РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ. РАДИОЭКОЛОГИЯ, 2019, том 59, № 1, с. 82–93

РАДИОЭКОЛОГИЯ

УДК 612.11.3:616.937:597:539.163:574.63:614.876:539.1.047

РЕАКЦИЯ ЭРИТРОПОЭЗА НА ТРИПАНОСОМНУЮ ИНВАЗИЮ У РЫБ, ОБИТАЮЩИХ В РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОЙ РЕКЕ ТЕЧА

© 2019 г. Г. А. Тряпицына[1,2,*], Е. А. Пряхин[1], Д. И. Осипов[1], Е. А. Егорейченков[1,2], Г. Рудольфсен[3,4], Х.-К. Тейен[5], М. Сневе[3], А. В. Аклеев[1,2]

[1] *Уральский научно-практический центр радиационной медицины ФМБА России, Челябинск, Россия*

[2] *Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия*

[3] *Норвежское агентство по радиационной защите, Остерас, Норвегия*

[4] *Университет Трумсё, Трумсё, Норвегия*

[5] *Норвежский университет наук о жизни, Центр передового опыта и радиоактивности окружающей среды, Эш, Норвегия*

* *E-mail: tga28@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.11.2017 г.

Выполнена оценка состояния эритропоэза у рыб (плотва (*Rutilus rutilus* L., 1758), окунь (*Perca fluviatilis* L., 1758), щука (*Esox lucius* L., 1758)), обитающих в радиоактивно-загрязненной р. Теча, и у рыб водотока сравнения р. Миасс при трипаносомой инвазии. Показано, что в уловах летом доля зараженных рыб (40%) более высокая, чем весной (20%); самый высокий уровень заболеваемости у окуня (45%), затем у щуки (23%) и самый низкий у плотвы (14%); уровень заболеваемости снижается от верхнего течения (44%) к более полноводному низовью (12%). В условиях хронического радиационного воздействия на рыб в диапазоне мощностей доз облучения 3–150 мкГр/сут сочетанное действие радиации и трипаносомной инвазии характеризуется антагонистическим взаимодействием на продуктивность бластных клеток и аддитивным взаимодействием на продукцию более дифференцированных (нормоциты) клеток и количество зрелых эритроцитов. Выявлено статистически значимое влияние трипаносомной инвазии на процентный состав эритроидных клеток различной степени зрелости в периферической крови у рыб. Мощность дозы облучения статистически значимо влияет на процентное содержание эритробластов и пронормоцитов и на абсолютное количество эритроидных клеток в целом. Сочетанное действие трипаносомной инвазии и радиации может приводить к модификации эффектов в делящихся пулах кроветворения.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, радионуклиды, река Теча, эритропоэз, трипаносомы, рыбы

DOI: 10.1134/S0869803119010119

Экосистема р. Теча (Челябинская обл., Россия) подверглась радиоактивному загрязнению в результате регламентных и аварийных сбросов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в 1949–1956 гг. предприятием атомной промышленности ПО “Маяк” [1–3]. В настоящее время суммарная удельная активность β-излучающих радионуклидов в донных отложениях на различных участках р. Теча находится в пределах от 10^1 до 10^6 Бк/кг сухой массы, объемная активность этих радионуклидов в воде – от 5 до 40 Бк/дм^3 [4].

Несмотря на столь длительное существование уникальной радиоэкологической ситуации, исследования состояния ихтиофауны р. Теча немногочисленны и в основном касаются накопления радионуклидов в организме рыб [5, 6].

У рыб, обитающих в р. Теча, жизненный цикл на протяжении нескольких поколений проходит в естественных природных экосистемах в условиях хронического радиационного воздействия. Это, несомненно, может привести к выработке у них определенных механизмов адаптации к радиационному фактору. Представляется крайне интересным оценить адаптационные возможности у этих рыб на примере кроветворной системы.

Система крови является одной из наиболее чувствительных к действию факторов различной природы [7, 8]. У рыб отсутствует красный костный мозг, и кроветворение осуществляется в ряде органов – в жаберном аппарате, кишечнике, сердце, почках, селезенке, а также в периферической крови [9], что позволяет проводить оценку состояния гемопоэза по показателям периферической крови.

В исследованиях современного состояния ихтиофауны р. Теча было показано, что в условиях

хронического радиационного воздействия у плотвы наблюдаются повышение численности эритробластов и снижение количества эритроцитов в периферической крови по отношению к этим показателям у рыб из р. Миасс, использованной в качестве водотока сравнения, и эти изменения носят дозозависимый характер [10].

В экспериментальных работах на млекопитающих показано, что вследствие компенсаторных реакций при хроническом радиационном воздействии система иммуногемопоэза переходит на качественно другой уровень организации [11, 12], который позволяет ей выполнять наиболее приоритетные функции, однако при этом в неприоритетных могут наблюдаться количественные и качественные изменения, которые могут снижать адаптационные возможности к действию других факторов.

Одним из неблагоприятных факторов для рыб может быть паразитарная инвазия. Известно, что паразитарные инвазии у рыб могут приводить к изменению картины крови [13, 14]. Представляется интересным изучение одновременного действия этих двух факторов (хронического радиационного воздействия и паразитарной инвазии) на состояние эритропоэза у рыб, тем более что в доступной литературе авторами не найдено информации по данному вопросу.

Целью данной работы была оценка реакции эритропоэза по показателям периферической крови у рыб, обитающих в условиях хронического радиационного воздействия, на трипаносомную инвазию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Район исследований

На р. Теча были организованы три станции отбора проб [10]. Станция РТ1 располагалась в верховье вблизи выселенного ранее населенного пункта С. Асанова (33 км ниже места исторического выпуска ЖРО ПО “Маяк”, в 5 км ниже плотины П-11, замыкающей каскад водоемов хранилищ жидких радиоактивных отходов). Станция РТ2 – на среднем участке реки, в 81 км ниже плотины П-11 вблизи населенного пункта Бродокалмак (109 км ниже места исторического выпуска ЖРО ПО “Маяк”). Станция РТ3 – в нижней части реки, в 184 км ниже плотины П-11, в 30 км выше впадения р. Теча в р. Исеть, вблизи населенного пункта Першинское (212 км ниже места исторического выпуска ЖРО ПО “Маяк”). Отлов рыбы проводили вблизи станций на участках реки длиной 3–5 км.

