

Эколого-генетическая оценка последствий влияния радиации на загрязненных территориях

А.Б. Бигалиев¹✉, К.З. Шалабаева¹, Б.Е. Шимшиков¹, С.С. Кобегенова¹, Л.М. Адилова², А.Н. Кожакметова¹, С. Шарахметов¹, М.Н. Бурханова³

¹ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

² Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова, Алматы, Казахстан

³ Научно-практический центр санитарно-эпидемиологической экспертизы и мониторинга, Алматы, Казахстан

✉ e-mail: aitkhazha@gmail.com

Аннотация. Объектами исследования являются районы Западно-Казахстанской области Республики Казахстан, прилегающие к полигону Капустин Яр: Бокейординский, Жангалинский, Жанибекский, Казталовский, Акжайыкский и Сырымский. Цель работы – радиоэкологическое обследование загрязненных территорий и исследование содержания загрязнителей в объектах среды, биоте (грызунах, рыбах и биосубстратах домашних животных) физико-химическими методами для оценки воздействия полигона на биоту и человека. Представлены результаты экспедиционных и лабораторных исследований объектов окружающей среды прилегающих к полигону районов. Приведены показатели гамма-съемки уровней радиационного фона обследуемых территорий, данные о загрязнении почвы, поверхностных и подземных вод, доминантных форм растений, биосубстратов (шерсти домашних животных: верблюда, лошади, коровы). Использованы стандартные способы отбора проб, общепринятые методы исследования: радиологический и цитогенетический (микроядерный), атомно-абсорбционная спектрофотометрия. Проведено рекогносцировочное и радиоэкологическое обследование объектов окружающей среды с использованием аналитических методик, что позволило определить количественное содержание токсичных компонентов, приоритетных загрязнителей и радиоактивных изотопов. Установлено, что значения объемной активности природных и техногенных радионуклидов в пробах почвы, питьевой воды и биосубстратах (шерсти домашних животных, образцах периферической крови человека) из населенных пунктов соответствуют величине контрольного уровня для данного региона. Измерения гамма-излучения показали, что по периметру территории полигона и в близлежащих населенных пунктах уровень радиации находится в пределах 0.06–0.14 мкЗв/ч. Незначительное превышение уровня радиоактивности сохраняется вблизи падения ракет в Бокейординском районе. Исследованные районы характеризуются незначительным уровнем радиационного фона: среднее значение МЭД составляет 0.014 мкЗв/ч. Абсолютный максимум, 0.73 мкЗв/ч, зарегистрирован в пунктах падения ракет в Казталовском районе. Ключевые слова: радиация; радионуклиды; радиоактивность; биосубстрат; полигон; мутация; цитогенетика; мутагены; экология.

Для цитирования: Бигалиев А.Б., Шалабаева К.З., Шимшиков Б.Е., Кобегенова С.С., Адилова Л.М., Кожакметова А.Н., Шарахметов С., Бурханова М.Н. Эколого-генетическая оценка последствий влияния радиации на загрязненных территориях. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020;24(7):794-801. DOI 10.18699/VJ20.675

Ecological and genetic assessment of the consequences of radiation influence on contaminated areas

A.B. Bigaliev¹✉, K.Z. Shalabaeva¹, B.E. Shimshikov¹, S.S. Kobegenova¹, L.M. Adilova², A.N. Kozhakhmetova¹, S. Sharakhmetov¹, M.N. Burkhanova³

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

² Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Kazakhstan

³ Scientific and Practical Center for Sanitary and Epidemiological Expertise and Monitoring, Almaty, Kazakhstan

✉ e-mail: aitkhazha@gmail.com

Abstract. The objects of study are the territory of the districts of the West Kazakhstan region of the Republic of Kazakhstan adjacent to the Kapustin Yar test site: Bokeyordinsky, Zhangalinsky, Zhanibeksky, Kaztalovsky, Akzhayiksky and Syrymsky. The purpose of the work is to conduct a radioecological survey of contaminated areas and to study the content of pollutants in environmental objects, biota (rodents, fish and biosubstrates of domestic animals) by physicochemical methods to assess the risk of the landfill's impact on biota and humans. This paper presents the results of expeditionary and laboratory research on the pollution of environmental objects in the areas adjacent to the landfill. Indicators of the gamma-survey of the levels of radiation background of the surveyed territories as well as data on pollution of soil, surface and ground waters, dominant forms of plants, biosubstrates (hair of domestic animals: camel, horse, cow) are given. The generally accepted research methods were used: standard sampling me-

thods, radiological, atomic adsorption spectrophotometry, cytogenetic (micronucleus) method. A reconnaissance and radioecological examination of environmental objects was carried out using analytical methods, which made it possible to determine the quantitative content of toxic components, the content of priority pollutants and radioactive isotopes. It has been established that the values of the volumetric activity of natural and man-made radionuclides in soil samples, drinking water and biosubstrates (pet hair, human peripheral blood samples) from settlements correspond to the value of the control level for this region. The measurements of radiation activity by gamma radiation showed that along the perimeter of the surveyed territory of the test site and in nearby settlements the radiation level is in the range of 0.06–0.014 $\mu\text{Sv/h}$. A slight excess of the level of radioactivity persists in the area near the fall of missiles in the Bokeyordin region. The investigated regions are characterized by an insignificant level of background radiation, the average DER value for the regions as a whole is 0.14 $\mu\text{Sv/h}$. The absolute maximum, 0.73 $\mu\text{Sv/h}$, was recorded at the points of missile impact in the Kaztal region.

