

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

EDN: <https://elibrary.ru/ouamla>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-9-617-626>

УДК 504.054+504.75.05

© Коллектив авторов, 2023

Румак В.С.^{1,2}, Мышлявкина Т.А.^{1,2}, Лавренов А.Р.^{1,2}, Шелепчиков А.А.¹, Умнова Н.В.¹**Начальная оценка диоксинов, загрязняющих среду за пределами санитарной зоны полигона отходов производства и потребления «Лесная» (г. Серпухов, Московская область)**¹ФГБУ «Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова» РАН, Ленинский проспект, 33, Москва, 119071;²ФГБУ «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», Ленинские горы, 1, стр. 12, Москва, 119234**Введение.** Полигоны отходов производства и потребления, эксплуатация которых сопровождается нежелательными выбросами и/или сбросами диоксинов, встречаются повсеместно.

Процессы переноса этих химических веществ током воздуха и воды за пределы санитарных зон, включения в трофические цепи, биоаккумуляции и свертывания могут способствовать запуску токсического процесса при содержании в среде малых субтоксичных доз. Особенно важно это учитывать для агропромышленных и селитебных регионов.

Цель исследования — оценить диоксиновое загрязнение окружающей среды за пределами санитарной зоны полигона твёрдых отходов производства и потребления «Лесная» (полигон «Лесная») путём начальных (скринговых) исследований ожидаемого риска для здоровья населения.**Материалы и методы.** Диоксиновое загрязнение характеризовали величинами концентраций токсичных для человека конгенов в специально приготовленных пробах, а также показателями суммарной токсичности ($WHO-TEQ_{05}$). Пробы готовили из поверхностных слоёв почв и тушек животных, представляющих сменяющие друг друга поколения (группировки) зимнего и летнего сезонов природной популяции рыжей полёвки (*Clethrionomys glareolus*). Концентрации конгенов измеряли методом хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения.**Результаты.** Все пробы содержали диоксины. Хорошая сопоставимость спектров профилей конгенов этих веществ в пробах почв и тканях животных свидетельствует в пользу общей истории их происхождения, а также формирования в окружающей среде условий для практически непрерывного действия малых доз смесей этих веществ на обитателей. В пробах почв значения показателя $WHO-TEQ_{05}$ были значимо меньше гигиенического норматива. В тканях животных концентрации конгенов, характеризующихся выраженной гормоноподобной токсичностью, тератогенными, эмбриотоксическими и канцерогенными свойствами, в первую очередь 2,3,7,8-тетрахлордибензо-п-диоксина, оказались очень высокими.**Выводы.** Последствия длительного воздействия на локальную природную популяцию рыжей полёвки малых доз диоксинов в условиях загрязнения среды за пределами санитарной зоны полигона «Лесная» характеризовало накопление в их тканях токсикантов с гормоноподобными свойствами, способных запускать механизмы формирования и развития токсического процесса при любых концентрациях. Научно-практическую значимость полученного результата определяют перспективы создания на его основе методического приёма для решения задачи начальной (скринговой) оценки риска для здоровья населения, а именно опасности малых концентраций (доз) диоксинов, загрязняющих среду.**Ключевые слова:** диоксин; скринговая оценка риска; малые субтоксичные дозы; полигоны твёрдых отходов производства и потребления; рыжая полёвка**Этика.** Исследования с участием животных проходили с соблюдением следующих нормативных актов: Хельсинкской декларации 2000 г. «О гуманном отношении к животным»; Приказа Минздрава СССР № 755 от 12.08.1977 г. «Правила проведения работ с использованием экспериментальных животных»; Приказа Минздравсоцразвития России № 199н от 01.04.2016 г. «Об утверждении правил лабораторной практики». Метод эвтаназии соответствовал требованиям ст. 6 и Приложения IV Директивы Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22.09.2010 г. о защите животных, используемых для научных целей.**Для цитирования:** Румак В.С., Мышлявкина Т.А., Лавренов А.Р., Шелепчиков А.А., Умнова Н.В. Начальная оценка диоксинов, загрязняющих среду за пределами санитарной зоны полигона отходов производства и потребления «Лесная» (г. Серпухов, Московская область). *Мед. труда и пром. экол.* 2023; 63(9): 617–626. <https://elibrary.ru/ouamla> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-9-617-626>**Для корреспонденции:** Умнова Наталья Владимировна, ведущий научный сотрудник лаборатории Центр безопасности биосистем, ФГБУ «Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова» РАН. E-mail: unv2014@mail.ru**Участие авторов:**Румак В.С. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста, редактирование;
Мышлявкина Т.А. — сбор и обработка данных;
Лавренов А.Р. — пробоподготовка и обработка данных;
Шелепчиков А.А. — измерение концентраций конгенов в пробах;
Умнова Н.В. — концепция и дизайн исследования, обработка данных, написание текста, редактирование.**Благодарности.** Авторы выражают благодарность депутату Государственной думы VI созыва, учредителю Общественного регионального экологического фонда «Гражданин» Максиму Андреевичу Шингаркину, а также экоактивисту и общественному деятелю Андрею Викторовичу Елькину за активную поддержку выполненных нами исследований.**Финансирование.** Работа выполнена в рамках плановой тематики ИПЭЭ РАН и биофака МГУ при финансовой поддержке от регионального экологического общественного фонда «Гражданин».**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 01.08.2023 / Дата принятия к печати: 12.09.2023 / Дата публикации: 05.10.2023

Vladimir S. Roumak^{1,2}, Tatiana A. Myshlyavkina^{1,2}, Anton R. Lavrenov^{1,2}, Andrey A. Shelepchikov¹, Nataliya V. Umnova¹**Initial assessment of dioxins polluting the environment outside the sanitary zone of the landfill of production and consumption waste "Lesnaya" (Serpukhov, Moscow region)**¹A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS, 33, Leninsky Prospect, Moscow Russia, 119071;²M.V. Lomonosov Moscow State University, 1-12, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991

Introduction. Landfills of production and consumption waste exist everywhere. Their operation is closely related to unwanted emissions and/or discharges of dioxins. The processes of transfer of these chemicals by air and water flow outside sanitary zones, inclusion in trophic chains, bioaccumulation and overaccumulation can contribute to the launch of a toxic process when low subtoxic doses are contained in the medium. It is especially important to take this into account for agro-industrial and residential regions.

The study aims to assess the dioxin pollution of the environment outside the sanitary zone of the solid waste landfill of production and consumption "Lesnaya" (landfill "Lesnaya") by initial (screening) studies of the expected risk to public health.

Materials and methods. Experts characterized dioxin contamination by concentrations of compounds toxic to humans in specially prepared samples, as well as indicators of general toxicity (WHO-TEQ₀₅). The researchers obtained samples from the surface layers of soil and animal carcasses representing successive generations (groupings) of the winter and summer seasons of the natural population of the bank vole (*Clethrionomys glareolus*). Concentrations of related substances were measured by high-resolution chromatography-mass spectrometry.

Results. All samples contained dioxins. The good comparability of the profiles of congeners of these substances in soil samples and animal tissues testifies to the general history of their origin, as well as the formation of conditions in the environment for the almost continuous action of small doses of mixtures of these substances on the inhabitants. In soil samples, the values of the WHO-TEQ₀₅ index were significantly less than the hygienic standard. In animal tissues, concentrations of congeners characterized by pronounced hormone-like toxicity, teratogenic, embryotoxic and carcinogenic properties, primarily 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin, were very high.

