

Эколого-токсикологическая оценка воздействия компонентов ракетных топлив (диметилгидразина и авиационного керосина) на объекты окружающей среды

Г.А.Жариков, А.И.Марченко, О.А.Крайнова

ФГБУ «Государственный научный центр «Институт иммунологии» Федерального медико-биологического агентства, филиал «НИЦ токсикологии и гигиенической регламентации биопрепаратов», п. Большевик, Московская область, Российская Федерация

Проведение экологического мониторинга природных экосистем и промышленных территорий позволяет оценить степень воздействия деятельности человека на окружающую среду и прогнозировать ее способность к самовосстановлению. Традиционно для эколого-токсикологической оценки территорий применяют химико-аналитические методы. Они дают «моментальный снимок» картины загрязненности природных объектов. Однако они не могут показать состояние экосистемы в целом, охватить весь спектр загрязнителей и их взаимодействие друг с другом (эффект «коктейля»). Для многих химических веществ не разработаны гигиенические нормативы (предельно допустимые концентрации, пороговые дозы и т.п.), по которым можно оценить степень их воздействия на человека и окружающую среду. Одним из эффективных методов определения загрязненности и суммарной (интегральной) токсичности почвы и воды может быть биотестирование, основанное на использовании специальных линий животных-биотестов (дафний, рыб, дождевых червей), растений, микробных тест-систем.

Проведена оценка острой и хронической токсичности проб воды и почвы, отобранных с территорий возле аэропортов АО «Домодедово» и АО «Шереметьево» (Москва), АО «Салехард», на космодроме «Байконур» (Казахстан). По результатам лабораторных исследований высокую чувствительность и избирательность к компонентам ракетных топлив показали: дафнии; люминесцирующие микроорганизмы на приборе «Биотокс-10М»; клетки водоросли хлореллы; из семян растений – редис и овес; ферментативная активность почв (гидролазная, дегидрогеназная).

Ключевые слова: авиационный керосин, биотестирование, дафнии, диметилгидразин-гептил, дождевые черви, овес, острая и хроническая токсичность, почвенные микроорганизмы, прибор «Биотокс-10М», редис, рыбы, фитотоксичность, хлорелла

Для цитирования: Жариков Г.А., Марченко А.И., Крайнова О.А. Эколого-токсикологическая оценка воздействия компонентов ракетных топлив (диметилгидразина и авиационного керосина) на объекты окружающей среды. Бактериология. 2023; 8(3): 26–35. DOI: 10.20953/2500-1027-2023-3-26-35

Environmental and toxicological assessment of the impact of rocket fuel components (dimethylhydrazine and aviation kerosine) on environmental objects

G.A.Zharikov, A.I.Marchenko, O.A.Krainova

NRC Institute of Immunology FMBA of Russia – Branch RC Toxicology and Hygienic Regulation of Biopreparations, Serpukhov city district, Moscow region, Russian Federation

Conducting environmental monitoring of natural ecosystems and industrial areas makes it possible to assess the degree of impact of human activity on the environment and predict its ability to self-repair. Traditionally, chemical-analytical methods are used for the ecological and toxicological assessment of territories. They give, as it were, a "snapshot" of a picture of the contamination of natural objects. However, they cannot show the state of the ecosystem as a whole, study the entire range of pollutants and their interaction with each other (the "cocktail" effect), and for many chemicals no hygienic standards have been developed (maximum concentration limits, threshold doses, etc.), according to which can assess the degree of their impact on humans and the environment. One of the effective methods for determining the contamination and total (integral) toxicity of soil and water can be biotesting based on the use of special lines of animal bioassays (daphnia, fish, earthworms), plants, and microbial test systems.

Для корреспонденции:

Жариков Геннадий Алексеевич, доктор биологических наук, начальник отдела экологической биотехнологии Научно-исследовательского центра токсикологии и гигиенической регламентации биопрепаратов – филиал ФГБУ «Государственный научный центр «Институт иммунологии» Федерального медико-биологического агентства

Адрес: 142253, Московская область, г.о. Серпухов, п. Большевик, ул. Ленина, 102А

Телефон: (4967) 70-5238

Статья поступила 26.05.2023, принята к печати 29.09.2023

For correspondence:

Gennady A. Zharikov, PhD, DSc (Biological Sciences), Head of the Department of Ecological Biotechnology, Research Center for Toxicology and Hygienic Regulation of Biological Products – branch of the State Research Center «Institute of Immunology» of the Federal Medical and Biological Agency

Address: 102A Lenin str., Bolshhevik, Serpukhov city district, Moscow region, 142253, Russian Federation

Phone: (4967) 70-5238

The article was received 26.05.2023, accepted for publication 29.09.2023

The assessment of acute and chronic toxicity of water and soil samples taken from the territories of "Domodedovo" and "Sheremetyevo" airports (Moscow), Salekhard, at the Baikonur cosmodrome (Kazakhstan) was carried out. According to the results of laboratory studies, high sensitivity and selectivity to rocket fuel components were shown by: daphnia; luminescent microorganisms on the device "Biotoks-10M"; chlorella algae cells; from plant seeds – radishes and oats; soil enzymatic activity (hydrolase and dehydrogenase).

Key words: aviation kerosene, biotesting, daphnia, dimethylhydrazine – heptyl, earthworms, acute and chronic toxicity, soil microorganisms, Biotox-10M device, radish, fish, phytotoxicity

For citation: Zharikov G.A., Marchenko A.I., Krainova O.A. Environmental and toxicological assessment of the impact of rocket fuel components (dimethylhydrazine and aviation kerosene) on environmental objects. *Bacteriology*. 2023; 8(3): 26–35. (In Russian). DOI: 10.20953/2500-1027-2023-3-26-35

Огромное количество химических веществ, используемых в сельском хозяйстве в виде пестицидов и гербицидов, а также промышленные выбросы и аварии на предприятиях ракетно-космической отрасли приводят к значительному загрязнению окружающей среды [1]. Учитывая, что для современного промышленного производства человеком введено в оборот свыше 100 млн синтетических химических соединений, трудно оценить масштабы их воздействия на окружающую среду [2].

Проведение экологического мониторинга природных экосистем и промышленных территорий позволяет оценить степень воздействия деятельности человека на окружающую среду и прогнозировать ее способность к самовосстановлению [3]. С учетом степени загрязнения почвы и воды разрабатывают перечень мероприятий по их очистке, чтобы предотвратить заболевания у людей, работающих или проживающих на этой территории.

