

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ У ТОНКОНОГА ТОНКОГО С ПЛОЩАДКИ, ГДЕ ПРОВОДИЛИ ИСПЫТАНИЯ БОЕВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА СЕМИПАЛАТИНСКОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ

© 2020 г. К. С. Минкенова¹, Ж. А. Байгазинов¹, С. А. Гераськин^{2,*}, А. Н. Переволоцкий²

¹Филиал “Институт радиационной безопасности и экологии” РГП “НЯЦ РК”, Курчатов, Казахстан

²Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

*E-mail: stgeraskin@gmail.com

Поступила в редакцию 09.10.2019 г.

После доработки 09.10.2019 г.

Принята к публикации 20.11.2019 г.

Оценка цитогенетических эффектов у тонконога тонкого выполнена на 38 участках площадки “4А” Семипалатинского испытательного полигона (Казахстан), не отличающихся по почвенным характеристикам и загрязнению тяжелыми металлами, но контрастных по уровню радиоактивного загрязнения. На площадке “4А” в 1954–1957 гг. проводили испытания боевых радиоактивных веществ. Дозовые нагрузки на растения на этой площадке варьируют в диапазоне 0.00014–15 Гр, основной вклад в поглощенную растениями дозу вносит внутреннее облучение ⁹⁰Sr. Показано, что дозовая зависимость распадается на два участка, в пределах которых характер изменения частоты цитогенетических нарушений с дозой принципиально отличается. В диапазоне 0.14–250 мГр частота цитогенетических эффектов статистически значимо не отличается от контрольного уровня. Увеличение дозы выше этого предела ведет к линейному росту частоты цитогенетических нарушений. Основной вклад в формирование цитогенетических эффектов вносят двойные мосты, что служит дополнительным доказательством радиационной природы наблюдаемых в популяциях тонконога тонкого изменений.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон, радиоактивное загрязнение, ⁹⁰Sr, цитогенетические нарушения, тонконог тонкий

DOI: 10.31857/S0869803120030078

В результате испытаний ядерного оружия на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) образовались многочисленные участки с повышенным радиационным фоном. Большинство загрязненных участков расположено на площадках “Опытное поле”, “Дегелен”, “Балапан”, “Сары-Узень” и “4А” [1]. Радиоактивное загрязнение площадок существенно различается по составу радионуклидов, что делает особенно ценными исследования на них хронического радиационного воздействия на биоту. Однако исследования биологических эффектов хронического облучения растений и животных в полевых условиях СИП немногочисленны, в большинстве публикаций отсутствует информация об уровнях радиоактивного и химического загрязнения и величинах поглощенных доз [2]. Большая часть выполненных на СИП исследований посвящена оценке плотности радиоактивного загрязнения природных сред, изучению механизмов миграции радионуклидов, а также оценке

доз и медицинских последствий для населения прилегающих населенных пунктов [1, 3].

В настоящей работе рассмотрены цитогенетические эффекты у растений с площадки СИП “4А”, где в 1953–1957 гг. проводили испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ). БРВ представляли собой жидкие или порошкообразные смеси радионуклидов, в которых доминирующее положение занимал ⁹⁰Sr. Уровни радиоактивного загрязнения на площадке “4А” различаются на несколько порядков [4], что предполагает наличие выраженных радиобиологических эффектов у населяющих площадку животных и растений. Однако до настоящего времени исследования биологических эффектов на этой площадке были немногочисленными.

Травянистое растение – один из референтных видов в современной концепции радиационной защиты биоты [5]. Многолетний злак тонконог тонкий – типичный представитель растительности Казахстана, широко распространен на терри-

тории СИП с разными уровнями радиоактивного загрязнения. Новая информация о радиобиологических эффектах для одного из референтных видов может быть использована для уточнения оценок риска хронического облучения и вносит вклад в совершенствование концепции радиационной защиты биоты.

В нашем предварительном исследовании [6] было показано, что цитогенетические эффекты в популяциях тонконога тонкого с наиболее загрязненных радионуклидами площадок СИП статистически значимо превышают контрольный уровень. Настоящая работа посвящена изучению цитогенетических эффектов в популяциях тонконога тонкого, произрастающего на площадке “4А”, где проводили испытания боевых радиоактивных веществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Район исследования. Пробы для исследования отбирали на площадке “4А” площадью 63 км², где в 1953–1957 гг. проводили испытания боевых радиоактивных веществ. БРВ представляли собой отходы радиохимического производства или смеси радионуклидов, полученные путем облучения нейтронами на атомном реакторе специально подобранных веществ [7]. Испытания включали рассеяние БРВ путем подрыва отдельных снарядов, бомбардировки участков минометами, сброса бомб или распыления БРВ с самолетов. В результате на площадке “4А” было сформировано порядка 30 радиоактивно загрязненных участков [8].

Территория площадки по ботанико-географическому районированию относится к подзоне сухих типчаково-ковыльных степей, входит в состав Восточно-Казахстанского мелкосопочника и находится на границе смены подзон каштановых и светло-каштановых почв. Климат континентальный и засушливый [9]. Исследуемая площадка представлена полынно-злаковым сообществом, в том числе: доминантный вид – полынь Маршалла (*Artemisia marschalliana* Spreng), доминантные виды – тонконог тонкий (*Koeleria gracilis* Pers.), ломкоколосник ситниковый (*Psathyrostachys juncea* Nevski), ковыль волосовидный (*Stipa capillata* L.), солонечник татарский (*Galatella tatarica* Less.), подмаренник настоящий (*Galium verum* L.). Изредка встречается овсяница валлиская (*Festuca valesiaca* Gaudin). Единично встречаются карагана низкорослая (*Caragana pumila* Pojark) и таволга зверобоелистная (*Spiraea hypericifolia* L.).

Объект исследования. Объектом исследования являлся многолетний дикорастущий злак – тонконог тонкий (*Koeleria gracilis* Pers.), образующий плотные дерновины. Стебли – 45–55 см высоты. Метелки – 5–10 см длины, 4–8 мм ширины,

плотные, цилиндрические, постепенно суженные к верхушке и к основанию [10].

Полевые работы и отбор проб растительности. Полевые работы проведены в период созревания семян тонконога, в конце июля–начале августа 2013–2014 гг. Участки для исследований выбирали на основе данных о распределении плотности потока β-частиц и мощности эквивалентной дозы на поверхности почвы, которые измеряли дозиметром-радиометром МКС-АТ6130 (Беларусь).

Обследование радиационной обстановки на загрязненной территории проводили согласно методике [11]. Всего на трех участках площадки было заложено 38 исследовательских точек (β – от < 10 до 60 000 част/(мин см²); мощность эквивалентной дозы по β- и γ-излучению – от 0.1 до 60 мкЗв/ч), в том числе на участке № 1 – 10, на участке № 2 – 10 и на участке № 3 – 18 точек (рис. 1). В качестве контрольных были выбраны пять точек (одна на участке № 1 и по две на участках № 2 и 3). В этих точках мощность эквивалентной дозы по β- и γ-излучению не отличалась от фонового уровня. Данные о плотности потока β-частиц и мощности эквивалентной дозы на исследуемых участках представлены в табл. 1.

В каждой точке производили отбор надземной части растений, в том числе вегетативную часть (150–300 г) – для анализа растений на содержание химических элементов и радионуклидов, генеративную часть (колос, 150–300 г) – для цитогенетического анализа.

Пробы растений отбирали на площади 1–2 м² в зависимости от плотности их произрастания. В местах, где плотность потока β-частиц была от 10 до 4000 част/(мин см²), расстояние между точками отбора проб растений составляло от 100 до 800 м. Ввиду того, что площади с высокими уровнями загрязнения малы, в местах, где плотность потока β-частиц была выше 4000 част/(мин см²), расстояния между точками отбора проб растений составляли от 5 до 20 м.

Определение содержания радионуклидов в растениях. Пробы растений измельчали, промывали и ополаскивали дистиллированной водой, сушили при температуре 100°C, затем перемалывали до состояния травяной муки. Температура озоления проб растений для определения ¹³⁷Cs составляла 400°C, ⁹⁰Sr – 550°C, ²⁴¹Am – 650°C. Чашки с золой охлаждали в эксикаторе. Готовую золу просеивали через сито для удаления незольного остатка. Остывший зольный остаток взвешивали и определяли коэффициент озоления.

