.** Radioactive discharges in Yenisei river during the period of operation (2000–2010) and after the decommissioning (2011–2019) of the last Mining and Chemical Combine nuclear reactor (in brackets – change interval), Bq/year

Радионуклид	2000–2010 гг.	2011–2019 гг.
<sup>60</sup> Co	4.3 × 10 <sup>10</sup> (1.7 × 10 <sup>10</sup> –6.8 × 10 <sup>10</sup> )	1.8 × 10 <sup>9</sup> (1.9 × 10 <sup>8</sup> –9.1 × 10 <sup>9</sup> )
<sup>137</sup> Cs	2.1 × 10 <sup>10</sup> (7.2 × 10 <sup>9</sup> –5.1 × 10 <sup>10</sup> )	1.1 × 10 <sup>10</sup> (4.4 × 10 <sup>9</sup> –2.6 × 10 <sup>10</sup> )
<sup>90</sup> Sr	1.3 × 10 <sup>10</sup> (1.1 × 10 <sup>9</sup> –2.7 × 10 <sup>10</sup> )	8.7 × 10 <sup>9</sup> (2.4 × 10 <sup>9</sup> –2.5 × 10 <sup>10</sup> )
<sup>24</sup> Na	5.7 × 10 <sup>13</sup> (1.2 × 10 <sup>13</sup> –7.0 × 10 <sup>13</sup> )	–
<sup>32</sup> P	8.7 × 10 <sup>12</sup> (3.5 × 10 <sup>12</sup> –1.3 × 10 <sup>13</sup> )	–
<sup>238</sup> Pu	–	3.7 × 10 <sup>8</sup> (2.8 × 10 <sup>8</sup> –4.7 × 10 <sup>8</sup> )
<sup>239</sup> Pu	–	2.0 × 10 <sup>8</sup> (4.5 × 10 <sup>7</sup> –7.2 × 10 <sup>8</sup> )

ионизирующей радиации, при этом рассматриваются детерминированные, а не стохастические эффекты. Адекватными предложено считать следующие типы эффектов для популяции: увеличение заболеваемости, снижение репродуктивности, сокращение продолжительности жизни.

В отличие от радиационного риска для человека показатель  $R_j$  для биоты представляет собой безразмерный коэффициент, нормируемый на безопасный для популяции пороговый уровень облучения организмов, а не стохастическую величину. При не превышении этого уровня облучения сохраняется живучесть популяций, а также соответственно и видовое разнообразие, являющееся одним из важнейших интегральных параметров биотического сообщества, как в естественном состоянии, так и в условиях антропогенного воздействия [25–27]. Данный параметр характеризуется высокой социальной и экологической значимостью, чувствительностью к источнику риска, и является по существу синонимом качества окружающей среды. Вместе с тем получение его количественной характеристики далеко нетривиально и среди научного сообщества на этот счет нет единодушия. Несмотря на отсутствие консенсуса индексы разнообразия (Шеннона, Симпсона и др.) широко используются на практике для оценки воздействия на биоценозы факторов антропогенного стресса. В настоящее



**Рис. 2.** Показатели экологического риска для гидробионтов р. Енисей в 2000–2010 гг. и 2011–2019 гг. в исследуемых пунктах: 1 – с. Б. Балчуг (2000–2010 гг.); 2 – с. Б. Балчуг (2011–2019 гг.); 3 – п. Додоново (2000–2010 гг.); 4 – п. Додоново (2011–2019 гг.).

**Fig. 2.** Ecological risk data for hydrobionts the Yenisei river in 2000–2010 and 2011–2019 in the study points: 1 – B. Balchug (2000–2010); 2 – B. Balchug (2011–2019); 3 – Dodonovo (2000–2010); 4 – Dodonovo (2011–2019).

время сама формализация оценки экологического риска с учетом комплексного воздействия различных факторов физической, химической и биологической природы находится в стадии разработки и обсуждений. Выбор показателя экологического риска (5), обеспечивающего сохранение видового разнообразия и благоприятного качества окружающей среды, следует рассматривать в качестве одного из первых шагов на пути формирования новой методологии в области оценки радиоэкологической безопасности объектов использования атомной энергии.

В качестве референтных (представительных) организмов для оценки радиоэкологической обстановки в регионе ГХК были выбраны [5, 17, 18]:

– наземная биота: полевка – *Microtus*; трава осока – *Carex*; дерево сосна – *Pinus sylvestris*;

– водная биота: плотва – *Rutilus rutilus*; моллюск речная дрейссена – *Dreissena polymorpha*; водное растение рдест блестящий – *Potamogeton lucensi*.