Key words: radiation; radionuclides; radioactivity; biosubstrate; polygon; mutation; cytogenetics; mutagens; ecology.

For citation: Bigaliev A.B., Shalabaeva K.Z., Shimshikov B.E., Kobegenova S.S., Adilova L.M., Kozhakhmetova A.N., Sharakhmetov S., Burkhanova M.N. Ecological and genetic assessment of the consequences of radiation influence on contaminated areas. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(7): 794–801. DOI 10.18699/VJ20.675 (in Russian)

Введение

Вокруг ракетно-ядерных полигонов в Атырауской и Западно-Казахстанской областях Республики Казахстан сложилась сложная экологическая обстановка, вызванная радиационным загрязнением природной среды. В 2004–2008 гг. на территории военных полигонов Капустин Яр и Азгир и в прилегающих районах проведен ряд экологических работ с применением полевых и аналитических методов исследования. Тем не менее вопрос о степени влияния деятельности полигонов на окружающую среду и здоровье населения остается нерешенным¹ (Мухаметжанова, 2017). На протяжении нескольких десятков лет ученые Казахского национального университета имени аль-Фараби проводят исследования, направленные на поиск чувствительных биологических маркеров, специфичных для оценки радиационного воздействия и информативных как в раннем, так и отдаленном периоде облучения. В настоящее время одними из немногих биологических показателей (наряду с ЭПР-спектроскопией эмали зубов), в полной мере отвечающих этим требованиям, являются хромосомные aberrации в лимфоцитах периферической крови. Принципы цитогенетического метода индикации радиационного воздействия достаточно убедительно обоснованы во многих отечественных и зарубежных исследованиях, результаты которых послужили основой для рекомендаций ВОЗ, МАГАТЭ и НКДАР ООН по использованию анализа хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови в качестве тест-системы для количественной оценки действия мутагенных факторов радиационной природы (WHO..., 2010). Данные о «биологической» дозе, полученные с помощью цитогенетических методов шире, чем ее физическое значение, так как отражают не только результат радиационного воздействия на организм человека, но и его индивидуальную радиочувствительность, что позволяет более корректно прогнозировать ранние и отдаленные последствия облучения. В настоящее время в большинстве случаев, при которых люди подвергаются воздействию радиации как от естественных, так и техногенных источников, речь идет об облучении в небольших

дозах (Zhumadilov et al., 2013). Поэтому основную проблему составляют последствия радиационного воздействия в малых дозах, особенности биологических эффектов которого до сих пор являются предметом активных дискуссий (Hoshi, Saimova, 2017).

Актуальность предлагаемой работы определена необходимостью изучения современного состояния природных популяций растений, животных и человека в условиях различного фона ионизирующей радиации при длительном хроническом облучении в местах ядерных испытаний на территории полигона Капустин Яр. В свою очередь, оценка влияния деятельности полигона требует разработки природоохранных мероприятий по уменьшению техногенного воздействия, ранней диагностики устойчивости генома природных популяций, подвергающихся давлению антропогенного пресса. При этом требуются учет и прогнозирование текущих и отдаленных последствий влияния факторов среды обитания на биоту и здоровье населения, что представляет чрезвычайную актуальность для данного региона и имеет научно-практическую значимость (Bigaliev, 2016; Markabayeva et al., 2018).

Материалы и методы

Использованы общепринятые методы отбора проб почвы, воды, образцов растений, животных и человека. Отбор проб почвы производили согласно стандартной методике № 5.05.008-99 г. (Островская и др., 2014). Пробы почвы плотно запечатывали в кюветах и перед спектрометрическими измерениями выдерживали в течение 2–3 нед. для установления подвижного равновесия между изотопами ^{226}Ra , ^{224}Ra и продуктами их распада (^{222}Ra , ^{220}Ra и др.). Исследования проводили согласно утвержденному и внесенному в государственный реестр Республики Казахстан документу «Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс» (рег. № KZ.07.00.00304-2014)². Из населенных пунктов, расположенных на прилегающей к полигону территории, отобраны биосубстраты домашних животных, образцы доминантных видов растений, взяты образцы периферической крови жителей. Все они являются зве-

¹ Национальный доклад о состоянии окружающей среды и использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2011–2014 годы. Под ред. РГП на ПХВ «Информационно-аналитический центр охраны окружающей среды». Алматы, 2015;214.

² Инструкция по отбору проб почвы при радиационном обследовании загрязненной территории, 1987.