Определение удельной активности радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁶Ra, ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu, ¹⁵⁵Eu, ²³⁸U, ²³⁵U, ²¹⁴Pb и ²⁴¹Am в пробах растений проводили на γ-спектрометре “Canberra” (США) с германиевым детектором (BE 2020), предел обнаружения

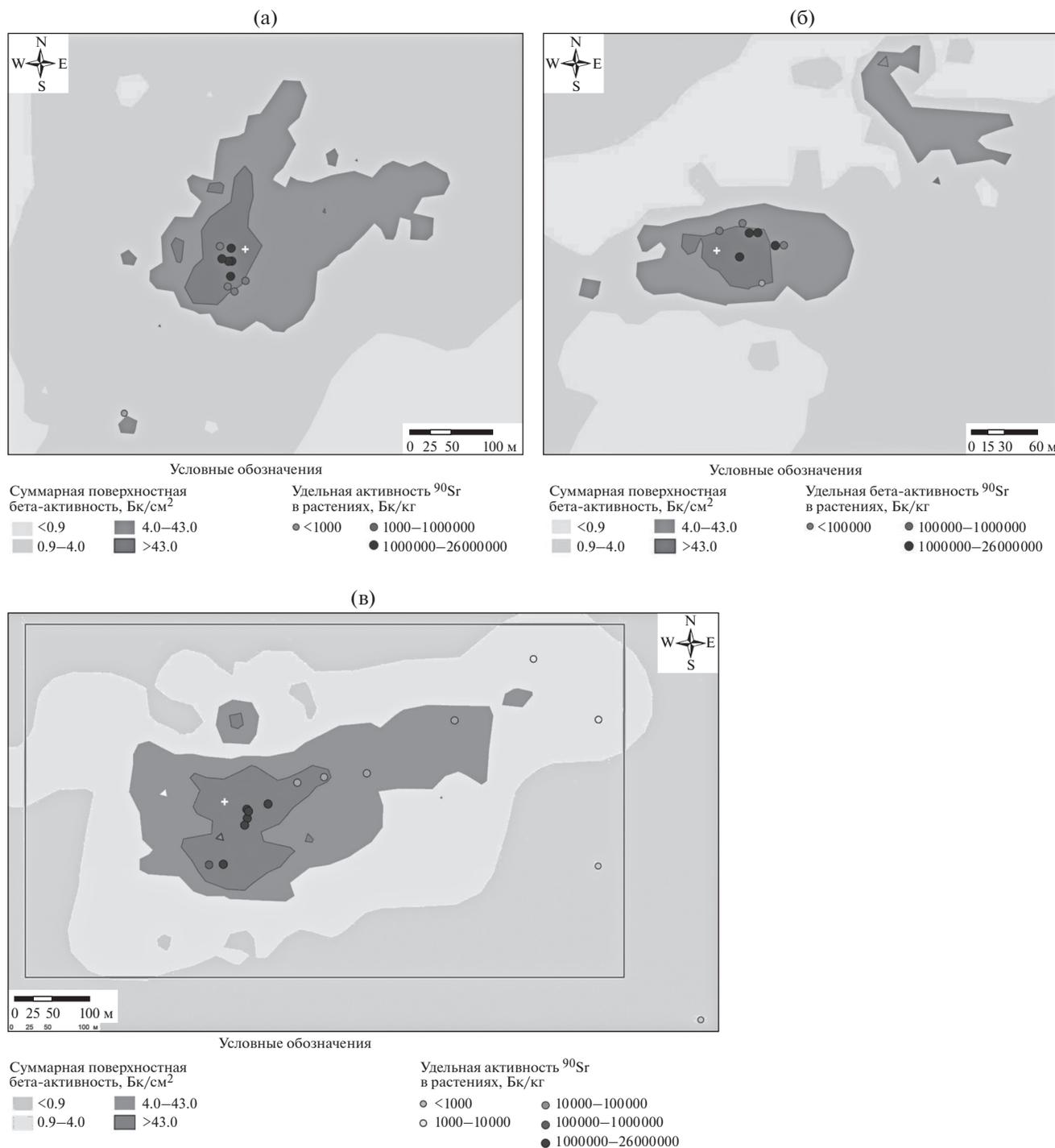


Рис. 1. Схема расположения исследовательских точек на участках 1 (а) (50°33'51.2" 77°45'58.3"); 2 (б) (50°33'28.9" 77°49'59.3"); 3 (в) (50°33'13.6" 77°45'22.2") площадки "4А". Знаком "+" обозначены точки, для которых определены географические координаты.

Fig. 1. Layout of research points chart on plots 1 (a) (50°33'51.2" 77°45'58.3"); 2 (b) (50°33'28.9" 77°49'59.3"); 3 (c) (50°33'13.6" 77°45'22.2") from site "4A". The "+" sign indicates points for which geographical coordinates were determined.

0.7–20 Бк/кг [12]. Определение ⁹⁰Sr в пробах растений проводили на β-спектрометре "Прогресс" (Россия), предел обнаружения 100 Бк/кг [13]. По-

грешность измерений в основном не превышала 30%. Калибровку спектрометра проводили по энергии с использованием твердотельных источ-

Таблица 1. Плотность потока β -частиц и мощность эквивалентной дозы на исследуемых участках
Table 1. β -particles flux density and exposure dose rate at research plots

Участок 1			Участок 2			Участок 3		
№	β , част/(мин см ²)	МЭД, мкЗв/ч	№	β , част/(мин см ²)	МЭД, мкЗв/ч	№	β , част/(мин см ²)	МЭД, мкЗв/ч
1	<10	0.1	1	<10	0.1	1	<10	0.06
2	200	0.4	2	150	1	2	<10	0.06
3	500	0.8	3	200	0.4	3	14	0.1
4	1200	2	4	500	0.8	4	16	0.1
5	2200	4	5	1100	1.5	5	60	0.2
6	4200	6	6	2100	3	6	200	0.3
7	8500	11	7	4000	4	7	440	0.8
8	20000	23	8	8700	14	8	550	0.6
9	31000	37	9	16000	13	9	2000	1.2
10	45000	58	10	26000	38	10	5000	10
—	—	—	—	—	—	11	10000	5
—	—	—	—	—	—	12	20000	24
—	—	—	—	—	—	13	30000	45
—	—	—	—	—	—	14	40000	42
—	—	—	—	—	—	15	60000	60
—	—	—	—	—	—	16	40000	40
—	—	—	—	—	—	17	20000	23
—	—	—	—	—	—	18	60000	60

ников ^{90}Sr и/или ^{24}Na . Удельная активность радионуклидов в растениях приведена в табл. 2 на воздушно сухой вес.

Оценка содержания радионуклидов в почве. Ввиду крайне высоких уровней радиоактивного загрязнения почвы на площадке “4А” сбор и исследование в лаборатории образцов почвы оказались невозможными по соображениям радиационной безопасности. Поэтому удельную активность радионуклидов в почве оценивали с использованием полученных экспериментально значений удельной активности радионуклидов в растениях и коэффициентов накопления радионуклидов растениями из справочника МАГАТЭ [14].

Мощность поглощенной растениями дозы для i -го радионуклида рассчитывали согласно основным допущениям и положениям дозиметрической модели оценки поглощенной растениями дозы, изложенным в публикации МКРЗ 108 [4]:

$$P_{\text{общ},i} = \text{КДП}_{\text{внеш},i}^{\text{почва}} \sigma_{\text{почва},i} + \text{КДП}_{\text{внутр},i}^{\text{раст}} C_{\text{раст},i} \quad (1)$$

где: $\text{КДП}_{\text{внеш},i}^{\text{почва}}$ — коэффициент дозового преобразования для внешнего облучения от i -го радионуклида в почве, (мкГр/сут)/(Бк/м²); $\sigma_{\text{почва},i}$ — плотность загрязнения почвы i -м радионуклидом, Бк/м²; $\text{КДП}_{\text{внутр},i}^{\text{раст}}$ — коэффициент дозового преоб-

разования для облучения от i -го радионуклида, находящегося в растениях (мкГр/сут)/(Бк/кг); $C_{\text{раст},i}$ — удельная активность i -го радионуклида в растениях, Бк/кг.

Время от прорастания семян (начало апреля) до их созревания (конец июля) составляет порядка 120 сут.

Определение содержания тяжелых металлов в растениях. В растениях определяли содержание следующих тяжелых металлов: ванадий, хром, марганец, кобальт, никель, медь, цинк, мышьяк, стронций, кадмий, теллур, цезий, свинец и уран. Пробы растений готовили методом автоклавного разложения по стандартной методике [15]. Определение концентраций элементов проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе “Elan 9000” (Perkin Elmer SCIEX, США) [16].