Conclusions. The consequences of prolonged exposure to the local natural population of the bank vole of small doses of dioxins in conditions of environmental pollution outside the sanitary zone of the Lesnaya landfill were characterized by the accumulation in their tissues of toxicants with hormone-like properties capable of triggering the mechanisms of formation and development of the toxic process at any concentrations. The scientific and practical significance of the obtained result is determined by the prospects for creating a methodological technique based on it to solve the problem of initial (screening) assessment of the risk to public health, namely the danger of low concentrations (doses) of dioxins polluting the environment.

Keywords: dioxin; screening risk assessment; small subtoxic doses; landfills of solid waste of production and consumption; bank vole

Ethics. Scientists have conducted the studies involving animals in accordance with the following rules: Helsinki Declaration of 2000 "On humane treatment of animals"; Order of the Ministry of Health of the USSR No. 755 of 12.08.1977 "Rules for carrying out work using experimental animals"; Order of the Ministry of Health and Social Development of Russia No. 199n of 01.04.2016 "On approval of the rules of laboratory practice". The method of euthanasia complied with the requirements of Article 6 and Annex IV of the Directive of the European Parliament and of the Council of the European Union 2010/63/EC of 22.09.2010 on the protection of animals used for scientific purposes.

For citation: Roumak V.S., Myshlyavkina T.A., Lavrenov A.R., Shelepchikov A.A., Umnova N.V. Initial assessment of dioxins polluting the environment outside the sanitary zone of the landfill of production and consumption waste "Lesnaya" (Serpukhov, Moscow region). *Med. truda i prom. ekol.* 2023; 63(9): 617–626. <https://elibrary.ru/ouamla> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-9-617-626> (in Russian)

For correspondence: Natalia V. Umnova, the leading researcher of the Laboratory at Biosystems Security Center, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS. E-mail: unv2014@mail.ru

Author IDs: Roumak V.S. <https://orcid.org/0000-0002-6645-8677>
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507986855>
<https://istina.msu.ru/profile/roumak/>
 Lavrenov A.R. <https://orcid.org/0000-0002-7318-8046>
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56046623800>
<https://istina.msu.ru/profile/LavrenovAR/>
 Shelepchikov A.A. <https://orcid.org/0000-0002-6108-0409>
<https://istina.msu.ru/workers/2320362/>
 Umnova N.V. <https://orcid.org/0000-0002-1615-2194>
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701771785>
<https://istina.msu.ru/profile/noumnova/>

Contribution:

Roumak V.S. — research concept and design, data collection and processing, the text writing, editing;

Myshlyavkina T.A. — data collection and processing;

Lavrenov A.R. — sample preparation and data processing;

Shelepchikov A.A. — measurement of congener concentrations in samples;

Umnova N.V. — research concept and design, data processing, the text writing, editing.

Acknowledgement. The authors express their gratitude to Maxim A. Shingarkin (public figure, deputy of the State Duma of the 6th convocation, founder of the foundation "Grazhdanin") and Andrey V. El'kin (public figure, ecological activist) for help in conducting the study.

Funding. This study was performed according to the State programs of A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution (Russian Academy of Sciences) and M.V. Lomonosov Moscow State University (MSU) and was supported by the regional ecological public foundation "Grazhdanin".

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 01.08.2023 / Accepted: 12.09.2023 / Published: 05.10.2023

Введение. Загрязнение среды опасными для здоровья человека конгенерами полихлорированных дибензо-пара-диоксинов (ПХДД) и дибензофуранов (ПХДФ) — 7 конгенов ПХДД и 10 ПХДФ (ПХДД/Ф или диоксины), равно как и появление источников их выбросов и/или сбросов вблизи селитебных зон вызывает серьёзную озабоченность, так как связанные с действием этих веществ последствия имеют множество сходств с полигенными экологозависимыми заболеваниями [1]. Это в полной мере относится к полигонам отходов производства и потребления (П), обладающих способностями производить, выбрасывать и/или сбрасывать ПХДД/Ф, перенос которых током воздуха и воды может вызывать загрязнение среды далеко за пределами санитарных зон [2–4]. При оценке таких загрязнений отмечено, что механизмы прямого действия на организм конгенов с высоким уровнем гормоноподобной токсичности, характеризующихся биоаккумуляцией и сверхкумулятивными эффектами, могут способствовать росту риска для здоровья даже при действии малых доз (концентраций) [1, 5].

Для контроля и охраны окружающей среды обоснованы нормы допустимого содержания смесей ПХДД/Ф в средах путём характеристики их общей (или суммарной) токсичности (*WHO-TEQ₀₅*). Между тем, особенности её проявления при действии на организм малых доз учтены явно недостаточно. К наиболее важным среди них относят:

- «парадоксальную» токсичность [6];
- избирательность накопления гормоноподобных конгенов (и в первую очередь 2,3,7,8-тетрахлордибензо-п-диоксина, ТХДД) [7, 8];
- передачу этих и сопутствующих им не менее опасных конгенов от матери потомкам в период внутриутробного развития (плацентарный путь передачи) и раннего детского возраста (вместе с грудным молоком) [9];
- высокий уровень влияния многих сопутствующих ПХДД/Ф внешних, внутренних и временных факторов [5].

Считается, что все эти факторы активно способствуют проявлению ПХДД/Ф токсических свойств при любых концентрациях [1, 10–14]. Поэтому для контроля и охраны здоровья окружающей среды и населения на загрязняемых этими веществами территориях стали активно разрабатывать методы биомониторинга [3, 4, 15].

Наилучшие условия для биомониторинга последствий действия на население химических веществ, загрязняющих селитебную среду, предоставляют эпидемиологические исследования. Однако, серьёзным ограничением к решению таким образом задач в области обеспечения экологической безопасности на загрязняемых диоксинами территориях стала возможность возникновения у населения трудно излечимых форм патологии [16–19]. Поэтому на начальном этапе исследований риска здоровью от загрязняющих среду диоксинов специальное внимание стали уделять созданию методов биомониторинга прямого действия этих веществ на животных [4, 20, 21]. В проводимых нами исследованиях в качестве модельного вида для биомониторинга действия малых доз ПХДД/Ф на млекопитающих, обитающих за пределами санитарных зон полигонов, использовали рыжую полёвку (*Clethrionomys glareolus*). Ключевыми аргументами для нашего выбора стала принадлежность этого вида к классу млекопитающих и его экологическая

устойчивость, определяющая повсеместное присутствие на территориях европейской части России, а также практика использования мелких млекопитающих в экспериментальных исследованиях [22, 23].

Цель исследования — оценить диоксиновое загрязнение окружающей среды за пределами санитарной зоны полигона твёрдых отходов производства и потребления «Лесная» (П «Лесная») путём начальных (скрининговых) исследований ожидаемого риска для здоровья населения.

Материалы и методы. Полигон «Лесная» создан вблизи г. Серпухов в середине 70-х годов XX века. К настоящему времени площадь П достигла ≈32,7 га. Общий объём захороненных отходов превысил 2 млн тонн. В 2000 г. П законсервирован, в 2002 г. зафиксировано горение, в 2010 г. расконсервирован. Для сжигания свалочного газа в 2018 г. в непосредственной близости от П установлены и эксплуатируются высокотемпературные факельные устройства¹, которые могут быть дополнительными источниками диоксинов². Степень участия выбрасываемых П «Лесная» диоксинов в загрязнении окружающей среды, включая территории за пределами санитарной зоны, была оценена путём сравнения концентраций и профилей конгенов в пробах почв, для приготовления которых было отобрано 50 отдельных образцов с 2-х площадок размером около 1 га каждая. С каждой площадки отбирали по 25 образцов путём откопки поверхностных слоёв на глубину до ≈10 см методом конверта³ (длина стороны конверта в 1 м). Площадка-1 (П-1) была разбита на удалении в ≈1 км от границ санитарной зоны П, площадка-2 (П-2) — в границах санитарной зоны.