нями трофической цепи питания и участвуют в миграции радионуклидов и тяжелых металлов (Постановление Правительства РК «Об утверждении Правил объявления чрезвычайной экологической ситуации» № 431 от 5 мая 2005 г.). Определение активности радионуклидов проводили спектрометрическим методом с использованием гамма-спектрометров «МКС-01А Мультирад» (ООО «НТЦ «Амплитуда», Россия), Canberra CR-4018 (США). Для выявления содержания тяжелых металлов применена атомно-абсорбционная спектрофотометрия. Исследования проведены в физико-химической лаборатории факультета биологии и биотехнологии Казахского национального университета имени аль-Фараби в соответствии с общепринятыми стандартами (ГОСТ 26929-86, ГОСТ 30178-96, ИСО 8288-1986) на спектрофотометре «МГА-915МД» (ГК «Люмэкс», Россия) (Техногенные потоки..., 2001).

Для цитогенетического исследования использовали микроядерный тест. Цитологические препараты для микроядерного анализа готовили согласно общепринятым методикам (Руководство..., 2002), фотографировали в световых микроскопах Axioskop 40 (Carl Zeiss, Германия) и Micro Optic (Австрия). Забор образцов крови для микроядерного анализа проводили из фаланги пальцев в условиях сельских поликлиник, соблюдая принципы антисептики. Объектом исследования служила популяция коренных жителей, включающая 107 человек, проживающих на территории, прилегающей к полигону Капустин Яр.

Результаты и обсуждение

Планомерные работы по оценке влияния деятельности полигонов Капустин Яр и Азгир на окружающую среду начались в 2001 г., став первым этапом программы исследований в регионе, охватывающем шесть южных районов Западно-Казахстанской области и два района Атырауской области. Работы первого этапа завершены в 2002 г. (Loomis et al., 1990) – представлены результаты полевых и лабораторных исследований в Бокейординском и южной части Жангалинского районов. Выполнены инструментальные измерения радиационных параметров территории данных районов, используемой для падения отделяющихся частей ракет. Однако изучение состояния здоровья населения проведено только с использованием медицинской и демографической статистики. Данные медицинских исследований получены разными составами врачей, без сравнения с контрольным районом и проведения необходимых генетических исследований (популяционных и цитогенетических), должной статистической обработки полученных результатов.

В 2018–2019 гг. мы впервые взяли пробы, образцы и биосубстраты в этих же районах Западно-Казахстанской области для лабораторных исследований. Для рекогносцировочного изучения загрязненных участков, выявленных по результатам предыдущих исследований, проведено экспедиционное обследование экологического состояния компонентов окружающей среды: произведен отбор проб почвы, воды (подземных и поверхностных), растений, биосубстратов (шерсти домашних животных, органов и тканей рыб, грызунов, ящериц, образцов периферической крови жителей). В 2018 г. в Жангалинском районе взято 78 проб и образцов, Бокейординском районе – 89, Жани-

бекском районе – 75, Казталовском районе – 91. Всего по четырем районам – 333. В 2019 г. в Акжайыкском районе отобрано 78 проб и образцов, бывшем Тайпакском районе – 89, Сырымском районе – 46. Всего по трем районам – 213. Проведены измерения радиометрических параметров среды в точках отбора проб в соответствии с методикой гамма-съемки³.

Полевые исследования

Результаты радиологического исследования активности радионуклидов техногенного происхождения в пробах и образцах тест-объектов, взятых с территорий зоны полигона, представлены в табл. 1.

Проведенные радиоэкологические исследования объектов окружающей среды с использованием аналитических методик позволили определить количественное содержание приоритетных загрязнителей и радиоактивных изотопов. Установлено, что значения объемной активности природных и техногенных радионуклидов в пробах почвы, питьевой воды и биосубстратах (шерсти домашних животных) из исследуемых населенных пунктов соответствуют показателям контрольного уровня. Измерения радиационной активности методом гамма-излучения показали, что по периметру обследованной территории полигона и в близлежащих населенных пунктах уровень радиации находится в пределах 0.06–0.014 мкЗв/ч, что соответствует уровню радиации для данного региона. Незначительное превышение уровня радиоактивности сохраняется на территории вблизи падения ракет в Бокейординском районе. Таким образом, исследованные районы характеризуются незначительным уровнем радиационного фона, среднее значение МЭД составляет 0.14 мкЗв/ч (Постановление Правительства РК «Об утверждении Правил объявления чрезвычайной экологической ситуации» № 431 от 5 мая 2005 г.). Абсолютный максимум, 0.73 мкЗв/ч, зарегистрирован в пунктах падения ракет в Казталовском районе.

Определено содержание тяжелых металлов в подготовленных пробах (почвы, растений и воды) методом атомно-абсорбционной спектрометрии согласно ГОСТ СТ РК ИСО 11047-2008 на приборах «МГА-915» и ASS-1 (табл. 2).

Наибольшая концентрация тяжелых металлов выявлена в подземных водах обследованных районов. Так, максимальные показатели содержания Zn составили 0.05–0.71 мг/л, Mn – 0.838 (с. Базаршолан), Cr – 0.052, Fe – 0.06–0.88 мг/л (с. Базартобе).

