
ОБЩАЯ РАДИОБИОЛОГИЯ

УДК 539.12.04:575.17.504.75

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНЕГО ПОРОГА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ТЕХНОГЕННОГО ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ У ЖИВОТНЫХ МЕТОДОМ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

© 2025 г. Т. Г. Сазыкина*, А. И. Крышев

Научно-производственное объединение “Тайфун” (ФГБУ НПО “Тайфун”), г. Обнинск, Россия

*E-mail: ecomod@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.07.2024 г.

После доработки 27.10.2025 г.

Принята к публикации 12.11.2025 г.

Для количественной оценки нижнего порога возникновения генетических повреждений в природной фауне при хроническом облучении сформирована выборка данных публикаций (113 записей) о генетических повреждениях в зависимости от мощности дозы облучения. Анализ данных выполнен методом непараметрической статистики. Нижний порог появления генетических эффектов при хроническом техногенном облучении животных составляет 10 мкГр/сут, с 95% доверительным интервалом 3–12 мкГр/сут. Несмотря на то, что нижние границы проявления генетических эффектов хронического облучения для беспозвоночных и позвоночных животных различаются несущественно, анализ всего массива данных показывает различие в их радиочувствительности. Мощность дозы облучения 10 мкГр/сут не превышается при воздействии штатных сбросов и выбросов АЭС в зоне наблюдения. Превышение уровня 10 мкГр/сут возникает в ситуациях, требующих более детального расчета мощности дозы облучения биоты и анализа неопределенностей — на территориях, загрязненных в результате прошлых аварий или повышенных сбросов радионуклидов, в районах расположения хранилищ радиоактивных отходов и предприятий по добыче урана.

Ключевые слова: ионизирующая радиация, биота, хроническое облучение, генетические эффекты, непараметрическая статистика, пороговый уровень, критерий

DOI: 10.7868/S3034590125060024

ВВЕДЕНИЕ

Методология радиационной защиты природной биоты была разработана в рамках международных программ на основе анализа радиобиологических данных об эффектах хронического облучения для природных организмов. В публикациях Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) сформулирована концепция радиационной защиты биоты на основе определения пороговых уровней хронического облучения, при превышении которых появляются детерминированные негативные эффекты, в том числе ухудшение здоровья и репродуктивной функции, а также снижение продолжительности жизни [1, 2]. Следует отметить, что концепция радиационной безопасности биоты, сформулированная МКРЗ, ориентирована на ситуации хронического облучения биоты в районах расположения предприятий ядерной

отрасли, на радиоактивно загрязненных территориях и др.

В публикациях МКРЗ приведены эмпирические установленные диапазоны мощностей доз хронического облучения, соответствующие возможности появления детерминированных радиационных эффектов для разных групп организмов. В качестве нижних границ референтных диапазонов мощности дозы хронического жизненного облучения животных указаны следующие величины: 1 мГр/сут для позвоночных животных, 10 мГр/сут — для беспозвоночных [2].

В нашей предыдущей работе методами непараметрической статистики был выполнен анализ базы данных по радиационным эффектам хронического облучения животных [3]. Показано, что при хроническом облучении (гамма- и бета-излучение), нижний пороговый уровень

ухудшения здоровья организмов составляет 0.8 (0.2–1) мГр/сут; снижения репродуктивной функции — 0.6 (0.4–1.5) мГр/сут; сокращения продолжительности жизни — 3 (1–6) мГр/сут [3]. С учетом диапазонов неопределенности данный результат не противоречит значениям, приведенным в публикации МКРЗ [2].

Указанные уровни соответствуют граничной мощности дозы хронического облучения, превышение которой влияет на радиационную безопасность биоты в природных условиях. Нерешенным остается вопрос: каковы уровни хронического облучения природной фауны, не превышение которых гарантирует не только отсутствие детерминированных радиационных эффектов, но и отсутствие значимого повышения выявления генетических эффектов?

В публикации [4] в качестве скринингового уровня для биоты предложено значение мощности дозы 10 мкГр/час (0,24 мГр/сут). Это значение фактически соответствует нижнему порогу появления детерминированных эффектов на заболеваемость у позвоночных животных с коротким жизненным циклом и выше порога заболеваемости у долгоживущих позвоночных животных. Поэтому использование данного значения в качестве скринингового не обосновано.

В настоящей статье выполнен анализ базы данных генетических эффектов хронического облучения животных с целью определения нижнего порога мощности дозы, при превышении которого выявляются генетические повреждения. Для статистического анализа использовались те же методы непараметрической статистики, как и в наших предыдущих публикациях, посвященных определению нижних порогов детерминированных радиационных эффектов в природной биоте. Таким образом, выполнено уточнение шкалы “мощность дозы–эффект” в области дозовых нагрузок, характерных для появления генетических повреждений. При этом записи, содержащие сведения о детерминированных эффектах на здоровье, репродукцию и продолжительность жизни, в данном случае в анализ не включались.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В последние десятилетия генетическим исследованиям биоты на радиоактивно загрязненных территориях уделяется большое внимание [5]. Исследования показали, что воздействие ионизирующей радиации на живые организмы приводит к появлению характерных генетиче-

ских дефектов в виде микроядер, дицентриков, транслокаций, делеций, множественных аберраций [6]. Также наблюдаются повышенные уровни метилирования ДНК, геномная нестабильность, нарушения экспрессии отдельных генов и другие проявления генетических нарушений.

С целью количественного определения нижнего порога возникновения генетических повреждений, статистически значимо превышающих естественный фон, нами была подготовлена представительная выборка данных из опубликованных источников, содержащая информацию о генетических повреждениях у животных при хроническом облучении в зависимости от мощности дозы. В выборку включали только результаты исследований, показавших статистически значимое превышение уровня генетических нарушений над контрольными значениями (в условиях естественного радиационного фона).

Выборка данных содержит 113 записей. При ее формировании были учтены несколько критериев. Использовались только те публикации, в которых наряду с описанием генетических эффектов были приведены сведения о дозовых нагрузках на организмы или характеристики загрязнения, позволяющие реконструировать мощность дозы хронического облучения. При необходимости реконструкция мощности дозы выполнялась с помощью калькулятора BiotaDC v.1.5.1 (<http://biotadc.icgr.org>), который является приложением к публикации МКРЗ 136 [7]. В каждой записи табл. 1, 2 представлена суммарная мощность дозы облучения (внутреннее и внешнее облучение). Отдельные случаи только внешнего облучения отмечены в таблицах. Облучение животных предполагалось хроническим, пожизненным, с фиксированной мощностью дозы. Накопленная доза может быть определена как произведение мощности дозы на продолжительность жизни организма.

Рассматривались преимущественно данные исследований природных популяций животных разных видов. Учитывались только результаты исследований, показавших статистически значимое превышение уровня генетических нарушений над контрольными значениями. Не включались данные об эффектах внутреннего облучения альфа-излучающими радионуклидами, что является темой отдельного исследования. Использовались преимущественно результаты исследований с продолжительным облучением организмов, при которых можно было ожидать установление равновесия между образованием и reparацией генетических нарушений.