Для оценки радиоэкологического воздействия ГХК были выбраны следующие районы: район с. Большой Балчуг – ближайшего населенного пункта к комбинату в зоне наблюдения (находится на правом берегу р. Енисей ниже по течению реки от места выпуска сбросных вод), и для гидробионтов – район п. Додоново, где ежегодно проводятся фоновые измерения содержания радионуклидов в воде р. Енисей, для референтных объектов наземной биоты – контрольный пункт фоновых наблюдений в районе п. Емельяново, 70 км западнее ГХК.

В качестве исходных при расчете мощности дозы облучения референтных объектов биоты использовались данные многолетнего мониторинга о содержании техногенных радионуклидов в абиотических компонентах окружающей среды и биоте, публикуемые в Ежегодниках Росгидромета “Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств” [1]. В состав радиоэкологических параметров базы данных входят результаты измерений содержания радионуклидов в приземном слое атмосферы, почве, водных объектах и биоте на территории промплощадки, санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения ГХК. Кроме этого, в базу данных включены данные радиационного контроля за выбросами и сбросами ГХК. К настоящему времени в базе данных 8301 запись. По мере поступления дополнительной информации производится пополнение базы данных.

Обобщенные данные мониторинга о содержании радионуклидов в воде р. Енисей и почве в районе расположения ГХК в 2000–2019 гг. приведены в табл. 2 и 3 [1].

Статистическую обработку данных проводили стандартными методами с использованием Microsoft Excel 2007. На диаграммах и в таблицах представлены средние значения и соответствующие им стандартные ошибки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные в результате расчетов оценки мощности дозы облучения объектов биоты для современного периода 2000–2019 гг. приведены в табл. 4. Рассматриваются два временных интервала – до и после остановки последнего реактора ГХК (2000–2010 гг. и 2011–2019 гг.).

В представленных оценках использовалось значение коэффициента накопления плутония в рыбе ( $K_n = 180$ ) по данным радиоэкологического обследования рек Обь-Иртышского бассейна [28, 29]. Значения остальных коэффициентов накопления были взяты из работ [19, 30, 31]. При оценке суммарной мощности дозы облучения для изотопов плутония использовался коэффициент качества  $\alpha$ -излучения 10.

В табл. 5 для сравнения показан вклад различных радионуклидов в суммарную дозу облучения рыбы и моллюсков в с. Б. Балчуг в 2000–2010 гг. и 2011–2019 гг.

На рис. 2 представлены показатели экологического риска для рыбы и моллюсков р. Енисей в с. Б. Балчуг и п. Додоново в 2000–2010 гг. и 2011–2019 гг.

Оценки мощности дозы облучения референтных организмов наземной биоты в регионе ГХК представлены в табл. 6.

**Таблица 2.** Содержание техногенных радионуклидов в воде р. Енисей в период эксплуатации (2000–2010 гг.) и после остановки (2011–2019 гг.) последнего ядерного реактора ГХК, Бк/л  
**Table 2.** The content of technogenic radionuclides in water of the Yenisei river during operation (2000–2010) and after the decommissioning (2011–2019) of the last Mining and Chemical Combine nuclear reactor, Bq/l

Место пробоотбора воды	17 км выше выпуска (п. Додоново), фон				УВ*
Период	2000–2010 гг.		2011–2019 гг.		
Радионуклид	среднее значение	доверительный интервал	среднее значение	доверительный интервал	
<sup>137</sup> Cs	0.0017	0.0007–0.0027	0.0016	0.0011–0.0023	11
<sup>90</sup> Sr	0.0037	0.0026–0.0048	0.0037	0.0021–0.0047	4.9
Место пробоотбора воды	10 км ниже выпуска (1 км выше с. Б. Балчуг)				УВ*
Период	2000–2010 гг.		2011–2019 гг.		
Радионуклид	среднее значение	доверительный интервал	среднее значение	доверительный интервал	
<sup>60</sup> Co	0.0015	0.001–0.002	0.0016	0.001–0.002	40
<sup>137</sup> Cs	0.002	0.001–0.003	0.002	0.001–0.003	11
<sup>24</sup> Na	1.5	1.3–1.7	–	–	2900**
<sup>32</sup> P	0.11	0.07–0.13	–	–	57
<sup>90</sup> Sr	0.0036	0.0022–0.005	0.0067	0.003–0.013	4.9
<sup>239</sup> + <sup>240</sup> Pu***	–	–	0.0010	0.0004–0.002	0.55

Примечание. \* Уровень вмешательства по НРБ-99/2009; \*\* ДУА<sub>нас</sub> по НРБ-96, так как уровень вмешательства по НРБ-99/2009 для <sup>24</sup>Na не указан; \*\*\* измерения объемной активности начали проводить с 2015 г., среднее значение определяется за 2015–2019 гг.