В качестве водотока сравнения использовалась р. Миасс (станция РМ), также относящаяся к Обь-Иртышской системе, русло которой проходит на расстоянии 20–100 км южнее русла р. Теча. Химический состав воды на исследуемых станциях рек Теча и Миасс в летний период 2012 г. был схожим (за исключением содержания радионуклидов); существенные отличия в значениях показателей воды двух рек выявлены лишь для содержания Cl^- и HCO_3^- [10]. В целом в р. Теча отмечена более высокая минерализация воды по сравнению с водой р. Миасс. Содержание тяжелых металлов на станциях обеих рек соответствовало фоновым уровням их содержания в водоемах Челябинской области.

Отбор проб и пробоподготовка

В качестве объекта исследования использовали представителей популяций плотвы *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758), окуня *Perca fluviatilis* (Linnaeus, 1758) и щуки *Esox lucius* (Linnaeus, 1758). Лов рыбы проводили электроудочкой SAMUS 725MP (Польша) весной во время нереста (апрель 2012 и 2013 г.) и летом во время нагула (август 2012 и 2013 г.). Видовое определение рыб проводили по руководству Л.С. Берга [15], определение возраста рыб – по руководству И.Ф. Правдина [16], пол определяли по гонадам при вскрытии рыб.

Гематологические исследования

В гематологических исследованиях у живой рыбы шприцем отбирали кровь из хвостовой вены. Определение количества клеток в периферической крови у рыб было выполнено с использованием счетчика форменных элементов крови “Пикоскель ПС-4М” (“НПФ Лабовэй”, Россия). Из цельной крови готовили мазки, которые фиксировали метанолом в течение 3 мин и затем окрашивали по Романовскому–Гимза [17]. Для определения клеточного состава крови в каждом препарате анализировали не менее 1000 клеток крови. По результатам вычисляли показатели относительного количества эритроцитов, эритроидных клеток различной степени зрелости, а также показатели абсолютного количества этих клеток в крови. Все препараты крови были исследованы на наличие трипаносом. Всего было проанализировано 526 мазков крови.

Дозы облучения рыбы

Уровень радиоактивного загрязнения в р. Теча снижается от верховья к устью реки [2]. На основе измерений концентраций радионуклидов в воде, донных отложениях, рыбе были рассчитаны индивидуальные мощности доз облучения для рыб р. Теча [4]. В табл. 1 представлены средние значения и коэффициенты вариации мощностей доз облучения рыб, обитающих на станциях РТ1, РТ2, РТ3.

Таблица 1. Средние надфоновые мощности доз и их коэффициенты вариации для рыб р. Течи, мкГр/сут

Показатель		Станции		
		РТ1	РТ2	РТ3
Окунь	Мощность дозы	124 (1.2)	11 (0.4)	4 (0.8)
Плотва	Мощность дозы	108 (1.4)	16 (0.6)	9 (0.6)
Щука	Мощность дозы	150 (1.1)	9 (0.4)	3 (0.7)

Примечание. В скобках указаны коэффициенты вариации мощности дозы.

Статистический анализ

При проведении статистического анализа использовали программное обеспечение R [18]. Рассчитывали средние арифметические значения показателей и их стандартную ошибку. Для оценки зараженности рыб кровепаразитами использовали показатель экстенсивности инвазии (встречаемости) – процентная доля зараженных трипаносомами особей, к общему числу обследованных рыб. Экстенсивность инвазии рассчитывали по формуле:

$$E = (n/Nx) \times 100\%,$$

где n – число зараженных особей; N – число исследованных особей [19]. Для оценки статистической значимости отличий показателей в различных группах рыб применяли критерий Уилкоксона [20]. Оценку влияния видовой принадлежности, пола, возраста рыб, сезона отлова, мощности дозы облучения, места обитания (верховье реки, среднее и нижнее течение р. Теча), трипаносомной инвазии на показатели эритропоэза у рыб проводили с использованием дисперсионного многофакторного анализа [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При анализе мазков крови у рыб из р. Теча и р. Миасс были обнаружены внеклеточные паразиты крови – трипаносомы (*Trypanosoma*).

Трипаносомы – это эндопаразиты рода простейших, класса жгутиковых (рисунок 1). Имеют веретеновидное тело, снабженное жгутиком. Между телом и жгутиком находится тонкая цитоплазматическая перепонка – ундулирующая мембрана, с помощью волнообразных движений которой трипаносома передвигается. Размножаются трипаносомы бесполым путем (продольным делением). Развитие происходит со сменой хозяев, которыми являются рыбы и пиявки. Заражение рыб происходит через кровососущих пиявок [22].

Поскольку подобных исследований по оценке сочетанного действия радиации и паразитарной инвазии на гемопоэз у рыб р. Теча не проводилось, то авторы сочли важным на первом этапе определить, существует ли взаимодействие этих факторов и каков его характер. С этой целью рыбы р. Теча и р. Миасс были распределены на группы: здоровые рыбы (незараженные трипаносомами) и больные рыбы (зараженные трипаносомами). Были рассчитаны индексы встречаемости трипаносом для исследуемых видов в уловах, а также в целом для всей выборки. В табл. 2 приведены суммарные данные встречаемости инвазии трипаносом у исследуемых видов рыб (плотва, окунь, щука) в уловах за 2012 и 2013 г. в летний и весенний периоды для всех станций отлова. Самый высокий уровень заболеваемости регистрировался у окуня (доля зараженных особей составила 45%), затем у щуки (доля зараженных особей составила 23%) и самый низкий у плотвы (доля зараженных особей составила 15%). В целом третья часть всех обследованных рыб была заражена трипаносомами (доля зараженных особей составила 29%). Как видно из таблицы, летом доля зараженных рыб более высокая, чем весной.

В р. Теча наиболее благополучная ситуация по заболеваемости рыб наблюдалась на станции РТ3. Станция РТ3 находится в нижнем, более полноводном и более быстром течении р. Теча. Возможно, более низкий уровень заражения рыб трипаносомами на станции РТ3 в большей степени обусловлен тем, что гидрологический режим (глубина реки, скорость течения и др.) на этом участке может затруднять прикрепление пиявок – переносчиков трипаносом, к рыбе-хозяину. Кроме этого, может иметь значение плотность популяции рыб на исследуемых станциях [23].

Многофакторный дисперсионный анализ с использованием главной линейной модели пока-

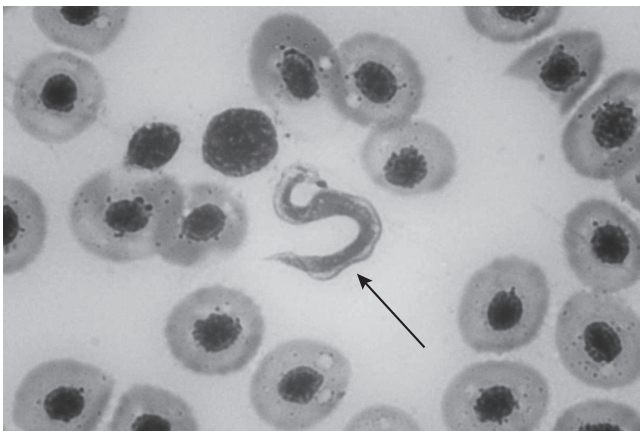

Рис. 1. Трипаносома (*Trypanosoma percae*) в крови окуня указана стрелкой. Увеличение ×900.