Таблица 1. Ранжированный ряд данных по генетическим эффектам хронического облучения позвоночных животных, статистически значимо превышающих контрольные значения

Table 1. Ranked data on genetic effects of chronic exposure for vertebrate animals, reliably exceeding the control values for background exposure

Ранг в общей выборке	Мощность дозы, мГр/сут	Организм	Место и время исследования	Описание эффекта и ссылка на источник данных
1	0.0024	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Березинский заповедник, Беларусь, 1996 г.	Повышенная частота хромосомных, хроматидных аберраций в клетках костного мозга мышей [8]
3	0.004	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Березинский заповедник, Беларусь, 1991 г.	Повышенная частота хромосомных, хроматидных аберраций в клетках костного мозга мышей [8]
4	0.007	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Гомельская обл. (д. Майск), Беларусь, 1996 г.	Повышенная частота хромосомных, хроматидных аберраций в костном мозге мышей [8]
5	0.008	Серебряный карась (<i>Carassius auratus gibelio</i>)	Озеро Лядо. Полесский заповедник. Беларусь, 2018 г.	Повышенная частота микроядер в эритроцитах крови [13]
7	0.01	Лошадь (<i>Equus caballus</i>)	Чернобыль, пожарная часть. Внешнее облучение.	В периферической крови повышенная частота клеток с микроядрами и двухядерных клеток [11]
8	0.01	Большая японская полевая мышь (<i>Apodemus speciosus</i>)	Префектура Фукусима, 2012–2014 гг.	Повышенный уровень хромосомных аберраций в лимфоцитах (транслокации, дицентрики) [12]
9	0.01	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Полесский заповедник, д. Савичи, Беларусь, 1993 г.	Повышенная частота хромосомных аберраций в клетках костного мозга мышей [14]
12	0.012	Шука (<i>Esox lucius</i>)	Озеро Лядо, Полесский заповедник. Беларусь, 2018 г.	Повышенная частота микроядер в эритроцитах крови [13]
13	0.014	Серебряный карась (<i>Carassius auratus gibelio</i>)	Река Несвич, Полесский заповедник. Беларусь, 2018 г.	Повышенная частота микроядер в эритроцитах крови [13]
14	0.017	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Гомельская обл. (д. Майск), Беларусь, 1991 г.	Повышенная частота аберраций в костном мозге мышей [8]
15	0.02	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, участок 1. 1988 г.	В клетках костного мозга мышей повышенная частота структурных аберраций хромосом [16]
16	0.02	Кабан (<i>Sus scrofa</i>)	Киевская обл., Иванковский район, Украина	В периферической крови повышенная частота клеток с микроядрами и двухядерных клеток [11]
17	0.02	Крупный рогатый скот	Киевская обл., Иванковский район, Украина	В периферической крови повышенная частота клеток с микроядрами и двухядерных клеток [11]
18	0.027	Шука (<i>Esox lucius</i>)	Река Несвич, Полесский заповедник. Беларусь, 2018 г.	Повышенная частота микроядер в эритроцитах крови [13]
19	0.03	Полевая мышь (<i>Apodemus agrarius</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 2007 г. (участок 2-Изумрудное).	В клетках костного мозга мышей повышенная частота микроядер [16,11]
20	0.04	Лабораторная мышь	Хроническое облучение от трития	Генотоксические эффекты в лимфоцитах крови, хромосомные аберрации [17]
21	0.042	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Гомельская обл. (д. Бабчин), Беларусь, 1996 г.	Повышенная частота хромосомных, хроматидных аберраций в клетках костного мозга мышей [8]
22	0.05	Шука (<i>Esox lucius</i>)	Река Несвич, Беларусь, 2018 г.	Повышенная частота микроядер в эритроцитах крови [13]
25	0,06	Травяная лягушка (<i>Rana temporaria</i>)	Могилевская обл. г. Чериков, Беларусь, 1987–1990 гг.	Повышенный уровень хромосомных аберраций в клетках костного мозга лягушек [19–21]

Таблица 1. Продолжение**Table 1.** Continuation of the table

Ранг в общей выборке	Мощность дозы, мГр/сут	Организм	Место и время исследования	Описание эффекта и ссылка на источник данных
26	0.06	Японская древесная лягушка (<i>Dryaphytes japonica</i>)	Префектура Фукусима, 2013 г. Участок R1.	Повышение глобального уровня метилирования ДНК, повреждение митохондриальной ДНК [22]
27	0.07	Ласточка (<i>Hirundo rustica</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 2005–2007 г.	Повреждения ДНК [23]
29	0.07	Ласточка (<i>Hirundo rustica</i>)	Префектура Фукусима, зона отселения, 2012	Повышенный уровень мутаций [25]
30	0.07	Японская голубая бабочка (<i>Zizeeria maha</i>)	Территория, загрязненная после аварии на АЭС “Фукусима-1”	Геномная нестабильность, морфологические аномалии, передающиеся по наследству [26, 27]
31	0.076	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Гомельская обл. (д. Майск), Беларусь, 1988 г.	Повышенная частота хромосомных aberrаций, в костном мозге мышей [8]
32	0.076	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, участки 5, 6. 1988 г.	Повышенный уровень aberrаций в клетках костного мозга и роговицы глаза мышей [18]
33	0.08	Острый полоз (<i>Elaphe climacophora</i>)	Префектура Фукусима	Повреждения ДНК [28]
34	0.1	Японская древесная лягушка (<i>Dryaphytes japonica</i>)	Территория, загрязненная после аварии на АЭС “Фукусима”, 2013 г. Участки R1, R2	Повышение глобального уровня метилирования ДНК, повреждения митохондриальной ДНК [22]
35	0.1	Желтогорлая мышь (<i>Apodemus flavicollis</i>)	Полесский заповедник, Красноселье, Беларусь. 2008 г.	Повышенная частота микроядер в клетках костного мозга [11]
36	0.1	Желтогорлая мышь (<i>Apodemus flavicollis</i>)	Полесский заповедник, Масаны, Беларусь. 2008 г.	Повышенная частота микроядер в клетках костного мозга [11]
37	0.1	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Полесский заповедник, Масаны, Беларусь. 2008 г.	Повышенная частота микроядер в клетках костного мозга [11]
38	0.1	Мышевидные грызуны	Республика Коми. Природная популяция.	Уровни хромосомных aberrаций в клетках костного мозга более чем в 10 раз превышали контрольные значения [29, 30]
39	0.1	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Гомельская обл., Беларусь (д. Бабчин), 1991 г.	Повышенная частота хромосомных aberrаций в костном мозге мышей [8]
40	0.11	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, участок 6. 1987 г.	Повышенный уровень aberrаций (хромосомных, хроматидных) в клетках костного мозга и роговицы глаза мышей [18]
41	0.12	Остромордая лягушка (<i>Rana arvalis</i>)	Могилевская обл. г. Чериков, Беларусь, 1987–1990 гг.	Повышенный уровень хромосомных aberrаций в клетках костного мозга лягушек, множественные aberrации [19–21]
45	0.18	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1987 г. Участок 1.	В клетках костного мозга мышей повышенная частота структурных aberrаций хромосом [16]
46	0.18	Желтогорлая мышь (<i>Apodemus flavicollis</i>)	Полесский заповедник, Кулажин, Беларусь. 2008 г.	Повышенная частота микроядер в клетках костного мозга [11]
47	0.18	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Полесский заповедник, Кулажин, Беларусь. 2008 г.	Повышенная частота микроядер в клетках костного мозга [11]
48	0.2	Кабан (<i>Sus scrofa</i>)	Префектура Фукусима, зона отселения, 2016–2018 гг.	Генетические повреждения, фрагменты ДНК, дицентрики, микросателлиты [33]
49	0.2	Крупный рогатый скот	Префектура Фукусима Япония, зона отселения	Генетические повреждения ДНК [34]