Соответствующие показатели экологического риска для объектов наземной биоты ГХК приведены на рис. 3, а и 3, б.

Оценки дозы облучения биоты проводились с целью снижения консервативности на основе данных многолетнего радиационного мониторинга в пунктах ближней зоны наблюдений ГХК. Полученные оценки дозовой нагрузки на референтные организмы биоты дают представление о максимальной степени радиационного воздействия ГХК на окружающую среду.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Доминирующий вклад в суммарную мощность дозы гидробионтов р. Енисей в 2000–2010 гг. вносило внутреннее облучение, обусловленное содержащимися в воде <sup>24</sup>Na и <sup>32</sup>P. Согласно оценкам [14], в период работы всех ядерных реакторов ГХК в 1975–1980 гг. мощности дозы облучения варьировали от 0.049 мГр/сут (рыба) до 0.17 мГр/сут (моллюски). По сравнению с этим периодом максимальных дозовых нагрузок мощности дозы облучения в 2000–2010 гг. уменьшились для рыбы в 7 раз, для моллюсков – в 21 раз.

**Таблица 3.** Содержание <sup>137</sup>Cs в 10-сантиметровом слое почвы в СЗЗ и ЗН ГХК в период до (2000–2010 гг.) и после остановки последнего ядерного реактора (2011–2019 гг.)

**Table 3.** <sup>137</sup>Cs content in 10-cm soil layer in sanitary protection zone and observation zone of the Mining and Chemical Combine during operation (2000–2010) and after the decommissioning of the last nuclear reactor (2011–2019)

Период	2000–2010 гг.	2011–2019 гг.
Показатель	Удельная активность в почве, Бк/кг	
Санитарно-защитная зона	25 ± 3	26 ± 3
Зона наблюдения	28 ± 3	22 ± 3
с. Б. Балчуг	32 ± 4	30 ± 4
Контрольные точки	27 ± 3	22 ± 3
Показатель	МЭД в точке отбора, мкГр/сут	
Санитарно-защитная зона	2.8 ± 0.5	2.7 ± 0.6
Зона наблюдения	2.6 ± 0.5	2.5 ± 0.6
с. Б. Балчуг	2.7 ± 0.4	2.5 ± 0.6
Контрольные точки	2.7 ± 0.5	2.2 ± 0.6

**Таблица 4.** Оценки мощности дозы облучения гидробионтов р. Енисей в регионе ГХК в 2000–2019 гг., мкГр/сут

**Table 4.** Estimates of the radiation dose rate of hydrobionts the Yenisei river in the region of the MCC in 2000–2019, mkGy/day

Гидробионт	Район с. Большой Балчуг (16 км от ГХК)	Район п. Додоново (Фоновый пункт наблюдений)
2000–2010 гг.*		
Рыба придонная	6.6 ± 1.3	0.07 ± 0.03
Моллюски	8.2 ± 1.7	0.06 ± 0.03
2011–2019 гг.		
Рыба придонная	0.40 ± 0.16	0.07 ± 0.03
Моллюски	2.94 ± 0.98	0.06 ± 0.02

\*Актуализированные оценки по сравнению с [16–18] с учетом вклада  $^{239+240}\text{Pu}$  с коэффициентом качества  $\alpha$ -излучения 10.

В связи с выводом из эксплуатации последнего реактора весной 2010 г. дозовые нагрузки на референтные виды речной биоты снизились и в 2011–2019 гг. были ниже, чем в 2000–2010 гг., для рыбы в 17 раз, для моллюсков – в 3 раза. Основной вклад в техногенную дозу облучения моллюсков в 2011–2019 гг. вносил  $^{239+240}\text{Pu}$ , а для рыб –