Цитогенетическое исследование образцов растений. Собранные семена подвергали предварительной камеральной обработке (очистка, стратификация и др.). Удаляли поврежденные семена, обломки стеблей и шелуху. Отобранные семена высушивали при комнатной температуре, после чего подвергали холодной стратификации. Для этого их выдерживали в течение 30 сут при температуре 1–5°С в холодильнике.

Таблица 2. Удельная активность радионуклидов в растениях тонконога тонкого
 Table 2. Radionuclide activity concentrations in crested hairgrass plants

№ точки	Удельная активность радионуклидов в растениях, Бк/кг												
	⁹⁰ Sr	⁴⁰ K	²³² Th	²²⁶ Ra	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co	¹⁵² Eu	¹⁵⁴ Eu	¹⁵⁵ Eu	²³⁸ U	²³⁵ U	²¹⁴ Pb
Участок № 1													
1 контроль	<100	490 ± 100	9.2 ± 2.1	16 ± 3	2.9 ± 0.6	<0.4	<1	<5	<2	<2	<3.8	<1.5	11 ± 2
2	(2.9 ± 0.3) × 10 ⁵	840 ± 170	<19	27 ± 7	8.7 ± 2.7	<11	<4	<5	<9	<11	<94	<6	29 ± 6
3	(3.2 ± 0.4) × 10 ⁵	200 ± 60	<13	<7.2	17.2 ± 2.0	<15	<1	<5	<6	12 ± 7	<120	<3	<5
4	(4.6 ± 0.6) × 10 ⁵	1200 ± 200	<16	47 ± 6	7.8 ± 2.3	22 ± 8	<2	<5	<7	<13	<120	<4	32 ± 6
5	(5.0 ± 0.5) × 10 ⁵	770 ± 150	<9	30 ± 6	10.7 ± 1.7	11.3 ± 4.0	<1	<5	<6	<9	<63	<9	25 ± 5
6	(1.6 ± 0.2) × 10 ⁶	470 ± 160	<84	<37	63 ± 15	22 ± 6	<1	<7	<6	<13	<105	<3	<21
7	(2.6 ± 0.3) × 10 ⁶	570 ± 110	3.6 ± 1.7	<9	22 ± 4	22 ± 4	<1	<5	6.7 ± 1.3	<8	<34	<3	6.4 ± 2.4
8-	(3.1 ± 0.3) × 10 ⁶	261 ± 70	27 ± 11	<9	48.6 ± 3.4	58 ± 29	<4	<8	33.6 ± 54	<10	<385	<8	<10
9	(4.3 ± 0.4) × 10 ⁶	360 ± 70	<6	11 ± 3	35.9 ± 1.7	21 ± 5	<1	<5	11 ± 3	<10	<77	<4	14 ± 3
10	(4.3 ± 0.4) × 10 ⁶	280 ± 60	<18	<10	190 ± 40	180 ± 40	<3	<8	94 ± 7	71 ± 24	<450	<9	<22
Участок № 2													
1 контроль	<100	950 ± 190	17 ± 3	29 ± 6	2.6 ± 0.6	<0.5	<0.8	<1	<4	<1	22 ± 4	<2	26 ± 5
2 контроль	<100	—	—	—	5.1 ± 1.5	4.79 ± 0.67	—	<3	—	<2	<13	—	<11
3	(5.5 ± 0.7) × 10 ⁴	210 ± 60	<11	<6	3.3 ± 1.6	<8.6	<1	<3	<5	<7	<70	<2	<3
4	(2.2 ± 0.3) × 10 ⁵	170 ± 80	<16	<8	9.7 ± 2.3	38 ± 11	<1	<5	14 ± 4	<13	<150	<3	<5
5	(4.4 ± 0.5) × 10 ⁵	1500 ± 300	<17	<10	15.2 ± 2.6	125 ± 11	<2	<5	<7	<16	<140	<4	<6
6	(9.1 ± 0.9) × 10 ⁵	1400 ± 100	33 ± 12	<11	6.1 ± 2.7	28 ± 14	<2	<6	17 ± 6	<21	<190	<5	<7
7	(1.6 ± 0.2) × 10 ⁶	490 ± 100	<7	<4	3.3 ± 1.1	27 ± 7	<1	<3	9.4 ± 2.3	15 ± 6	<94	<2	<6
8	(4.1 ± 0.4) × 10 ⁶	<121	<19	<11	19.7 ± 3.4	164 ± 34	2.6 ± 1.3	<8	40 ± 6	<38	<443	<8	<9

Таблица 2. Окончание

№ точки	Удельная активность радионуклидов в растениях, Бк/кг												
	⁹⁰ Sr	⁴⁰ K	²³² Th	²²⁶ Ra	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co	¹⁵² Eu	¹⁵⁴ Eu	¹⁵⁵ Eu	²³⁸ U	²³⁵ U	²¹⁴ Pb
9	$(7.9 \pm 0.8) \times 10^6$	340 ± 70	<14	<9	6.8 ± 2.6	<41	<12	<7	14 ± 5	<35	<344	<7	<19
10	$(1.0 \pm 0.1) \times 10^7$	292 ± 66	<23	<14	35.0 ± 4.7	225 ± 53	4.5 ± 1.6	<9	74 ± 8	<61	<728	<14	<15
Участок № 3													
1 контроль	<100	<190	<24	<13	<6	<3	<4	<5	<18	<9	<54	<6	<8
2 контроль	<100	140 ± 30	<7	<3	<1.6	<0.9	<1.0	<1.5	<4	<3	<12	<1.1	<4
3	$(1.4 \pm 0.6) \times 10^3$	140 ± 51	<10	<5	<3	<2	<1.8	<3	<8	<8	<24	<2	<4
4	$(1.1 \pm 0.5) \times 10^3$	<76	<10	<5	5 ± 2	<2	<1.6	<2	<6	<7	<27	<2	<4
5	$(2.2 \pm 0.4) \times 10^4$	<140	<16	<10	<5	<4	<3	<5	<14	<10	<88	<5	<7
6	$(3.9 \pm 0.6) \times 10^4$	140 ± 70	<16	<8	<4	<4	<2	<5	<10	<10	<80	<3	<6
7	$(7.3 \pm 0.1) \times 10^4$	200 ± 90	<21	<12	9 ± 4	<8	<3	<7	<13	<22	<94	<5	<9
8	$(8.4 \pm 1.1) \times 10^4$	930 ± 190	<9	29 ± 3	<2	<4	<1.3	<3	<6	<10	<71	<2	32 ± 2
9	$(1.8 \pm 0.2) \times 10^5$	3300 ± 1700	<22	49 ± 7	<5	<10	<3	<9	<15	<28	<175	11 ± 4	36 ± 6
10	$(1.8 \pm 0.2) \times 10^6$	2700 ± 500	45 ± 20	<22	18 ± 7	<52	<4	<20	42 ± 13	<200	860 ± 390	<42	63 ± 18
11	$(4.1 \pm 0.4) \times 10^6$	735 ± 101	<48	<33	57 ± 12	<110	<6	<30	57 ± 16	<240	<1200	<46	<64
12	$(4.8 \pm 0.5) \times 10^6$	750 ± 15	<36	<24	24 ± 8	<73	<4	26 ± 15	<21	<140	<870	<32	42 ± 22
13	$(7.2 \pm 0.7) \times 10^6$	1400 ± 300	<42	49 ± 17	<15	<75	6 ± 4	<25	<29	<240	<1400	<54	47 ± 24
14	$(1.4 \pm 0.1) \times 10^7$	950 ± 190	<25	38 ± 10	42 ± 6	107 ± 23	<3	<16	35 ± 12	86 ± 49	<480	<25	41 ± 12
15	$(2.6 \pm 0.3) \times 10^7$	410 ± 130	<79	<50	72 ± 18	<178	16 ± 6	<46	<35	<370	<2200	<84	<80
16	$(1.4 \pm 0.1) \times 10^7$	—	—	—	290	230 ± 50	—	—	—	—	—	—	—
17	$(4.8 \pm 0.5) \times 10^6$	—	—	—	350 ± 70	230 ± 50	—	—	—	—	—	—	—
18	$(2.6 \pm 0.3) \times 10^7$	—	—	—	<440	<440	—	—	—	—	—	—	—

Воздушно-сухие семена раскладывали на влажную фильтровальную бумагу в чашках Петри. Семена проращивали в термостате MIR-253 при температуре 18–25°C в течение 7 ± 2 сут [17]. Проросшие семена, у которых главный корешок имел длину не менее длины семени, фиксировали в смеси 96%-ного этилового спирта и ледяной уксусной кислоты в соотношении 3:1 (фиксатор Кларка).