Таблица 2. Показатели встречаемости инвазии трипаносом у рыб в уловах, суммарные данные за 2012–2013 гг.

Сезон	Станции	Индекс встречаемости инвазии, %			
		плотва	окунь	щука	все виды
Весна	РМ	0%; $n = 33$	31%; $n = 45$	10%; $n = 10$	17%; $n = 88$
	РТ3	4%; $n = 32$	0%; $n = 33$	0%; $n = 15$	2%; $n = 80$
	РТ2	0%; $n = 26$	71%; $n = 21$	19%; $n = 16$	29%; $n = 63$
	РТ1	9%; $n = 26$	55%; $n = 20$	13%; $n = 9$	29%; $n = 55$
	Все станции	3%; $n = 117$	39%; $n = 119$	12%; $n = 50$	20%; $n = 286$
Лето	РМ	30%; $n = 23$	39%; $n = 23$	60%; $n = 15$	4%; $n = 61$
	РТ3	13%; $n = 20$	29%; $n = 22$	0%; $n = 20$	21%; $n = 62$
	РТ2	14%; $n = 22$	64%; $n = 22$	0%; $n = 10$	31%; $n = 54$
	РТ1	60%; $n = 23$	91%; $n = 34$	40%; $n = 6$	65%; $n = 63$
	Все станции	28%; $n = 88$	52%; $n = 101$	33%; $n = 51$	40%; $n = 240$
Весна + Лето	РМ	13%; $n = 56$	34%; $n = 68$	40%; $n = 25$	27%; $n = 149$
	РТ3	8%; $n = 52$	19%; $n = 55$	0%; $n = 35$	12%; $n = 42$
	РТ2	6%; $n = 48$	67%; $n = 43$	12%; $n = 26$	30%; $n = 117$
	РТ1	29%; $n = 49$	69%; $n = 54$	29%; $n = 15$	44%; $n = 118$
Индекс встречаемости в среднем за весь период исследований		15%; $n = 205$	45%; $n = 220$	23%; $n = 101$	29%; $n = 526$

Примечание. Индекс встречаемости инвазии – доля зараженных рыб от числа обследованных рыб, %; n – число экземпляров обследованных рыб.

зал, что на экстенсивность трипаносомной инвазии у рыб статистически значимо влияет вид рыб ($F = 30.3$, $p = 0.001$), сезон отлова ($F = 29.3$, $p = 0.001$), место обитания – верхнее, среднее, нижнее течение реки ($F = 3.6$, $p = 0.015$).

Таблица 3. Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния биологических и средовых факторов на абсолютное количество клеток в периферической крови у рыб, суммарные данные за 2012–2013 гг.

Факторы	Коэффициент Фишера (F)	Уровень значимости (p)
Пол	0.09	0.91
Вид	2.06	0.13
Возраст	0.31	0.58
Год отлова	0.58	0.44
Сезон отлова (весна/лето)	310.5	4.6×10^{-54}
Трипаносомы	4.71	0.03
Мощность дозы	4.54	0.03
Место обитания (верхнее, среднее, нижнее течение реки)	2.72	0.07

В целом в выборке, сформированной из уловов рыб трех видов со всех станций в 2012–2013 гг., присутствовали особи в возрасте от 0+ до 7+ (0+ – 3.6%; 1+ – 32.5%; 2+ – 33.7%; 3+ – 19.1%; 4+ – 7.8%; 5+ – 2.9%; 6+ – 1%; 7+ – 1%); распределение по полу было следующим – 53% самок и 47% самцов.

С целью выявления влияния факторов биологической природы и факторов окружающей среды на гемопоэз у рыб был выполнен многофакторный дисперсионный анализ, результаты которого представлены в табл. 3. Статистически значимое влияние на абсолютное количество клеток в периферической крови оказывали сезон отлова – весна или лето ($F = 310$; $p = 4.60 \times 10^{-54}$), трипаносомная инвазия ($F = 4.71$; $p = 0.03$) и мощность дозы облучения ($F = 4.54$; $p = 0.03$). Влияние видовой принадлежности, возраста, пола рыб оказалось статистически не значимым. Также не выявлено статистически значимого влияния на исследуемый показатель места обитания (верхнее/среднее/нижнее течение реки) и года отлова рыб. В работе [10] приведены результаты исследования эритропоэза у плотвы р. Теча, в которых показано, что адаптационные реакции

Таблица 4. Абсолютное количество клеток в периферической крови у здоровых и больных трипаносомозом рыб, суммарные данные за 2012–2013 гг., $\times 10^{12}$ кл./л

Станция	Трипаносомная инвазия	Количество клеток ($M \pm m$)	Количество эритроидных клеток ($M \pm m$)
РМ	Здоровые животные	1.85 ± 0.08	1.66 ± 0.06
РТ3		1.87 ± 0.07	1.77 ± 0.07
РТ2		1.83 ± 0.08	1.64 ± 0.08
РТ1		* 1.36 ± 0.09	* 1.22 ± 0.06
Все станции		1.75 ± 0.04	1.62 ± 0.04
РМ	Больные животные	1.67 ± 0.12	1.52 ± 0.07
РТ3		†1.52 ± 0.22	†1.38 ± 0.13
РТ2		1.73 ± 0.13	1.72 ± 0.12
РТ1		1.44 ± 0.09	*# 1.29 ± 0.05
Все станции		†1.57 ± 0.06	†1.45 ± 0.04

Примечание. Здесь и далее ($M \pm m$) – средняя арифметическая величина и ее стандартная ошибка; статистически значимое отличие от группы сравнения при $p < 0.05$: * – отличия от показателя в группе сравнения здоровых рыб (РМ); # – отличия от показателя в группе сравнения больных рыб (РМ); † – отличия от показателя в аналогичной группе здоровых животных.

на хроническое радиационное воздействие у плотвы выражаются в увеличении пролиферативной активности делящихся эритроидных клеток в периферической крови, что позволяет обеспечить организм функциональными клетками крови на уровне физиологической нормы (показатели в популяции сравнения из р. Миасс) при дозах 9 и 16 мкГр/сут, и является недостаточным при дозах свыше 108 мкГр/сут. При этом более выраженные эффекты регистрировались при обследовании рыб весной, но и летом эта тенденция сохранялась, т.е. физиологическое состояние рыб в различные периоды годичного цикла влияло на выраженность выявленного эффекта, но не на его направленность.