**Таблица 5.** Вклад различных радионуклидов в суммарную дозу облучения гидробионтов р. Енисей в районе с. Б. Балчуг

**Table 5.** Contribution of radionuclides to the total radiation dose of hydrobionts the Yenisei river near B. Balchug

Объект биоты	Вклад радионуклидов в суммарную дозу облучения гидробионтов, %	
	в 2000–2010 гг.	в 2011–2019 гг.
Рыба придонная	$^{24}\text{Na}$ – 65.0	$^{60}\text{Co}$ – 44.2
	$^{32}\text{P}$ – 31.2	$^{239,240}\text{Pu}$ – 32.2
	$^{60}\text{Co}$ – 1.7	$^{137}\text{Cs}$ – 18.6
	$^{239,240}\text{Pu}$ – 1.2	$^{90}\text{Sr}$ – 5.0
	$^{137}\text{Cs}$ – 0.7	
	$^{90}\text{Sr}$ – 0.2	
Моллюски	$^{24}\text{Na}$ – 53.9	$^{239,240}\text{Pu}$ – 90.7
	$^{32}\text{P}$ – 24.6	$^{60}\text{Co}$ – 6.5
	$^{239,240}\text{Pu}$ – 19.5	$^{137}\text{Cs}$ – 1.9
	$^{60}\text{Co}$ – 1.4	$^{90}\text{Sr}$ – 0.9
	$^{137}\text{Cs}$ – 0.4	
	$^{90}\text{Sr}$ – 0.2	

$^{60}\text{Co}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . В фоновом пункте наблюдений мощности дозы облучения рыбы и моллюсков в этот период были соответственно в 6 и 49 раз ниже мощности дозы в ближней зоне ГХК.

При использовании в расчетах более высокого значения коэффициента накопления плутония в рыбе ( $2.1 \times 10^4$ ) из справочника МАГАТЭ [31] мощность дозы облучения рыбы в с. Б. Балчуг возрастает до  $1.5 \times 10^{-2}$  мГр/сут, что существенно ниже величины БУОБ (1 мГр/сут). В работе [32] на основе результатов анализа экспериментальных данных методами непараметрической статистики предложено для объектов биоты использовать значение коэффициента качества  $\alpha$ -излучения изотопов плутония, равное 50. Однако и в этом случае наиболее консервативной оценки современных величины мощности дозы облучения гидробионтов в р. Енисей будут ниже БУОБ.

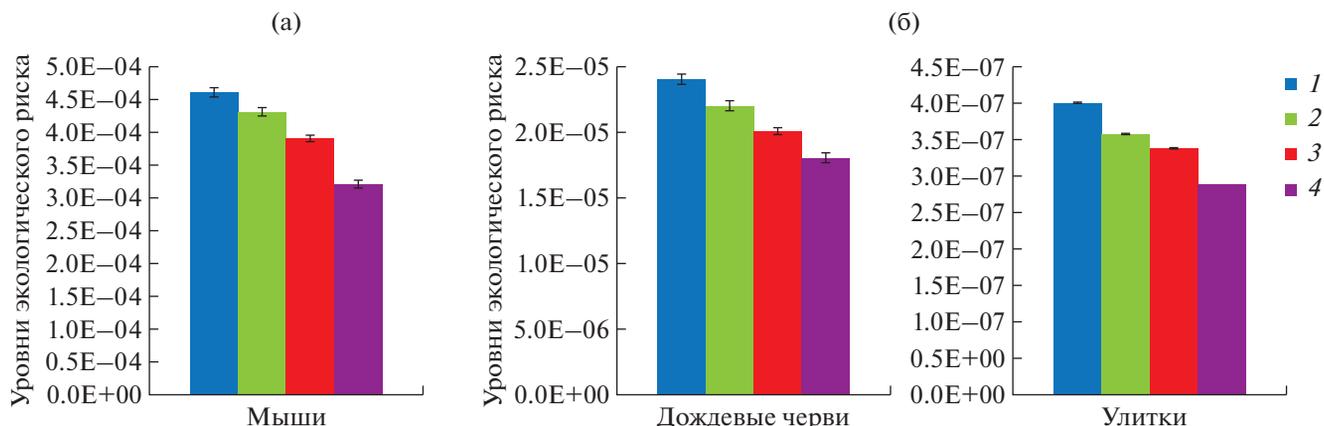
По сравнению с показателем радиоэкологического риска для придонной рыбы уровень риска для моллюсков как в с. Б. Балчуг, так и в п. Додоново ниже, что обусловлено более низким значением БУОБ для моллюсков. В целом использованные показатели радиоэкологического риска для гидробионтов в районе расположения ГХК значительно ниже уровней, обеспечивающих сохранение благоприятной окружающей среды.

Согласно расчетным оценкам не наблюдается значимого различия в дозовых нагрузках на наземную биоту для районов с. Б. Балчуг и п. Емельяново для обоих периодов наблюдений (2000–2010 гг. и 2011–2019 гг.). При этом дозовые нагрузки на наземную биоту значительно ниже, чем на гидробионтов р. Енисей в ближней зоне ГХК.