Воздействие на обитателей диоксинов, загрязняющих среду за пределами санитарной зоны П, были оценены путём сравнения показателей содержания и профилей конгенов в тканях животных из локальной природной популяции рыжей полёвки (*Clethrionomys glareolus*) со значениями в пробе почв для П-1. Влияние на механизмы формирования и развития этих последствий факторов сезонности было учтено путём сравнения концентраций и профилей конгенов в тканях животных из двух функциональных группировок — зимнего сезона против летнего сезона (ФГЗС и ФГЛС), так как в популяции полёвок эти группировки представляют сменяющиеся друг друга поколения [24, 25].

Состояние отловленных особей, их видовую и половую принадлежность, ориентировочный возраст оценивали квалифицированные эксперты. Эвтаназию полёвок выполняли в соответствии с соблюдением следующих нормативных актов: Хельсинкской декларации 2000 г. «О гуманном отношении к животным»; Приказа Минздравсоцразвития России № 199н от 01.04.2016 г. «Об утверждении правил лабораторной практики». Метод эвтаназии соответствовал требованиям ст. 6 и Приложения IV Директивы Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ ЕС от 22.09.2010 г. о защите животных, используемых для научных целей.

Сведения об отловленных животных и сформированных из них пробах приведены в **таблице 1**. Содержание

¹ «Проект полигона ТКО «Лесная» с увеличением проектной мощности». ЗАО «Спецгеоэкология», 2018.

² «Проект рекультивации полигона ТБО «Лесная» в ГО Серпухов Московской области». Пояснительная записка 03-04-2020-ПР-2-ООС1.1 Том 8.1.1. ЗАО «Спецгеоэкология» 2021.

³ ГОСТ 17.4.4.02-84

токсичных для человека конгенов диоксинов определяли в пробах почв и тканях животных методом хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения силами специалистов лаборатории аналитической экотоксикологии ИПЭЭ РАН. Показателями токсичности проб стали концентрации конгенов (ТХДД и других), и значения суммарной токсичности — *WHO-TEQ₀₅*, как суммарного диоксинового эквивалента токсичности, вычисляемого с использованием системы коэффициентов токсичности [26], предложенной ВОЗ в 2005 г.

Статистическая обработка данных выполнена методами непараметрического анализа с использованием традиционных методов вариационной статистики.

Результаты. Величины концентраций конгенов диоксинов в пробах почв и суммарной их токсичности представляет *таблица 2*.

Из *таблицы 2* видно, что на площадке П-1 уровни содержания конгенов диоксинов были существенно выше таковых на площадке П-2. Доминирующими конгенерами на обеих площадках были ОХДД, 1,2,3,4,6,7,8-ГпХДФ

Таблица 1 / Table 1

Характеристика подготовленных проб биоматериала из функциональных группировок зимнего и летнего сезонов (ФГЗС и ФЛАС) природной популяции рыжих полёвок
Characteristics of biomaterial and samples representing functional groups of the local bank voles' population — over-wintering (functional group of the winter season) and summer-born (functional group of the summer season) voles

Показатели	ФГЗС	ФЛАС
	Время отлова	
	19–22 апреля 2022 г.	30 сентября – 03 октября 2022 г.
Количество животных, всего	11	8
Количество проб, всего	4	4
Ткани самок (вес пробы)	51,2	35,64
Ткани самцов (вес пробы)	60,7	35,66
Ткани самцов (вес пробы)	60,8	—
Ткани смешанные (вес пробы)*	42,2	35,68
Ткани смешанные (вес пробы)	—	34,47

Примечание: * — ткани смешанных проб состоят из двух полёвок (самец + самка).
Note: * — mixed sample tissues consist of two voles (male + female).

Таблица 2 / Table 2

Содержание конгенов диоксинов (пг/г) в пробах почв, отобранных в месте отлова животных (П-1) и в границах санитарной зоны полигона «Лесная» (П-2), и показатели суммарной токсичности
PCDD/Fs concentrations and total toxicity (WHO-TEQ₀₅) levels (pg/g) in the soil samples collected in the vicinity of the landfill "Lesnaya" on the territory of bank voles trapping (P-1) and in the sanitary zone (P-2)

Конгены	Токсические эквиваленты (по шкале ВОЗ)	Концентрации, пг/г	
		П-1	П-2
2,3,7,8-ТХДД	1,0	0,34	0,26
1,2,3,7,8-ПсХДД	1,0	1,04	0,33
1,2,3,4,7,8-ГкХДД	0,1	1,05	0,21
1,2,3,6,7,8-ГкХДД	0,1	2,33	0,46
1,2,3,7,8,9-ГкХДД	0,01	1,51	0,36
1,2,3,4,6,7,8-ГпХДД	0,01	19,7	2,85
ОХДД	0,0003	60,36	9,29
2,3,7,8-ТХДФ	0,1	9,28	6,02
1,2,3,7,8-ПсХДФ	0,03	5,02	2,08
2,3,4,7,8-ПсХДФ	0,3	6,82	1,73
1,2,3,4,7,8-ГкХДФ	0,1	9,23	1,8
1,2,3,6,7,8-ГкХДФ	0,1	6,63	1,41
1,2,3,7,8,9-ГкХДФ	0,1	0,34	0,17
2,3,4,6,7,8-ГкХДФ	0,1	8,12	1,24
1,2,3,4,6,7,8-ГпХДФ	0,01	35,85	4,75
1,2,3,4,7,8,9-ГпХДФ	0,01	2,61	0,42
ОХДФ	0,0003	17,55	2,74
WHO-TEQ ₀₅		8,0	2,4

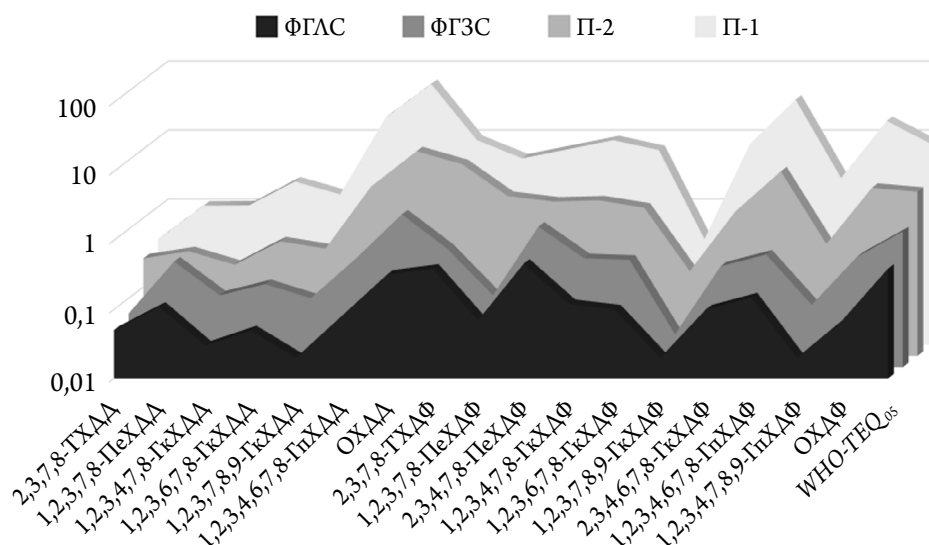


Рисунок Сравнение профилей конгенов диоксинов в тканях рыжих полёвок и в почвах из мест их обитания

Примечания: П-1 — почвенные пробы из мест отлова животных; П-2 — почвенные пробы, отобранные в границах санитарной зоны; ФГЗС — функциональная группировка зимнего сезона; ФГЛС — функциональная группировка летнего сезона.