Незначительно увеличенное содержание тяжелых металлов определено на территориях с относительно повышенным радиационным фоном (с. Харкен, Базаршолан, Базартобе) – как в образцах почвы, так и растений. Значительное накопление тяжелых металлов Ni, Zn, Co, Cr установлено в почвах обследованных территорий, прилегающих к полигону. Полученные результаты позволяют констатировать, что загрязнение окружающей среды представляет определенную опасность для биоты и человека. К стойким химическим загрязнителям кумулятивного действия со специфическими токсическими свойствами

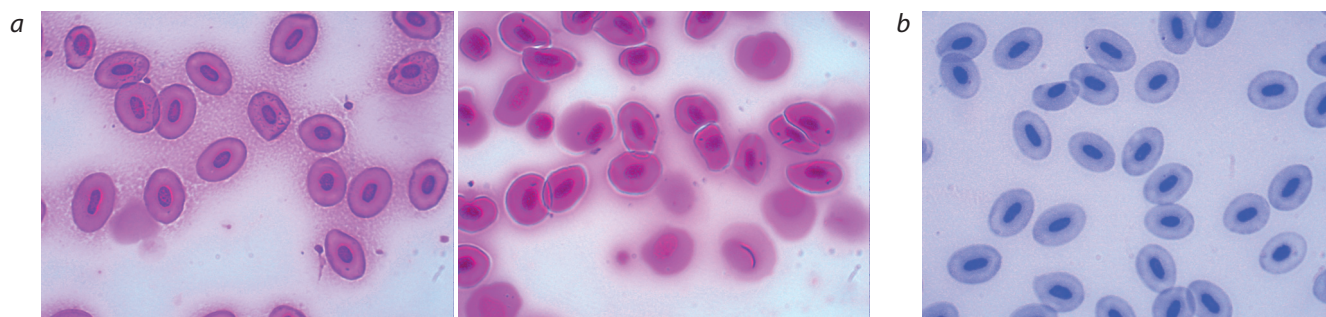
³ Коллектив авторов ИРБЭ НЯЦ РК – отчет по теме: «Оценка влияния деятельности военных полигонов на окружающую среду и определение мер по ее реабилитации», 2002.

Table 1. Activity of technogenic radionuclides in samples and samples of test objects

Location name	Object type	Mass (g)	Cs-137	Ra-226	Th-232	K-40	r-90
Bokeyordinsky district							
Bisen	Plants	89	< 3.0	38.5±18.3	16.7±9.0	220.0±32.0	< 3.0
	Soil	942		36.8±15.2	18.2±7.0	324.0±42.0	
Khan Ordasy (rocket crash site)	Soil	108		30.6±11.6	19.2±6.0	251.0±37.0	
	Plants	249		30.7±14.0	20.0±10.0	100.0±27.0	
	Salt film on the surface of groundwater	40		40.9±16.0	27.0±13.0	110.0±24.0	
Zhanibeksky district							
Mashteksay village (point cemetery)	Soil	494	< 3.0	55.8±11.7	7.7±5.0	98.0±27.0	< 3.0
	Plants	55		57.9±13.2	9.4±4.0	105.0±23.0	
Onege village (point 3 km to the north)	Plants	90		59.3±15.4	7.6±5.0	109.0±25.0	
	Soil	542		56.6±11.0	11.3±6.0	104.0±20.0	
Zhangalinsky district							
Zhana Kazan village (Bolshoy Ozen river bank)	Soil	95	< 3.0	44.7±11.0	18.7±7.0	90.8±28.0	< 3.0
	Plants	97		40.5±14.0	23.3±11.0	97.2±26.0	
Kazstalovsky district							
Kaztalovka (Seksenbay-1)							
point 3 km to the west	Plants	54	< 3.0	62.6±10.0	21.1±10.0	218.5±13.0	< 3.0
point 3 km to the south	Soil	355		73.5±9.0	22.6±12.0	226.2±14.0	
Kaztalovka (Seksenbay-2)							
point 3 km to the north	Plants	50		59.5±10.0	24.4±10.0	195.9±18.0	
point 3 km to the south-west	Soil	297		54.9±12.0	17.9±13.0	97.7±20.0	
Bozoy village							
3 points along the perimeter	Plants	240		49.7±15.0	25.4±9.0	223.3±10.0	
point 3 km to the north	Soil	1002		58.6±13.0	18.2±9.0	228.2±11.0	
Konys village							
3 points along the perimeter	Plants	24		56.8±11.0	17.6±10.0	193.6±19.0	
point 3 km to the north	Soil	257		55.8±13.0	25.9±8.0	219.4±12.0	
Novokazanka village (litter along the road)	Plants	137		59.4±10.0	21.8±9.0	195.5±20.0	
Combined samples of 5 individuals of each species (biosubstrates)							
Bokeyordinsky district (village Saigyn point)	Wool (cow)	104	< 3.0	13.8±8.05	< 3.0	15.0±10.0	< 3.0
	Wool (horse)	102		11.6±6.03		13.2±8.0	
	Wool (camel)	107		12.5±7.11		13.43±7.1	
Zhangalinsky district (points Novokazanka, Zhangala)	Wool (cow)	100	< 3.0	11.6±6.15	< 3.0	12.2±7.31	< 3.0
	Wool (horse)	102		10.4±5.83		13.11±8.2	
	Wool (camel)	107		11.5±6.22		12.2±7.31	
Zhanibeksky district (point Bozoy, aul Konys)	Wool (cow)	120	< 3.0	12.4±7.51	< 3.0	13.3±6.52	< 3.0
	Wool (horse)	125		13.6±8.14		13.7±6.82	
	Wool (camel)	135		14.7±7.66		15.2±9.33	
Kaztalovsky district (item drop location)	Wool (cow)	110	< 3.0	11.4±6.42	< 3.0	10.7±5.81	< 3.0
	Wool (horse)	125		13.6±8.14		13.7±6.73	
	Wool (camel)	105		10.8±5.54		11.2±7.12	