С учетом вышесказанного, с целью увеличения объема выборки и соответственно статистической силы авторы сочли возможным объединить в одну выборку данные о состоянии гемопоэза у рыб разных видов, возраста, пола, выловленных на всех станциях весной и летом в 2012 и 2013 г.

Как видно из табл. 4, у здоровых рыб из р. Миасс численность эритроцитов в периферической крови составила $(1.66 \pm 0.06) \times 10^{12}$ кл./л, у здоровых рыб из р. Теча на станциях РТ2, РТ3 показатели количества эритроцитов в крови не отличались от показателя контроля (станция РМ). У здоровых рыб со станции РТ1 (наиболее радиоактивно загрязненный участок р. Теча, мощность дозы облучения рыб 108–150 мкГр/сут) регистрировалось статистически значимое снижение количества эритроцитов в периферической крови по отношению к контрольным здоровым рыбам на 26%.

У больных рыб из р. Миасс, зараженных трипаносомами, количество эритроцитов в периферической крови не отличалось от показателя у здоровых рыб этой же реки и составляло $(1.52 \pm \pm 0.07) \times 10^{12}$ кл./л. У больных рыб со станций РТ3 и РТ2 количество эритроцитов не имело значимых отличий от показателя у больных рыб из р. Миасс, хотя у рыб со станции РТ3 отмечено статистически значимое снижение количества эритроцитов по сравнению со здоровыми рыбами с этой же станции. На станции РТ1 численность эритроцитов у больных рыб была статистически значимо ниже, чем у здоровых и больных рыб из р. Миасс, но не отличалась от показателя у здоровых рыб с этой же станции РТ1.

Данные о влиянии инвазии трипаносом на относительное и абсолютное количество эритроидных клеток различной степени зрелости в периферической крови у рыб приведены в табл. 5 и 6.

У здоровых рыб на всех станциях р. Теча в два и более раза статистически значимо увеличено процентное содержание эритробластов в крови (табл. 5). Также у здоровых рыб р. Теча со станций РТ3 и РТ1 повышено процентное содержание пронормоцитов и в целом бластных клеток (эритробласты + пронормоциты) в крови по отношению к рыбам из р. Миасс. У больных рыб из р. Теча статистически значимое снижение процентного содержания эритробластов и НХЭ и по-

Таблица 5. Влияние инвазии трипаносом на относительное количество эритроидных клеток разной степени зрелости в периферической крови у рыб, суммарные данные за 2012–2013 гг., ($M \pm m$), %

Станция	Трипаносомная инвазия	Эритробласты	Пронормоциты	Нормоциты	ПХЭ	НХЭ	Бластные клетки	Делящиеся клетки	Неделящиеся клетки
РМ	Здоровые животные	0.059 ± 0.014	0.31 ± 0.07	12.8 ± 1.2	22.6 ± 1.0	62.0 ± 1.9	0.37±0.08	13.7 ± 1.3	86.3 ± 1.3
РТ3		*0.124 ± 0.020	*0.45 ± 0.06	15.3 ± 1.0	23.1 ± 0.6	57.8 ± 1.4	*0.58 ± 0.07	16.6 ± 1.1	83.4 ± 1.1
РТ2		*0.111 ± 0.020	0.33 ± 0.05	12.7 ± 1.3	22.2 ± 0.9	62.2 ± 2.0	0.44 ± 0.06	13.3 ± 1.3	86.7 ± 1.3
РТ1		*0.160 ± 0.030	*1.00 ± 0.30	13.7 ± 1.2	23.9 ± 1.2	58.0 ± 1.9	*1.20 ± 0.40	15.7 ± 1.4	84.3 ± 1.4
Все станции		0.110 ± 0.011	0.49 ± 0.07	13.8 ± 0.6	22.9 ± 0.4	59.9 ± 0.9	0.60 ± 0.07	14.9 ± 0.6	85.1 ± 0.6
РМ	Больные животные	0.056 ± 0.015	0.46 ± 0.09	17.6 ± 2.3	20.6 ± 1.2	57.8 ± 3.2	0.52 ± 0.09	19.1 ± 2.4	80.9 ± 2.4
РТ3		0.100 ± 0.050	0.48 ± 0.10	14.9 ± 3.0	#27.7 ± 2.3	54.1 ± 2.8	0.58 ± 0.13	16.2 ± 3.2	83.8 ± 3.2
РТ2		0.065 ± 0.023	0.41 ± 0.11	16 ± 2.6	22.4 ± 1.6	†57.2 ± 3.3	0.47 ± 0.12	17.3 ± 2.7	82.7 ± 2.7
РТ1		†0.094 ± 0.023	0.51 ± 0.09	†17.8 ± 1.3	22.9 ± 1.0	†53.7 ± 1.6	0.60 ± 0.10	19.5 ± 1.4	80.5 ± 1.4
Все станции		†0.078 ± 0.013	0.47 ± 0.05	†17.1 ± 1.0	22.6 ± 0.7	†55.6 ± 1.4	0.55 ± 0.06	#18.6 ± 1.1	#81.4 ± 1.1

Примечание. Здесь и далее ПХЭ – полихроматофильные эритроциты, НХЭ – нормохроматофильные эритроциты.

вышение нормоцитов регистрировались на станции РТ1 по отношению к показателям здоровых рыб с этой же станции. Также регистрировалось снижение процентного содержания НХЭ у больных рыб со станций РТ1 и РТ2 по отношению к здоровым рыбам с этих же станций.

Показатели абсолютного количества эритроидных клеток различной степени зрелости в крови у больных и здоровых рыб из р. Миасс не имели значимых отличий (табл. 6). У здоровых рыб из р. Теча по сравнению со здоровыми рыбами из р. Миасс количество эритробластов в крови было в два раза выше (различия статистически значимы у рыб со станций РТ3 и РТ1, у рыб со станции РТ2 – не достигали статистической значимости; на станциях РТ1 и РТ3 у рыб в крови статистически значимо повышено количество бластных клеток (эритробласты + пронормоциты); у рыб со станции РТ1 выявлено статистически значимое снижение количества неделящихся клеток в крови на 28%.

У больных рыб из р. Теча показатели абсолютного количества эритроидных клеток различной степени зрелости в крови не имели значимых отличий от показателей у больных рыб из р. Миасс, за исключением статистически значимого снижения количества неделящихся клеток у рыб со станции РТ1.