Для приготовления “давленных” препаратов проводили мацерацию растительной ткани, затем корешки помещали в краситель (ацетоорсеин). Корешки окрашивали в закрытых стеклянных бюксах в течение 1–2 ч. Окрашенные корешки наносили на предметное стекло, отрезали кончики (2–3 мм), добавляли каплю 45%-ного раствора уксусной кислоты, накрывали покровным стеклом и раздавливали объект так, чтобы клетки корешка распределились в один слой. Цитогенетический анализ проводили с использованием микроскопа “AxioImager M2” (Германия) при увеличении объектива $\times 100$ (масляная иммерсия) и $\times 40$.

Анализировали частоту аберрантных клеток в апикальной меристеме корешков прорастающих семян тонконога. При анализе учитывали такие цитогенетические аномалии, как мосты, фрагменты, отстающие хромосомы, забегающие хромосомы и многополосные митозы [18]. Процент аберрантных клеток (M) определяли по формуле:

$$M = \frac{A \times 100}{N}, \quad (2)$$

где: A – сумма ана-телофазных клеток с перестройками; N – общее число изученных ана-телофаз.

Статистический анализ данных. Статистическую значимость различий по частоте встречаемости цитогенетических нарушений при разных дозах облучения по сравнению с контролем оценивали с помощью двухвыборочного t -критерия Стьюдента для альтернативных признаков с учетом поправки Йетса [19, 20]. Связь радиоактивного загрязнения с цитогенетическими нарушениями в апикальной меристеме корешков проростков тонконога тонкого исследовали методами корреляционного анализа. Для сравнения данных, находящихся в широком диапазоне значений (мощность поглощенной дозы в растениях изменяется на 5 порядков, а частота аберрантных клеток только на один порядок), применяли логарифмическое преобразование для первого показателя.

Анализ частоты цитогенетических нарушений в зависимости от дозы облучения проводили с применением кусочно-линейной регрессионной модели методом наименьших квадратов. При расчетах принят критический уровень значимости 0.05. Была принята гипотеза H_0 о предполагаемой точке разрыва регрессионной кривой (T_p) для двух сегментов, относительно которой часто-

та нарушений на единицу десятичного логарифма мощности поглощенной дозы в растениях статистически значимо отличается. Статистическая оценка групп данных, характеризующих частоту цитогенетических нарушений в зависимости от логарифма мощности поглощенной дозы, расположенного слева и справа от T_p , выполнена с применением уравнения линейной регрессии:

$$Y = a_1 + a_2X (X < T_p) + a_3X (X \geq T_p), \quad (3)$$

где Y – частота цитогенетических нарушений, %; X – десятичный логарифм мощности поглощенной дозы в растениях; T_p – десятичный логарифм мощности поглощенной дозы в растениях, соответствующий положению точки разрыва на оси абсцисс; a_1 – свободный член регрессии; a_2 и a_3 – коэффициенты регрессии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание радионуклидов в растениях. Результаты определения удельной активности радионуклидов в пробах растений приведены в табл. 2. Основной вклад в загрязнение растений вносит ^{90}Sr , удельная активность которого в растениях контрольных участков ниже предела обнаружения β -спектрометра, в то время как на загрязненных участках она находится в диапазоне $n \times 10^3$ – $n \times 10^7$ Бк/кг. Можно также отметить ^{40}K и ^{238}U , удельная активность которых в растениях некоторых экспериментальных точек превышала 1000 Бк/кг.

Дозовые нагрузки на генеративные органы растений. Поглощенная растениями доза в зависимости от участка менялась от 0.00014 до 15 Гр (табл. 3). Основную часть дозы растения получали от внутреннего облучения ^{90}Sr . Вклад других радионуклидов в суммарную поглощенную дозу пренебрежимо мал.

Содержание тяжелых металлов в растениях. Сравнение результатов оценки концентраций тяжелых металлов в тканях тонконога с экспериментальных участков (табл. 4) с данными В.С. Добровольского [21] о средних концентрациях тяжелых металлов в растительности свидетельствует о том, что во всех случаях концентрации исследуемых элементов в пробах растений существенно ниже средних. Таким образом, концентрации тяжелых металлов не должны оказать токсическое воздействие на растения наших экспериментальных участков.

Частота аберрантных клеток. Всего было изучено 1404 препарата апикальной меристемы проростков, 12749 ана-телофазных клеток, из них аберрантных ана-телофаз – 874 (табл. 5).

Уникальный для полевых исследований как по количеству экспериментальных точек, так и по диапазону поглощенных доз набор данных позво-

Таблица 3. Годовые дозы облучения растений тонконога тонкого
Table 3. Absorbed by plants annual doses

Внутренняя доза, мкГр		Внешняя доза, мкГр		Суммарная доза, Гр
⁹⁰ Sr	другие радионуклиды	⁹⁰ Sr	другие радионуклиды	
Участок № 1				
57.6	468.4	0.000019	0.56	0.00052
167040	1066	0.056	1.16	0.168
184320	611.6	0.06	0.76	0.184
264960	1598	0.088	1.64	0.268
288000	990	0.092	1.24	0.288
921600	1481.6	0.3	3.48	0.92
1497600	534.4	0.48	1	1.48
1785600	1640.4	0.6	1.96	1.8
2476800	615.6	0.8	1.52	2.48
2476800	2292.8	0.8	6.56	2.48
Участок № 2				
57.6	889.6	0.000019	0.96	0.00096
57.6	78.4	0.000019	0.164	0.00014
31680	426	0.0104	0.308	0.032
126720	808.8	0.04	0.6	0.128
253440	1523.6	0.084	0.84	0.256
524160	1336.8	0.172	0.6	0.52
921600	604	0.3	0.26	0.92
2361600	2146.4	0.76	1.04	2.36
4550400	1426.4	1.48	0.56	4.56
5760000	3301.2	1.88	1.68	5.76
Участок № 3				
57.6	518.4	0	0.64	0.00056
57.6	150.4	0	0.164	0.000208
806.4	232.4	0	0.28	0.00104
633.6	220.8	0	0.344	0.00084
12672	528	0.004	0.52	0.0132
22464	465.2	0.008	0.4	0.0228
42048	622.4	0.012	0.72	0.044
48384	994.8	0.016	0.92	0.048
103680	2403.6	0.032	1.68	0.12
1036800	4018.4	0.336	1.44	1.04
2361600	4806.4	0.768	3	2.36
2764800	3516.8	0.9	1.6	2.76
4147200	5688.8	1.348	2.08	4.16
8064000	2796.4	2.62	2.52	8.08
14976000	8226.8	4.868	4.24	15
8064000	2812	2.62	10.6	8.08
2764800	2826	0.9	12.2	2.76
14976000	9170.8	4.868	16.48	15

лил оценить форму дозовой зависимости по частоте цитогенетических нарушений. Результаты статистической оценки параметров уравнения (3) приведены в табл. 6. Свободный член данной зависимости a_1 может быть интерпретирован как частота цитогенетических нарушений при равной нулю мощности дозы, a_2 и a_3 — как тангенс угла наклона к оси абсцисс на участках зависимости до и после точки перегиба.

В контрольных точках поглощенная доза находится в интервале 0.14–0.96 мГр, а частота aberrантных клеток в среднем составляет $1.4 \pm 0.3\%$ ($n = 5$). Необходимо отметить неравномерное распределение пар наблюдений (доза — частота цитогенетических нарушений) в пределах исследуемого диапазона доз, поскольку при дозе менее 10 мГр имеются только семь точек, причем пять из них являются контрольными. Для снижения разброса значений мощности поглощенной в растениях дозы, которая изменялась на пять математических порядков при изменениях частоты aberrантных клеток только на один порядок, выполнено логарифмическое преобразование значений мощности поглощенной дозы. Из представленных на рис. 2 данных можно предположить существование двух участков, в пределах которых изменение частоты цитогенетических нарушений с дозой принципиально отличается. Результаты расчета параметров представленной на рис. 2 зависимости (см. табл. 6) показали, что с 95%-ной достоверной вероятностью абсцисса точки перегиба соответствует поглощенной дозе 250 мГр, а доверительный диапазон поглощенных доз, в котором она находится — 90–690 мГр. При этом до точки перегиба частота aberrантных клеток статистически значимо не увеличивается с дозой ($a_2 = 0.711 \pm 0.395$ при $p > 0.05$). Превышение соответствующей точке перегиба дозы 250 мГр ведет к резкому увеличению частоты aberrантных клеток с дозой (на 6.2% при 10-кратном увеличении мощности поглощенной дозы). Таким образом, исходя из представленных в настоящей работе результатов полевых исследований, можно предположить наличие статистически значимой пороговой дозы, ниже которой частота цитогенетических эффектов в природных популяциях растений не превышает значимо спонтанный уровень. Однако, поскольку статистические параметры этой зависимости находятся на границе значимости (см. табл. 6), для обоснования или опровержения этой гипотезы необходимо проведение дополнительных исследований.