Традиционно для эколого-токсикологической оценки территорий применяют химико-аналитические методы. Они дают «моментальный снимок» картины загрязненности природных объектов конкретными токсикантами. Однако они не могут отразить состояние экосистемы в целом, оценить весь спектр загрязнителей и их взаимодействие друг с другом (эффект «коктейля»). Кроме того, большими недостатками этих методов являются их высокая трудоемкость, необходимость приобретения высокоточного, дорогостоящего аналитического оборудования. Следует также помнить, что выявление даже всего спектра загрязнителей окружающей среды зачастую не позволяет судить об их токсичности для теплокровных животных и человека. Для многих химических веществ не разработаны гигиенические нормативы (предельно допустимые концентрации, пороговые дозы и т.п.), по которым можно оценить степень их воздействия на человека и окружающую среду.

Одним из эффективных методов определения загрязненности и суммарной (интегральной) токсичности почвы и воды может быть биотестирование, основанное на использовании животных-биотестов (дафний, рыб, дождевых червей), растений, микробных тест-систем.

Большое значение метод биотестирования приобретает при оценке безопасности территорий, загрязненных компонентами ракетных топлив и других токсичных химических веществ. Биотестирование обеспечивает мониторинг экологической безопасности территорий, позволяет достаточно быстро и эффективно оценить интегральную токсичность почвы, а также показать, что продукты разложения поллютантов являются малотоксичными для окружающей среды. Основная цель эконоормирования – регламентация

антропогенных воздействий на агроландшафт до уровня, который обеспечивает его функционирование, самоподдержание, самовосстановление и самоочищение его элементов в процессе рационального природопользования [4].

Применение биотестирования имеет ряд преимуществ перед физико-химическим анализом, средствами которого часто не удается обнаружить неустойчивые соединения или определить ультрамалые концентрации экотоксикантов, оценить генотоксичность загрязнений. Довольно часты случаи, когда выполненный современными средствами химический анализ не показывает наличия токсикантов, тогда как использование биологических тест-объектов свидетельствует об их присутствии в исследуемой среде. Биотестирование дает возможность быстрого получения интегральной оценки токсичности, что делает весьма привлекательным его применение при скрининговых исследованиях.

В отличие от биоиндикаторов, одним из основных требований к которым является толерантность, тест-объекты обычно выбирают среди видов, наиболее чувствительных к загрязняющим компонентам. Каждый из этих объектов имеет свои преимущества и ограничения, и ни один из организмов не может служить универсальным «тестером», одинаково чувствительным ко всем загрязняющим веществам. Опыт токсикологического нормирования показывает, что при использовании этих видов биотестированием может быть охвачено более 80% подлежащих контролю загрязняющих воду химикатов. При наличии определенного количества вредных веществ в анализируемой пробе животные сигнализируют о токсичности изменением своего физиологического состояния или смертью [4].

По чувствительности и степени изученности среди других тест-объектов выделяют дафний (*Daphnia magna*, *Daphnia pulex*) несколько видов микроскопических одноклеточных зеленых водорослей из класса протококковых (*Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella* sp.) и 5–6 видов рыб, как аквариумных (гуппи, данио-рерио), так и мелких аборигенных (голец, голяян).

Для биотестирования почвенных образцов обычно применяют дождевых червей, олигохет (кольчатых червей) и личинок различных насекомых.

Использование прибора «Биотокс-10М» (Россия) с микробным препаратом «ЭкоЛюм» позволяет проводить экспресс-тестирование проб почвы и воды на токсичность в течение короткого времени, с высокой точностью. Снижение (затухание) яркости биолюминесценции бактерий, регистрируемое прибором, позволяет с высокой точностью определять токсичность проб воды и водных вытяжек из почвы.

Изучение функциональной (ферментативной) активности микробного сообщества позволяет оценить токсическое воздействие компонентов ракетных топлив на аборигенную (естественную) микрофлору почвы и прогнозировать ее биологическую активность. Обычно такую оценку проводят по дегидрогеназной, гидролазной и целлюлазной активностям.

Медико-санитарное сопровождение и санитарно-эпидемиологический надзор за работами на объектах по утилизации вооружений Минобороны России и ликвидации аварий на космодромах Российского космического агентства является составной частью работы ФМБА России. Разработка нормативно-правового и методического обеспечения работ по биомониторингу и биотестированию почв на территориях аэропортов и космодромов является важным условием их эколого-гигиенической безопасности.

Осуществление комплекса мероприятий по эколого-токсикологической оценке почвы, загрязненной компонентами ракетных топлив, позволит снизить риск возникновения профпатологий у работников, занятых на работах по ликвидации аварийных запусков и при утилизации военной ракетной техники.

Цель настоящей работы: оценить острую и хроническую токсичность проб почвы и воды, отобранных возле аэропортов и космодрома, на различных тест-объектах.

Материалы и методы

Для проведения исследований был организован и круглогодично поддерживается в активном состоянии музей лабораторных линий животных-биотестов: дафний, рыб гуппи и данио-рерио, дождевых червей. Они имеют относительно короткий жизненный цикл развития, легко культивируются в лабораторных условиях.

Отбор проб почвы и воды проводили на территории аэропортов АО «Домодедово» (стоки 1 и 5 возле взлетной полосы; дер. Кутузово и река Гнилуша; южнее аэропорта водоем Журавлиная заводь), АО «Шереметьево» (водовыпуск южный в Воскресенский ручей), АО «Салехард» (стоки 1, 2 и 3). Почву, загрязненную ракетным топливом (гептилом), отбирали на месте падения ракеты космического назначения «Протон-М», платформа 81, космодром «Байконур» (Казахстан).

Интегральную (суммарную) токсичность проб воды и экстрактов из почвы оценивали на лабораторной культуре пресноводного рачка *D. magna*. Биотестирование проводили в соответствии с нормативной документацией [5, 6]. Изучали острую (3-суточную) и хроническую (24-суточную) токсичность воды и водной вытяжки из почв.

Интегральную (суммарную) токсичность проб воды и экстрактов из почвы оценивали на лабораторных культурах рыб в соответствии с общепринятыми методическими рекомендациями [7–9]. Изучали острую (4-суточную) и хроническую (30-суточную) токсичность воды и водной вытяжки из почв.

Интегральную (суммарную) токсичность образцов почвы оценивали на лабораторной линии дождевых червей. Острую токсичность определяли в соответствии с ранее опубликованными рекомендациями [10–13].