Table 2. The content of heavy metals in soil, plant and water (surface and underground) samples in the Kapustin Yar landfill area

Location name	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Mn	Cr	Fe
In soil samples in a layer of 0–10 cm, mg/kg									
Lbischensky (at the akimat)	18.67	118.71	0.77	15.00	91.43	17.08	766.66	71.43	52100.80
Aksuat (Baturino)	23.11	121.29	0.56	27.50	377.14	17.50	883.33	65.71	47058.82
Shandarzhap (Harken)	16.00	83.87	0.21	17.50	331.43	13.33	608.33	45.71	26890.75
Tompok	14.89	87.74	0.28	27.50	3371.42	15.42	666.66	42.86	31932.77
Tinali (at the well)	22.44	127.74	0.70	27.50	480.00	16.25	733.33	54.28	33613.44
Bazarsholan	18.44	105.80	0.49	35.00	245.71	13.33	733.33	45.71	35294.41
Karaultobe	21.11	116.13	0.63	62.50	411.43	19.58	950.00	68.57	48739.49
Bazartobe	17.11	149.68	0.35	32.50	251.43	4.58	633.33	37.14	16806.72
Tolepkol	26.22	121.29	0.56	40.00	137.14	13.75	416.66	37.14	48739.50
Saykuduk	18.22	110.97	0.63	57.50	297.14	14.17	725.00	48.57	18487.39
J. Moldagaliev	15.11	103.22	0.70	37.50	131.43	10.00	725.00	37.44	33613.44
Zhympity	20.33	117.42	0.77	47.50	262.86	14.17	900.00	51.43	21848.74
In plant samples, mg/kg									
Lbischensky (near the akimat), gray wormwood	15.83	90.11	0.80	3.81	10.90	3.00	7.14	16.18	694.44
Aksuat (Baturino), gray wormwood	11.33	67.03	0.76	5.71	8.00	2.33	26.19	25.43	944.44
Chapaev, white wormwood	14.33	60.44	0.53	7.62	8.73	2.33	3.81	34.68	333.33
Tinali (at the well), wormwood	6.67	49.45	0.49	9.52	5.09	2.00	17.62	32.37	777.77
Tompok, gray wormwood	8.00	27.47	0.53	5.71	5.82	1.67	12.38	39.31	750.00
Shandarzhap (Harken), itsigek	6.83	40.66	0.98	11.43	5.82	3.00	10.95	34.68	694.44
Tolepkol, green wormwood	9.67	65.93	0.49	7.62	7.27	4.00	3.33	18.50	916.66
Bazarsholan, kochia	10.33	39.56	0.71	9.52	10.18	2.67	20.00	32.37	1916.66
Bazartobe, wormwood	9.50	59.34	0.53	7.62	9.45	2.67	11.91	34.68	1527.77
Karaultobe, wormwood	8.16	26.37	0.58	93.52	5.09	1.67	12.38	23.12	694.44
Saykuduk, wormwood	9.16	42.86	0.53	13.33	10.90	2.67	14.29	32.37	1666.66
J. Moldagaliev, wormwood	12.16	60.44	0.71	11.43	8.73	2.67	13.33	34.68	1472.22
Zhympity, wormwood	9.16	52.75	0.89	13.33	5.09	3.67	9.05	23.12	1027.77
In water samples, mg/l									
Aksuat (Baturino), water tower	0.00322	0.05358	0.001145	0.02365	0.0095	0.0084	0.008571	0.02446	0.1277
Bazarsholan, drinking water	0.00458	0.04956	0.001955	0.02514	0.0183	0.01503	0.8380	0.034335	0.024
Tinali, well	0.00967	0.02677	0.000773	0.01546	0.01353	0.05993	0.001933	0.033526	0.0177
Lake near Aksuat	0.0048	0.03428	0.000773	0.009143	0.0136	0.0050	0.2743	0.01387	0.0053
Lbischenski, underground water	0.003513	0.05859	0.000772	0.01771	0.005787	0.005373	0.01476	0.03583	0.0689
Karaultobe, drinking water	0.00447	0.02279	0.00057	0.00813	0.006913	0.004473	0.002614	0.02538	0.01525
J. Moldagaliev, drinking water	0.000353	0.00058	0.00024	0.00505	0.003180	0.002297	0.00025	0.02696	0.0029
Saykuduk	0.00171	0.0089	0.00074	0.01131	0.00612	0.00540	0.0108	0.02122	0.0120
Zhympity, drinking water	0.00219	0.01704	0.00074	0.01131	0.004387	0.004543	0.00201	0.02065	0.0235
Budarinsky Canal	0.00324	0.02314	0.00122	0.02057	0.00544	0.00918	0.002571	0.0250	0.0195
Bazartobe, water from a well	0.00544	0.01266	0.00448	0.07863	0.03456	0.0528	0.021486	0.05216	0.8800
Tolepkol, a well for sheep	0.0050	0.05220	0.00096	0.01905	0.007393	0.006667	0.1357	0.03237	0.0250
Shandarzhap (Harken), water supply	0.00309	0.7011	0.000772	0.01105	0.005027	0.00522	0.00193	0.02145	0.02094



Pathologies of erythrocytes of crucian carp: *a* – micronuclei, displacement of the nucleus to the periphery, anisocytosis; *b* – micronuclei, invagination of the nucleus ($\times 1000$, coloration with basic fuchsin according to Pfeffer).