Спектр цитогенетических нарушений. В ходе цитогенетического анализа были обнаружены следующие типы нарушений (рис. 3): одиночные и двойные мосты, одиночные и двойные фрагменты, митотические нарушения (забегания, отставания хромосом, трехполюсные митозы).

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов в растениях тонконога тонкого
Table 4. The content of heavy metals in crested hairgrass plants

Элемент	Содержание элементов, мг/кг			кларк в растительности суши [21]
	m^*	g^*	$M_e(Q_{1/2}-Q_{3/4})$	
V, $n = 34$	2.2	1.7	1.2 (1–2)	30
Cr, $n = 31$	4.2	2.7	3.2 (1–6.3)	35
Mn, $n = 34$	89.0	78.2	84.5 (60–109)	4100
Co, $n = 34$	0.52	0.34	0.3 (0.2–0.4)	10
Cu, $n = 34$	3.3	3.2	3.2 (2.4–4)	160
Zn, $n = 34$	14.5	13.3	13.5 (10–17)	600
As, $n = 32$	0.32	0.25	0.2 (0.2–0.4)	3
Sr, $n = 34$	45.0	42.6	43 (34–54)	700
Cd, $n = 34$	0.13	0.12	0.1 (0.1–0.2)	0.7
Cs, $n = 34$	0.064	0.053	0.04(0.03–0.1)	3
Pb, $n = 34$	3.0	2.7	2.4 (2–3)	25
U, $n = 34$	0.11	0.09	0.1 (0.1–0.1)	0.4

Примечание. n — число исследованных растений, m — среднее арифметическое, g — среднее геометрическое, M_e — медиана, $Q_{1/2}-Q_{3/4}$ — верхний и нижний квартиль.

В некоторых клетках присутствовали сразу несколько типов нарушений. Данные о частоте aberrаций разного типа и их относительном вкладе в спектр цитогенетических нарушений

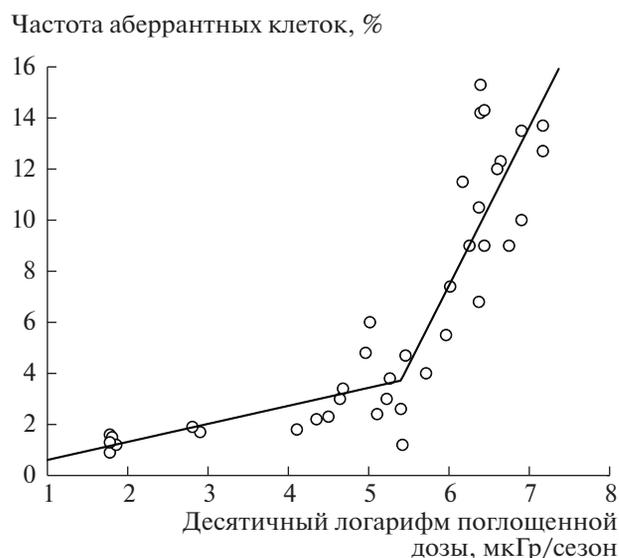


Рис. 2. Зависимость частоты aberrантных клеток от десятичного логарифма поглощенной растениями дозы.

Fig. 2. Dependence of the aberrant cells frequency on the decimal logarithm of absorbed by plants dose.

Таблица 5. Частота и спектр цитогенетических нарушений в проростках тонконога тонкого
Table 5. Frequency and spectrum of cytogenetic abnormalities in seedlings of crested hairgrass

№ точки	Просмотрены и изучены				Число нарушений							Спектр нарушений, % ± m			Частота ана-телофаз с цитогенетическими нарушениями % ± m
	Число корешков	Число ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число нарушений	m'	m''	f'	f''	g	s	3p	m' + f'	m'' + f''	g + s + 3p	
Участок № 1															
1(К)	37	251	4	5	2	3	—	—	—	—	—	0.8 ± 0.6	1.2 ± 0.7	—	1.6 ± 0.8
2	41	236	7	9	5	2	1	—	1	—	—	2.5 ± 1.0	0.9 ± 0.6	0.4 ± 0.4	3.0 ± 1.1
3	32	185	7	9	3	—	3	2	—	1	—	3.2 ± 1.3	1.1 ± 0.8	0.5 ± 0.5	3.8 ± 1.4
4	22	161	2	2	—	1	—	—	—	1	—	—	0.6 ± 0.6	0.6 ± 0.6	1.2 ± 0.9
5	24	127	6	6	3	2	—	1	—	—	—	2.4 ± 1.4	2.4 ± 1.4	—	4.7 ± 2.0
6	42	290	14	20	6	6	—	1	1	6	—	2.1 ± 0.8	2.4 ± 0.9	2.4 ± 0.9*	4.8 ± 1.3*
7	36	183	21	22	8	5	4	—	—	1	1	7.0 ± 2.0**	5.0 ± 1.6*	1.1 ± 0.8	11.5 ± 2.4**
8	31	222	20	20	5	9	3	1	—	2	—	3.6 ± 1.3*	4.5 ± 1.4*	0.9 ± 0.6	9.0 ± 3.0*
9	28	228	32	32	7	9	6	5	3	2	—	5.7 ± 1.5**	6.1 ± 1.6**	2.2 ± 1.0	14 ± 2.3**
10	30	189	29	31	8	13	1	4	3	2	—	4.8 ± 1.6*	9.0 ± 2.1***	2.6 ± 1.2	15.3 ± 2.6**
Участок № 2															
1(К)	39	402	6	9	4	1	3	—	1	—	—	1.7 ± 0.6	0.2 ± 0.2	0.2 ± 0.2	1.5 ± 0.6
2(К)	124	107	1	1	—	—	1	—	—	—	—	0.9 ± 0.9	—	—	0.9 ± 1.0
3	23	172	4	6	2	1	3	—	—	—	—	3.0 ± 1.3	0.6 ± 0.6	—	2.3 ± 1.1
4	49	254	6	8	6	1	1	—	—	—	—	2.8 ± 1.0	0.4 ± 0.4	—	2.4 ± 1.0
5	56	459	12	12	3	—	2	—	2	—	—	1.1 ± 0.5	0.4 ± 0.3	—	2.6 ± 0.7
6	48	251	10	14	3	5	2	—	4	—	—	2.0 ± 0.9	2.0 ± 0.9	1.6 ± 0.8	4.0 ± 1.2
7	30	199	11	13	6	1	1	1	4	—	—	3.5 ± 1.3	1.0 ± 0.7	2.0 ± 1.0	5.5 ± 1.6*
8	34	263	18	18	3	6	5	2	2	—	—	3.0 ± 1.1	3.0 ± 1.1*	0.8 ± 0.5	6.8 ± 1.6*
9	50	448	55	56	12	25	2	6	5	6	—	3.1 ± 0.8	7.0 ± 1.2***	2.9 ± 0.8***	12.3 ± 1.6**
10	59	475	43	44	11	13	5	4	4	7	—	3.4 ± 0.8	3.6 ± 0.9***	2.3 ± 0.7**	9.0 ± 1.3**
Участок № 3															
1(К)	32	330	4	4	1	1	1	1	—	—	—	0.6 ± 0.4	0.6 ± 0.4	—	1.2 ± 0.6
2(К)	26	299	4	4	1	3	—	—	—	—	—	0.3 ± 0.3	1.0 ± 0.6	—	1.3 ± 0.7
3	41	508	9	9	2	3	1	1	1	1	—	0.6 ± 0.3	0.8 ± 0.4	0.4 ± 0.3	1.7 ± 0.6
4	33	424	8	8	2	3	1	1	1	—	—	0.7 ± 0.4	1.0 ± 0.5	0.2 ± 0.2	1.9 ± 0.7
5	25	281	5	5	2	1	2	—	—	—	—	1.4 ± 0.7	0.4 ± 0.4	—	1.8 ± 0.8
6	29	445	10	10	4	3	1	1	1	—	—	1.1 ± 0.5	0.9 ± 0.4	0.2 ± 0.2	2.2 ± 0.7
7	26	275	8	8	1	4	1	1	1	—	—	0.7 ± 0.5	1.8 ± 0.8	0.4 ± 0.4	3.0 ± 1.0