Таблица 1. Продолжение**Table 1.** Continuation of the table

Ранг в общей выборке	Мощность дозы, мГр/сут	Организм	Место и время исследования	Описание эффекта и ссылка на источник данных
51	0.23	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Республика Коми. Природная популяция	Повышенная частота клеток щитовидной железы с микроядрами. У потомков облученных родителей количество 2-нитевых разрывов ДНК в клетках щитовидной железы в 1.7 раз выше контроля [35]
52	0.23	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Полесский заповедник, Ломачи, Беларусь, 1991 г.	Повышенная частота хромосомных аберраций в клетках костного мозга [14]
53	0.24	Полевая мышь (<i>Apodemus agrarius</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 2007 г. (участок 4)	В клетках костного мозга мышей повышенная частота микроядер [16]
55	0.25	Кабан (<i>Sus scrofa</i>)	Префектура Фукусима, зона отселения, 2016–2018 гг.	Изменения в экспрессии отдельных генов в клетках тонкого кишечника [34]
57	0.27	Остромордая лягушка (<i>Rana arvalis</i>)	Гомельская обл., Хойникский р-н, Ломачи, Беларусь, 1987–1990 гг.	Повышенный уровень хромосомных аберраций в клетках костного мозга лягушек, множественные аберрации [19–21]
58	0.29	Остромордая лягушка (<i>Rana arvalis</i>)	Гомельская обл. Корминский р-н, д. Струмень, Беларусь, 1987–1990 гг.	Повышенный уровень хромосомных аберраций в клетках костного мозга лягушек, множественные аберрации [19–21]
59	0.3	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Полесский заповедник, д. Савичи, Беларусь, 1990 г.	Повышенная частота хромосомных аберраций в клетках костного мозга [14]
60	0.3	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Республика Коми. Природная популяция.	Повышенная частота микроядер в клетках костного мозга (в 1.8 раз выше контроля) [29]
61	0.32	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Гомельская обл. (д. Бабчин), Беларусь, 1988 г.	Повышенная частота хромосомных и хроматидных аберраций в костном мозге мышей [8]
62	0.36	Травяная лягушка (<i>Rana temporaria</i>)	Могилевская обл. г. Чериков, Беларусь, 1986 г.	Повышенная частота хромосомных аберраций в клетках костного мозга [19–21]
63	0.4	Речной окунь (<i>Perca fluviatilis</i>)	Чернобыльская 10-км зона. Яновский затон, 1988–2014 гг.	Высокий уровень аберраций в клетках красной крови рыб (двойные ядра, без ядер, микроядра, вакуолизация ядер). Частота клеток с аберрациями в 3–5 раз выше контроля (0.4%) [36, 37]
64	0.4	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Полесский заповедник, Ломачи, Беларусь, 1990 г.	Повышенная частота хромосомных аберраций в клетках костного мозга мышей [14]
65	0.42	Полевая мышь (<i>Apodemus agrarius</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 2007 г. Участок 3-Копачи.	В клетках костного мозга мышей повышенная частота микроядер [11, 16]
66	0.5	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1988 г. Участок 2.	В клетках костного мозга мышей повышенная частота структурных аберраций хромосом [16]
67	0.5	Рыжая полевка (<i>Clethrionomys glareolus</i>)	Полесский заповедник, д. Савичи, Беларусь, 1990 г.	Повышенная частота хромосомных аберраций в клетках костного мозга мышей [14]
68	0.5	Рыба. Канальный сом (<i>Ictalurus punctatus</i>)	Водоем-охладитель Чернобыльской АЭС, 1993 г.	Повышенный уровень двойных разрывов ДНК, микроядер в клетках крови рыб [38, 39]
69	0.5	Рыба. Канальный сом (<i>Ictalurus punctatus</i>)	Водоем-охладитель Чернобыльской АЭС, 1990-е гг.	Аномальные ДНК-гистограммы при анализе клеток крови [39, 40]

Таблица 1. Продолжение**Table 1.** Continuation of the table

Ранг в общей выборке	Мощность дозы, мГр/сут	Организм	Место и время исследования	Описание эффекта и ссылка на источник данных
70	0.5	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, участок 4. 1988 г.	Повышенный уровень аберраций (хромосомных, хроматидных) в клетках костного мозга и роговицы глаза мышей [18]
71	0.5	Серебряный карась (<i>Carassius auratus gibelio</i>)	Озеро Бердениш на территории ВУРС	Повышенная средняя скорость мутагенеза (0.01–0.001 на локус на поколение), контроль 0.00001 [41, 42]
72	0.55	Полевая мышь (<i>Apodemus agrarius</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 2007 г. Участок За-Шепеличи	В клетках костного мозга мышей повышенная частота микроядер [11, 16]
73	0.56	Остромордая лягушка (<i>Rana arvalis</i>)	Гомельская обл., Беларусь, 1987–1990 гг.	Повышенный уровень хромосомных аберраций в клетках костного мозга лягушек [19, 20]
74	0.6	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1986 г. Участок 1.	В клетках костного мозга мышей повышенены частоты структурных аберраций хромосом [16]
75	0.6	Крысы линии Вистар	Республика Коми. Участок с повышенным облучением	Частота тироцитов с микроядрами в тканях щитовидной железы в 2.6 раз выше контроля [35]
76	0.8	Лабораторные мыши	Хроническое внутреннее облучение от трития	Генотоксические эффекты в лимфоцитах крови, повышение хромосомных аберраций в 2–3 раза [17]
78	1.0	Японская полевая мышь (<i>Apodemus argenteus</i>)	Префектура Фукусима, 2012 г.	Повышенный уровень хромосомных аберраций [43, 44]
81	1.2	Обыкновенная полевка (<i>Microtus arvalis</i>)	Восточно-Уральский заповедник, головная часть ВУРС, 2002 г.	Уровни хромосомных аберраций в клетках костного мозга значительно выше, чем в контрольных популяциях [45]
84	1.8	Полевка (<i>Myodes glareolus</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2011 г. Вблизи оз. Глубокое	Повышение генетических вариаций, увеличение количества гаплотипов и полиморфных локусов, изменения в геноме митохондрий [46]
87	3.0	Японская полевая мышь (<i>Apodemus argenteus</i>)	Префектура Фукусима, 2012 г.	Повышенный уровень хромосомных аберраций [43, 44]
89	3.67	Большая японская полевая мышь (<i>Apodemus speciosus</i>)	Префектура Фукусима, 2012–2014 гг.	Повышенный уровень хромосомных аберраций в лимфоцитах (транслокации, дицентрики) [12]
90	4.4	Речной окунь (<i>Perca fluviatilis</i>)	Чернобыльская 10-км зона. Озеро Глубокое, 1998–2014 гг.	Высокий уровень аберраций в клетках красной крови рыб (двойные ядра, без ядер, микроядра, вакуолизация ядер). Частота клеток с аберрациями в 7–15 раз выше контроля [36, 37]
91	6.5	Серебряный карась (<i>Carassius auratus gibelio</i>)	Чернобыльская 10-км зона. Озеро Глубокое, 1998–2014 гг.	Высокий уровень аберраций в клетках красной крови рыб (двойные ядра, без ядер, микроядра, вакуолизация ядер). Частота клеток с аберрациями в 4–16 раз выше контроля [36, 37]
92	6.67	Полевка (<i>Myodes glareolus</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2011 г. Рыжий лес	Повышение генетических вариаций, увеличение количества гаплотипов и полиморфных локусов, изменения в геноме митохондрий [46]
93	6.7	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, участок 4. 1987 г.	Повышенный уровень аберраций (хромосомных, хроматидных) в клетках костного мозга и роговицы глаза мышей [18]
96	7.5	Серебряный карась (<i>Carassius auratus gibelio</i>)	Чернобыльская 10-км зона, озеро Азбучин, 1998–2014 гг.	Высокий уровень аберраций в клетках красной крови рыб (двойные ядра, без ядер, микроядра, вакуолизация ядер). Частота клеток с аберрациями в 3–4 раз выше контроля [36, 37]

Таблица 1. Окончание**Table 1. End**

Ранг в общей выборке	Мощность дозы, мГр/сут	Организм	Место и время исследования	Описание эффекта и ссылка на источник данных
97	9.1	Крысы линии Вистар	Республика Коми. Участок с повышенным уровнем облучения.	Частота тироцитов с микроядрами в тканях щитовидной железы в 3 раза выше контроля [35]
98	9.9	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1987 г. участок 2.	В клетках костного мозга мышей значительное повышение частоты структурных аберраций хромосом [16]
101	12	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1991 г. Янов. Эксперимент. Содержание при различной экспозиционной дозе	В клетках костного мозга мышей повышенная частота структурных аберраций хромосом и микроядер [11, 16]
103	14.4	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, Янов. 1991 г. Эксперимент. Содержание при различной экспозиционной дозе	В клетках костного мозга мышей повышенная частота микроядер [11, 16]
105	16.8	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1991 г. Янов. Эксперимент. Содержание при различной экспозиционной дозе	В клетках костного мозга мышей повышенная частота структурных аберраций хромосом, микроядер и полиплоидных клеток [11, 16]
108	36	Полевка-экономка (<i>Microtus oeconomus</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1991 г. Эксперимент. Содержание при различной экспозиционной дозе	В клетках костного мозга мышей повышенная частота структурных аберраций хромосом и микроядер [11, 16]
111	51	Обыкновенная полевка (<i>Microtus arvalis</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1986 г.	В клетках костного мозга мышей значительное (в 3–5 раз) повышение частоты структурных аберраций хромосом: дицентрики, кольца, множественные аберрации [16]

Таблица 2. Ранжированный ряд данных по генетическим эффектам хронического облучения беспозвоночных животных, статистически значимо превышающих контрольные значения**Table 2. Ranked data on genetic effects of chronic exposure for invertebrate animals, reliably exceeding the control values for background exposure**