При сравнении показателей абсолютного количества эритроидных клеток у больных и здоровых рыб из р. Теча статистически значимые отличия выявлены только у животных со станции РТ1: у больных рыб на 23% снижено содержание эритробластов, на 40% повышено содержание нормоцитов, на 35% повышено общее количество делящихся клеток. У больных рыб со станций РТ2 и РТ3 не зарегистрировано существенных отличий от показателей эритропоэза у здоровых рыб с соответствующих станций.

В целом различия в показателях состояния эритропоэза у больных рыб из р. Теча по отношению к больным рыбам из р. Миасс менее выражены, чем изменения в эритропоэзе у здоровых рыб из р. Теча по отношению к здоровым рыбам из р. Миасс.

Таким образом, хроническое радиационное воздействие на здоровых рыб вызывает увеличение содержания в периферической крови эритроидных бластов, которое позволяет обеспечить количество эритроцитов в крови на уровне контроля (показатели у рыб р. Миасс) в среднем и нижнем течении р. Теча (мощность дозы 3–16 мкГр/сут) и является недостаточным при мощности дозы свыше 100 мкГр/сут: у рыб со станции РТ1 регистрируется статистически значимое снижение

Таблица 6. Влияние инвазии трипаносом на абсолютное количество эритроидных клеток разной степени зрелости в периферической крови у рыб, суммарные данные за 2012–2013 гг., ($M \pm m$), $\times 10^{12}$ кл./л

Станция	Трипаносомная инвазия	Эритробласты	Пронормоциты	Нормоциты	ПХЭ	НХЭ	Бластные клетки	Делящиеся клетки	Неделящиеся клетки
РМ	Здоровые животные	0.00095 ± 0.00023	0.0052 ± 0.0010	0.232 ± 0.023	0.391 ± 0.021	1.07 ± 0.05	0.0060 ± 0.0010	0.239 ± 0.023	1.43 ± 0.05
РТ3		*0.0026 ± 0.0005	*0.0088 ± 0.0013	0.281 ± 0.020	0.435 ± 0.022	1.08 ± 0.05	*0.0112 ± 0.0015	0.293 ± 0.020	1.47 ± 0.06
РТ2		0.002 ± 0.0004	0.0051 ± 0.0008	0.208 ± 0.027	0.368 ± 0.027	1.01 ± 0.06	0.0073 ± 0.0011	0.220 ± 0.027	1.41 ± 0.08
РТ1		*0.0019 ± 0.0004	0.0120 ± 0.0040	0.177 ± 0.017	*0.320 ± 0.027	*0.76 ± 0.04	*0.0130 ± 0.0040	0.190 ± 0.017	*1.03 ± 0.05
Все станции		0.00189 ± 0.00021	0.0074 ± 0.0008	0.234 ± 0.011	0.389 ± 0.012	1.01 ± 0.03	0.0094 ± 0.0009	0.244 ± 0.012	1.37 ± 0.03
РМ	Больные животные	0.00099 ± 0.00027	0.0069 ± 0.0013	0.260 ± 0.030	0.330 ± 0.022	0.96 ± 0.08	0.0080 ± 0.0013	0.270 ± 0.030	1.28 ± 0.08
РТ3		0.0017 ± 0.0010	0.0065 ± 0.0013	0.240 ± 0.060	0.410 ± 0.050	0.82 ± 0.08	0.0081 ± 0.0019	0.250 ± 0.050	1.15 ± 0.10
РТ2		0.0015 ± 0.00060	0.0079 ± 0.0027	0.270 ± 0.040	0.410 ± 0.040	1.06 ± 0.10	0.0090 ± 0.0030	0.280 ± 0.040	1.4 ± 0.13
РТ1		†0.0015 ± 0.0004	0.0079 ± 0.0016	†0.248 ± 0.023	0.323 ± 0.020	0.77 ± 0.04	0.0094 ± 0.0017	†0.257 ± 0.024	#1.04 ± 0.05
Все станции		0.00137 ± 0.00023	0.0075 ± 0.0009	0.255 ± 0.016	0.352 ± 0.014	†0.89 ± 0.04	0.0088 ± 0.0011	0.264 ± 0.017	†1.19 ± 0.04

Таблица 7. Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния биологических и средовых факторов на абсолютное количество клеток в периферической крови у рыб со станции РТ1 р. Теча, суммарные данные за 2012–2013 гг.

Факторы	Коэффициент Фишерра (F)	Уровень значимости (p)
Пол	0.22	0.8
Вид	1.71	0.18
Возраст	0.08	0.78
Год отлова	3.54	0.06
Сезон отлова (весна/лето)	69.01	5.9×10^{-15}
Трипаносомы	6.05	0.01
Мощность дозы	43.89	2.06×10^{-10}

количества эритроцитов в крови по отношению к контролю.

С использованием дисперсионного многофакторного анализа выполнена оценка влияния хронического радиационного воздействия и паразитарной инвазии на состояние эритропоэза у рыб (табл. 7). Как видно из таблицы, трипаносомная инвазия оказывает статистически значимое влияние на процентный состав эритроидных клеток различной степени зрелости в периферической крови, а именно на содержание пролиферирующих клеток (эритробласты, нормоциты, в целом все делящиеся клетки), а также на содержание зрелых нормохроматофильных эритроцитов. Мощность дозы облучения значимо влияет на процентное содержание эритробластов и пронормоцитов, на абсолютное количество эритроидных клеток в целом, а также на численность клеток в различных компартментах (эритробласты, пронормоциты, ПХЭ, НХЭ) в периферической крови у рыб, обитающих в радиоактивно загрязненной реке.

Также многофакторный анализ показал, что совместное действие трипаносомной инвазии и радиации может приводить к модификации эффектов этих факторов: в основном модифицирующее действие проявляется в изменении содержания делящихся клеток (относительное количество пронормоцитов, абсолютное количество нормоцитов и суммарное количество делящихся клеток).

Для прояснения роли исследуемых факторов (радиация и трипаносомная инвазия) в работе выполнен анализ влияния сочетанного воздействия радиации и трипаносом на эффективность эритропоэза у рыб со станции РТ1 р. Теча по отношению к рыбам из р. Миасс (табл. 8).

Таблица 8. Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния мощности дозы облучения и трипаносомной инвазии на эритропоэз у рыб со станции РТ1, суммарные данные за 2012–2013 гг.