№ точки	Просмотрены и изучены				Число нарушений							Спектр нарушений, % ± <i>m</i>			Частота ана-телофаз с цитогенетическими нарушениями % ± <i>m</i>
	Число корешков	Число ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число нарушений	m'	m''	f'	f''	g	s	3p	m' + f'	m'' + f''	g + s + 3p	
8	31	466	16	16	2	8	2	2	—	1	1	0.9 ± 0.4	2.1 ± 0.7	0.4 ± 0.3	3.4 ± 0.8*
9	34	441	27	29	6	5	5	5	4	4	—	2.5 ± 0.7*	2.3 ± 0.7*	1.8 ± 0.6	6.0 ± 1.1**
10	37	408	30	30	5	11	2	5	3	4	—	1.7 ± 0.6	4.0 ± 1.0***	1.7 ± 0.6	7.4 ± 1.3**
11	23	228	24	24	7	9	2	4	1	1	—	4.0 ± 1.3*	5.7 ± 1.5**	0.9 ± 0.6	10.5 ± 2.0**
12	40	627	56	59	9	32	4	5	5	5	1	2.1 ± 0.6*	6.0 ± 1.0***	1.8 ± 0.5	9.0 ± 1.1**
13	22	256	31	33	12	11	1	5	2	2	—	5.0 ± 1.4**	6.3 ± 1.5***	1.6 ± 0.8	12 ± 2.0**
14	20	266	36	36	3	16	4	8	4	1	—	2.6 ± 1.0*	9.0 ± 1.8***	1.9 ± 0.8	13.5 ± 2.1**
15	47	532	73	74	11	31	13	9	3	7	—	4.5 ± 0.9***	7.5 ± 1.0***	1.9 ± 0.6*	13.7 ± 1.5**
16	30	632	62	63	6	32	3	4	3	10	5	1.4 ± 0.5	5.7 ± 1.0***	2.8 ± 0.7**	10 ± 1.2**
17	28	482	69	76	10	19	9	14	2	18	4	4.0 ± 0.9***	6.8 ± 1.1***	5.0 ± 1.0***	14.3 ± 1.6**
18	45	747	94	100	18	37	9	10	5	17	4	3.6 ± 0.7***	6.3 ± 0.9***	3.5 ± 0.7***	12.7 ± 1.2**

Примечание. К — контроль; f' и f'' — одиночные и двойные фрагменты; m' и m'' — одиночные и двойные мосты; m' + f' — хроматидные мосты и фрагменты; m'' + f'' — хромосомные мосты и фрагменты; g — отстаивания хромосомом; s — забегания хромосомом; 3p — трехполюсные митозы.

Различия с контролем статистически значимы при уровне значимости: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Note. C — control; f' and f'' — single and double fragments; m' and m'' — single and double bridges; m' + f' — chromatid (single) bridges and fragments; m'' + f'' — chromosome (double) bridges and fragments; g — chromosome lags; s — overlapping chromosome; 3p—triple pole mitosis.

Significant difference from the control: * $p < 0.05$, ** $p < 0.001$, *** $p < 0.001$.

представлены в табл. 5, из которой следует, что в условиях хронического облучения основной вклад (40–80%) в спектр структурных мутаций в популяциях тонконога тонкого вносят одиночные и двойные мосты. Вклад одиночных, двойных фрагментов и митотических аномалий менее 50% (табл. 5). Частота aberrаций хроматидного и хромосомного типа статистически значимо превышала контрольный уровень на участках с поглощенной растениями дозой более 0.1 Гр, митотических аномалий — на участках с поглощенной дозой более 2.7 Гр (табл. 3, табл. 5).

Статистический анализ зависимостей “мощность поглощенной дозы—частота разных типов цитогенетических нарушений” свидетельствует о наличии точек перегиба, характеризующих резкое изменение частоты выхода данного типа нарушений с дозой (табл. 6). В частности, для частоты двойных мостов и фрагментов значение точки перегиба (232 мГр) и ее доверительный интервал (70–750 мГр) практически совпадают с показателями для частоты aberrантных клеток, что подчеркивает ведущий вклад этого вида цитогенети-

ческих нарушений в формирование aberrантных клеток.

Поскольку повышенная частота двойных мостов и фрагментов типична для облученных организмов [22], эти данные являются еще одним подтверждением радиационной природы наблюдаемых изменений. Для остальных цитогенетических эффектов связь с мощностью дозы несколько ниже, а для митотических аномалий значимость точки перегиба вообще не удалось показать. Наиболее сильная связь с мощностью дозы обнаружена для двойных мостов, дозовая зависимость для которых фактически повторяет зависимость для частоты aberrантных клеток (рис. 2, 4). Таким образом, в условиях загрязнения среды обитания тонконога тонкого преимущественно ^{90}Sr основной вклад в формирование цитогенетических эффектов вносят двойные мосты.

До точки перегиба частота всех видов цитогенетических нарушений не зависит от дозы (параметр a_2 не отличается статистически значимо от нуля ($a_2 = -0.222 - 0.193$ при значении t -критерия Стьюдента = $-0.236 - 0.784$ и уровне значимости

Таблица 6. Статистические оценки параметров зависимости цитогенетических нарушений от десятичного логарифма мощности поглощенной дозы**Table 6.** Statistical estimates of parameters of the dependence of cytogenetic abnormalities on decimal logarithm of the absorbed dose rate

Вид цитогенетических нарушений	Параметр	Параметр и его стандартная ошибка	Критерий Стьюдента	Уровень значимости, отн. ед.	Доверительный интервал параметра	
					нижний	верхний
Частота aberrantных клеток	a_1	3.734 ± 0.886	4.216	0.000	1.934	5.534
	a_2	0.711 ± 0.395	1.803	0.080	-0.062	1.485
	T_p	5.401 ± 0.215	24.764	0.000	4.958	5.844
	a_3	6.188 ± 0.854	7.248	0.000	4.453	7.923
Частота одиночных фрагментов и мостов	a_1	0.502 ± 1.151	0.436	0.665	-1.836	2.840
	a_2	-0.222 ± 0.941	-0.236	0.815	-2.134	1.690
	T_p	3.513 ± 1.265	2.777	0.009	0.942	6.084
	a_3	0.988 ± 0.248	3.988	0.000	0.484	1.491
Частота двойных фрагментов и мостов	a_1	1.402 ± 0.538	2.607	0.014	0.307	2.497
	a_2	0.193 ± 0.246	0.784	0.439	-0.308	0.694
	T_p	5.366 ± 0.250	21.503	0.000	4.858	5.875
	a_3	3.617 ± 0.614	5.894	0.000	2.367	4.868
Частота трехполосных митозов, забеганий и отставаний хромосом	a_1	0.323 ± 2.039	0.158	0.875	-3.868	4.513
	a_2	0.020 ± 1.041	0.019	0.985	-2.120	2.160
	T_p	4.350 ± 2.587	1.682	0.105	-0.968	9.667
	a_3	0.803 ± 0.217	3.708	0.001	0.358	1.249

$p > 0.44$). После точки перегиба ситуация кардинально меняется: значения тангенса угла наклона a_3 рассчитаны с высокой степенью надежности ($t > 3.7$ при $p < 0.001$). Таким образом, статистический анализ параметров зависимости “доза–эффект” по всем видам цитогенетических нарушений подтверждает наличие пороговой дозы, ниже которой частота нарушений не отличается от спонтанного уровня, а выше – возрастает с увеличением дозы. Тем не менее полученные результаты в силу неравномерного распределения экспериментальных данных в пределах исследуемого диапазона доз и присущей полевым наблюдениям неопределенности в оценках доз требуют дополнительного исследования.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выбранные для проведения исследований на площадке “4А” 38 экспериментальных точек (в том числе пять контрольных) не отличались друг от друга по почвенно-климатическим условиям и загрязнению тяжелыми металлами (табл. 4), но были контрастны по уровню радиоактивного загрязнения (табл. 2). Доминирующую роль в радиоактивном загрязнении площадки “4А” играет ^{90}Sr , удельная активность которого в отдельных

пробах растений достигала нескольких МБк/кг. Учитывая высокую подвижность ^{90}Sr в системе почва–растение [23], не удивительно, что основной вклад в дозовую нагрузку растений внесло внутреннее облучение ^{90}Sr (табл. 3). Исходя из однородности участков по почвенно-климатическим условиям и содержанию тяжелых металлов, можно утверждать, что наблюдаемые в популяциях тонконога цитогенетические эффекты являются следствием радиационного воздействия.