**Таблица 6.** Оценки мощности дозы облучения референтных организмов наземной биоты в регионе ГХК в 2000–2019 гг., мкГр/сут

**Table 6.** Estimates of the radiation dose rate to reference organisms of terrestrial biota in the MCC region in 2000–2019, mkGy/day

Референтные организмы	Район с. Большой Балчуг (16 км от ГХК)	Район п. Емельяново (Фоновый пункт наблюдений, 70 км от ГХК)
2000–2010 гг.		
Мыши	0.46 ± 0.06	0.39 ± 0.05
Дождевые черви	0.24 ± 0.03	0.20 ± 0.03
Улитки	0.004 ± 0.0005	0.0034 ± 0.0004
2011–2019 гг.		
Мыши	0.43 ± 0.06	0.32 ± 0.05
Дождевые черви	0.23 ± 0.03	0.17 ± 0.03
Улитки	0.0037 ± 0.0005	0.0028 ± 0.0004



**Рис. 3.** Показатели экологического риска для наземной биоты ГХК: для мышей (а), дождевых червей и улиток (б) в 2000–2010 гг. и 2011–2019 гг. в пунктах: 1 – с. Б. Балчуг (2000–2010 гг.); 2 – с. Б. Балчуг (2011–2019 гг.); 3 – п. Емельяново (2000–2010 гг.); 4 – п. Емельяново (2011–2019 гг.).

**Fig. 3.** Ecological risk data for terrestrial biota of the Mining and Chemical Combine: for mice (a), earthworms and snails (b) in 2000–2010 and 2011–2019 in points: 1 – B. Balchug (2000–2010); 2 – B. Balchug (2011–2019); 3 – Yemelyanovo (2000–2010); 4 – Yemelyanovo (2011–2019).

Как показывает опыт исследований, влияние ГХК на окружающую среду распространяется и на прилегающие районы [2–5]. Выбранные для оценки радиоэкологического воздействия ГХК пункты являются представительными, поскольку располагаются в зоне сброса и ближней зоне наблюдения рассматриваемого объекта. Многолетние данные мониторинга окружающей среды в этих пунктах позволяют адекватно оценивать радиоэкологическое воздействие комбината.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам наблюдений и выполненным на их основе радиоэкологическим оценкам ГХК в период работы ядерных реакторов оказывал регистрируемое локальное и региональное влияние на содержание радиоактивных веществ в объектах экосистемы р. Енисей. Дозовые нагрузки на отдельные гидробионты более чем на порядок величины превышали фоновые значения, но оставались ниже современных экологически безопасных уровней радиационного воздействия на организмы и популяции. В настоящее время в связи с остановкой промышленных реакторов уровень этого техногенного воздействия существенно снизился.

В период работы ГХК до остановки ядерных реакторов для гидробионтов р. Енисей преобладал вклад в суммарную дозу облучения таких короткоживущих радионуклидов, как  $^{24}\text{Na}$  и  $^{32}\text{P}$ . На современном этапе деятельности комбината (2011–2019 гг.) основной вклад в техногенную дозу облучения речной биоты вносят плутоний,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

По сравнению с организмами наземной биоты более высокие экологические риски характерны для гидробионтов р. Енисей. После остановки последнего реактора в 2010 г. снизились дозовые нагрузки на референтные виды речной биоты – для рыбы в 17 раз и моллюсков в 3 раза, для организмов наземной биоты в 1,1 раза. Соответственно в 2011–2019 гг. по сравнению с предшествующим периодом работы предприятия сократились и показатели экологического риска для объектов биоты.

Уровни облучения референтных объектов биоты в районе расположения ГХК за весь период эксплуатации не превышали экологически безопасного уровня. С учетом потенциальной радиационной опасности Горно-химического комбината необходимо продолжить радиационный мониторинг окружающей среды в зоне влияния комбината.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2000–2019 гг. Ежегодники Росгидромета. Обнинск, НПО "Тайфун". [Radiacionnaja 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 Russian)]
2. Вакуловский С.М., Крышев И.И., Никитин А.И. и др. Оценка влияния Красноярского горно-химического комбината на радиоэкологическое состояние реки Енисей // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 1994. № 2–3. С. 124–130. [Vakulovskij S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I. et al. Ocenka vlijaniya]