Фитотоксичность почвы определяли по методу О.А.Берестецкого [14] согласно нормативной документации

[15] тестированием на семенах однодольных и двудольных растений. Наличие в исследуемой пробе фитотоксинов определяли по ростовым эффектам.

Фитотоксичность воды оценивали на лабораторной культуре хлореллы [16–17]. Основным показателем для оценки токсического действия служит угнетение роста количества клеток водорослей в опыте более чем на 20% по сравнению с контролем [18].

Определение интегральной токсичности воды и экстрактов из почвы проводили биолюминесцентным методом с использованием бактериального теста «ЭкоЛюм» на приборе «Биотокс-10М» [19, 20]. Критерием токсического действия считали снижение интенсивности биолюминесценции тест-объекта в исследуемой пробе более чем на 20% по сравнению с контрольной, не содержащей токсических веществ.

При определении дегидрогеназной активности почвы в качестве субстрата использовали бесцветный 2,3,5-трифенилтетразолий хлористый, который в анаэробных условиях в присутствии дегидрогеназы превращается в 2,3,5-трифенилформазан (ТФФ), имеющий красную окраску. Интенсивность окраски определяли фотокolorиметрически [21].

Общую гидролазную активность почвы определяли по реакции гидролиза флуоресцеин диацетата (ФДА) [22]. Оптическую плотность определяли колориметрированием при длине волны 490 нм.

Для определения целлюлозоразлагающей способности почвы применяли аппликационный метод: целлюлозный материал (фильтровальную бумагу) заложенный в почву, выдерживали в ней в течение 30 и 60 суток. По разнице в массе (%) фильтровальной бумаги до и после инкубации образцов судили об интенсивности целлюлолитической активности почвы [23].

Определение концентраций почвенных микроорганизмов проводили в соответствии с методикой [24], используя высев на чашки Петри с плотной питательной средой ферментативного гидролизата рыбной муки.

При работе с почвенными микроорганизмами соблюдали санитарно-эпидемиологические требования [25].

Статистическую обработку результатов экспериментов проводили с использованием пакетов прикладных программ Excel 7.0 и Statistica 10.0. Экспериментальные данные представляли в виде средних арифметических величин и их доверительных интервалов, рассчитанных с вероятностью 95%.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Изучение чувствительности различных тест-животных и растений к компонентам ракетных топлив и нефтепродуктам

Проведена предварительная оценка чувствительности различных тест-животных (дафний, рыб гуппи и данио-рерио, дождевых червей), однодольных и двудольных растений (редиса, гороха, огурцов, овса, пшеницы и ржи), хлореллы, почвенных микроорганизмов, люминесцентного микробного препарата «ЭкоЛюм» на приборе «Биотокс-10М» для различных загрязнителей. В экспериментах по биотестированию использовали компоненты ракетных топлив: диметилгидразин (гептил), формалин (имитатор гептила), авиационный керосин, а также возможные сопутствующие загрязни-

Таблица 1. Сравнительная оценка чувствительности тест-животных к различным загрязнителям, ЛД₅₀ в мг/кг
Table 1. Comparative assessment of the sensitivity of test animals to various pollutants, LD₅₀ in mg/kg

Тест-объекты / Test objects	Авиакеросин / Avia-kerosene	Ацетон / Acetone	Бензин / Petrol	Гептил / Heptyl	Дизельное топливо / Diesel fuel	Мазут / Fuel oil	Формалин / Formalin	Четыреххлористый углерод / Carbon tetrachloride	Оценка чувствительности в баллах / Sensitivity assessment in points
Дафнии / Daphnia	78	312	312	0,25	78	312	156	78	5
Дождевые черви / Earthworms	4100	20000	12500	-	7500	11 500	3000	160 000	3
Рыбы гуппи / Guppy fish	120	3,8	2	-	нет реакции / no reaction	нет реакции / no reaction	0,5	1	4
Рыбы данио-рерио / Zebrafish	120	1	-	-	нет реакции / no reaction	нет реакции / no reaction	0,17	-	4
Прибор «Биотокс-10М» на воде / Device "Biotox-10M" on water	218	290	302	-	250	212	13	13	5
Прибор «Биотокс-10М» на почве / Device "Biotox-10M" on soil	1640	2045	2321	-	1668	2122	752	879	3
Почвенные микроорганизмы / Soil microorganisms	10	10	10	-	10	10	10	10	нет индивидуальной реакции / no individual reaction

Таблица 2. Сравнительная оценка чувствительности семян растений к различным загрязнителям, ЕС₅₀ в г/кг почвы
Table 2. Comparative assessment of the sensitivity of plant seeds to various pollutants, EC₅₀ in g/kg of soil

Тест-объекты / Test objects	Авиакеросин / Avia-kerosene	Ацетон / Acetone	Бензин / Petrol	Гептил / Heptyl	Дизельное топливо / Diesel fuel	Мазут / Fuel oil	Формалин / Formalin	Четыреххлористый углерод / Carbon tetrachloride	Оценка чувствительности в баллах / Sensitivity assessment in points
Редис / Radish	77–110	35–5	20–25	?	45–68	46–72	3–5	615–800	5
Горох / Peas	1400–11590	57–70	2,2	291	81–92	116–320	3,6–14,8	88–159	3
Огурцы / Cucumbers	144	?	54	-	65–77	?	3,2–3,7	92	2
Овес / Oat	29–36	30–66	16–25	0,07	18–22	7–10	2,4–3,1	239–337	5
Пшеница / Wheat	?	?	?	?	46–47	-	-	-	1
Рожь / Rye	?	46–77	63–71	-	45	33–45	2,3–2,8	?	2
Хлорелла / Chlorella	218	290	301	-	250	212	13	13	4

* Статистически недостоверные результаты. / * Statistically unreliable results.

тели на космодромах и аэродромах: ацетон, бензин, дизельное топливо, мазут и четыреххлористый углерод.

В связи с высокой летучестью и токсичностью диметилгидразина большую часть экспериментов проводили на продукте его первичного разложения в почве и воде – формалине. Это было также методически правильным, т.к. в окружающей среде диметилгидразин из-за своей химической активности и высокой нестабильности быстро разлагается на ряд продуктов окисления, одним из которых является формалин. Результаты биотестирования на тест-животных представлены в табл. 1.

Результаты оценки фитотоксичности почвы на различных семенах растений представлены в табл. 2.