Ранг в общей выборке	Мощность дозы, мГр/сут	Организм	Место и время исследования	Описание эффекта и ссылка на источник данных
2	0.003	Водяной ракок-бокоплав (<i>Gammarus</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 1991–1995 гг.	Хромосомные аберрации, двукратное увеличение числа фрагментов ДНК [9]
6	0.01	Земляной червь (<i>Octolasion lacteum</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2014–2015 гг.	Повышенный уровень метилирования отдельных участков ДНК [10]
10	0.01	Малошетинковые черви (<i>Stylaria</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 1991–1995 гг.	Хромосомные аберрации, двукратное увеличение числа фрагментов ДНК [9]
11	0.01	Головастики лягушки (<i>Rana arvalis</i>)	Республика Коми. Повышенный уровень облучения.	Повышенная частота разрывов ДНК в клетках крови головастиков лягушки. Высокая вариабельность цитогенетических показателей крови [15]
23	0.05	Малошетинковые черви (<i>Stylaria</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 1991–1995 гг.	Хромосомные аберрации, двукратное увеличение числа фрагментов ДНК [9]

Таблица 2. Продолжение**Table 2.** Continuation of the table

Ранг в общей выборке	Мощность дозы, мГр/сут	Организм	Место и время исследования	Описание эффекта и ссылка на источник данных
24	0.05	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Киевская обл., август 1986 г.	Повышенная частота доминантных и рецессивных леталей, связанных с полом [18]
28	0.07	Земляной червь (<i>Octolasion lacteum</i>)	Префектура Фукусима, зона отселения, 2012	Повышенный уровень повреждений ДНК в видах червей из загрязненной зоны [24]
42	0.13	Кузнечик (<i>Chorthippus albomarginatus</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2010 г.	Повышенные уровни повреждений ДНК и флюктуирующей асимметрии в потомстве кузнецов из природных популяций, выращенных в лабораторных условиях [31]
43	0.16	Земляной червь (<i>Octolasion lacteum</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2014–2015 гг.	Повышенный уровень метилирования отдельных участков ДНК [10]
44	0.17	Водяной ракочий дафния (<i>Daphnia magna</i>)	Хроническое облучение нескольких поколений	Изменения в ДНК, передающиеся по наследству следующим поколениям [32]
50	0.22	Земляной червь (<i>Octolasion lacteum</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2014–2015 гг.	Повышенный уровень метилирования отдельных участков ДНК [10]
54	0.24	Малоштакиновые черви (<i>Stylaria sp.</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 1991–1995 гг.	Хромосомные аберрации, двукратное увеличение числа фрагментов ДНК [9]
56	0.26	Кузнечик (<i>Chorthippus albomarginatus</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2010 г.	Повышенные уровни повреждений ДНК и флюктуирующей асимметрии в потомстве кузнецов из природных популяций, выращенных в лабораторных условиях [31]
77	0.85	Кузнечик (<i>Chorthippus albomarginatus</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2010-е гг.	Повышенные уровни повреждений ДНК и флюктуирующей асимметрии в потомстве от природных популяций, выращенном в лабораторных условиях [31]
79	1.0	Земляной червь (<i>Octolasion lacteum</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2014–2015 гг.	Повышенный уровень метилирования отдельных участков ДНК [10]
80	1.2	Кузнечик (<i>Chorthippus albomarginatus</i>)	Чернобыльская 10-км зона, 2010-е гг.	Повышенные уровни повреждений ДНК и флюктуирующей асимметрии в потомстве от природных популяций, выращенном в лабораторных условиях [31]
82	1.4	Моллюск прудовик (<i>Lymnaea stagnalis</i>)	Чернобыльская 10-км зона, озеро Далёкое	Повышенный уровень хромосомных аберраций в эмбриональных тканях моллюска: 18% клеток с аберрациями, в контроле менее 2% [36]
83	1.44	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Киевская обл., август 1986 г.	Повышенная частота доминантных и рецессивных леталей, связанных с полом [18]
85	1.9	Моллюск прудовик (<i>Lymnaea stagnalis</i>)	Чернобыльская 10-км зона, озеро Азбучин	Повышенный уровень хромосомных аберраций в эмбриональных тканях моллюска: 19% клеток с аберрациями, в контроле менее 2% [36]
86	2.3	Моллюск прудовик (<i>Lymnaea stagnalis</i>)	Чернобыльская 10-км зона, Яновский затон	Повышенный уровень хромосомных аберраций в эмбриональных тканях моллюска: 15% клеток с аберрациями, в контроле менее 2% [36]
88	3.6	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Киевская область, август 1986 г.	Повышенная частота доминантных и рецессивных леталей связанных с полом [18]
94	7.5	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Хроническое облучение в течение 30-ти поколений мушек	Повышенные частоты рецессивных летальных мутаций сцепленных с полом у самцов (более чем в 2 раза выше контроля) [47]
95	7.5	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Личинки 27–31-го поколений облученных мушек	Повышение уровня 2-нитевых разрывов ДНК в нейробластах личинок (более чем в 2 раза выше контроля) [47]

Таблица 1. Окончание

Table 1. End

Ранг в общей выборке	Мощность дозы, мГр/сут	Организм	Место и время исследования	Описание эффекта и ссылка на источник данных
99	10	Моллюск прудовик (<i>Lymnaea stagnalis</i>)	Чернобыльская 10-км зона, озеро Глубокое, 1998–2014 гг.	Повышенный уровень хромосомных аберраций в эмбриональных тканях моллюска: 22% клеток с аберрациями, в контроле менее 2% [36]
100	10.8	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Киевская область, август 1986 г.	Повышенная частота доминантных и рецессивных леталей связанных с полом [18]
102	12	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1987 г.	Повышенный уровень рецессивных летальных мутаций [18]
104	15.6	Водяной ракоч дафния (<i>Daphnia magna</i>)	Хроническое облучение	Изменения в ДНК, передающиеся по наследству следующим поколениям [32]
106	19.2	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Киевская область, август 1986 г.	Повышенная частота доминантных и рецессивных леталей, связанных с полом [18]
107	24	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Киевская область, август 1986 г.	Повышенная частота доминантных и рецессивных леталей, связанных с полом [18]
109	38.4	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Киевская область, август 1986 г.	Повышенная частота доминантных и рецессивных леталей связанных с полом [18]
110	48	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Чернобыльская 30-км зона, 1987 г.	Повышенный уровень рецессивных летальных мутаций [18]
112	61.2	Плодовая мушка (<i>Drosophila melanogaster</i>)	Киевская область, август 1986 г.	Повышенная частота доминантных и рецессивных леталей, связанных с полом [18]
113	113	Водяной ракоч дафния (<i>Daphnia magna</i>)	Хроническое облучение в течение нескольких поколений.	Изменения в ДНК, передающиеся по наследству следующим поколениям [32]

Основой выборки явились исследования природных популяций на радиоактивно загрязненных территориях. При составлении выборки использовались современные данные по генетическим эффектам у животных, обитающих в районах, пострадавших в результате радиационной аварии на АЭС “Фукусима-1”, результаты многолетних исследований фауны на территориях с радиоактивным загрязнением после аварии на Чернобыльской АЭС, результаты исследований на Южном Урале на территориях Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) и др.

Выборка данных оформлена в виде записей, представленных в таблицах 1 (позвоночные) и 2 (бес позвоночные). Каждая запись включает название организма, мощность дозы (мГр/сут), место и период проведения исследований, обнаруженные генетические повреждения, статистически значимо превышающие контроль, и ссылку на источник данных. Записи отранжированы по критерию возрастания мощности дозы, номера рангов указаны в левом столбце табл. 1 и 2. Таким образом, получен ряд упорядоченных возрастающих мощностей дозы x_1, x_2, \dots, x_N , этим упорядоченным значениям присвоены ранги от 1 до N , где N – общее число записей в ряде данных.

Распределение рангов является непрерывным и однородным с бета-распределением позиции случайно выбранного значения данных [48]. Распределение k -го ранга в наборе из N ранжированных значений следует бета-распределению с параметрами $(k, N+1-k)$. Совокупная плотность вероятности для бета-распределения (α, k, N) определяется для различных значений параметров. Детальное описание метода, исходно разработанного для анализа экотоксикологических данных, представлено в работе [48].