Figure. PCDD/Fs congeners profiles in the animal samples and in soils collected in the area of their inhabitation (logarithmic scale)

Note: П-1 — soil samples in the area of animal trapping; П-2 — soil samples in the landfill sanitary zone; ФГЗС — over-wintering bank voles' functional group; ФГЛС — summer-born bank voles' functional group.

и ОХДФ. Соотношения концентраций ОХДД/ОХДФ на площадках П-1 и П-2 хорошо сопоставимы — 3,44 и 3,39, соответственно. Величина $WHO-TEQ_{05}$ для диоксинов, загрязняющих почвы на площадке П-1, более чем в 3 раза превышала величину этого показателя суммарной токсичности для площадки П-2 (8,03 пг/г против 2,42). Сравнением профилей конгенов на площадках П-1 и П-2 выявлена хорошая сопоставимость их концентраций (рисунок).

При обследовании рыжих полёвок очевидных признаков нарушений здоровья и/или развития не отмечено. Оценка возраста животных из ФГЗС, выполненная экспертом с учётом показателей их развития, тургора семенников у самцов и состояния маточных труб самок показала, что он мог быть равным 8–9 месяцам. Это заключение во взаимосвязи с временем отлова — сразу после схода снежного покрова, стало основанием для характеристики их как перезимовавших. Оценка экспертом возраста отловленных в сентябре 2022 г. полёвок по совокупности параметров (размерам, массе тела, внешним морфологическим признакам) позволила отнести их к сеголеткам в возрасте ≈ 3 –4 месяцев, представляющих ФГЛС.

Результаты измерения концентраций диоксинов в пробах тканей животных из ФГЗС и ФГЛС представлены в таблице 3.

Из таблицы 3 видно, что в тканях животных присутствовали все токсичные для человека конгены диоксинов, которые были идентифицированы в пробе почвы из мест их обитания (П-1). Концентрация самого токсичного среди них, обладающего выраженной канцерогенной активностью 2,3,7,8-ТХДД, а также 1,2,3,7,8-ПсХДД, характеризуемого сопоставимым с 2,3,7,8-ТХДД уровнем токсичности (значения фактора токсической эквивалентности = 1), оказались высокими.

Величины средних значений концентраций конгенов в тканях животных из ФГЗС были значимо вы-

ше аналогичных значений в тканях полёвок из ФГЛС — прежде всего для 1,2,3,7,8-ПсХДД, 1,2,3,6,7,8-ГкХДД, 1,2,3,7,8,9-ГкХДД, 1,2,3,4,6,7,8-ГпХДД, ОХДД, а также для показателя $WHO-TEQ_{05}$. В отношении ТХДД статистически значимых различий между двумя группировками не выявлено. Отметим хорошую сопоставимость профилей конгенов в пробах тканей животных из обеих функциональных группировок, а также в пробе почвы из мест их обитания (рисунок).

Обсуждение. Сопоставимость профилей конгенов диоксинов в пробах почв, отобранных в границах санитарной зоны П (площадка П-2) и за её пределами (площадка П-1), стала основанием для выделения П «Лесная» в качестве ключевого источника этих веществ. Доминирование в пробах конгенов ПХДФ, а также величины соотношения конгенов ОХДД/ОХДФ, которые относят к индикаторам термических процессов (сжигание твёрдых бытовых отходов, древесины и осадков сточных вод), а также вариативность наблюдаемых профилей не исключают возможностей существования дополнительных источников, к которым в первом приближении можно отнести высокотемпературные факельные устройства для сжигания свалочного газа [27].

Особенностью загрязнения диоксинами почвенных покровов на площадках П-1 и П-2 стало возрастание их концентраций по мере удаления от тела П (концентрации на площадке П-1 были выше зарегистрированных на П-2). Подобный эффект отмечен нами ранее в работе, посвящённой изучению загрязнения почв в окрестностях П «Саларьево» [3, 4]. Там концентрации диоксинов в почвах вблизи поселения Московский, удалённом от тела П на расстояние около 5 км, оказались немного выше против почв возле поселения «Картмазово», расположенного в 1 км от этого источника [4]. Такие особенности загрязнения почвенного покрова требуют специального

Таблица 3 / Table 3

Содержание конгенов диоксинов (пг/г, сухой вес) в пробах тканей рыжих полёвок из функциональных группировок зимнего и летнего сезонов (ФГЗС и ФГЛС) и показатели суммарной токсичности PCDD/Fs concentrations and total toxicity (WHO-TEQ₀₅) levels (pg/g body weight) in the bank voles' samples of different functional groups

Конгены	ФГЗС				ФГЛС				p
	Me	μ	SD	SE	Me	μ	SD	SE	
2,3,7,8-ТХДД	0,06	0,06	0,01	0,01	0,05	0,05	0,01	0,01	ns
1,2,3,7,8-ПсХДД	0,30	0,34	0,16	0,08	0,12	0,11	0,03	0,01	*
1,2,3,4,7,8-ГкХДД	0,11	0,11	0,04	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	ns
1,2,3,6,7,8-ГкХДД	0,16	0,16	0,05	0,03	0,04	0,05	0,02	0,01	*
1,2,3,7,8,9-ГкХДД	0,08	0,10	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	*
1,2,3,4,6,7,8-ГпХДД	0,35	0,38	0,20	0,10	0,08	0,08	0,04	0,02	*
ОХДД	1,41	1,64	1,09	0,55	0,25	0,32	0,20	0,10	*
2,3,7,8-ТХДФ	0,52	0,52	0,13	0,07	0,37	0,39	0,07	0,03	ns
1,2,3,7,8-ПсХДФ	0,11	0,11	0,03	0,02	0,07	0,07	0,01	0,00	ns
2,3,4,7,8-ПсХДФ	1,08	1,09	0,38	0,19	0,47	0,46	0,18	0,09	ns
1,2,3,4,7,8-ГкХДФ	0,35	0,38	0,19	0,10	0,12	0,12	0,05	0,03	ns
1,2,3,6,7,8-ГкХДФ	0,36	0,36	0,16	0,08	0,10	0,10	0,04	0,02	*
1,2,3,7,8,9-ГкХДФ	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	ns
2,3,4,6,7,8-ГкХДФ	0,28	0,29	0,14	0,07	0,10	0,10	0,05	0,02	ns
1,2,3,4,6,7,8-ГпХДФ	0,44	0,43	0,21	0,10	0,10	0,15	0,14	0,07	ns
1,2,3,4,7,8,9-ГпХДФ	0,08	0,08	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	ns
ОХДФ	0,36	0,40	0,27	0,13	0,03	0,07	0,09	0,04	ns
WHO-TEQ ₀₅	0,88	0,93	0,35	0,18	0,40	0,39	0,10	0,05	*

Примечания: Me — медиана; μ — среднее значение; p — критерий значимости различий; SD — стандартное отклонение; SE — стандартная ошибка средней; * — уровень значимости, $p < 0,05$; ns — уровень значимости, $p > 0,05$; с.в. — сухой вес.