- Krasnojarskogo gorno-himicheskogo kombinata na radiojelogicheskoe sostojanie reki Enisej // *Izvestija vuzov. Jadernaja jenergetika*. 1994. № 2–3. P. 124–130. (In Russian)]
3. *Vakulovskij S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I. et al.* Radioactive Contamination of the Yenisei River // *J. Environ. Radioact.* 1995. V. 29. № 3. P. 225–236.
  4. Мониторинг радиационной обстановки на территории России. Булгаков В.Г., Вакуловский С.М. Крышев И.И., Гниломедов В.Д., Каткова М.Н., Уваров А.Д., Полянская О.Н., Яхрюшин В.Н., Артемьев Г.Б., Сапожникова А.А., Бурякова А.А. / Под ред. В.М. Шершакова. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”, 2018. 68 с. [Monitoring radiacionnoj obstanovki na territorii Rossii. Bulgakov V.G., Vakulovskij S.M. Kryshev I.I., Gnilomedov V.D., Katkova M.N., Uvarov A.D., Poljanskaja O.N., Jahryushin V.N., Artem'ev G.B., Sapozhnikova A.A., Burjakova A.A. / Pod red. V.M. Shershakova. Obninsk: FGBU “NPO “Tajfun”, 2018. 68 s. (In Russian)]
  5. *Панченко С.В., Линге И.И. и др.* Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / Под ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: “САМ полиграфист”, 2015. 296 с. [*Panchenko S.V., Linge I.I. i dr.* Radiojelogicheskaja obstanovka v regionah raspolozhenija predpriyatij Rosatoma / Pod red. I.I. Linge i I.I. Krysheva. M.: “SAM poligrafist”, 2015. 296 p. (In Russian)]
  6. *Болсуновский А.Я., Дементьев Д.В.* Оценка интенсивности накопления  $^{32}\text{P}$  водными растениями реки Енисей // *Экология*. 2010. Т. 41. № 6. С. 464–467. [*Bolsunovskij A.Ya., Demytyev D.V.* Rates  $^{32}\text{P}$  accumulation by aquatic plants in the Yenisei river // *Russian Journal of Ecology*. 2010. V. 41. № 6. P. 464–467. (In Russian)]
  7. *Болсуновский А.Я., Медведева М.Ю., Александрова Ю.В.* Интенсивность накопления радионуклидов в биомассе водных растений реки Енисей // *Изв. Самарского науч. центра РАН*. 2011. Т. 13. № 1 (4). С. 776–779. [*Bolsunovskij A.Ya., Medvedeva M.Yu., Aleksandrova Yu.V.* Intensity of radionuclides accumulation in the biomass of aquatic plants in Yenisei river // *Izvestiya of the Samara scientific centre of the Russian academy of science*. 2011. V. 13. № 1 (4). P. 776–779. (In Russian)]
  8. *Вакуловский С.М., Тертышник Э.Г., Кабанов А.И.* Перенос радионуклидов в р. Енисей // *Атомная энергия*. 2008. Т. 105. Вып. 5. С. 285–291. [*Vakulovskij S.M., Tertyshnik E.G., Kabanov A.I.* Radionuclide transport in the Yenisei river // *Atomic Energy*. 2008. V. 105. № 5. P. 285–291. (In Russian)]
  9. *Зотина Т.А., Трофимова Е.А., Карпов А.Д., Болсуновский А.Я.* Накопление радионуклидов в трофических цепях р. Енисей после остановки реакторного производства на Горно-химическом комбинате // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2014. Т. 54. № 4. С. 405–414. [*Zotina T.A., Trofimova E.A., Karpov A.D., Bolsunovskij A.Ya.* Accumulation of radionuclides in food chains of the Yenisei river after the nuclear power plant shutdown at the Mining-and-Chemical Combine // *Radiation biology. Radioecology*. 2014. V. 54. № 4. P. 405–414. (In Russian)]
  10. *Линник В.Г.* Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов. М.: ГЕОХИ РАН, 2018. 372 с. [*Linnik V.G.* Landshaftnaja differenciacija tehnogennyh radionuklidov. M.: GEOHI RAN, 2018. 372 p. (In Russian)]
  11. *Носов А.В.* 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. Вып. 2. С. 144–150. [*Nosov A.V.* Radioaktivnoe zagryaznenie r. Enisej, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината / A.V. Nosov, M.V. Ashanin, A.B. Ivanov, A.M. Martynova // *Atomnaja jenergija*. 1993. V. 74. № 2. P. 144–150. (In Russian)]
  12. Радиоэкология XXI века: Мат. Междунар. науч.-практ. конф. (Красноярск, 14–16 мая 2012 г.). Красноярск: СФУ, 2012. 440 с. [Radiojelogija XXI veka: Materialy Mezhdunar. nauchno-prakticheskoj konf. (Krasnojarsk, 14–16 maja 2012 g.). Krasnojarsk: SFU, 2012. 440 p. (In Russian)]
  13. *Трофимова Е.А., Зотина Т.А., Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я.* Накопление техногенных радионуклидов хищными и мирными рыбами реки Енисей // *Вопр. радиац. безопасности*. 2014. № 4. С. 55–61. [*Trofimova E.A., Zotina T.A., Demytyev D.V., Bolsunovskij A.Ya.* Accumulation of artificial radionuclides by piscivorous and non-predatory fish of the Yenisei river // *Radiation Safety Problems*. 2014. V. 76. № 4. P. 55–61. (In Russian)]
  14. *Крышев А.И.* Биологический перенос радионуклидов в экосистеме реки Енисей и оценка дозы облучения природной биоты А.И. Крышев // *Изв. вузов. Ядерная энергетика*. 2007. № 4. С. 31–39. [*Kryshev A.I.* Biologicheskij perenos radionuklidov v jekosisteme reki Enisej i ocenka dozy obluchenija prirodnoj bioty // *Izvestija vuzov. Jadernaja jenergetika*. 2007. № 4. P. 31–39. (In Russian)]
  15. *Крышев А.И., Сазыкина Т.Г.* Реконструкция дозы облучения и оценка радиационного риска для жителей прибрежных населенных пунктов реки Енисей за многолетний период эксплуатации Красноярского ГХК (1975–2000 гг.) // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2009. Т. 49. № 2. С. 246–250. [*Kryshev A.I., Sazykina T.G.* The Reconstruction of Radiation Dose and Risk for Population Living Near the Yenisei River from the Long-Term Radioactive Discharges of the Krasnoyarsk NCC (1975–2000) // *Radiation biology. Radioecology*. 2009. V. 49. № 2. P. 246–250. (In Russian)]
  16. *Крышев И.И., Рязанцев Е.П.* Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИздАТ, 2010. 496 с. [*Kryshev I.I., Rjazancev E.P.* Jekologicheskaja bezopasnost' jaderno-jenergeticheskogo kompleksa