При непараметрическом статистическом анализе данных определяли наименьшую мощность дозы D_5 , ниже которой только в 5% записей содержится информация о наличии статистически значимого эффекта, а в остальных 95% записей содержится информация о наличии эффекта при мощностях дозы выше пороговой величины.

В упорядоченном наборе данных длиной N искомая величина ранга записи для D_5 определяется как $Y = 0.05 \cdot (N + 1)$, если полученное число оказывается не целым, то в качестве ранга k выбирается ближайшее целое число ниже Y . Консервативная оценка D_5 соответствует величине мощности дозы x_k , соответствующей

записи с рангом k . Двусторонний 95%-ный доверительный интервал для D_5 вычисляется с помощью совокупной плотности вероятности для бета-распределения (α, k, N) для $\alpha = 0.05$ и $\alpha = 0.95$. Таблица с рассчитанными рангами k для различного размера наборов данных ($N \leq 200$) и разными α приведена в публикации [48]. В ряде данных размером $N = 113$ границы 95%-ного доверительного интервала соответствуют рангу $k_1 = 2$ для нижней границы и рангу $k_2 = 12$ для верхней границы [48].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка нижней границы D_5 значимого увеличения генетических эффектов у животных при хроническом облучении и доверительного интервала, полученного с помощью непараметрической статистики, представлены в таблице 3. При анализе всего массива данных величина D_5 равна 10 мкГр/сут, 95%-й доверительный интервал составляет 3–12 мкГр/сут.

Величина D_5 для беспозвоночных животных (33 записи в выборке) равна 10 мкГр/сут, для позвоночных животных (80 записей в выборке) — 7 мкГр/сут. Несмотря на то, что нижние границы проявления генетических эффектов хронического облучения для беспозвоночных и позвоночных животных различаются несущественно, анализ всего массива данных показывает различие в их радиочувствительности. На рис. 1 представлены кумулятивные распределения генетических эффектов в зависимости от мощности дозы хронического облучения для беспозвоночных и позвоночных животных. Кривая эффектов для беспозвоночных животных заметно сдвинута в сторону более высоких мощностей дозы, что показывает их большую устойчивость к исследованному типу эффектов хронического облучения.

Для оценки возможности использования величины D_5 в качестве скринингового уровня техногенного воздействия на природных животных выполнено сравнение с литературными данными о хроническом облучении животных в разных условиях. Природный радиационный фон для млекопитающих составляет 2.7–5.5 мкГр/сут [49]. Величина D_5 дополнительного хронического техногенного облучения примерно в 2–4 раза выше природного радиационного фона для млекопитающих.

Мощность дозы облучения природных животных от штатных выбросов Ленинградской АЭС оценена в диапазоне 0.08–0.4 мкГр/сут, от штат-

Таблица 3. Статистическая оценка нижней границы мощности дозы, при которой наблюдалось значимое увеличение генетических эффектов у животных (хроническое пожизненное облучение)

Table 3. Statistical estimate of the lower dose rate threshold for appearance of elevated frequency of genetic effects in animals (chronic lifetime exposure)

Организмы	D_5 , мкГр/сут	95%-й доверительный интервал, мкГр/сут
Животные (весь ряд данных)	10	3–12

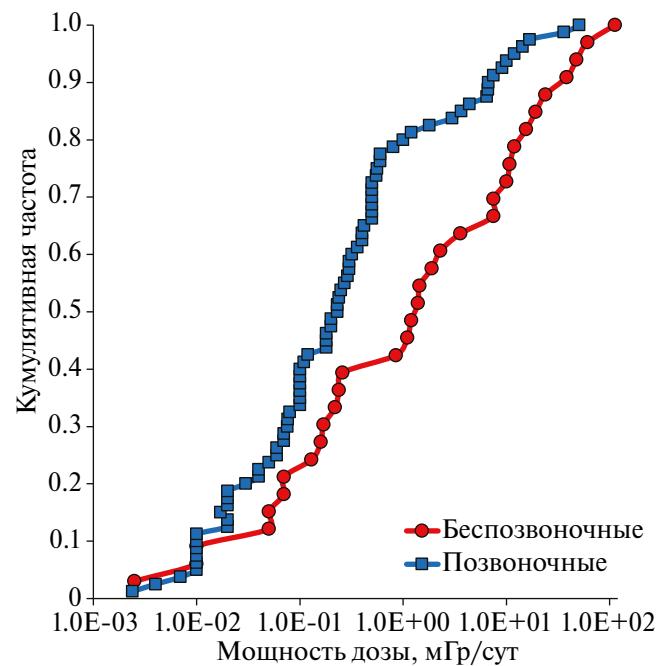


Рис. 1. Кумулятивная частота распределения мощности дозы хронического облучения, при которой были обнаружены повышенные уровни генетических эффектов у беспозвоночных и позвоночных животных.

Fig. 1. Cumulative frequency distribution of chronic dose rate at which elevated frequencies of genetic effects were detected in invertebrate and vertebrate animals.

ных сбросов Ленинградской АЭС — в диапазоне 0.006–0.5 мкГр/сут [50]. Мощность дозы облучения наземных животных в зоне наблюдения Нововоронежской АЭС находится в диапазоне 0.4–5 мкГр/сут, водных животных в реке Дон в районе сбросов Нововоронежской АЭС — 0.04–0.2 мкГр/сут [50]. Расчетная мощность дозы облучения наземных животных от существующих и планируемых выбросов Белоярской АЭС (реакторы БН-600 и БН-800) и Института реакторных материалов (ИРМ — исследовательский реактор) находится в диапазоне 0.2–

0.4 мкГр/сут [51]. Современные уровни техногенного облучения наземной биоты в районе расположения Горно-химического комбината (ГХК) составляют 0.1–0.6 мкГр/сут, водной биоты реки Енисей ниже по течению от сбросов ГХК – 0.1–3 мкГр/сут [50]. Все эти значения существенно ниже величины $D_5 = 10$ мкГр/сут, нижнего порога появления генетических эффектов при хроническом облучении.

С другой стороны, мощность дозы хронического облучения наземных животных, обитающих в Новозыбковском районе Брянской области, загрязненном в результате аварии на Чернобыльской АЭС, составляет 33–135 мкГр/сут [52]. Уровни хронического облучения рыб в слабопроточных озерах Святского и Ревучее Гомельской области (Беларусь) составляют 17–89 мкГр/сут [53]. Мощность дозы хронического облучения природных обитателей Ольховского болота, находящегося на территории санитарно-защитной зоны Белоярской АЭС, оценивается в диапазоне 15–25 мкГр/сут [54]. Хроническое облучение наземных млекопитающих, обитающих в районе предприятия по добыче урана (Приаргунское горно-химическое объединение), составляет 13–46 мкГр/сут [50]. Мощность дозы облучения наземных моллюсков в районе расположения хранилища радиоактивных отходов, оценена в диапазоне 0.9–200 мкГр/сут [55]. В перечисленных ситуациях мощности дозы облучения животных выше уровня $D_5 = 10$ мкГр/сут (нижний порог статистически значимого увеличения генетических эффектов при хроническом облучении), но ниже нижних границ мощности дозы, при которых возможно появление детерминированных негативных радиобиологических эффектов у животных.