Note: Me — median; μ — mean value; p — criterion of significance of differences; SD — standard deviation; SE — standard error of the mean; * — significance level, $p < 0.05$; ns — significance level, $p > 0.05$; SV — dry weight.

внимания и учёта. Это связано с тем, что уровни содержания конгенов диоксинов в объектах среды могут отражать общие закономерности распространения выбросов, производимых точечными источниками диоксинов (впрочем, и других загрязняющих веществ с выраженными адгезивными способностями), и последствия взаимодействия этих веществ с различными компонентами биоты, а в конечном счёте — меру ущерба, наносимого живым организмам, их популяциям и экосистемам [28]. Не исключено, что в окрестностях П «Лесная» таким источником выбросов диоксинов могут выступать эксплуатируемые высокотемпературные факельные устройства. Это предположение требует специальной проработки.

Не менее важной особенностью проявления загрязнения почв в окрестностях П «Лесная» (П-1), относительно наблюдаемых вблизи поселений Картазово и Московский, мы посчитали существенно большие уровни содержания 2,3,7,8-ТХДД — 0,34; 0,09; 0,11 пг/г, и значений WHO-TEQ₀₅ — 8,0; 1,1; 1,3 пг/г, соответственно.

Величины показателей WHO-TEQ₀₅ для почв, загрязняющих площадки П-1 и П-2, составляли 8,0 и 2,4 пг/г, что не превышает значений рекомендованных ориентировочно-допустимых концентраций⁴ для почв населённых

мест (50 нг/г) и сельскохозяйственных угодий (5,0 нг/г). Здесь важно отметить, что с помощью этого показателя, включая значения концентраций отдельных конгенов, составляющих его профиль, успешно решаются задачи идентификации источников диоксинов [29]. Общая токсичность этих веществ обусловлена только прямым их действием на организм [1, 5, 10, 28, 30].

В пробах тканей полёвок, представлявших ФГЗС и ФГЛС, присутствовали все загрязняющие почвы конгены диоксинов. Хорошая сопоставимость их профилей в пробах почв и тканей животных стала основанием для характеристики места обитания полёвок как источника этих ядов. Отметим, что величины WHO-TEQ₀₅ в тканях оказались неплохо сопоставимыми с регистрируемыми у жителей России уровнями на загрязнённых территориях [31, 32], что требует учёта мероприятиями по оценке влияния малых доз диоксинов на население [10, 12–14, 18, 19, 34–35].

Концентрации большей части конгенов в тканях животных из ФГЛС имели меньшие значения по сравнению с тканями полёвок из ФГЗС. Для ряда конгенов (ОХДД, 1,2,3,7,8-ПсХДД, 1,2,3,6,7,8-ГкХДД, 1,2,3,7,8,9-ГкХДД, 1,2,3,4,6,7,8-ГпХДД), а также суммарной токсичности

⁴ Гигиенический норматив ГН 2.1.7.3298-15 «Ориентировочные допустимые концентрации (ОДК) полихлорированных дибензо-п-диоксинов и дибензофуранов (в пересчёте на 2,3,7,8-тетрахлор-дибензо-пара-диоксин и его аналоги) в почве населённых мест, сельскохозяйственных угодий и промышлен-

ной площадки» и Постановление Гл. Гос. Санврача РФ от 28 января 2021 года № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

(WHO-TEQ₀₅), эти различия были статистически значимыми. Между тем, неразличимыми и довольно высокими оказались концентрации 2,3,7,8-ТХДД, характеризуемого выраженными гормоноподобными, тератогенными, эмбриотоксическими и канцерогенными свойствами. Анализ этих данных с учётом почти двукратных возрастных различий полёвок из двух функциональных группировок свидетельствует о формировании на изучаемой территории условий для практически непрерывного поглощения и накопления диоксинов обитателями в различные сезоны года.

Законодательно закреплённая референтная доза (RfD, мг/кг в день) для 2,3,7-ТХДД составляет 1,00Е–09 мг/кг (0,0001 пг/г) при хроническом пероральном поступлении в организм человека⁵. Если принять, что все поглощённые животными и идентифицированные нами количества 2,3,7,8-ТХДД были накоплены в их тканях (0,06 пг/г для ФГЗС и 0,05 пг/г для ФГАС) за весь период онтогенеза, то зная возраст особей (≈9 месяцев для ФГЗС и ≈4 месяца для ФГАС) можно в первом приближении определить ожидаемые количества поступавших в организм доз в течение суток. Для ФГЗС эти значения составили 0,00022 пг/г, для ФГАС — 0,00042 пг/г, что в 4,5 и 2,4 раза меньше референтной дозы. Однако здесь важно учитывать присущую этим веществам способность передаваться от матери потомкам через плаценту в период эмбрионального развития и с грудным молоком на этапе раннего онтогенеза [10]. Чувствительность организма к токсическому действию этих веществ в эти периоды может быть гораздо более высокой, что неоднократно подтверждено системным влиянием комплекса диоксинового рецептора (AhR) на наблюдаемые в онтогенезе эффекты [17, 35–38]. Среди населения Вьетнама, обследованного нами в связи с историей изучения отдалённых медико-биологических последствий применения армией США «Оранжевого агента», содержавшего диоксины, передача их послевоенным поколениям от родителей проявилась дополнительными случаями соматической патологии и нарушениями развития детей, которые были диагностированы в условиях длительного хронического воздействия малых доз диоксинов [10]. Для рыжих полёвок из популяции, обитающей на загрязнённых диоксинами территориях в окрестностях П «Саларьево», эффект передачи этих веществ от самки детёнышам зарегистрирован и описан нами ранее [4]. Методами молекулярной генетики в сопоставимых выборках из той же популяции рыжих полёвок выявлены изменения показателей экспрессии ряда генов, способствующих запуску токсического процесса (включая ген *ahr*) [15]. В этой связи отметим, что в тканях животных из ФГЗС и ФГАС, присутствуют конгенеры, которые рассматриваются⁶ как

канцерогены — 2,3,7,8-ТХДД и 2,3,4,7,8-ПсХДФ. При этом Руководством по оценке риска для населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду, 2,3,7,8-ТХДД классифицирован как канцероген для человека с необычайно высокими значениями (150 000) фактора канцерогенного потенциала, призванными отражать степень увеличения вероятности развития онкологического заболевания. Для 2,3,4,7,8-ПсХДФ, рассматриваемого лишь как вероятный канцероген для человека, фактор канцерогенного потенциала имеет несколько меньшие значения — 80 000. В организме рыжих полёвок из окрестностей П «Лесная» этот конгенер содержался в достаточно больших количествах — 1,08 пг/г (в тканях ФГЗС) и 0,47 пг/г (в тканях ФГАС).

Негативное влияние диоксинов на состояние здоровья окружающей среды и населения уже твёрдо доказано. Гигиенисты-практики не раз отмечали, что на состояние животных и растений может влиять даже воздух, загрязнённый веществами, концентрации которых существенно ниже ПДК [39], что безусловно говорит о необходимости особого внимания к проблемам оценки экологической безопасности загрязняемых этими веществами территорий, а также важности профилактики и минимизации экологически детерминированной патологии (прежде всего у детей). В этой связи можно говорить и о веществах, недоучёт трансформации которых замечают при мониторинге технологических выбросов в реальных условиях экспозиции [27], когда даже после очистки свалочного газа получают на выходе новый набор загрязнителей, среди которых возможно присутствие веществ более токсичных или опасных, чем исходные. Отметим, что оснований для исключения из этого правила факельных установок пока не получено.