Показатель	Мощность дозы		Трипаносомы		Мощность дозы + трипаносомы	
	F	p	F	p	F	p
Относительное количество клеток в периферической крови, %						
Эритробласты	5.5	1.9×10^{-2}	5.9	1.6×10^{-2}	–	–
Пронормоциты	15.6	9.3×10^{-5}	–	–	8.7	3.3×10^{-3}
Нормоциты	–	–	11.9	6.1×10^{-4}	–	–
НХЭ	–	–	9.6	2.0×10^{-3}	–	–
Делящиеся клетки	–	–	12.2	1.0×10^{-3}	–	–
Абсолютное количество клеток в периферической крови, $\times 10^{12}$/л						
Эритробласты	4.3	3.9×10^{-2}	–	–	–	–
Пронормоциты	5.5	2.0×10^{-2}	–	–	–	–
Нормоциты	–	–	–	–	3.6	2.7×10^{-2}
ПХЭ	14.3	1.8×10^{-2}	–	–	–	–
НХЭ	34.1	1.1×10^{-8}	–	–	–	–
Делящиеся клетки	–	–	–	–	3.10	$4. \times 10^{-2}$
Все эритроидные клетки	38.7	1.3×10^{-9}	–	–	–	

Примечание. F – коэффициент Фишера, p – уровень значимости.

Таблица 9. Расчетные показатели эффективности эритропоэза у рыб со станции РТ1, суммарные данные для исследуемых видов рыб за 2012–2013 гг.

Факторы воздействия	Отношение коэффициентов эффективности эритропоэза		
	(эритробласты + + пронормоблаты) → → нормоциты	нормоциты → → (ПХЭ + НХЭ)	(эритробласты + + пронормобласты + + нормоциты) → → (ПХЭ + НХЭ)
Трипаносомы (РМ больные/РМ здоровые)	84% (потери 16%)	80% (потери 20%)	79% (потери 21%)
Радиация (РТ1 здоровые/РМ здоровые)	35% (потери 65%)	94% (потери 6%)	91% (потери 9%)
Трипаносомы + радиация (РТ1 больные/РМ здоровые)	68% (потери 32%)	68% (потери 32%)	68% (потери 32%)
Расчетный ожидаемый аддитивный эффект Трипаносомы + + радиация	30% (потери 70%)	75% (потери 25%)	72% (потери 28%)

В анализ были взяты рыбы, выловленные на станции РТ1 и РМ. Распределение по возрасту в этой выборке было следующим: 0+ – 3.8%; 1+ – 30.1%; 3+ – 39.79%; 4+ – 15.23%; 5+ – 6.57%; 6+ – 0.35%; 7+ – 0.35%. В выборке 48% составляли самки, 52% – самцы. В этом случае многофакторный анализ показал статистически значимое влияние на количество клеток в периферической крови у рыб следующих факторов – сезона, трипаносом, мощности дозы и отсутствие влияния вида, пола, возраста рыб и года отлова, поэтому здесь также был использован весь массив гематологических данных (абсолютные значения), полученных в 2012 и 2013 г. для трех видов рыб со станций РТ1 и РМ.

Оценивали продуктивность бластных клеток (эритробласты + пронормоциты) по соотношению нормоциты/бластные клетки; продуктивность нормоцитов по соотношению (ПХЭ + НХЭ)/нормоциты; продуктивность всех делящихся клеток по соотношению (ПХЭ + НХЭ)/(эритробласты + пронормоциты + нормоциты). В качестве физиологической нормы были приняты коэффициенты соотношения этих показателей у здоровых рыб из р. Миасс. Затем рассчитывали соотношение этих коэффициентов для больных рыб со станции РМ, здоровых и больных рыб со станции РТ1 по отношению к соответствующим коэффициентам у здоровых рыб со станции РМ (табл. 9). Эти отношения использовали для оценки эффективности эритропоэза у рыб с учетом воздействия исследуемых факторов: трипаносмы, радиационное воздействие, сочетанное действие этих двух факторов. Также были рассчитаны коэффициенты эффективности эритропоэза при аддитивном взаимодействии радиационного фактора и трипаносом как произведение коэффициентов при раздельном действии факторов.

Сравнение показателей по отношению к здоровым рыбам из р. Миасс оценивает влияние на эритропоэз следующих факторов: (РМ больные/РМ здоровые) – действие трипаносом; (РТ1 здоровые/РМ здоровые) – действие радиации; (РТ1 больные/РМ здоровые) – сочетанное действие радиации и трипаносом.

Как видно из табл. 9, заражение рыб р. Миасс трипаносомами приводит к снижению до 84% продуктивности бластных эритроидных клеток ((эритробласты + пронормоблаты) → нормоциты) по отношению к здоровым рыбам из этой же реки: при одинаковом количестве бластных клеток у больных рыб образуется нормоцитов на 16% меньше, чем у здоровых рыб. Расчетные потери продукции в ряду нормоциты → зрелые клетки (НХЭ + ПХЭ) у больных рыб из р. Миасс составили 20%. В целом же потери в эритропоэзе ((эритробласты + пронормоблаты + нормоциты) → → (ПХЭ + НХЭ)) у больных рыб по отношению к здоровым составили 21%, при этом потери были практически одинаковыми во всех компартментах эритропоэза.

При хроническом радиационном воздействии на рыб в диапазоне мощностей доз 100–150 мкГр/сут в эритропоэзе наблюдается другая картина. У здоровых рыб из р. Теча наибольшие потери в эритропоэзе наблюдались в ряду бластные клетки (эритробласты + пронормоблаты) → → нормоциты и составили 65% по отношению к продуктивности эритропоэза у здоровых рыб из р. Миасс. Клеточные потери в ряду нормоциты → → (ПХЭ+НХЭ) составили всего лишь 6% по отношению к контролю. В целом потери в эритропоэзе ((эритробласты + пронормоблаты + нормоциты) → (ПХЭ+НХЭ)) у больных рыб из р. Теча

по отношению к здоровым рыбам из р. Миасс составили 9%.

При сочетанном действии факторов (трипаносомы + радиация) клеточные потери в эритропоэзе в целом ((эритробласты + пронормоблаты + нормоциты) → (ПХЭ + НХЭ)), а также в ряду (нормоциты → (ПХЭ+НХЭ)), были выше, чем при действии каждого из факторов по отдельности и выше, чем рассчитанные для аддитивного взаимодействия факторов, и составили 32%. В то же время сочетанное действие трипаносомной инвазии и радиации повысило потери в ряду (эритробласты + пронормоблаты) → нормоциты по отношению к действию трипаносомной инвазии, но снизило потери по отношению к радиационному воздействию. То есть взаимодействие этих факторов по показателю снижения эффективности в ряду (эритробласты + пронормобласты) → нормоциты носит антагонистический характер.