- Rossii. 2-e izd., pererab. i dop. M.: IzdAT, 2010. 496 p. (In Russian)]
17. *Лунева К.В.* Оценка радиационно-экологического воздействия радиохимических комбинатов на референтные объекты животного мира: Автореферат дис. ... канд. биол. наук: 03.01.01. Обнинск, 2014. 24 с. [*Luneva K.V.* Ocenka radiacionno-jekologicheskogo vozdejstviya radiohimicheskikh kombinatov na referentnye ob'ekty zhivotnogo mira. [Dissertation] Obninsk, 2014. 24 p. (In Russian)]
  18. *Лунева 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. [*Luneva K.V., Kryshev A.I.* Analysis of radioecological impact of the Krasnoyarsk Mining and Chemical industrial complex on objects of river biota in 2000–2012 // Radiation and risk. 2014. V. 23. № 1. P. 89–96. (In Russian)]
  19. Рекомендации Р 52.18.820–2015. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет / *Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. и др.* Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Обнинск, 2015. 50 с. [Rekomendacii R 52.18.820–2015. Ministerstvo prirodnyh resursov i jekologii RF, Rosgidromet / *Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kryshev I.I. i dr.* Ocenka radiacionno-jekologicheskogo vozdejstviya na ob'ekty prirodnoj sredy po dannym monitoringa radiacionnoj obstanovki. Obninsk, 2015. 50 p. (In Russian)]
  20. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. Annals of the ICRP, 2008. 251 p.
  21. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Publication 136. Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. Annals of the ICRP. V. 46. № 2. 2017. 136 p.
  22. *Beresford N., Brown J., Coplestone D. et al.* D-ERICA: An Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation: Description of purpose, methodology and application. 2007. 82 p.
  23. *Спирidonов С.И., Алексахин Р.М., Спирин Е.В.* Интегральные показатели радиационного воздействия предприятий открытого и замкнутого ядерных топливных циклов на окружающую среду // XLIII Радиоэкологические чтения, посвященные действительному члену ВАСХНИЛ В.М. Ключковскому: Сб. материалов. Обнинск, 2015. С. 15–38. [*Spiridonov S.I., Alexakhin R.M., Spirin E.V.* Integral'nye pokazateli radiacionnogo vozdejstviya predpriyatij otkrytogo i zamknutogo jadernyh toplivnyh ciklov na okruzhajushhuyu sredyu // XLIII Radiojekologicheskie chtenija, posvjashhennye dejstvitel'nomu chлену VASHNIL V.M. Klechkovskomu: sbornik materialov. Obninsk, 2015. P. 15–38. (In Russian)]
  24. *Крышев И.И., Рязанцев Е.П.* Экологический риск радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС “Фукусима” (Япония) // Атомная энергия, 2017. Т. 122. № 1. С. 46–55. [*Kryshev I.I., Ryzantsev E.P.* Environmental risk of the radiological accidents at Chernobyl and Fukushima (Japan) NPP // Atomic Energy. 2015. V. 122. № 1. P. 46–55. (In Russian)]
  25. *Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.* Критерии оценки экологического риска // Эколого-геофизические аспекты ядерных аварий. М.: Гидрометеиздат, 1992. С. 160–168. [*Kryshev I.I., Sazykina T.G.* Kriterii ocenki jekologicheskogo riska // Jekologo-geofizicheskie aspekty jadernyh avarij. M.: Gidrometeizdat, 1992. P. 160–168. (In Russian)]
  26. *Suter II G.W.* Endpoints for Regional Risk Assessments // Environ. Management. 1990. V. 14. № 1. P. 9–23.
  27. Ecological Risk Assessment. Second Edition / Editor and Principal Author G. W. Suter II. CRC Press, 2006. 654 p.
  28. *Никитин А.И., Крышев И.И., Чумичев В.Б. и др.* Радиоэкологический мониторинг Обь-Иртышской речной системы // Радиоэкология: Итоги, современное состояние и перспективы: Сб. мат. Междунар. конф. (Москва, 3–5 июня 2008 г.). Обнинск, 2008. С. 151–167. [*Nikitin A.I., Kryshev I.I., Chumichev V.B. et al.* Radioecological Monitoring of the Irtysh-Ob' System // Radioecology: Results, modern condition and perspectives: Materials of International conference (Moscow, 3–5 June 2008). Obninsk, 2008. P. 151–167. (In Russian)]
  29. *Крышев И.И., Никитин А.И.* Миграция радионуклидов в речной системе Теча–Исеть–Тобол–Иртыш–Обь // XLIV Радиоэкологические чтения В.М. Ключковского (Обнинск, 2 дек. 2015 г.). Обнинск, 2016. С. 48–82. [*Kryshev I.I., Nikitin A.I.* Migracija radionuklidov v rečnoj sisteme Techa–Iset'–Tobol–Irtysh–Ob' // XLIV Radiojekologicheskie chtenija V.M. Klechkovskogo (Obninsk, 2 dek. 2015 g.). Obninsk, 2016. P. 48–82. (In Russian)]
  30. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Publication 114. Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants. Annals of the ICRP, 2009. 111 p.
  31. IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports Series No. 472. Vienna, 2010. 208 p.
  32. *Sazykina T.G., Kryshev A.I.* Lower thresholds for lifetime health effects in animals from high-LET radiation – comparison with chronic low-LET radiation // J. Environ. Radioact. 2016. V. 165. P. 227–242.