Выводы:

1. Получены данные, позволяющие рассматривать полигон «Лесная» в качестве источника выбросов опасных для здоровья человека конгенов диоксинов, загрязнивших территории за пределами её санитарной зоны.

2. Хорошая сопоставимость профилей конгенов в почвах и тканях животных (рыжая полёвка), обитающих на загрязнённых диоксинами территориях за пределами санитарной зоны полигона «Лесная», свидетельствует о возникновении в окружающей среде изменений, способствующих запуску процессов длительного хронического действия наиболее опасных конгенов на обитателей.

3. Уровни поглощённых и накопленных в тканях полёвок конгенов диоксинов, характеризуемых выраженными гормоноподобными, тератогенными, эмбриотоксическими и канцерогенными свойствами, определяют актуальность скорейшего принятия специальных мер в области обеспечения экологической безопасности территории вблизи и в окрестностях полигона.

4. Полученный результат открывает перспективы для развития методической базы в области решения путём биомониторинга задач начальной (скрининговой) оценки риска для здоровья населения диоксинов, загрязняющих среду в малых дозах (концентрациях).

⁵ Руководство по оценке риска для населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Руководство. Р2.1.10.1920-04 (утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 05.03.2004).

⁶ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 21.04.2008 N 27 (ред. от 22.12.2014): Об утверждении СанПиН 1.2.2353-08 "Канцерогенные факторы и основные требования к профилактике канцерогенной опасности".

Список литературы

- Софронов Г.А., Рембовский В.Р., Радилов А.С., Могиленкова Л.А. Современные взгляды на механизмы токсического действия диоксинов и их санитарно-гигиеническое нормирование. *Мед. академ. журнал*. 2019; 19(1): 17–28. <https://doi.org/10.17816/MAJ19117-28>
- Розанов В.Н., Тререр Ю.А. Оценка выбросов диоксинов основных источников РФ. *Экология и промышленность России*. 2011; 2: 32–35.
- Румак В.С., Умнова Н.В., Левенкова Е.С., Турбабина К.А., Пивоваров Е.А., Шелепчиков А.А. и др. Диоксины в среде и организме животных вблизи полигона отходов производства и потребления: к методологии оценки риска для здоровья населения. *Экология человека*. 2017; 10: 9–15.
- Roumak V.S., Levenkova E.S., Umnova N.V., Popov V.S., Turbabin K.A., Shelepchikov A.A. The content of dioxins and furans in soils, bottom sediments of water bodies, and tissues of small mammals near the landfill site with municipal solid wastes (Moscow, Russia). *Environ Sci and Pollut Res*. 2018; 25(29): 29379–29386. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2933-y>
- Позняков С.П., Румак В.С., Софронов Г.А., Умнова Н.В. Диоксины и здоровье населения. *Научные основы выявления диоксиновой патологии*. СПб.: Наука; 2006.
- Кунцевич А.Д. Систематизация и оценка степени риска суперэкоотоксикантов. *Успехи химии*. 1991; 60(3): 530–535.
- Van den Berg M., De Jongh J., Poiger H., Olson J.R. The toxicokinetics and metabolism of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) and their relevance for toxicity. *Crit. Rev. Toxicol.* 1994; 24: 1–74. <https://doi.org/10.3109/10408449409017919>
- Shen H., Han J., Guan R., Cai D., Zheng Y., Meng Z. et al. Use of different endpoints to determine the bioavailability of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Sprague-Dawley rats. *Sci Rep*. 2022; 12(1): 20433. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25042-3>
- Никитин А.И. Гормоноподобные ксенобиотики и их роль в патологии репродуктивной функции человека. *Экология человека*. 2006; 1: 9–16.
- Софронов Г.А., Румак В.С., Умнова Н.В., Белов Д.А., Турбабина К.А. Возможные риски хронического воздействия малых доз диоксинов для здоровья населения: к методологии выявления токсических эффектов. *Мед. академ. журнал*. 2016; 16(3): 7–18. <https://doi.org/10.17816/MAJ1637-18>
- Eggen R.I.L., Behra R., Burkhardt-Holm B., Escher B.I., Schweigert N. Challenges in Ecotoxicology. *Environ. Sci. Technol.* 2004; 38(3): 58–64.
- Pohjanvirta R., Viluksela M. Novel Aspects of Toxicity Mechanisms of Dioxins and Related Compounds. *Int. J. Mol. Sci.* 2020; 21(7): 2342. <https://doi.org/10.3390/ijms21072342>
- Andersen M.E., Conolly R.B. Mechanistic modeling of rodent liver tumor promotion at low levels of exposure: an example related to dose-response relationships for 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin. *Hum Exp Toxicol*. 1998; 17(12): 683–90. <https://doi.org/10.1177/096032719801701208>
- Tuomisto J., Pekkanen J., Kiviranta H., Tukiainen E., Vartiainen T., Viluksela M., Tuomisto J.T. Dioxin cancer risk — example of hormesis? *Dose Response*. 2006; 3(3): 332–41. <https://doi.org/10.2203/dose-response.003.03.004>
- Лавренов А.Р., Орджоникидзе К.Г., Румак В.С., Ким А.И., Умнова Н.В. Оценка начальных проявлений токсического процесса в условиях хронического действия малых субтоксичных доз диоксинов, загрязняющих среду. *Экология человека*. 2022; 29(3): 57–66. <https://doi.org/10.17816/humeco77320>
- Schwarz M., Appel K.E. Carcinogenic risks of dioxin: mechanistic considerations. *Regul Toxicol Pharmacol*. 2005; 43(1): 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2005.05.008>
- Rejano-Gordillo C., Ordiales-Talavera A., Nacarino-Palma A., Merino J.M., González-Rico F.J., Fernández-Salguero P.M. Aryl Hydrocarbon Receptor: From Homeostasis to Tumor Progression. *Front Cell Dev Biol*. 2022; 10: 884004. <https://doi.org/10.3389/fcell.2022.884004>
- Vandenberg L.N., Colborn T., Hayes T.B., Heindel J.J., Jacobs D.R. Jr, Lee D.H., et al. Hormones and endocrine-disrupting chemicals: low-dose effects and nonmonotonic dose responses. *Endocr Rev*. 2012; 33(3): 378–455. <https://doi.org/10.1210/er.2011-1050>
- Vandenberg L.N., Rayasam S.D.G., Axelrad D.A., Bennett D.H., Brown P., Carignan C.C., et al. Addressing systemic problems with exposure assessments to protect the public's health. *Environ Health*. 2023; 21(1): 121. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00917-0>
- Scaramozzino P., Battisti S., Desiato R., Tamba M., Fedrizzi G., Ubaldi A., Neri B., Abete M.C., Ru G. Application of a risk-based standardized animal biomonitoring approach to contaminated sites. *Environ Monit Assess*. 2019; 191(8): 526. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7653-3>
- Кудрявцева А.А., Шелепчиков А.А., Мир-Кадырова Е.Я., Бродский Е.С. Изменение профиля полихлорированных дибензо-п-диоксинов и дибензофуранов в процессе биоаккумуляции в яйцах кур на свободном выгуле. *Изв. РАН. Сер. биол.* 2023; 1: 93–102. <https://doi.org/10.31857/S1026347023010080>
- Башенина Н.В. *Европейская рыжая полевка*. М.: Наука; 1981.
- Безель В.С. Основы экологической токсикологии. В кн. Курляндский Б.А., Филлов В.А., ред. «Общая токсикология». М.: Медицина. 2002: 545–586.
- Оленев Г.В., Григоркина Е.Б. Функциональные закономерности жизнедеятельности популяций грызунов в зимний период. *Экология*. 2014; 6: 428–438. <https://doi.org/10.7868/S0367059714060109>
- Roumak V.S., Popov V.S., Shelepchikov A.A., Osipova O.V., Umnova N.V. Seasonal peculiarities of PCDD/Fs levels in bank voles inhabiting sites in the vicinity of the landfill with municipal wastes (Moscow, Russia). *Environ Sci and Pollut Res*. 2022; 29(35): 52796–52805. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19602-3>
- Safe S. Polychlorinated biphenyls (PCBs), dibenzo-p-dioxins (PCDDs), dibenzofurans (PCDFs), and related compounds: environmental and mechanistic considerations which support the development of toxic equivalency factors (TEFs). *Crit Rev Toxicol*. 1990; 21(1): 51–88. <https://doi.org/10.3109/10408449009089873>
- Мальшова А.Г., Козлова Н.Ю., Растяпников Е.Г., Ермаков А.А., Шохин В.А. Физико-химические исследования для оценки химической безопасности и эффективности применения новой системы очистки свалочного газа на полигоне твердых бытовых отходов. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(11): 1103–8.
- Софронов Г.А., Румак В.С., Лазаренко Д.Ю. Экоотоксикокинетика и экоотоксикодинамика токсичных химических веществ в условиях тропиков. *Мед. академ. журнал*. 2010; 10(4): 183–190. <https://doi.org/10.17816/MAJ104183-190>
- Кудрявцева А.А., Мир-Кадырова Е.Я., Калинин Г.А., Бродский Е.С. Характер загрязнения почвы вблизи мест захоронения твердых бытовых отходов. *Почвоведение*. 2021; 8: 957–968. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21080128>
- Федоров Л.А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы. М.: Наука, 1993. 266 с.
- Клюев Н.А., Курляндский Б.А., Ревич Б.А., Филатов Б.Н. Диоксины в России. М.: ЮНЕП, 2001.
- Revich B., Aksel E., Ushakova T., Ivanova I., Zhuchenko N., Klyuev N. Et al. Dioxin exposure and public health in Chapaevsk, Russia. *Chemosphere*. 2001; 43(4–7): 951–66. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(00\)00456-2](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(00)00456-2)
- Rhee J., Medgyesi D.N., Fisher J.A., White A.J., Sampson J.N., Sandler D.P. et al. Residential proximity to dioxin emissions and risk of breast cancer in the sister study cohort. *Environ Res*. 2023; 222: 115297. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115297>