относятся прежде всего тяжелые металлы. Тройку наиболее экологически опасных тяжелых металлов составляют свинец, ртуть и кадмий. Данные металлы являются потенциально опасными токсикантами, способными вызывать нарушения жизнедеятельности водной и наземной биоты, и, следовательно, могут быть дестабилизирующим фактором в экологической системе сложившегося биоценоза (Фомин Г.С., Фомин А.Г., 2001). Также общеизвестно, что тяжелые металлы, накапливаясь в тканях организма, изменяют транскрипционную активность хромосом (Теплая, 2013; Chaizhunusova et al., 2017; Serzhanova et al., 2018) и приводят к нарушениям устойчивости генома. Обнаруженный относительно высокий уровень активности радионуклидов в локальных точках среди исследуемых тест-объектов отмечается в почвах, подземных водах, растениях и биосубстратах в пределах контрольных величин.

Цитогенетические исследования

В популяциях человека и животных имеются индивидуумы и особи с различной устойчивостью к мутагенным факторам. Особое внимание в этой связи следует обратить на виды с выраженной нестабильностью генома (Bigalyev et al., 2014).

Микроядерный анализ образцов рыб. Из образцов отловленных на исследуемой территории видов рыб были приготовлены гематологические препараты для микроядерного теста. У обследованных рыб эритроциты были представлены молодыми бластными формами и зрелыми клетками (см. рисунок). Молодые клетки в зависимости от степени развития представляли собой круглые или слегка вытянутые клетки, размеры ядер которых варьировали от крупных, занимавших большую часть клетки, до мелких. В большинстве случаев зрелые эритроциты имели эллипсоидную форму, вытянутое ядро красно-фиолетового цвета, прозрачную цитоплазму серо-розового цвета. Наряду со здоровыми клетками были зарегистрированы и патологические.

Вобла. Клетки крови воблы в большинстве случаев характеризовались неправильной формой эритроцитов. Патологии эритроцитов включали микроядра, смещение ядра к периферии, анизцитоз, инвагинацию ядра, что несколько затрудняло проведение микроядерного анализа.

Судак. У особой судака умеренно часто встречались патологии двух групп: смещение ядра к периферии, вызываемое набуханием клетки, микроядра, возникающие

при нарушениях клеточного деления, и инвагинация ядра, являющаяся маркером дегенерации эритроцитов. Отмечены единичные очаги ядерных теней, возникающих при разрушении эритроцитов.

Жерех. У особой жереха были наиболее выражены патологии первой группы. Отмечено большое количество эритроцитов неправильной формы – грушевидной, серповидной, пятиугольной (пойкилоцитоз). Незначительно представлены ядерные патологии в виде инвагинации ядра и микроядер.

Карась. В эритроцитах изученных карасей присутствовали как относительно крупные, так и мелкие микроядра. При этом в одной клетке в некоторых случаях наблюдалось по одной-две и более микроядер. Однако наиболее часто встречались клетки с одним микроядром помимо основного ядра. Кроме того, наблюдались смещение ядра к периферии клетки и инвагинация ядра (см. рисунок).

Нарушения эритроцитов, выявленные у исследуемых видов, свидетельствовали о дестабилизации физиологических процессов в организме обследованных рыб, приводящей к развитию патологии митоза. Так, анизо- и пойкилоцитоз показывают функциональную недостаточность кроветворных органов, а также наблюдаются при анемии. Наряду с вышеуказанными патологиями обнаружено смещение ядер к периферии (возникающее при набухании). К дегенеративным изменениям также можно отнести инвагинацию ядра, свидетельствующую о деградации самого эритроцита. Последующий микроядерный анализ мазков показал увеличение спонтанной частоты клеток с микроядрами в 1.5–2 раза в загрязненных районах. Вероятность встречаемости эритроцитов с микроядрами в периферической крови при спонтанном мутагенезе составляет 0.5–1.0 % (Fenech, 2011).

Полученные результаты в дальнейшем будут сопоставлены с результатами гистопатологического анализа внутренних органов (жабр, печени, кишечника, мышц и гонад) для оценки токсикологического состояния среды обитания рыб.