Таким образом, по результатам предварительных лабораторных исследований, для биотестирования воды и почвы, загрязненных этой группой химических соединений, показали высокую чувствительность и избирательность дафнии и

дождевые черви; люминесцирующие микроорганизмы на приборе «Биотокс-10М»; хлорелла; из семян растений – редис и овес. Эти тест-объекты являются наиболее предпочтительными для проведения лабораторных исследований при мониторинге загрязненности территорий космодромов и аэропортов.

2. Изучение токсичности почвы и воды на территории аэропортов методами биотестирования

Изучение токсичности проб почвы и воды, отобранных на территориях аэропортов и космодрома, проводили с использованием различных животных-биотестов, растений, хлореллы, на приборе «Биотокс-10М», изучали ферментативную активность почвы, проводили химический анализ на содержание этиленгликоля, авиационного керосина, гептила. Результаты исследований представлены в сводных таблицах 3–13.

Таблица 3. Анализ проб воды из аэропорта АО «Домодедово» / Table 3. Analysis of water samples from Domodedovo airport

Место отбора / Sampling location	Химический анализ / Chemical analysis		Биотокс. индекс токсичности в % (M ± σ), токсичность / Biotox. toxicity index in %, (M + σ), toxicity	Дафнии / Daphnia	Рыбы гуппи/Данио Guppy fish/Danio	Содержание микрофлоры, КОЕ/мл / Microflora content, CFU/ml	Хлорелла / Chlorella
	Содержание этиленгликоля, мг/л воды / Ethylene glycol content, mg/l water	Содержание нефтепродуктов, мг/л воды / Oil content, mg/l water					
Сток 1, ЭД-40 П1 / Drain 1, ED-40 P1	0,04	27,3	26,1 ± 1,8, слабо токсично / slightly toxic	100%, токсично / toxic	0 / 0, не токсично / non-toxic	1,3 × 10 ⁶	40,6, токсично / toxic
Сток 1, ЭД-43 Д1 / Drain 1, ED-43 D1	0,9	5,9	42,7 ± 0,6, токсично / toxic	100%, токсично / toxic	0 / 0, не токсично / non-toxic	3,8 × 10 ⁵	41,1, токсично / toxic
Сток 5, ЭД-41 Д5 / Drain 5, ED-41 D5	0,08	24,6	43,1 ± 2,4, токсично / toxic	84%, токсично / toxic	0 / 0, не токсично / non-toxic	2,8 × 10 ⁴	42,3, токсично / toxic
Сток 5, ЭД-42 П5 / Drain 5, ED-42 P5	0,03	46,9	31,5 ± 1,0, токсично / toxic	84%, токсично / toxic	0 / 0, не токсично / non-toxic	5,2 × 10 ⁴	36,6, токсично / toxic
Дер. Кутузово, река Гнилуша / Kutuzovo village, Gnilusha river	0,30	0,476	31,9 ± 1,8, токсично / toxic	80%, токсично / toxic	0 / 0, не токсично / non-toxic	3,1 × 10 ⁴	36,00, токсично / toxic
Южнее аэропорта, водоем Журавлиная заводь / South of the airport, the pond Crane creek	0,11	1,70	72,7 ± 0,4, сильно токсично / highly toxic	80%, токсично / toxic	0 / 0, не токсично / non-toxic	1,9 × 10 ⁵	53,3, сильно токсично / highly toxic

Таблица 4. Анализ проб почвы из аэропорта АО «Домодедово» / Table 4. Analysis of soil samples from Domodedovo airport

Место отбора / Sampling location	Химический анализ / Chemical analysis		Биотокс. индекс токсичности в % (M ± σ), токсичность / Biotox. toxicity index in %, (M + σ), toxicity	Дафнии / Daphnia	Содержание микрофлоры, КОЕ/г / Microflora content, CFU/g	Фитотоксичность / Phytotoxicity	Дождевые черви / Earthworms
	Содержание этиленгликоля, мг/кг почвы / Ethylene glycol level, mg/l of water	Содержание нефтепродуктов, мг/кг почвы / Level of petroleum products, mg/l of water					
Сток 1, ЭД-39 Д1 / Drain 1, ED-39 D1	0,09	1,39	47,8 ± 2,5, токсично / toxic	20%, не токсично / non-toxic	1,1 × 10	51,1 / 46,4	3%, не токсично / non-toxic
Сток 1, ЭД-40 П1 / Drain 1, ED-40 P1	0,06	1,95	22,8 ± 1,3, не токсично / non-toxic	0%, не токсично / non-toxic	1,9 × 10 ⁷	24,7 / 24,2	3%, не токсично / non-toxic
Сток 5, ЭД-42 П5 / Drain 5, ED-42 P5	0,09	0,31	20,0 ± 0,9, слабо токсично / mildly toxic	0%, не токсично / non-toxic	2,1 × 10 ⁷	6,4 / 24,2	0%, не токсично / non-toxic
Сток 5, ЭД-47 Д5 / Drain 5, ED-47 D5	0,09	0,60	56,7 ± 1,8, сильно токсично / highly toxic	20%, не токсично / non-toxic	1,9 × 10 ⁴	14,2 / 37,3	10%, не токсично / non-toxic
Территория аэропорта / Airport territory	0,06	0,27	23,6 ± 0,4, токсично / toxic	0, не токсично / non-toxic	4,2 × 10 ⁶	0,63 / 15,7	0, не токсично / non-toxic
Южнее аэропорта, берег водоема Журавлиная заводь / South of the airport, the shore of the reservoir Crane creek	1,32	0,42	56,5 ± 0,6, токсично / toxic	60, токсично / toxic	5,1 × 10 ⁵	0,52 / 14,1	0, не токсично / non-toxic

Таблица 5. Ферментативная активность почвы с территории аэропорта АО «Домодедово»
 Table. 5. Enzymatic activity of soil from the territory of Domodedovo Airport

Место отбора / Sampling location	Дегидрогеназная активность, мг ТФФ / 10 г / Dehydrogenase activity mg TFF / 10 g	Гидролазная активность почвы, мг ФДА г ⁻¹ ч ⁻¹ / Hydrolyase activity of the soil, mg FDA g ⁻¹ h ⁻¹	Интенсивность разложения целлюлозы в почве, % / The intensity of cellulose decomposition in soil, %
Домодедово, южнее аэропорта, берег водоема Журавлиная заводь / Domodedovo, south of the airport, the shore of the reservoir Crane creek	15,6 ± 0,7	12,6 ± 0,8	0 суток / 0 nights 14 суток / 14 nights 30 суток / 30 nights 0,0 12,2 ± 0,5 34,2 ± 1,1
Территория аэропорта / Airport territory	14,6 ± 0,4	12,3 ± 0,7	0,0 10,7 ± 0,3 36,3 ± 3,0
Территория аэропорта / Airport territory	14,5 ± 0,5	12,3 ± 0,3	0,0 11,4 ± 0,4 35,7 ± 1,1
Почва чистая (контроль) / The soil is clean (control)	32,7 ± 1,0	29,7 ± 1,4	- - -