34. VoPham T., Bertrand K.A., Jones R.R., Deziel N.C., DuPré N.C., James P. et al. Dioxin exposure and breast cancer risk in a prospective cohort study. *Environ Res.* 2020; 186: 109516. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109516>
35. Gileadi T.E., Swamy A.K., Hore Z., Horswell S., Ellegood J., Mohan C. et al. Effects of low-dose gestational TCDD exposure on behavior and on hippocampal neuron morphology and gene expression in mice. *Environ. Health Perspect.* 2021; 129: 57002. <https://doi.org/10.1289/EHP7352>
36. Zablón H.A., Ko C.I., Puga A. Converging Roles of the Aryl Hydrocarbon Receptor in Early Embryonic Development, Maintenance of Stemness, and Tissue Repair. *Toxicol Sci.* 2021; 182(1): 1–9. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfab050>
37. Grishanova A.Y., Perepechaeva M.L. Aryl Hydrocarbon Receptor in Oxidative Stress as a Double Agent and Its Biological and Therapeutic Significance. *Int J Mol Sci.* 2022; 23(12): 6719. <https://doi.org/10.3390/ijms23126719>
38. Lowery R.L., Latchney S.E., Peer R.P., Lamantia C.E., Lordy K.A., Opanashuk L.A. et al. Gestational and lactational exposure to 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin primes cortical microglia to tissue injury. *Brain Behav Immun.* 2022; 101: 288–303. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2022.01.013>
39. Красовский Г.Н., Рахманин Ю.А., Егорова Н.А. Экстраполяция токсикологических данных с животных на человека. М.: Медицина; 2009.