## Assessment of Dose and Environmental Risk to Biota in the Area of Mining and Chemical Combine

A. A. Buryakova<sup>a,#</sup>, I. I. Kryshev<sup>a</sup>, T. G. Sazykina<sup>a</sup>, M. V. Vedernikova<sup>b</sup>, and S. V. Panchenko<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Research and Production Association "Typhoon" Obninsk, Russia*

<sup>b</sup> *Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: buryakova@rpatyphoon.ru*

Estimates of the radiation dose rate and environmental risk were made. It were based on data from long-term monitoring of the radiation situation for hydrobionts of the Yenisei river and reference organisms of terrestrial biota in the area of "Mining and Chemical Combine" (MCC). It was shown that the dose loads on reference organisms of river biota decreased after the decommissioning of the last nuclear reactor in the spring of 2010. Radiation doses for fish and shellfish were 17 and 3 times lower than in 2000–2010. Doses for reference organisms of terrestrial biota haven't changed much in 2011–2019. Dose loads and their contribution to environmental risks for terrestrial biota were significantly lower than for hydrobionts of the Yenisei. However, radiation doses and risks to river biota in the near zone of MCC didn't exceed the derived consideration reference levels.

**Key words:** Mining and Chemical Combine, monitoring, Yenisei river, radiation doses, reference organisms, hydrobionts, terrestrial biota, environmental risk