Таким образом, превышение уровня 10 мкГр/сут возникает в радиоэкологических ситуациях, требующих более детального расчета мощности дозы облучения биоты и анализа неопределенностей. Примером таких ситуаций являются территории, загрязненные в результате прошлых аварий или повышенных сбросов радионуклидов, районы расположения хранилищ радиоактивных отходов и предприятий по добыче урана. Анализ значимости радиационного воздействия для таких территорий можно проводить с использованием обобщенного показателя радиоэкологической безопасности, учитывающего пространственный масштаб, продолжительность и интенсивность радиационного воздействия [56].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ базы данных эффектов хронического облучения животных методом непараметрической статистики позволил определить нижний порог мощности дозы, при превышении которого наблюдаются генетические повреждения у животных в природных условиях. Величина нижнего порога появления значимых генетических эффектов при хроническом облучении составляет 10 мкГр/сут, с 95%-ным доверительным интервалом 3–12 мкГр/сут. Кривая эффектов для беспозвоночных животных заметно сдвинута в сторону более высоких мощностей дозы, что показывает их большую устойчивость к исследуемому типу эффектов хронического облучения. Уровень облучения природной фауны 10 мкГр/сут не превышается при воздействии штатных выбросов и сбросов АЭС, но может быть превышен на территориях, загрязненных в результате прошлых радиационных аварий, в районах расположения предприятий по добыче урана и хранилищ радиоактивных отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. Ann. ICRP 38(4–6), 2009. 251 p.
- ICRP Publication 124. Protection of the environment under different exposure situations. Ann. ICRP 43(1), 2014. 59 p.
- Sazykina T.G., Kryshev A.I., Sanina K.D. Non-parametric estimation of thresholds for radiation effects in vertebrate species under chronic low-LET exposures. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2009; 48(4):391–404.
- Andersson P., Garnier-Laplace J., Beresford N.A., et al. Protection of the environment from ionizing radiation in a regulatory context (protect): proposed numerical benchmark values. *J. Environ. Radioact.* 2009; 100:1100–1108.
- Гераськин С.А., Фесенко С.В., Волкова П.Ю., Исамов Н.Н. Что мы узнали о биологических эффектах облучения в ходе 35-летнего анализа последствий аварии на Чернобыльской АЭС? Радиационная биология. Радиоэкология. 2021; 60(3):234–260.
[Geraskin S.V., Fesenko S.V., Volkova P.Y., Isamov N.N. What have we learned about the biological effects of radiation during the 35-year analysis of the consequences of the Chernobyl NPP accident? *Radiatsionnaya biologiya. Radioecologiya*. 2021; 60(3): 234–260. (In Rus.)].
- Cytogenetic dosimetry: applications in preparedness for and response to radiation emergencies. IAEA, Vienna, 2011. 229 p.

7. ICRP Publication 136. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation. *Ann. ICRP.* 2017; 46(2):136 p.
8. Ryabokon N.I., Goncharova R.I. Transgenerational accumulation of radiation damage in small mammals chronically exposed to Chernobyl fallout. *Radiation and Environmental Biophysics.* 2006; 45(3):167–177.
9. Цыцугина В.Г., Поликарпов Г.Г. Изучение последствий аварии на Чернобыльской АЭС для гидробионтов (1986–1996 гг.). Радиационная биология. Радиоэкология. 1996; 36(4):460–467.
[Tsytsgina V.G., Polikarpov G.G. Izuchenie posledstviy avarii na Chernobylskoy AES dlya gidrobiontov (1986–1996 gg.). *Radiatsionnaya biologiya. Radioecologiya.* 1996; 36(4):460–467. (In Russ.)].
10. Newbold L.K., Robinson A., Rasnaca I., et al. Genetic, epigenetic and microbiome characterisation of an earthworm species (*Octolasion lacteum*) along a radiation exposure gradient at Chernobyl. *Environ. Pollution.* 2019; 255:113238.
11. Костенко С.А., Ермакова О.В., Сушко С.Н. и др. Цитогенетические показатели соматического мутагенеза млекопитающих в условиях хронического низкодозового облучения. Радиационная биология. Радиоэкология. 2015; 55(1):35–42.
[Kostenko S.A., Ermakova O.V., Sushko S.N., et al. Cytogenetic indices for somatic mutagenesis in mammals exposed to chronic low dose irradiation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioecologiya.* 2015; 55(1):35–42. (In Russ.)].
12. Kawagoshi T., Shiomi N., Takahashi H., et al. Chromosomal aberrations in large Japanese field mice (*Apodemus speciosus*) captured near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Environ. Sci. Technol.* 2017; 51(8):4632–4641.
13. Гулаков А.В., Дроздов Д.Н., Иванцов Д.Н. Цитогенетические и цитотоксические эффекты действия ионизирующего излучения на эритроциты крови рыб, обитающих в водоемах на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника./ Радиационная биология. Радиоэкология. 2021; 61(2):189–196.
[Gulakov A.V., Drozdov D.N., Ivantsov D.N. Analysis of cytogenetic and cytotoxic effects of radiation on red blood cells of fish inhabiting in reservoirs the territory of Polessky State Radiation-Ecological Reserve. *Radiatsionnaya biologiya. Radioecologiya.* 2021; 61(2):189–196. (In Russ.)].
14. Voitovich A.M., Afonin, V.Y., Krupnova E.V., et al. The level of aberrant cells in various tissues of bank vole depending on doses and radionuclide balance in organism. Цитология и генетика. 2003; 37(4):10–15. [*Tsytologiya i genetika.* 2003; 37(4):10–15].
15. Юшкова Е.А., Боднарь И.С., Зайнуллин В.Г. Цитогенетические эффекты в популяциях *Rana arvalis* в условиях радиоактивного загрязнения среды // Радиобиология: антропогенные излучения. Материалы международной научной конференции, Гомель, 25–26.09.2014. Минск: Институт радиологии, 2014. С. 218–221.
[Yushkova E.A., Bodnar I.S., Zainullin V.G. Tsitogeneticheskie effekty v populatsiyah *Rana arvalis* v usloviyah radioaktivnogo zagryazneniya sredy // Radiobiologiya: antropogennye izlucheniya. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Gomel, 25–26.09.2014. Minsk: Institut radiologii, 2014. P. 218–221. (In Russ.)].
16. Таскаев А.И., Башлыкова Л.А., Зайнуллин В.Г. Эколо-генетический мониторинг мышевидных грызунов из популяций, подвергшихся хроническому облучению. Радиационная биология. Радиоэкология. 2010; 50(5):560–571.
[Taskaev A.I., Bashlykova L.A., Zainullin V.G. Ecological and genetic monitoring of Muridae from populations undergone to the chronic irradiation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioecologiya.* 2010; 50(5): 560–571. (In Russ.)].
17. Roch-Lefevre S., Gregoire E., Martin-Bodiot C., et al. Cytogenetic damage analysis in mice chronically exposed to low-dose internal tritium beta-particle radiation. *Oncotarget.* 2018; 9(44):27397–27411.
18. Зайнуллин В.Г. Генетические эффекты хронического облучения в малых дозах ионизирующего излучения. Санкт-Петербург: Наука, 1998. 99 с.
[Zainullin V.G. Genetic effects of chronic exposure to low doses of ionizing radiation. Saint-Petersburg: Nauka, 1998. 99 p. (In Russ.)].
19. Елисеева К.Г., Войтович А.М., Плоская М.В., Смаль С.Э. Генетический мониторинг популяций бурых лягушек, обитающих в загрязненных радионуклидами районах республики Беларусь. Радиационная биология. Радиоэкология. 1994; 34(6):838–846.
[Eliseeva K.G., Voitovich A.M., Ploskaya M.V., Smal S.E. Geneticheskij monitoring populyatsiy burykh lyagushek, obitayushchikh v zagryaznennykh radionuklidami rayonakh respubliki Belarus. *Radiatsionnaya biologiya. Radioecologiya.* 1994; 34(6):838–846. (In Russ.)].
20. Войтович А.М. Опухоли костей у травяной лягушки (*Rana temporaria*) в условиях загрязнения среды обитания радионуклидами // Доклады Национальной академии наук Беларусь. 2001; 45(1): 91–94.
[Voitovich A.M. Opuholi kostey u travyanoy lyagushki (*Rana temporaria*) v usloviyah zagryazneniya sredy obitaniya radionuklidami. *Doklady Natsionalnoy akademii nauk Belarusi.* 2001; 45(1):91–94. (In Russ.)].
21. Voitovich A.M., Afonin V.Y. DNA damages and radionuclide accumulation in wild small vertebrates // Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic. Proceedings of the 5th International Conference, Saint-Petersburg, 16–20.06.2002. NRPA, Norway, 2002. P. 340–343.