Таблица 6. Анализ проб воды из аэропорта «Шереметьево»
 Table. 6. Analysis of water samples from Sheremetyevo Airport

Место отбора / Sampling location	Химический анализ / Chemical analysis	Блютокс, индекс токсичности в % (M ± σ), Биотокс, токсичность index in %, (M + σ), toxicity	Дافнии / Daphnia	Рыбы гуппи / данио рерио / Guppy fish/Danio	Численность аборигенной микрофлоры, КОЕ/мл* / Number of native microflora, CFU/ml*	Хлорелла / Chlorella	
Водовыпуск южный / Southern water outlet	0,35	2,023	32,6 ± 9,6, токсично / toxic	40, не токсично / non-toxic	0, не токсично / non-toxic	9,2 × 10 ⁴ , токсично / toxic	30,3, токсично / toxic
Водовыпуск южный / Southern water outlet	2,8	1,834	26,2 ± 0,9, слабо токсично / mildly toxic	0, не токсично / non-toxic	0, не токсично / non-toxic	4,0 × 10 ³ , токсично / toxic	22,2, токсично / toxic

Таблица 7. Анализ проб почвы из аэропорта «Шереметьево»
 Table. 7. Analysis of soil samples from Sheremetyevo Airport

Место отбора / Sampling location	Химический анализ / Chemical analysis	Биотокс, индекс токсичности в % (M ± σ), Биотокс, токсичность index in %, (M + σ), toxicity	Дافнии / Daphnia	Содержание микрофлоры, КОЕ/г / Microflora content, CFU/g	Фитотоксичность / Phytotoxicity	Дождевые черви / Earthworms	
Водовыпуск южный / Southern water outlet	0,108	1,418	37,5 ± 1,7, токсично / toxic	23, не токсично / non-toxic	1,8 × 10 ⁶	17,8 / 9,0	0, не токсично / non-toxic
Водовыпуск южный / Southern water outlet	0,124	1,195	32,9 ± 1,4, токсично / toxic	0, не токсично / non-toxic	3,5 × 10 ⁵	11,5 / 21,0	0, не токсично / non-toxic

Таблица 8. Ферментативная активность образцов почвы с прилегающей территории к аэропорту АО «Шереметьево»
Table. 8. Enzymatic activity of soil samples from the adjacent territory to the airport of Sheremetyevo JSC

Место отбора / Sampling location	Дегидрогеназная активность, мг ТФФ /10 г / Dehydrogenase activity mg TFF /10 g	Гидролазная активность почвы, мг ФДА Г ⁻¹ ч ⁻¹ / Hydrolyase activity of the soil, mg FDA g ⁻¹ h ⁻¹	Интенсивность разложения целлюлозы в почве, % / The intensity of cellulose decomposition in soil, %
Водовыпуск южный / Southern water outlet	19,2 ± 1,0	28,6 ± 0,7	0,0
Водовыпуск южный / Southern water outlet	14,2 ± 0,4	15,1 ± 0,4	20,3 ± 0,6
Почва чистая (контроль) / Clean soil (control)	32,4 ± 0,8	35,2 ± 1,0	0,0
			14 суток / 14 days
			30 суток / 30 days
			44,4 ± 1,3
			39,3 ± 1,1
			68,8 ± 2,0

Таблица 9. Анализ воды на территории аэропорта Салехарда
Table. 9. Water analysis on the territory of Salekhard airport

Место отбора / Sampling location	Химический анализ / Chemical analysis	Биотокс, индекс токсичности в % (M ± σ), токсичность / Biotox, toxicity index in %, toxicity (M + σ), toxicity	Дарнии, острый опыт, гибель в %, токсичность / Daphnia, Acute experience, mortality in %, toxicity	Численность аборигенной микрофлоры, КОЕ/мл / Number of native microflora, CFU/ml*	Хлорелла / Chlorocella
Сток 1, до биофильтров / Drain 1, before biofilters	Содержание этиленгликоля, мг/л воды / Ethylene glycol content, mg/l of water	0,73	60*	1,3 × 10 ³	Острый опыт, отклонение от контроля, % / Acute experience, deviation from control, %, toxicity
Сток 2, до биофильтров / Drain 2, before biofilters	Содержание нефтепродуктов, мг/дм ³ / Content of petroleum products, mg/dm ³	0,80	60*	9,7 × 10 ³	Хронический опыт, отклонение от контроля, % / Chronic experience, deviation from control, %, toxicity
Сток 3, до биофильтров / Drain 3, before biofilters	Содержание нефтепродуктов, г/кг почвы / The content of petroleum products, g/kg of soil	0,71	60*	1,4 × 10 ⁴	Острый опыт, отклонение от контроля, % / Acute experience, deviation from control, %, toxicity

* усредненная проба из 3 стоков из-за малого количества воды.
* average sample from 3 drains due to small amount of water.

Таблица 10. Анализ проб почвы на территории аэропорта АО «Салехард»
Table. 10. Analysis of soil samples on the territory of the airport JSC "Salekhard"

Место отбора / Sampling location	Химический анализ / Chemical analysis	Биотокс, индекс токсичности в % (M ± σ), токсичность / Biotox, toxicity index in %, toxicity (M + σ), toxicity	Дарнии, острый опыт, гибель в %, токсичность / Daphnia, Acute experience, death in %, toxicity	Содержание микрофлоры, КОЕ/г / Microflora content, CFU/g	Фитотоксичность / Phytotoxicity	Дождевые черви / Earthworms
Сток 1, до биофильтров / Drain 1, before biofilters	Содержание этиленгликоля, г/кг почвы / Ethylene glycol content, g/kg of soil	0,73	70, токсично / toxic	2,0 × 10 ³	Редис, индекс фитотоксичности по массе/по длине, % / Radish, Phytotoxicity Index by weight/length, %	Острый опыт, гибель в %, токсичность / Acute experience, death in %, toxicity
Сток 2, до биофильтров / Drain 2, before biofilters	Содержание нефтепродуктов, г/кг почвы / The content of petroleum products, g/kg of soil	0,80	60, токсично / toxic	1,3 × 10 ⁶	Овес, индекс фитотоксичности по массе / по длине, % / Oat, Phytotoxicity Index by weight / length, %	хронический опыт, гибель в %, токсичность / chronic experience, death in %, toxicity
Сток 3, до биофильтров / Drain 3, before biofilters	Содержание этиленгликоля, г/кг почвы / Ethylene glycol content, g/kg of soil	0,71	100, токсично / toxic	2,6 × 10 ⁶	55,1 / 54,8*	не токсично / non-toxic

* усредненная проба из 3 стоков из-за малого количества почвы.
* average sample from 3 drains due to small amount of water.