Микроядерный анализ клеток человека. Объектом исследования служила свежеполученная кровь из пальца смешанной популяции, включающей 107 человек, проживающих в районах с неблагополучной экологической обстановкой из-за близости полигона Капустин Яр. Сводные группы для микроядерного анализа составили 23 человека с наследственными дегенеративными заболеваниями

Table 3. The number of erythrocytes with micronuclei in the blood of individuals from the study area

Experimental group	Number of patients, <i>n</i>	The number of analyzed erythrocytes in thousands	Erythrocytes with micronuclei	
			absolute	at %
Control group	50	482.4		0.427 ± 0.01
Patients:				
with perinatal pathology	25	212.6	148	1.411 ± 0.07
children with congenital malformation	24	258.8	300	2.99 ± 0.11
with hepatocerebral dystrophy	27	259.6	774	3.82 ± 0.12
with other inherited degenerative diseases	23	245.1	991	3.68 ± 0.13
with Down syndrome	8	98.1	902	4.3 ± 0.11

нервной системы, 27 – с гепатоцеребральной дистрофией, 24 – с врожденными пороками развития, 25 – с перинатальной патологией, 8 – с синдромом Дауна. Средний возраст больных – 33.9 года. В контрольную группу вошли 50 практически здоровых людей в возрасте 20–37 лет. Результаты микроядерного теста представлены в табл. 3.

Количество выявленных микроядер достоверно выше у пациентов с наследственно-дегенеративными заболеваниями ($t = 21.68, p < 0.01$), гепатоцеребральной дистрофией ($t = 33.93, p < 0.01$), врожденными пороками развития ($t = 25.63, p < 0.01$), синдромом Дауна ($t = 38.73, p < 0.01$) и перинатальной патологией ($t = 14.05, p < 0.01$) в сравнении с контрольной группой – 0.427 ± 0.01 .

По данным различных авторов, спонтанный уровень микроядер у здоровых людей колеблется от 0.24 ± 0.01 до 0.34 ± 0.1 %. Больные с высоким показателем микроядер обследованы повторно через месяц, у них обнаружена тенденция повышения количества микроядер в эритроцитах периферической крови.

В зависимости от размера микроядра распределены на две группы: крупные и мелкие. Эритроциты с мелкими микроядрами составляли 88 %, а с крупными микроядрами – 12 %. Типы нарушений ядер соматических клеток различаются по количеству и форме в зависимости от видовой, тканевой принадлежности. По данным авторов, высокий уровень эритроцитов с микроядрами зарегистрирован у больных с различными формами миопатии. Дальнейшие исследования позволили прийти к выводу, что нестабильность генома подтверждается и другими тестами (Ильинских и др., 1992). Проведен корреляционный анализ, который свидетельствует, что образование крупных микроядер тесно связано с геномными нарушениями хромосомного аппарата ($r = 0.70, p < 0.05$), тогда как уровень клеток с мелкими микроядрами коррелирует с частотой нарушений в структуре хромосом ($r = 0.60, p < 0.05$). Установлено, что частота эритроцитов с мелкими микроядрами не зависит от уровня патологии митоза, многогрупповых мета- и анафаз с мостами (во всех случаях $p > 0.05$). Уровень клеток с крупными микроядрами тесно связан с патологией митоза – отставанием отдельных хромосом в мета- и анафазах – и свидетельствует о том, что крупные микроядра, по-видимому, образованы отставшими хромосомами, в то время как мелкие – в основном структурными aberrациями хромосом. Авто-

ры утверждают, что приведенные данные показывают тесную связь между цитогенетическими нарушениями и образованием микроядер (Djokovic-Davidovic et al., 2016).

Заключение

Значения объемной активности природных и техногенных радионуклидов в пробах почвы, питьевой воды, биосубстратах (шерсти домашних животных и образцах периферической крови человека) из населенных пунктов, расположенных рядом с полигоном Капустин Яр, соответствуют величине контрольного для Западно-Казахстанской области уровня (радиационный фон в пределах $0.06–0.014$ мкЗв/ч). Незначительное превышение уровня радиоактивности сохраняется на территории вблизи падения ракет в Бокеевском районе. Цитогенетические исследования с использованием микроядерного теста в соматических клетках рыб показали увеличение спонтанной частоты клеток с микроядрами в 1.5–2 раза в загрязненных районах. Вероятность встречаемости эритроцитов с микроядрами в периферической крови при спонтанном мутагенезе составляет 0.5–1.0 %. Анализ мазков крови человека на микроядерный тест также показал увеличение спонтанной частоты клеток с микроядрами в 1.5–2 раза в загрязненных районах по сравнению со спонтанной частотой 0.5–1.0 %.

Список литературы / References

- Ильинских Н.Н., Новицкий В.В., Ванчугова Н.Н., Ильинских И.Н. Микроядерный анализ и цитогенетическая нестабильность. Томск: Том. гос. ун-т, 1992;1:272.
[Ilyinskikh N.N., Novitskiy V.V., Vanchugova N.N., Ilyinskikh I.N. Micronucleus analysis and cytogenetic instability. Tomsk: Tomsk State University Publ., 1992;1:272. (in Russian)]
- Мухаметжанова З.Т. Современное состояние проблемы загрязнения окружающей среды. *Гигиена труда и медицинская экология*. 2017;2(55):11-20.
[Mukhametzhanova Z.T. The current state of the problem of environmental pollution. *Gigiena Truda i Meditsinskaya Ekologiya = Journal of Occupational Hygiene and Medical Ecology*. 2017;2(55): 11-20. (in Russian)]
- Островская С.С., Шаторная В.Ф., Бельская Я.А. Влияние тяжелых металлов и радиации на кроветворение у крыс. *Мир медицины и биологии*. 2014;4(47):177-179.
[Ostrovskaya S.S., Shatornaya V.F., Belskaya Ya.A. Effects of heavy metals and radiation on hematopoiesis in rats. *Mir meditsiny i bio-*