22. Gombeau K., Bonzom J.-M., Cavalie I. et al. Dose dependent genomic DNA hypermethylation and mitochondrial DNA damage in Japanese tree frogs sampled in the Fukushima Daiichi area. *J. Environ. Radioact.* 2020; 225: 106429.
23. Bonisoli-Alquati A., Voris A., Mousseau T., et al. DNA damage in barn swallows (*Hirundo rustica*) from the Chernobyl region detected by use of the comet assay. *Comparative Biochemistry and Physiology, part C*. 2010; 151:271–277.
24. Fujita Y., Yoshihara Y., Sato I., et al. Environmental radioactivity damages the DNA of earthworms of Fukushima Prefecture, Japan. *European Journal of Wildlife Research.* 2014; 60(1):145–148.
25. Bonisoli-Alquati A., Koyama K., Tedeschi D., Kitamura W., et al. Abundance and genetic damage of barn swallows from Fukushima. *Scientific reports.* 2015; 5:9432.
<https://doi.org/10.1038/srep09432>.
26. Hiyama A., Nohara C., Kinjo S., et al. The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *Scientific Reports.* 2012; 2:570.
27. Hancock S., Vo N., Omar-Nazir L. et al. Transgenerational effects of historic radiation dose in pale grass blue butterflies around Fukushima following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant meltdown accident. *Environ. Research.* 2019; 168:230–240.
28. Gerke H., Hinton T., Takase T., et al. Radiocesium concentrations and GPS-coupled dosimetry in Fukushima snakes. *Science of the Total Environment.* 2020; 734:139389.
29. Башлыкова Л.А. Цитогенетические эффекты и их наследование при длительном хроническом облучении // Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды. Материалы международной конференции, Сыктывкар, 17–21.03.2014. Сыктывкар: КНЦ УрО РАН, 2014. С. 199–202. [Bashlykova L.A. Tsitogeneticheskie effekty i ikh nasledovanie pri dlitelnom khronicheskem obluchenii // Biologicheskie effekty malyh doz ioniziruyushchey radiatsii i radioaktivnoe zagryaznenie sredy. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii, Syktyvkar, 17–21.03.2014. Syktyvkar: KNC UrO RAN, 2014. P. 199–202. (In Russ.)].
30. Башлыкова Л.А. Мониторинг цитогенетических эффектов в клетках мышевидных грызунов, обитавших в условиях хронического действия радиоактивного излучения естественных и искусственных радионуклидов // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-й годовщине аварии на Чернобыльской АЭС. Сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск 22–23.04.2021. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2021. С. 36–39.
[Bashlykova L.A. Monitoring tsitogeneticheskikh effektov v kletkakh myshevidnykh gryzunov, obitav- shikh v usloviyakh khronicheskogo deystviya radioaktivnogo izlucheniya estestvennykh i iskusstvennykh radionuklidov // Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh avari: k 35-y godovshchine avarii na Chernobylskoy AES. Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Obninsk 22–23.04.2021. Obninsk: VNIIRAE, 2021. P. 36–39. (In Russ.)].
31. Bonisoli-Alquati A., Ostermillers S., Beasley A., et al. Faster development covaries with higher DNA damage in grasshoppers (*Chorthippus albomarginatus*). *Physiological and Biochemical Zoology.* 2018; 1:776–787.
32. Parisot F., Bourdineaud J.-P., Plaire D., et al. DNA alterations and effects on growth and reproduction in *Daphnia magna* during chronic exposure to gamma radiation over three successive generations. *Aquatic Toxicology.* 2015; 163:27–36.
33. Cunningham K., Hinton T., Luxton J., et al. Evaluation of DNA damage and stress in wildlife chronically exposed to low-dose, low-dose rate radiation from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Environment International.* 2021; 155:106675.
34. Low-dose radiation effects on animals and ecosystems. Long-term study on the Fukushima Nuclear Accident. Ed.M. Fukumoto. Singapore: Springer Open, 2020. 259 p.
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-8218-5>
35. Раскоша О.В., Ермакова О.В., Павлов А.В., Кораблева Т.В. Морфометрические и цитогенетические исследования фолликулярного эпителия щитовидной железы мелких млекопитающих при хроническом облучении в малых дозах. Радиационная биология. Радиоэкология. 2015; 55(1):63–70. [Raskosha O.V., Ermakova O.V., Pavlov A.V., Korableva T.V. Morfometricheskie i tsitogeneticheskie issledovaniya follikulyarnogo epiteliya shchitovidnoy zhelez melkikh mlekopitayushchikh pri khronicheskem obluchenii v malykh dozakh. Radiatsionnaya biologiya. Radioecologiya. 2015; 55(1):63–70. (In Russ.)].
36. Gudkov D.I., Shevtsova N.L., Pomortseva N.A., et al. Radiation-induced cytogenetic and hematological effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone. *J. Environ. Radioact.* 2016; 151:438–448.
37. Гудков Д.И., Поморцева Н.Л., Дзюбенко Е.В. и др. Водная биота Чернобыльской зоны: эффекты хронического радиационного воздействия на различных уровнях организации // Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды. Материалы международной конференции, Сыктывкар, 17–21.03.2014. Сыктывкар: КНЦ УрО РАН, 2014. С. 123–128.
[Gudkov D.I., Pomortseva N.L., Dzyubenko E.V., et al. Vodnaya biota Chernobylskoy zony: effekty khronicheskogo radiatsionnogo vozdeystviya na razlichnykh urovnyakh organizatsii // Biologicheskie effekty malyh doz ioniziruyushchey radiatsii i radio-

- aktivnoe zagryaznenie sredy. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii, Syktyvkar, 17–21.03.2014. Syktyvkar: KNC UrO RAN, 2014. P. 123–128. (In Russ.)].
38. Sugg D., Bickham J., Brooks J., et al. DNA damage and radiocesium In channel catfish from Chernobyl. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1996; 15:1057–1063.
 39. Jagoe C., Dallas C., Chesser R., et al. Contamination near Chernobyl: radiocesium, lead and mercury in fish and sediment radiocesium from waters within the 10-km zone. *Ecotoxicology*. 1998; 7:201–209.
 40. Dallas C., Lingenfelser S., Lingenfelser J., et al. Flow cytometric analysis of erythrocyte and leukocyte DNA in fish from Chernobyl contaminated ponds in the Ukraine. *Ecotoxicology*. 1998; 7:211–219.
 41. Дубинин Н.П., Алтухов Ю.П., Салменкова Е.А. и др. Анализ мономорфных маркеров генов в популяциях как метод оценки мутагенности среды. Доклады АН СССР. 1975; 225(3):693–696.
[Dubinin N.P., Altukhov Y.P., Salmenkova E.A., et al. Analiz monomorfnykh markerov genov v populyatsiyakh kak metod otsenki mutagennosti sredy. Doklady AN SSSR. 1975; 225(3):693–696. (In Russ.)].
 42. Шевченко В.А., Абрамов В.И., Печкуренков В.Л. Генетические исследования в Восточно-Уральском радиоактивном следе // Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. М.: Наука, 1993. С. 258–303.
[Shevchenko V.A., Abramov V.I., Pechkurenkov V.L. Geneticeskie issledovaniya v Vostochno-Uralskom radioaktivnom sledre // Ekologicheskie posledstviya radioaktivnogo zagryazneniya na Yuzhnom Urale. M.: Nauka, 1993. P. 258–303. (In Russ.)].
 43. Kubota Y., Tsuji H., Kawagoshi T., et al. Chromosomal aberrations in wild mice captured in areas differentially contaminated by the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant accident. *Environmental Science and Technology*. 2015; 49:10074–10083.
 44. Kubota Y., Takahashi H., Watanabe Y., et al. Estimation of absorbed radiation dose rates in wild rodents inhabiting a site severely contaminated by the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *J. Environ. Radioact.* 2015; 142:124–131.
 45. Гилема Э.А. Хромосомная нестабильность у грызунов с территории ВУРСа: межвидовые сравнения. Радиационная биология. Радиоэкология. 2002; 42(6):665–669.
[Gileva E.A. Khromosomnaya nestabilnost u gryzunov s territorii VURSa: mezhvidovye sravneniya. Radiatsionnaya biologiya. Radioecologiya. 2002; 42(6): 665–669. (In Russ.)].
 46. Baker R.J., Dickins B., Wickliffe J., et al. Elevated mitochondrial genome variation after 50 generations of radiation exposure in a wild rodent. *Evol. Appl.* 2017; 10(8):784–791.
<https://doi.org/10.1111/eva.12475.eCollection2017Sep>
 47. Зайнуллин В.Г., Юшкова Е.А., Гурьев Д.В. Радиационно-индукционное изменение уровня двухцепочечных разрывов ДНК в нейробластах личинок и частоты летальных мутаций в половых клетках самцов *Drosophila melanogaster*. Радиационная биология. Радиоэкология. 2010; 50(5):523–528.
[Zainullin V.G., Yushkova E.A., Guryev D.V. The radiationally induced change of level of double-stranded breaks DNA in neuroblasts of larvae and frequency of lethal mutations in sex cells of males *Drosophila melanogaster*. Radiatsionnaya biologiya. Radioecologiya. 2010; 50(5):523–528. (In Russ.)].
 48. Van der Hoeven N. Estimating the 5-percentile of the species sensitivity distributions without any assumptions about the distribution // *Ecotoxicology*. 2001; 10:25–34.
 49. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАТ, 2010. 496 с.
[Kryshev I.I., Ryazantsev E.P. Ekologicheskaya bezopasnost yaderno-energeticheskogo kompleksa Rossii. M.: IzdAT, 2010. 496 p. (In Russ.)].
 50. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И. Опыт апробации радиоэкологических критерииев безопасности окружающей среды для Восточно-Уральского радиоактивного следа и районов расположения объектов использования атомной энергии // XLVI Международные радиоэкологические чтения, посвященные действительному члену ВАСХНИЛ В.М. Клечковскому, Обнинск, 30.11–01.12.2017. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2017. С. 29–58.
[Kryshev I.I., Sazykina T.G., Kryshev A.I. Opyt aprobatsii radioekologicheskikh kriteriev bezopasnosti okruzhayushchey sredy dlya Vostochno-Uralskogo radioaktivnogo sleda i rayonov raspolozheniya objektov ispolzovaniya atomnoy energii // XLVI Mezhdunarodnye radioekologicheskie chteniya, posvyashchennye dejstvitelnomu chlenu VASKHNIL V.M. Klechkovskomu, Obninsk, 30.11–01.12.2017. Obninsk: VNIIRAE, 2017. P. 29–58. (In Russ.)].
 51. Нуштаева В.Э., Спиридовон С.И. Дозы облучения биоты от газоаэрозольных выбросов Белоярской АЭС и Института реакторных материалов // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник научных трудов XXI Международной научно-практической конференции. М.: РУДН, 2020. Т. 2. С. 87–90.
[Nushtaeva V.E., Spiridonov S.I. Dozy oblucheniya bioty ot gazoaerazolnyh vybrosov Beloyarskoy AES i Instituta reaktornykh materialov // Aktualnye problemy ekologii i prirodopolzovaniya. Sbornik nauchnyh trudov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. M.: RUDN, 2020. T.2. P. 87–90. (In Russ.)].
 52. Бурякова А.А., Крышев И.И., Павлова Н.Н., Каткова М.Н. Современное состояние радиоэкологической обстановки на территориях чернобыльского следа в Брянской области // Радиоэк-