Таблица 11. Ферментативная активность почвы на территории аэропорта АО «Салехард»
Table. 11. Enzymatic activity of soil on the territory of the airport JSC "Salekhard"

Место отбора / Sampling location	Дегидрогеназная активность, мг ТДФ /10 г / Dehydrogenase activity mg TPP /10 g	Гидролазная активность почвы, мг ФДА г ⁻¹ ч ⁻¹ / Soil hydrolase activity, mg FDA g ⁻¹ h ⁻¹	Интенсивность разложения целлюлозы в почве, % / Intensity of cellulose decomposition in the soil, %		
1 сутки / 1 day	10,3 ± 0,3	8,3 ± 0,4	0 сутки / 0 days	14 суток / 14 days	30 суток / 30 days
Сток 1, до биофильтров / Drain 1, before biofilters	11,5 ± 0,5	9,8 ± 0,3	0,0	9,2 ± 0,6	24,8 ± 0,5
Сток 2, до биофильтров / Drain 2, before biofilters	12,3 ± 0,5	13,3 ± 1,0	0,0	8,8 ± 0,3	19,6 ± 1,0
Сток 3, до биофильтров / Drain 3, before biofilters	42,5 ± 1,2	40,1 ± 1,4	0,0	12,7 ± 0,9	28,7 ± 1,3
Почва чистая (контроль) / Soil clean (control)			0,0	36,5 ± 1,0	81,4 ± 0,8

Таблица 12. Анализ проб почвы с космодрома «Байконур»
Table. 12. Analysis of soil samples from the Baikonur cosmodrome

Место отбора / Sampling location	Содержание гербицида, мг/кг почвы / Herbicide content, mg/kg of soil	Биотокс, индекс токсичности в % (M ± σ), токсичность / Biotox, toxicity index in %, toxicity (M + σ)	Дафнии острый опыт, гибель в %, токсичность / Daphnia Acute experience, death in %, toxicity	Содержание микрофлоры, КОЕ/г / Microflora content, CFU/g	Фитотоксичность / Phytotoxicity	Дождевые черви / Earthworms			
Почва с космодрома / Soil from the cosmodrome	40	67,7 ± 1,5 высоко токсично / highly toxic	100, высоко токсично / highly toxic	(4,54 ± 0,11) × 10 ⁵	Редис, индекс фитотоксичности по массе / по длине, % / Radish Phytotoxicity index by weight / length, %	Овес, индекс фитотоксичности по массе / по длине, % / Oat Phytotoxicity index by weight / length, %	острый опыт, гибель в %, токсичность / acute experience, death in %, toxicity	Дождевые черви / Earthworms	хронический опыт, гибель в %, токсичность / chronic experience, death in %, toxicity
Почва чистая (контроль) / Soil clean (control)	-	-	0, не токсично / non-toxic	(1,82 ± 0,22) × 10 ⁷	41,2 / 66,5	19,7 / 43,5	0, не токсично / non-toxic	0, не токсично / non-toxic	0, не токсично / non-toxic

Таблица 13. Ферментативная активность почвы с космодрома «Байконур»
Table. 13. Enzymatic activity of soil from the Baikonur cosmodrome

Место отбора / Sampling location	Дегидрогеназная активность, мг ТДФ /10 г / Dehydrogenase activity mg TPP /10 g	Гидролазная активность почвы, мг ФДА г ⁻¹ ч ⁻¹ / Hydrolase activity of the soil, mg FDA g ⁻¹ h ⁻¹	Интенсивность разложения целлюлозы в почве, % / The intensity of cellulose decomposition in soil, %		
1 сутки / 1 day	6,6 ± 0,3	4,2 ± 0,4	0 сутки / 0 days	14 суток / 14 days	30 суток / 30 days
Почва с космодрома / Soil from the cosmodrome	40,3 ± 0,9	36,1 ± 0,8	0,0	15,7 ± 0,7	28,6 ± 5,4
Почва чистая (контроль) / The soil is clean (control)			0,0	44,1 ± 0,7	63,6 ± 4,8

Биотестирование грунтовых вод из дренажной системы аэропортов АО «Домодедово» и АО «Шереметьево», а также прилегающих территорий выполнили на дафниях, рыбах гуппи, хлорелле. Провели химический анализ содержания этиленгликоля и нефтепродуктов, а также оценили содержание микрофлоры (табл. 3, 4).

Одним из основных методов изучения функциональной активности микробного сообщества почвы является оценка ферментативной активности почвы. Для этих целей используют триаду основополагающих ферментов почвы, показывающих скорость разложения белков, углеводов и целлюлозы (остатков стеблей растений). Это гидролазная, дегидрогеназная и целлюлазная активности ферментов почвы. Результаты исследований представлены в табл. 5.

Заключение

Проведена оценка острой и хронической токсичности проб воды и почвы, отобранных с территорий аэропортов АО «Домодедово» и АО «Шереметьево» (Моск-ва), АО «Салехард», с космодрома «Байконур» (Казахстан). Тестирование проводили на лабораторных линиях дафний, рыб гуппи и данио-рерио, дождевых червей, на семенах однодольных (овес) и двудольных растений (редис), клетках водорослей хлореллы, на приборе «Биотокс-10М» с люминесцентным микробным препаратом «ЭкоЛюм». Также изучали ферментативную активность почвы (гидролазную, дегидрогеназную и целлюлазную), численность аборигенных микроорганизмов.

Биотестирование образцов с территорий аэропортов и прилегающей зоны показало, что загрязнения воды и почвы этиленгликолем и авиационным керосином близки к допустимым значениям и не представляют угрозы здоровью пассажиров и обслуживающего персонала.

Биотестирование почвы на территории космодрома с места падения «Протон-М», платформа 81, показало высокую остаточную токсичность для биотестов, фитотоксичность, значительное угнетение почвенной микрофлоры, снижение ферментативной активности. Длительное нахождение на загрязненной гептилом территории без защитной одежды и фильтрующих респираторов представляет опасность для здоровья людей.