References

1. Sofronov G.A., Rembovsky V.R., Radilov A.S., Mogilenkova L.A. Modern views on the mechanisms of toxic action of dioxins and their sanitary and hygienic regulation. *Med. akadem. zhurnal.* 2019; 19(1): 17–28. <https://doi.org/10.17816/MAJ19117-28>
2. Rozanov V.N., Treger Yu.A. Assessment of dioxin emissions from the main sources of the Russian Federation. *Ekologiya i promyshlennost' v Rossii.* 2011; 2: 32–35.
3. Rumak V.S., Umnova N.V., Levenkova E.S., Turbabina K.A., Pivovarov E.A., Shelepchikov A.A., etc. Dioxins in the environment and in the body of animals near the landfill of production and consumption waste: a methodology for assessing the risk to public health. *Ekologiya cheloveka.* 2017; 10: 9–15.
4. Roumak V.S., Levenkova E.S., Umnova N.V., Popov V.S., Turbabina K.A., Shelepchikov A.A. The content of dioxins and furans in soils, bottom sediments of water bodies, and tissues of small mammals near the landfill site with municipal solid wastes (Moscow, Russia). *Environ Sci and Pollut Res.* 2018; 25(29): 29379–29386. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2933-y>
5. Poznyakov S.P., Rumak V.S., Sofronov G.A., Umnova N.V. Dioxins and public health. *Scientific bases of detection of dioxin pathology.* St. Petersburg: Nauka; 2006.
6. Kuntsevich A.D. Systematization and risk assessment of superecotoxicants. *Uspekhi khimii.* 1991; 60(3): 530–535.
7. Van den Berg M., De Jongh J., Poiger H., Olson J.R. The toxicokinetics and metabolism of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) and their relevance for toxicity. *Crit. Rev. Toxicol.* 1994; 24: 1–74. <https://doi.org/10.3109/10408449409017919>
8. Shen H., Han J., Guan R., Cai D., Zheng Y., Meng Z. et al. Use of different endpoints to determine the bioavailability of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Sprague-Dawley rats. *Sci Rep.* 2022; 12(1): 20433. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25042-3>
9. Nikitin A.I. Hormone-like xenobiotics and their role in the pathology of human reproductive function. *Ekologiya cheloveka.* 2006; 1: 9–16.
10. Sofronov G.A., Rumak V.S., Umnova N.V., Belov D.A., Turbabina K.A. Possible risks of chronic exposure to low doses of dioxins for public health: a methodology for detecting toxic effects. *Med. akadem. zhurnal.* 2016; 16(3): 7–18. <https://doi.org/10.17816/MAJ1637-18>
11. Eggen R.I.L., Behra R., Burkhardt-Holm B., Escher B.I., Schweigert N. Challenges in Ecotoxicology. *Environ. Sci. Technol.* 2004; 38(3): 58–64.
12. Pohjanvirta R., Viluksela M. Novel Aspects of Toxicity Mechanisms of Dioxins and Related Compounds. *Int. J. Mol. Sci.* 2020; 21(7): 2342. <https://doi.org/10.3390/ijms21072342>
13. Andersen M.E., Conolly R.B. Mechanistic modeling of rodent liver tumor promotion at low levels of exposure: an example related to dose-response relationships for 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin. *Hum Exp Toxicol.* 1998; 17(12): 683–90. <https://doi.org/10.1177/096032719801701208>
14. Tuomisto J., Pekkanen J., Kiviranta H., Tukiainen E., Vartiainen T., Viluksela M., Tuomisto J.T. Dioxin cancer risk — example of hormesis? *Dose Response.* 2006; 3(3): 332–41. <https://doi.org/10.2203/dose-response.003.03.004>
15. Lavrenov A.R., Ordzhonikidze K.G., Rumak V.S., Kim A.I., Umnova N.V. Assessment of the initial manifestations of the toxic process under the conditions of chronic action of small subtoxic doses of dioxins polluting the environment. *Ekologiya cheloveka.* 2022; 29(3): 57–66. <https://doi.org/10.17816/humeco77320>
16. Schwarz M., Appel K.E. Carcinogenic risks of dioxin: mechanistic considerations. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2005; 43(1): 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2005.05.008>
17. Rejano-Gordillo C., Ordiales-Talavera A., Nacarino-Palma A., Merino J.M., González-Rico F.J., Fernández-Salguero P.M. Aryl Hydrocarbon Receptor: From Homeostasis to Tumor Progression. *Front Cell Dev. Biol.* 2022; 10: 884004. <https://doi.org/10.3389/fcell.2022.884004>
18. Vandenberg L.N., Colborn T., Hayes T.B., Heindel J.J., Jacobs D.R. Jr, Lee D.H. et al. Hormones and endocrine-disrupting chemicals: low-dose effects and nonmonotonic dose responses. *Endocr. Rev.* 2012; 33(3): 378–455. <https://doi.org/10.1210/er.2011-1050>
19. Vandenberg L.N., Rayasam S.D.G., Axelrad D.A., Bennett D.H., Brown P., Carignan C.C., et al. Addressing systemic problems with exposure assessments to protect the public's health. *Environ. Health.* 2023; 21(1): 121. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00917-0>
20. Scaramozzino P., Battisti S., Desiato R., Tamba M., Fedrizzi G., Ubaldi A., Neri B., Abete M.C., Ru G. Application of a risk-based standardized animal biomonitoring approach to contaminated sites. *Environ Monit Assess.* 2019; 191(8): 526. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7653-3>
21. Kudryavtseva A.D., Shelepchikov A.A., Mir-Kadyrova E.Ya., Brodsky E.S. Changes in the profile of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans during bioaccumulation in free-range chicken eggs. *Izv. RAN. Ser. Biol.* 2023; 1: 93–102. <https://doi.org/10.31857/S1026347023010080>
22. Bashenina N.V. *European red vole.* M.: Nauka; 1981.
23. Bezel V.S. Fundamentals of environmental toxicology. In: Kurlandsky B.A., Filov V.A., eds. "General toxicology". M.: Meditsina. 2002: 545–586.
24. Olenov G.V., Grigorkina E.B. Functional patterns of vital activity of rodent populations in winter. *Ekologiya.* 2014; 6: 428–438. <https://doi.org/10.7868/S0367059714060109>
25. Roumak V.S., Popov V.S., Shelepchikov A.A., Osipova O.V., Umnova N.V. Seasonal peculiarities of PCDD/Fs levels in bank voles inhabiting sites in the vicinity of the landfill with municipal wastes (Moscow, Russia). *Environ. Sci. and Pollut. Res.* 2022; 29(35): 52796–52805. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19602-3>
26. Safe S. Polychlorinated biphenyls (PCBs), dibenzo-p-dioxins (PCDDs), dibenzofurans (PCDFs), and related compounds: environmental and mechanistic considerations

- which support the development of toxic equivalency factors (TEFs). *Crit. Rev. Toxicol.* 1990; 21(1): 51–88. <https://doi.org/10.3109/10408449009089873>
27. Malysheva A.G., Kozlova N.Yu., Rastiannikov E.G., Ermakov A.A., Shokhin V.A. Physico-chemical studies to assess the chemical safety and effectiveness of the use of a new landfill gas treatment system at a solid waste landfill. *Gigiena i sanitariya.* 2017; 96(11): 1103–8.
 28. Sofronov G.A., Rumak V.S., Lazarenko D.Yu. Ecotoxicokinetics and ecotoxicodynamics of toxic chemicals in the tropics. *Med. akadem. zhurnal.* 2010; 10(4): 183–190. <https://doi.org/10.17816/MAJ104183-190>
 29. Kudryavtseva A.D., Mir-Kadyrova E.Ya., Kalinkevich G.A., Brodsky E.S. The nature of soil pollution near solid waste disposal sites. *Pochvovedenie.* 2021; 8: 957–968. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21080128>
 30. Fedorov L.A. *Dioxins as an environmental hazard: retrospective and prospects.* M.: Nauka; 1993.
 31. Klyuev N.A., Kurlandsky B.A., Revich B.A., Filatov B.N. *Dioxins in Russia.* Moscow: UNEP; 2001.
 32. Revich B., Aksel E., Ushakova T., Ivanova I., Zhuchenko N., Klyuev N. Et al. Dioxin exposure and public health in Chapaevsk, Russia. *Chemosphere.* 2001; 43(4–7): 951–66. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(00\)00456-2](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(00)00456-2)
 33. Rhee J., Medgyesi D.N., Fisher J.A., White A.J., Sampson J.N., Sandler D.P. et al. Residential proximity to dioxin emissions and risk of breast cancer in the sister study cohort. *Environ. Res.* 2023; 222: 115297. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115297>
 34. VoPham T., Bertrand K.A., Jones R.R., Deziel N.C., DuPré N.C., James P. et al. Dioxin exposure and breast cancer risk in a prospective cohort study. *Environ. Res.* 2020; 186: 109516. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109516>
 35. Gileadi T.E., Swamy A.K., Hore Z., Horswell S., Ellegood J., Mohan C. et al. Effects of low-dose gestational TCDD exposure on behavior and on hippocampal neuron morphology and gene expression in mice. *Environ. Health Perspect.* 2021; 129: S7002. <https://doi.org/10.1289/EHP7352>
 36. Zablon H.A., Ko C.I., Puga A. Converging Roles of the Aryl Hydrocarbon Receptor in Early Embryonic Development, Maintenance of Stemness, and Tissue Repair. *Toxicol Sci.* 2021; 182(1): 1–9. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfab050>
 37. Grishanova A.Y., Perepechaeva M.L. Aryl Hydrocarbon Receptor in Oxidative Stress as a Double Agent and Its Biological and Therapeutic Significance. *Int. J. Mol. Sci.* 2022; 23(12): 6719. <https://doi.org/10.3390/ijms23126719>
 38. Lowery R.L., Latchney S.E., Peer R.P., Lamantia C.E., Lordy K.A., Opanashuk L.A. et al. Gestational and lactational exposure to 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin primes cortical microglia to tissue injury. *Brain Behav Immun.* 2022; 101: 288–303. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2022.01.013>
 39. Krasovsky G.N., Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A. *Extrapolation of toxicological data from animals to humans.* M.: Meditsina; 2009.