- логические последствия радиационных аварий: к 35-й годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 22–23.04.2021. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2021. С. 48–51.
- [Buryakova A.A., Kryshev I.I., Pavlova N.N., Katkova M.N. Sovremennoe sostoyanie radioekologicheskoy obstanovki na territoriyakh chernobyl'skogo sleda v Bryanskoy oblasti // Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh avari: k 35-y godovshchine avarii na ChAES: Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Obninsk, 22–23.04.2021. Obninsk: VNIIRAE, 2021. P. 48–51. (In Russ.)].
53. Бусько Е.Г., Сологуб Э.В. Оценка радиоактивного воздействия на компоненты биоты по уровню радиационного загрязнения озер Гомельской области // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения: Сборник научных трудов по материалам Международной научной экологической конференции, посвященной Году науки и технологий, Краснодар, 29–31.03.2021. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2021. С. 597–600.
- [Busko E.G., Sologub E.V. Otsenka radioaktivnogo vozdeystviya na komponenty bioti po urovnyu radiatsionnogo zagryazneniya ozer Gomelskoj oblasti // Problemy transformatsii estestvennykh landshaftov v rezultate antropogennoy deyatelnosti i puti ikh resheniya: Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchnoy ekologicheskoy konferentsii,
- posvyashchennoy Godu nauki i tekhnologiy, Krasnodar, 29–31.03.2021. Krasnodar: Kubanskiy gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2021. P. 597–600. (In Russ.).]
54. Крышев А.И., Косых И.В., Крышев И.И. Анализ экологического риска радиоактивного загрязнения Ольховского болота. Атомная энергия. 2022. Т. 132. № 1. С. 43–46.
- [Kryshev A.I., Kosykh I.V., Kryshev I.I. Environmental risk analysis of radioactive contamination of the Ol'khovskoe marsh. *Atomic Energy*. 2022; 132(1):45–49].
55. Лаврентьева Г.В., Мирзебасов О.А., Сынзыны Б.И., Гешель И.В. Радиационный экологический риск для наземной экосистемы в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов. Радиация и риск. 2018; 27(4):65–75.
- [Lavrentyeva G.V., Mirzeabasov O.A., Synzyns B.I., Geshel I.V. Radiation ecological risk for the terrestrial ecosystem in the zone close to the radioactive waste storage facility. *Radiatsiya i risk*. 2018; 27(4):65–75. (In Russ.)].
56. Крышев И.И., Павлова Н.Н., Сазыкина Т.Г. и др. Оценка радиационной безопасности окружающей среды в зоне наблюдения объектов использования атомной энергии. Атомная энергия. 2021; 130(2):111–116.
- [Kryshev I.I., Pavlova N.N., Sazykina T.G., et al. Environmental radiation safety assessment in the control area at nuclear facilities. *Atomic Energy*. 2021; 130(2):119–125].

Estimation of the Lower Threshold Level for Appearance of Genetic Effects in Animals under Chronic Radiation Exposure Using a Method of Non-Parametric Statistics

T. G. Sazykina*, A. I. Kryshev

Research and Production Association "Typhoon", Obninsk, Russia

*e-mail: ecomod@yandex.ru

A database on genetic effects depending on the radiation dose rate (113 records) was collected to quantify the lower threshold for the occurrence of genetic damage in animals under the conditions of chronic irradiation. Analysis of data was performed using a non-parametric statistic method. The lower threshold for genetic effects under chronic technogenic irradiation of animals is 10 $\mu\text{Gy/day}$; the 95% confidence interval is 3–12 $\mu\text{Gy/day}$. Despite the fact that the lower thresholds for the manifestation of genetic effects of chronic irradiation differ insignificantly for vertebrate and invertebrate animals, analysis of the entire dataset shows the difference in their radiosensitivity. Dose rate 10 $\mu\text{Gy/day}$ for wildlife animals is not exceeded in situations of normal discharges and emissions from nuclear power plants. The exposure level 10 $\mu\text{Gy/day}$ is exceeded in areas contaminated as a result of past accidents or increased discharges of radionuclides, areas of radioactive waste storage facilities, and uranium mining enterprises; for these cases, more detailed estimations of the radiation dose rates to biota and analysis of uncertainties are required.

Keywords: ionizing radiation, biota, chronic exposure, genetic effects, non-parametric statistics, lower threshold level

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сазыкина Татьяна Григорьевна, ORCID:
<http://orcid.org/0000-0002-9082-5190>, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НПО “Тайфун”, Обнинск, Россия, e-mail: ecomod@yandex.ru

Sazykina Tatiana G., ORCID:
<http://orcid.org/0000-0002-9082-5190>, doctor of physical and mathematical sciences, major research scientist of Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russia, e-mail: ecomod@yandex.ru

Крышев Александр Иванович, ORCID:
<http://orcid.org/0000-0001-6816-0260>, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник

НПО “Тайфун”, Обнинск, Россия,
e-mail: ecomod@yandex.ru

Kryshev Alexander I., ORCID:
<http://orcid.org/0000-0001-6816-0260>, doctor of biological sciences, leading research scientist of Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russia, e-mail: ecomod@yandex.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

Сазыкина Т.Г.: идея исследования, сбор и обработка данных, подготовка таблиц 1 и 2, написание раздела «Материалы и методика».

Крышев А.И.: анализ данных, подготовка таблицы 3 и рисунка 1, написание разделов “Результаты и обсуждение” и “Заключение”.