По мнению МКРЗ [4], значимые изменения в популяциях злаковых растений начинаются с годовой дозы ~ 3.65 Гр. Поэтому радиационное воздействие на природные популяции тонконога на площадке “4А”, где проводили испытания боевых радиоактивных веществ, было достаточно высоким для индукции значительных биологических эффектов. Действительно, частота цитогенетических нарушений в проростках семян на участках с поглощенной дозой выше 250 мГр статистически значимо превышала уровень контроля и увеличивалась до 15% (табл. 5). Впервые по данным полевых исследований установлена пороговая доза, ниже которой частота цитогенетических нарушений не превышает статистически значимо спонтанный уровень. Этот результат

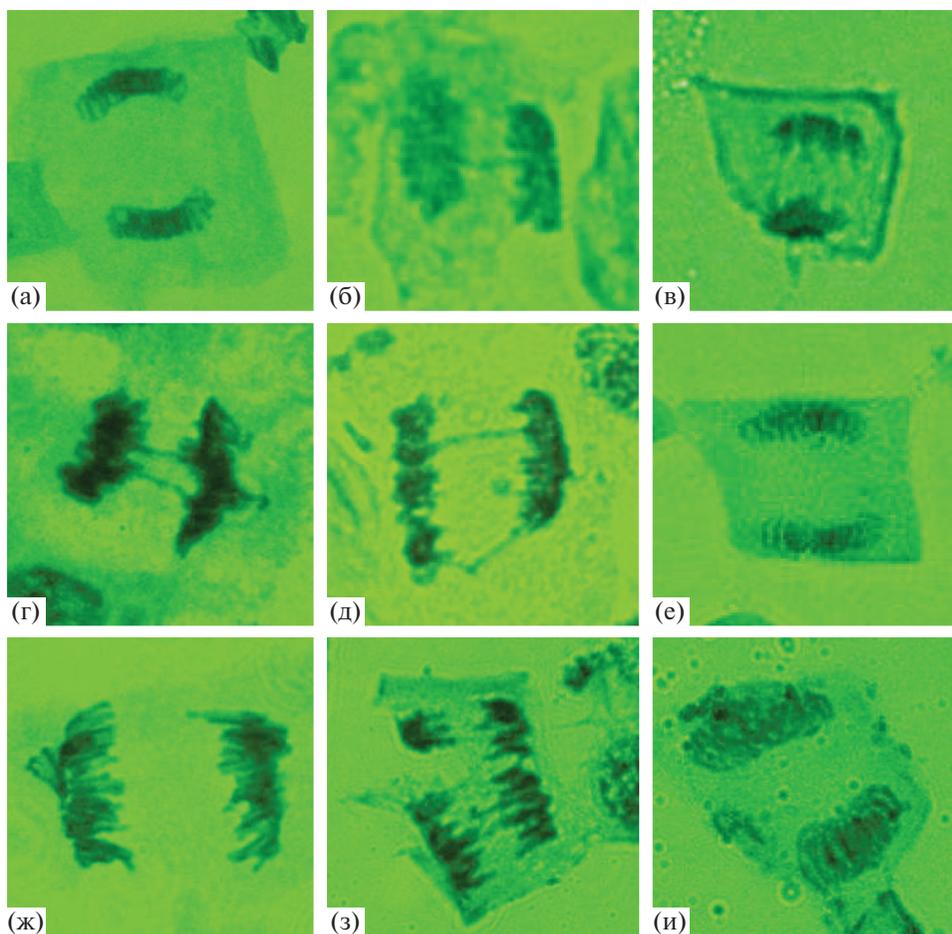


Рис. 3. Цитогенетические аномалии в ана-телофазных клетках тонконога с площадки “4А”: а – нормальная анафаза; б – одиночный мост; в – одиночный мост и забегание хромосомы (сложное нарушение); г – двойной мост и забегания хромосом (сложное нарушение); д – двойной мост; е – двойной фрагмент; ж – забегания хромосом, з – трехполюсный митоз; и) отставания хромосом.

Fig. 3. Cytogenetic abnormalities in the ana-telophase cells of crested hairgrass growing in the “4A” site: a – normal ana-telophase cell; b – single bridge; c – single bridge and chromosome overlapping (complex abnormalities); d – double bridge and chromosome overlapping (complex abnormalities); e – double bridge; f – double fragment; g – chromosome overlapping, h – triple pole mitosis; i – chromosome lagging.

имеет важное значение для развития системы радиационной защиты биоты. Однако полученные результаты, в силу недостаточной статистической нагруженности и присущей полевым наблюдениям неопределенности в оценках доз, требуют дополнительного исследования.

Ранее пороговый характер дозовой зависимости был установлен нами в лабораторных экспериментах с облучением семян пшеницы [24], семян [25] и проростков ячменя [26]. Представленные в работе [27] результаты эксперимента с корневым поступлением радионуклидов ^{90}Sr в растения ячменя также позволяют предположить наличие дозозависимого участка по частоте клеток с абберациями вплоть до 0.2 Гр (в нашем случае 0.25 Гр) с последующим линейным ростом до 2.4 Гр, после чего частота цитогенетических нарушений выходит на плато. В нашем исследо-

вании прирост частоты цитогенетических нарушений с дозой также резко замедляется, начиная с доз порядка 4 Гр. Однако имеющихся в нашем распоряжении данных оказалось недостаточно, чтобы обосновать статистически значимое плато в диапазоне 4–15 Гр. Тем не менее сопоставление выявленной в ходе настоящего исследования формы эмпирической дозовой зависимости с полученными ранее результатами показало, что кривые имеют схожий вид. Результаты различаются лишь значениями доз, при которых происходит выход на плато (2.4 Гр в работе [27], 4 Гр в нашем случае). При этом надо учитывать, что ячмень гораздо чувствительнее тонконога к действию ионизирующего излучения [28], а цитогенетические эффекты в работе [27] оценивались в более чувствительной фазе мейоза.

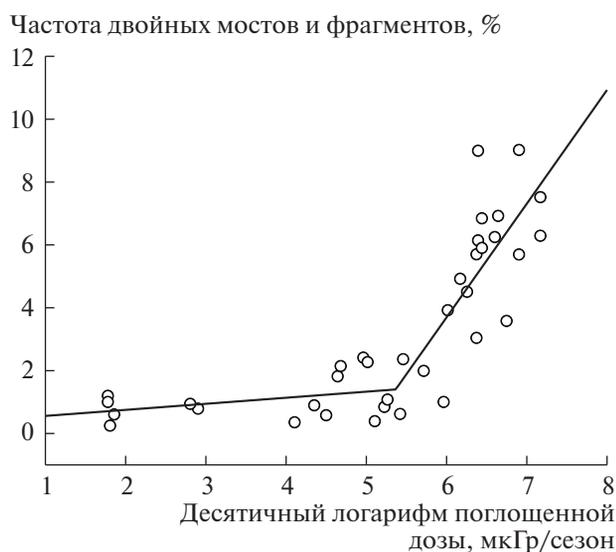


Рис. 4. Зависимость частоты двойных мостов от поглощенной дозы на экспериментальных участках СИП.

Fig. 4. The relationship between the frequency of double bridges and the absorbed dose at the experimental sites of the STS.

Таким образом, в ходе исследования цитогенетических эффектов у тонконога, произрастающего в местах испытания боевых радиоактивных веществ, установлена нелинейная зависимость между частотой цитогенетических нарушений в апикальной меристеме корешков проростков семян и дозой, поглощенной критическими органами растений. В диапазоне доз 0.14–250 мГр частота цитогенетических эффектов не отличается от контрольного уровня, т.е. установлен порог для данного типа эффектов. Превышение пороговой дозы ведет к линейному росту частоты цитогенетических нарушений вплоть до 15%. Основной вклад в формирование цитогенетических эффектов вносят двойные мосты, что служит еще одним подтверждением радиационной природы наблюдаемых изменений.