Следовательно, при действии радиации на рыб наибольшие потери продукции в эритропоэзе наблюдаются среди клеток с высоким уровнем пролиферации (65%), потери среди более дифференцированных клеток составляют не более 10% по отношению к контролю. Токсины трипаносом не обладают избирательным действием – наблюдается примерно одинаковый по отношению к контролю уровень потерь (около 20%) клеток различной степени зрелости.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты данного исследования позволяют полагать, что при обитании рыб в условиях хронического радиационного воздействия в диапазоне мощностей доз 3–150 мкГр/сут сочетанное действие двух факторов (радиации и трипаносомной инвазии) на эритропоэз характеризуется антагонистическим взаимодействием на продуктивность бластных клеток и аддитивным взаимодействием на продукцию более дифференцированных (нормоциты) клеток и количество зрелых эритроцитов.

Выявленное в данном исследовании увеличение количества бластных клеток в периферической крови у рыб из р. Теча может являться компенсаторной реакцией на радиационно-индуцированную гибель эритроцитов. При инвазии трипаносом также может отмечаться компенсаторная реакция в эритропоэзе, выражающаяся в повышении пролиферативной активности эритроидных клеток. Живя в плазме крови, питаясь диффузно органическими веществами, трипаносомы выделяют в кровь ядовитые вещества – токсины (гемолизины), которые разрушают эритроциты крови [24]. В ответ на разрушение эритроцитов в гемопоэзе запускается компенсаторная интенсификация эритропоэза, которая проявляется обычно возрастанием содержания делящихся клеток в кроветворных органах. По-видимому, оба фактора (трипаносомы и радиация) действуют однонаправленно – стимулируют пролиферацию бластных клеток, что повышает их количество и объясняет антагонистическое взаимодействие при сочетанном воздействии облучения и трипаносомной инвазии.

Такая перестройка в эритропоэзе обеспечивает содержание эритроцитов в периферической крови на уровне физиологической нормы у рыб со станций РТ3 и РТ2 (диапазон мощностей доз облучения 3–16 мкГр/сут), но является недостаточной при радиационном воздействии, характерном для станции РТ1 – мощность дозы облучения 100–150 мкГр/сут.

Зрелые эритроциты достаточно радиоустойчивы – радиационно-индуцированные потери в этом пуле у здоровых рыб из р. Теча незначительные. Потери зрелых эритроцитов при сочетанном действии соответствуют аддитивному взаимодействию исследуемых факторов, что, вероятно, связано с тем, что цитотоксическое действие радиации и трипаносом имеет различные механизмы: основной мишенью для радиации в клетке являются молекулы ДНК, а основной мишенью токсинов трипаносом являются мембраны [24], поэтому эффекты при совместном действии этих факторов суммируются.

ВЫВОДЫ

1. На уровень зараженности рыб трипаносомами в р. Теча и р. Миасс статистически значимое влияние оказывают видовая принадлежность рыб, сезон отлова, место обитания: летом доля зараженных рыб более высокая, чем весной; самый высокий уровень заболеваемости у окуня, затем у щуки и самый низкий у плотвы; уровень заболеваемости рыб в р. Теча снижается от верхнего течения к более полноводному низовью.

2. У больных рыб из водотока сравнения р. Миасс (РМ), зараженных трипаносомами, количество эритроцитов значимо не отличалось от показателя у здоровых рыб этой же реки. У больных рыб радиоактивно загрязненной р. Теча на станции РТ1 (верхнее течение, мощность дозы 108–150 мкГр/сут) численность эритроцитов значимо не отличалась от показателя у здоровых рыб с этой же станции, но была статистически значимо ниже, чем у здоровых и у больных рыб из р. Миасс. У здоровых и больных рыб р. Теча на станциях РТ2 (среднее течение, мощность дозы 9–16 мкГр/сут), РТ3 (нижнее течение, мощность дозы 3–9 мкГр/сут) показатели количества эритроцитов в крови значимо не отличались от показателя контроля (РМ).

3. У здоровых рыб на всех станциях р. Теча статистически значимо увеличено процентное содержание эритробластов, пронормоцитов и в целом бластных клеток (эритробласты + пронормоциты) в крови по отношению к рыбам из р. Миасс. У больных рыб из р. Теча статистически значимое увеличение процентного содержания эритробластов и нормоцитов по отношению к контролю регистрируется только на станции РТ1.

4. Статистически значимые отличия абсолютного количества эритроидных клеток в периферической крови у больных и здоровых рыб из р. Теча выявлены только у животных со станции РТ1: у больных рыб на 23% снижено содержание эритробластов, на 40% повышено содержание нормоцитов; на 35% повышено общее количество делящихся клеток по отношению к здоровым рыбам этой же станции. У больных рыб со станций РТ2 и РТ3 не зарегистрировано значимых отличий от показателей эритропоэза у здоровых рыб с соответствующих станций.

5. При проведении дисперсионного анализа выявлено, что трипаносомная инвазия статистически значимое влияние оказывает на процентный состав эритроидных клеток в периферической крови: на содержание пролиферирующих клеток (эритробласты, нормоциты, в целом все делящиеся клетки), а также на содержание зрелых нормохроматофильных эритроцитов; мощность дозы облучения статистически значимо влияет на процентное содержание эритробластов и пронормоцитов, на абсолютное количество эритроидных клеток в целом, а также на численность клеток в различных компартментах (эритробласты, пронормоциты, ПХЭ, НХЭ) в периферической крови у рыб, обитающих в радиоактивно-загрязненной реке; совместное воздействие трипаносомной инвазии и радиации может приводить к модификации эффектов в делящихся пулах кроветворения.

6. При хроническом радиационном воздействии на рыб с мощностью дозы 100–150 мкГр/сут наибольшие потери продукции в эритропоэзе наблюдаются среди клеток с высоким уровнем пролиферации (65%), потери среди неделящихся клеток составляют не более 10% по отношению к контролю. Токсины трипаносом вызывают примерно одинаковый по отношению к контролю уровень потерь в различных компартментах эритропоэза (около 20% клеток различной степени зрелости). При сочетанном действии радиации и трипаносом наблюдается антагонистическое взаимодействие факторов на продуктивность бластных клеток и аддитивное действие на содержание неделящихся клеток в периферической крови.