Результаты лабораторных исследований по биотестированию воды и почвы с территорий аэропортов и космодрома показали высокую чувствительность и избирательность следующих тест-объектов: дафнии, люминесцирующие микроорганизмы на приборе «Биотокс-10М», водоросль хлорелла, семена растений.

Высокочувствительными к загрязнению гептилом оказались показатель численности аборигенных микроорганизмов и ферментативная активность почв (гидролазная, дегидрогеназная). Эти тест-объекты являются также наиболее удобными для проведения исследований вследствие простоты культивирования в лабораторных условиях, удобства применения при мониторинге загрязненности территорий космодромов и аэропортов.

Биотестирование можно рекомендовать для оценки общей (интегральной) токсичности и загрязненности территорий аэропортов и космодромов, а также для экологического биомониторинга.

Информация о финансировании

Исследования выполнялись по государственному заказу Федерального медико-биологического агентства России №22.009.21.800.

Financial support

The studies were carried out under the state order of the Federal Medical and Biological Agency of Russia No 22.009.21.800.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Conflict of interest

Authors declare no conflict of interest requiring disclosure in this article.

Литература

1. Вредные химические вещества в ракетно-космической отрасли. Справочник (Под общей редакцией Уйба ВВ). ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России, 2011.
2. Кузнецов АЕ, Градова НБ. Научные основы эколобиотехнологии: Учеб. пособие для студентов. М.: Мир, 2006.
3. Кузнецов АЕ. Прикладная эколобиотехнология: Учеб. пособие. М.: Лаборатория знаний Бином. 2010;(1).
4. Соколов МС, Дядищев НР, Жариков ГА, Подгорный ЛИ. Концептуальное обоснование эколого-гигиенического нормирования экосистем. Токсикологический вестник. 2001;3:31-35.
5. ФР.1.39.2001.00283 «Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодovitости дафний». Акварос, 2001.
6. ПНД Ф Т 14.1:2:3.4.12-06/Т 16.1:2:2:2:3:3.9-06 (Издание 2021 г.) «Методика определения токсичности водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов, питьевой, сточной и природной воды по смертности тест-объекта *Daphnia magna* Straus». М., 2021.
7. Методические рекомендации «По применению методов биотестирования для оценки качества воды в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения» МР № ЦОС ПВ 005-95. М., 1995.
8. Методическое руководство по биотестированию воды РД 118-02-09. М., 2009.
9. Стандарт ИСО 734. Лихачев СВ, Пименова ЕВ, Жакова СН. Биотестирование в экологическом мониторинге. Учебно-методическое пособие. Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2020.
10. Фомин ГС, Фомин АГ. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам. Справочник. М.: Протектор, 2001.
11. Стандарт ИСО 11268-1:1993 «Качество почвы. Воздействие загрязняющих веществ на земляных червей (*Eisenia fetida*). М., 2011.
12. Стандарт OECD #207 «Earthworm Acute Toxicity Test». 1984.
13. Стандарт EPA OPPTS 850.6200 «Earthworm Subchronic Toxicity Test». Public Draft. 1996.
14. Берестецкий ОА. Методы определения токсичности почвы. Микробиологические и биохимические исследования почв. Киев: Урожай, 1971.
15. ГОСТ Р ИСО 22030-2009 Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. 2019.
16. ФР.1.39.2001.00284 Жмур НС, Орлова ТЛ. «Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей»: Федер. реестр ФР.1.39.2001.00284. М.: Акварос, 2001.

17. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04/ Т 16.1:2:2:2:3:3.7-04 (Издание 2021 г.) «Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, донных отложений, осадков сточных вод, отходов производства и потребления». М., 2021.
18. ГОСТ Р 54496–2011 (ИСО 8692:2004) ВОДА. Определение токсичности с использованием зеленых пресноводных одноклеточных водорослей. М.: Стандартинформ, 2012.
19. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04 Т 16.1:2:3:3.8-04 «Методика определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению интенсивности бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм». М., 2010.
20. Методические рекомендации №01.019.07 «Определение интегральной токсичности почв с помощью биотеста "Эколюм"». М., 2011.
21. Якушев АВ, Бызова БА. Гидролазная активность как показатель состояния микробного сообщества вермикомпоста. Вестник Моск. ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2009;2:41-46.
22. Методы почвенной микробиологии и биохимии: учеб. пособие под ред. Звягинцева ДГ. М.: Изд-во МГУ, 1991.
23. Практикум по агрохимии: учеб. пособие. 2 изд., перераб. и доп., под ред. академика РАСХН Минеева ВГ. М.: Изд-во МГУ, 2001.
24. ПНД ФТ 16.1.17-10 «Методика выполнения измерений интенсивности потребления тест-субстратов микробными сообществами почв и почвоподобных объектов фотометрическим методом». М., 2011.
25. СанПиН 3.3686-21. Санитарные правила и нормы Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней.
11. Standart ISO 11268-1:1993 «Kachestvo pochvy. Vozdeistvie zagryaznyayushchikh veshchestv na zemlyanykh chervei (*Eisenia fetida*). М., 2011. (In Russian).
12. Standart OECD #207 «Earthworm Acute Toxicity Test». 1984. (In Russian).
13. Standart EPA OPPTS 850.6200 «Earthworm Subchronic Toxicity Test». Public Draft, 1996. (In Russian).
14. Berestetsky OA. Metody opredeleniya toksichnosti pochvy. Mikrobiologicheskie i biokhimicheskie issledovaniya pochv. Kiev: Urozhai. (In Russian).
15. GOST R ISO 22030-2009 Biologicheskie metody. Khronicheskaya fitotoksichnost' v otnoshenii vysshikh rastenii. 2019. (In Russian).
16. FR.1.39.2001.00284 Zhmur NS, Orlova TL. «Metodika opredeleniya toksichnosti vod, vodnykh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnykh vod i otkhodov po izmeneniyu urovnya fluorestsentsii khlorofilla i chislennosti kletok vodoroslei»: Feder. reestr FR.1.39.2001.00284. М.: Akvaros, 2001. (In Russian).
17. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04/ Т 16.1:2:2:2:3:3.7-04 (Izdanie 2021 g.) «Metodika izmerenii opticheskoi plotnosti kul'tury vodorosli khlorella (*Chlorella vulgaris* Beijer) dlya opredeleniya toksichnosti pit'evykh, presnykh prirodnykh i stochnykh vod, vodnykh vytyazhek iz gruntov, pochv, donnykh otlozhenii, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya». М., 2021. (In Russian).
18. GOST R 54496–2011 (ISO 8692:2004) VODA. Opredelenie toksichnosti s ispol'zovaniem zelenykh presnovodnykh odnokletochnykh vodoroslei. М.: Standartinform, 2012. (In Russian).
19. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04 Т 16.1:2:3:3.8-04 (izdanie 2010 g.) «Metodika opredeleniya integral'noi toksichnosti poverkhnostnykh, v tom chisle morskikh, gruntovykh, pit'evykh, stochnykh vod vodnykh ekstraktov pochv, otkhodov, osadkov stochnykh vod po izmeneniyu intensivnosti bakterial'noi biolyuminesentsii test-sistemoi «Ekolyum». М., 2010. (In Russian).
20. Metodicheskie rekomendatsii №01.019.07 «Opredelenie integral'noi toksichnosti pochv s pomoshch'yu biotesta "Ekolyum"». М., 2011. (In Russian).
21. Yakushev AV, Byzova BA. Gidrolaznaya aktivnost' kak pokazatel' sostoyaniya mikrobного soobshchestva vermikomпоста. Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 17: Pochvovedenie. 2009;2:41-46. (In Russian).
22. Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii: Ucheb. posobie pod red. Zvyagintseva DG. М.: Izd-vo MGU, 1991. (In Russian).
23. Praktikum po agrokhimii: Ucheb. posobie. 2 izd., pererab. i dop., pod red. akademika RASKhN Mineeva VG. М.: Izd-vo MGU, 2001. (In Russian).
24. ПНД ФТ 16.1.17-10 «Metodika vypolneniya izmerenii intensivnosti potrebleniya test-substratov mikrobnyimi soobshchestvami pochv i pochvopodobnykh ob'ektov fotometricheskim metodom». М., 2011. (In Russian).
25. SanPIN 3.3686-21. Sanitarnye pravila i normy Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya po profilaktike infektsionnykh boleznei. (In Russian).