- logii = World of Medicine and Biology*. 2014;4(47):177-179. (in Russian)]
- Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды. Под ред. Соболева И.А., Беляева Е.Н. М., Медицина, 2002;123.
[Guide to Methods for Monitoring Environmental Radioactivity. Sobolev I.A., Belyaeva E.N. (Eds.). Moscow: Medicine Publ., 2002; 123. (in Russian)]
- Теплая Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы). *Астраханский вестник экологического образования*. 2013;1(23):182-192.
[Teplaya G.A. Heavy metals as environmental pollutants: a review. *Astrakhanskiy Vestnik Ekologicheskogo Obrazovaniya = Astrakhan Herald of Environmental Education*. 2013;1(23):182-192. (in Russian)]
- Техногенные потоки вещества и состояние экосистем. М., Наука. 2001;256.
[Technogenic flows of matter and the state of ecosystems. Moscow: Science Publ., 2001;256. (in Russian)]
- Фомин Г.С., Фомин А.Г. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам. Справочник. М., 2001.
[Fomin G.S., Fomin A.G. The soil. Quality control and environmental safety in accordance with international standards. Handbook. Moscow, 2001. (in Russian)]
- Bigaliev A.B. Ecological genetics, monograph. Almaty: Kazakh University, 2016;245.
- Bigalyev B., Kobegenova S., Vasil'ev V., Vasil'eva E., Imentai A., Shametov A. Study of Caspian Goby *Neogobius* sp. Karyotype Flexibility from Several Biotops. *J. Life Sci*. 2014;8(5):442-446.
- Chaizhunusova N., Madiyeva M., Tanaka K., Hoshi M., Kawano N., Noso Y., Takeichi N., Rakhypbekov T., Urazalina N., Dovgal G., Rymbaeva T., Tokanova S., Beisengazina M., Kembayeva K., Inoue K. Cytogenetic abnormalities of the descendants of permanent residents of heavy metals contaminated East Kazakhstan. *Radiat. Environ. Biophys*. 2017;56(4):337-343. DOI 10.1007/s00411-017-0717-2.
- Djokovic-Davidovic J., Milovanovic A., Milovanovic J., Antic V. Gajic Analysis of chromosomal aberrations frequency, haematological parameters and received doses by nuclear medicine professionals. *J. BUON*. 2016;21(5):1307-1315.
- Fenech M. Micronuclei and their association with sperm abnormalities, infertility, pregnancy loss, pre-eclampsia and intra-uterine growth restriction in humans. *Mutagenesis*. 2011;26:63-67. DOI 10.1093/mutage/geq084.
- Hoshi M., Saimova A.Zh. Problem in assessing the effects of radiation with "low doses". Review. *Nauka i Zdravookhranenie = Science & Healthcare*. 2017;2:115-127.
- Loomis D.P., Shy C.M., Allen J.W., Saccomanno G. Micronuclei epithelial cells from sputum of uranium workers. *Scand. J. Work Environ. Health*. 1990;16(5):355-362. DOI 10.5271/sjweh.1773.
- Markabayeva A., Bauer S., Pivina L., Björklund G., Chirumbolo S., Kerimkulova A., Semenova Y., Belikhina T. Increased prevalence of essential hypertension in areas previously exposed to fallout due to nuclear weapons testing at the Semipalatinsk Test Site, Kazakhstan. *Environ. Res*. 2018;167:129-135. DOI 10.1016/j.envres.2018.07.016.
- Serzhanova Z.B., Aidarkhanova A.K., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Timonova L.V., Raimkanova A.M. Researching of tritium speciation in soils of "Balapan" site. *J Environ. Radioact*. 2018;192:621-627. DOI 10.1016/j.jenvrad.2018.02.016.
- WHO human health risk assessment toolkit: chemical hazards. Geneva, World Health Organization (IPCS Harmonization Project Document, No. 8. Available at: http://whqlibdoc.who.int/publications/2010/9789241548076_eng.pdf. 2010; accessed 22 April 2013.
- Zhumadilov K., Ivannikov A., Stepanenko V., Zharlyganova D., Toyoda S., Zhumadilov Z., Hoshi M. ESR dosimetry study of population in the vicinity of the Semipalatinsk Nuclear Test Site. *J. Radiat. Res*. 2013;54(4):775-779. DOI 10.1093/jrr/rrt008.

ORCID ID

A. Bigaliev orcid.org/0000-0003-4274-6305
K. Shalabaeva orcid.org/0000-0001-6836-4829
B.E. Shimshikov orcid.org/0000-0002-0196-3373
S.S. Kobegenova orcid.org/0000-0003-1455-3987
L. Adilova orcid.org/0000-0001-8048-6116
A. Kozhakhmetova orcid.org/0000-0002-0612-0957
S. Sharakhmetov orcid.org/0000-0001-7278-5351
M. Burhanova orcid.org/0000-0002-8955-0978

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

Received September 10, 2020. Revised October 16, 2020. Accepted October 16, 2020.