7. Трипаносомная инвазия у рыб модифицирует радиационно-индуцированные изменения в гемопоэзе. При оценке действия радиационного фактора на гемопоэз необходимо учитывать фактор инвазии рыб трипаносомами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Норвежского агентства по радиационной защите, проект М14-11/18.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / Под ред. проф. А.В. Аклеева. Челябинск: Книга, 2016. 400 с.
2. *Трапезников А.В., Позолотина В.Н., Молчанова И.В. и др.* Радиоэкологическая характеристика речной системы Теча–Исеть // Экология. 2000. № 4. С. 248–256.
3. *Pryakhin E.A., Tryapitsina G.A., Osipov D.I. et al.* Characterization of biocenoses in the storage reservoirs of liquid radioactive wastes of mayak pa. initial descriptive report // J. Environ. Radioactiv. 2016. T. 151. C. 449–460.
4. *Shishkina E.A., Pryakhin E.A., Popova I.Ya. et al.* Evaluation of distribution coefficients and concentration ratios of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Techa river and the Miass river // J. Environ.Radioact. 2016. V. 158–159. P. 148–163.
5. *Марей А.Н., Ильин Д.И., Кардеева А.А. и др.* Влияние промышленных стоков завода им. Д.И. Менделеева, сбрасываемых в р. Теча, на санитарные условия жизни и здоровье населения прибрежных пунктов. Отчет // Вопр. радиац. безопасности. 2009. № 2. С. 55–71.
6. *Трапезников А.В., Трапезникова В.Н.* Пресноводная радиоэкология. М.: ФГУП “Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр “Наука”, 2012. 544 с.
7. Методы исследований токсичности на рыбах: Пер. с нем. / Под ред. В.И. Лукьяненко. М.: Агропромиздат, 1985. 117 с.
8. Токсикозы рыб с основами патологии: Справочная книга / Сост. Н.М. Аршаница, М.А. Перевозников. СПб.: ФГНУ “ГосНИОРХ”, 2006. 178 с.
9. *Житенева Л.Д., Полтавцева Т.Г., Рудницкая О.А.* Атлас нормальных и патологически измененных клеток крови рыб. Ростов Н/Д: Кн. изд-во, 1989. 112 с.
10. *Тряпицына Г.А., Осипов Д.И., Егорейченков Е.А. и др.* Оценка состояния эритропоэза у плотвы *(Rutilus rutilus)* радиоактивно загрязненной реки Теча // Радиац. биология. Радиоэкология. 2017. Т. 5. № 1. С. 98–107.
11. *Горизонтов П.Д., Белоусова О.И., Федотова М.И.* Стресс и система крови. М.: Медицина, 1983. 240 с.
12. *Шибкова Д.З., Аклеев А.В.* Адаптационно-компенсаторные реакции системы кроветворения при хроническом радиационном воздействии. М.: ТОО «Издательство “Радэкон”», 2006. 346 с.

13. *Тромбицкий И.Д.* Картина крови прудовых рыб в норме и при паразитарных заболеваниях: Дис. ... канд. биол. наук. Рыбное, 1984. 229 с.
14. *Хамнуева Т.Р.* Разнообразие и экология кинетопластид (Kinetoplastida: Kinetoplastidea) – паразитов рыб озера Байкал: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2001. 19 с.
15. *Берг Л.С.* Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. Ч. 2. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 467–925.
16. *Правдин И.Ф.* Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных) / Под ред. П.А. Дрягина, В.В. Покровского. М.: Пищевая пром-ть, 1966. 376 с.
17. Микроскопическая техника: Руководство / Под ред. Д.С. Саркисова, Ю.Л. Перова. М.: Медицина, 1996. 544 с.
18. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2015. URL: https://www.R-project.org/
19. *Хованский И.Е., Млынар Е.В., Кавтарадзе Т.М., Кошкин М.А.* Паразитологические индикаторы экологических условий обитания рыб // Фундам. исследования. 2014. № 9 (ч. 2). С. 345–348.
20. *Hollander M., Wolfe D.A., Chicken E.* Nonparametric Statistical Methods. Hoboken, New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, 2014. P. 115–133.
21. *Chambers J.M.* // Statistical Models in S / Eds J.M. Chambers, T.J. Hastie. London, Great Britain: Chapman & Hall, 1997. P. 95–144.
22. *Хайбулаев К.Х., Гусейнов М.А.* Изучение развития трипаносом (*Trypanosoma*) и криптобий (*Cryptobia*) карпа и линя в пиявке *Piscícola geómetra* // Паразитология. 1985. Т. 19. № 1. С. 75–77.
23. *Хамнуева Т.Р., Пронин Н.М.* Особенности гостального и пространственного распределения трипаносом и криптобий (*Kinetoplastidea*) – паразитов рыб озера Байкал // Сиб. экол. журн. 2003. Т. 10. № 3. С. 273–278.
24. *Kallinikova V.D., Matekin P.V., Ogloblina T.A. et al.* Anticancer properties of flagellate protozoan Trypanosoma cruzi Chagas, 1909. // Izv. Akademii Nauk. Ser. Biol. 2001. № 3. P. 299–311.

Reaction of Erythropoiesis on Trypanosomal Invasion in Fish Inhabiting the Radioactive Contaminated Techa River

G. A. Tryapitsyna[a,b,#], E. A. Pryakhin[a], D. I. Osipov[a], E. A. Egoreichenkov[a,b], G. Rudolfsen[c,d], H.-K. Teyen[e], M. Sneve[c], and A. V. Akleyev[a,b]

[a] *Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia*
[b] *Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia*
[c] *Norwegian Radiation Protection Authority, Østerås, Norway*
[d] *University of Tromsø, Tromsø, Norway*
[e] *Norwegian University of Life Sciences (UMB), Center of Excellence in Environmental Radioactivity (CERAD), Ås, Norway*
[#] *E-mail: tga28@mail.ru*

The influence of trypanosomal invasion on the erythropoiesis in fish (roach (Rutilus rutilus L., 1758), perch Perca fluviatilis L., 1758), pike Esox lucius L., 1758), inhabiting radioactively contaminated Techa Rivera and in fish inhabiting the comparison watercourse Miass River was performed. It is shown that in summer the proportion of infected fish (40%) is higher than in spring (20%); the highest incidence rate was in perch (45%), the next was pike (23%) and the lowest level was in roach (14%). The incidence rate declines from the upper reaches (44%) to the lower reaches (12%). Under conditions of chronic radiation exposure in the dose range of 3–150 μGy/day, the combined effect of radiation and trypanosomal invasion is characterized by antagonistic interaction on the productivity of blast cells and the additive interaction on the production of more differentiated (normocytes) cells and the number of mature erythrocytes. A statistically significant effect of trypanosomal invasion on the percentage composition of erythroid cells of different degree of maturity in peripheral blood was revealed. The dose rate of irradiation statistically significantly affects the percentage of erythroblasts and pronormocytes and the absolute number of erythroid cells in the peripheral blood. Trypanosomal invasion in fish can modify the effect of radiation on hematopoiesis.

Keywords: radioactive contamination, radionuclides, Techa River, erythropoiesis, trypanosomes, fish