References

1. Vrednye khimicheskie veshchestva v raketno-kosmicheskoi otrasli. Spravochnik (Pod obshchei redaktsiei Uiba VV). FMBTs im. A.I.Burnazyana FMBA Rossii, 2011. (In Russian).
2. Kuznetsov AE, Gradova NB. Nauchnye osnovy ekobiotekhnologii: Ucheb. posobie dlya studentov. М.: Mir, 2006. (In Russian).
3. Kuznetsov AE. Prikladnaya ekobiotekhnologiya: Ucheb. posobie. М.: Laboratoriya znaniy Binom, 2010;(1). (In Russian).
4. Sokolov MS, Dyadishchev NR, Zharikov GA, Podgorny LI. Kontseptual'noe obosnovanie ekologo-gigienicheskogo normirovaniya ekosistem. Toxicological Review (Toksikologicheskiy vestnik). 2001;3:31-35. (In Russian).
5. FR.1.39.2001.00283 «Metodika opredeleniya toksichnosti vody i vodnykh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov po smertnosti i izmeneniyu plodovitosti dafnii». Akvaros, 2001. (In Russian).
6. ПНД ФТ 14.1:2:3:4.12-06/Т 16.1:2:2:2:3:3.9-06 (Izdanie 2021 goda) «Metodika opredeleniya toksichnosti vodnykh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnykh vod i otkhodov, pit'evoi, stochnoi i prirodnoi vody po smertnosti test-ob'ekta *Daphnia magna* Straus». М., 2021. (In Russian).
7. Metodicheskie rekomendatsii «Po primeneniyu metodov biotestirovaniya dlya otsenki kachestva vody v sistemakh khozyaistvenno-pit'evogo vodosnabzheniya» MR № TsOS PV 005-95. М., 1995. (In Russian).
8. Metodicheskoe rukovodstvo po biotestirovaniyu vody RD 118–02–09. М., 2009. (In Russian).
9. Standart ISO 734. Likhachev SV, Pimenova EV, Zhakova SN. Biotestirovanie v ekologicheskom monitoringe. Uchebno-metodicheskoe posobie. Perm': IPTs "Prokrost", 2020. (In Russian).
10. Fomin GS, Fomin AG. Pochva. Kontrol' kachestva i ekologicheskoi bezopasnosti po mezhdunarodnym standartam. Spravochnik. М.: Protektor, 2001. (In Russian).
11. Marchenko Anatoly Ivanovich, kandidat biologicheskikh nauk, nachalnik laboratorii toksikologicheskikh metodov *in vitro* otдела ekologicheskoy biotekhnologii, Nauchno-issledovatel'skogo tsentra toksikologii i gigienicheskoy reglamentatsii biopreparatov – filial ФГБУ «Государственный научный центр «Институт иммунологии» Федерального медико-биологического агентства
12. Krainova Olga Aleksandrovna, kandidat biologicheskikh nauk, starshiy nauchnyy sotrudnik otдела ekologicheskoy biotekhnologii Nauchno-issledovatel'skogo tsentra toksikologii i gigienicheskoy reglamentatsii biopreparatov – filial ФГБУ «Государственный научный центр «Институт иммунологии» Федерального медико-биологического агентства

Информация о соавторах:

Марченко Анатолий Иванович, кандидат биологических наук, начальник лаборатории токсикологических методов *in vitro* отдела экологической биотехнологии, Научно-исследовательского центра токсикологии и гигиенической регламентации биопрепаратов – филиал ФГБУ «Государственный научный центр «Институт иммунологии» Федерального медико-биологического агентства

Крайнова Ольга Александровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела экологической биотехнологии Научно-исследовательского центра токсикологии и гигиенической регламентации биопрепаратов – филиал ФГБУ «Государственный научный центр «Институт иммунологии» Федерального медико-биологического агентства

Information about co-authors:

Anatoly I. Marchenko, PhD in Biological Sciences, Head of the Laboratory of *in vitro* Toxicological Methods of the Department of Ecological Biotechnology, Research Center for Toxicology and Hygienic Regulation of Biological Products – branch of the State Research Center «Institute of Immunology» of the Federal Medical and Biological Agency

Olga A. Krainova, PhD in Biological Sciences, Senior Researcher of the Department of Ecological Biotechnology, Research Center for Toxicology and Hygienic Regulation of Biological Products – branch of the State Research Center «Institute of Immunology» of the Federal Medical and Biological Agency