Сложившаяся на территории СИП уникальная радиоэкологическая ситуация, характеризующаяся значительным диапазоном уровней радиоактивного загрязнения, широким спектром радионуклидов, наличием участков с доминирующим вкладом излучений разного типа в формирование дозовой нагрузки на объекты живой природы, а также климатическими особенностями данного региона, предоставляет широкие возможности для изучения биологических эффектов в биоценозах, подвергавшихся хроническому радиационному воздействию на фоне экстремальных условий среды обитания. Населяющие в настоящее время территорию СИП организмы являются потомками растений и животных, ис-

пытывавших острое радиационное воздействие в период проведения ядерных испытаний и в течение многих поколений подвергавшихся хроническому облучению. Очевидна ценность получаемых в таких условиях данных как для научного обоснования оценок риска радиационного воздействия для человека и живой природы, так и для понимания сложных процессов, происходящих в биосфере в условиях увеличивающегося техногенного воздействия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела аналитических исследований за проведение спектрометрических и элементных анализов, а также сотрудникам отдела комплексных исследований экосистем Института радиационной безопасности и экологии за помощь в организации и проведении радиоэкологических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Логачёв В.А.* Ядерные испытания СССР. Семипалатинский полигон: факты, свидетельства, воспоминания. Обеспечение общей и радиационной безопасности ядерных испытаний. М.: ФУ Медбиоэкстрем, 1997. 319 с. [*Logachyov V.A.* Yadernye ispytaniya SSSR. Semipalatinskij poligon: fakty, svidetel'stva, vospominaniya. Obespechenie obshchej i radiacionnoj bezopasnosti yadernyh ispytaniy. M.: FU Medbioekstrem, 1997. 319 p. (In Russian)]
2. *Мозолин Е.М., Гераськин С.А., Минкенова К.С.* Радиобиологические эффекты у растений и животных Семипалатинского испытательного полигона (Казахстан) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. № 4. С. 422–431. [*Mozolin E.M., Geras'kin S.A., Minkanova K.S.* Radiobiologicheskie efekty u rastenij i zhivotnyh Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona (Kazahstan) // Radiac. biologiya. Radioekologiya. 2008. V. 48. № 4. P. 422–431. (In Russian)]
3. *Кундузбаева А.Е., Кабдыракова А.М., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю.* Сравнительная оценка форм нахождения радионуклидов в почвах некоторых участков территории СИП // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана: Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011 г. Т. 2. Вып. 3. Павлодар: Дом печати, 2011. С. 101–119. [*Kunduzbaeva A.E., Kabdyrakova A.M., Lukashenko S.N., Magasheva R.Yu.* Sravnitel'naya ocenka form nahozhdeniya radionuklidov v pochvah nekotoryh uchastkov territorii SIP // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazahstana: Sbornik trudov Nacional'nogo yadernogo centra Respubliki Kazahstan za 2011 g. V. 2. № 3. Pavlodar: Dom pechati, 2011. P. 101–119. (In Russian)]
4. *Осинцев А.Ю., Сальменбаев С.Е.* Исследование характера и уровней радиоактивного загрязнения площадки испытаний боевых радиоактивных веществ // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Вып. 4. Т. 1. Павлодар: Дом печати, 2013.

- С. 189–201. [Osincev A.YU., Sal'menbaev S.E. Issledovanie haraktera i urovnya radioaktivnogo zagryazneniya ploshchadki ispytaniy boevykh radioaktivnykh veshchestv // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazahstana. V. 1. № 4. Pavlodar: Dom pechati, 2013. P. 189–201. (In Russian)]
5. ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. *Annals ICRP* 38. 2009. P. 1–242.
 6. Гераськин С.А., Мозолин Е.М., Дикарев В.Г. и др. Цитогенетические эффекты в популяциях *Koeleria gracilis* Pers. с территории Семипалатинского испытательного полигона // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49. № 2. С. 147–157. [Geras'kin S.A., Mozolin E.M., Dikarev V.G. et al. Citogeneticheskie efekty v populyatsiyah *Koeleria gracilis* Pers. s territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona // Radiac. biologiya. Radioekologiya. 2009. V. 49. №2. P. 147–157. (In Russian)]
 7. Назарбаев Н.А., Школьник В.С., Батырбеков Э.Г. и др. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние (монография). Т. 1. Павлодар: Дом Печати, 2016. 320 с. [Nazarbaev N.A., Shkol'nik V.S., Bатырбеков E.G. i dr. Provedenie kompleksa nauchno-tekhnicheskikh i inzhenernykh работ po privedeniyu byvshego Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona v bezopasnoe sostoyanie (monografiya). V. 1. Pavlodar: Dom Pechati, 2016. 320 p. (In Russian)]
 8. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Радиоэкологическое состояние “Северной” части территории Семипалатинского испытательного полигона / Под ред. С.Н. Лукашенко. Павлодар: Дом печати, 2010. Вып. 1. 234 с. [Aktual'nye voprosy radioekologii Kazahstana. Radioekologicheskoe sostoyanie “Severnoy” chasti territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona / Pod red. S.N. Lukashenko. V. 1. Pavlodar: Dom pechati, 2010. 234 p. (In Russian)]
 9. Карамышева З.В., Рачковская Е.И. Ботаническая география степной части Центрального Казахстана. Л.: Наука, 1973. 277 с. [Karamysheva Z.V., Rachkovskaya E.I. Botanicheskaya geografiya stepnoj chasti Central'nogo Kazahstana. L.: Nauka; 1973. 277 p (In Russian)]
 10. Власова Н.В. Флора Сибири. Т. 2. Новосибирск: Наука, 1990. 361 с. [Vlasova N.V. Flora Sibiri. V. 2. Novosibirsk: Nauka, 1990. 361 p. (In Russian)]
 11. Инструкция и методические указания по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории. Межведомственная комиссия по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР. М., 1989. 118 с. [Instrukciya i metodicheskie ukazaniya po nazemnomu obsledovaniyu radiacionnoj obstanovki na zagryaznenoj territorii. Mezhhvedomstvennaya komissiya po radiacionnomu kontrolyu prirodnoj sredy pri Goskomgidromete SSSR. M.: 1989. 118 p. (In Russian)]
 12. МИ 5.06.001.98 РК Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре. МИ 2143-91. 18 с. [МИ 5.06.001.98 РК Aktivnost' radionuklidov v ob'emnykh obrazcah. Metodika vypolneniya izmerenij na gamma-spektrometre. MI 2143-91. 18 p. (In Russian)]
 13. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного бета-спектрометра с программным обеспечением “Прогресс” МВИ №40090.4Г006, Менделеево. 20 с. [Metodika izmereniya aktivnosti radionuklidov s ispol'zovaniem scintillyacionnogo beta-spektrometra s programmym obespecheniem “Progress” MVI №40090.4G006, Mendeleev. 20 p. (In Russian)]
 14. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments Technical Reports Series No. 472. Vienna: IAEA, 2010. 194 p.
 15. Подготовка проб для элементного анализа методом автоклавного разложения. Рабочая инструкция. РИ 03-02-03 (А). Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК, 2014. 12 с. [Podgotovka prob dlya elementnogo analiza metodom avtoklavnogo razlozheniya. Rabochaya instrukciya. RI 03-02-03 (A). Kurchatov: IRBE NYAC RK, 2014. 12 p. (In Russian)]
 16. Рабочая инструкция. Проведение элементного анализа проб растений методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре ELAN 9000. Курчатов, 2018. 25 с. [Rabochaya instrukciya. Provedenie elementnogo analiza prob rastenij metodom mass-spektrometrii s induktivno svyazannoj plazмой na mass-spektrometre ELAN 9000. Kurchatov: 2018. 25 p. (In Russian)]
 17. Майсuryан Н.А. Практикум по растениеводству. М.: 1980. 447 с. [Majsuryan N.A. Praktikum po rastenievodstvu. M.: Kolos, 1980. 447 p. (In Russian)]
 18. Паушева З.В. Практикум по цитологии растений. М.: Колос, 1980. 225 с. [Pausheva Z.V. Praktikum po citologii rastenij. M.: Kolos, 1980. 225 p. (In Russian)]
 19. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. школа, 1990. 352 с. [Lakin G.F. Biometriya. M.: Vysshaya shkola, 1990. 352 p. (In Russian)]
 20. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с. [Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. M.: Fizmatlit; 2006. 816 p. (In Russian)]
 21. Добровольский В.С. Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003. 400 с. [Dobrovolskij V.S. Osnovy biogeohimii. M.: Akademiya, 2003. 400 p. (In Russian)]
 22. Streffer C., Bolt H., Follesdal D. et al. Low dose exposures in the environment. Dose-effect relations and risk evaluation. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 471 p.
 23. Burger A., Lichtscheidl I. Strontium in the environment: Review about reactions of plants towards stable and radioactive strontium isotopes // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 653. P. 1458–1512.
 24. Гераськин С.А., Зяблицкая Е.Я., Удалова А.А. Закономерности индукции γ -излучением структурных мутаций в корневой меристеме проростков семян гексаплоидной пшеницы // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35. Вып. 2. С. 137–149. [Geras'kin S.A., Zyblickaya E.Ya., Udalova A.A. Zakonomernosti induktsii γ -izlucheniem strukturnih mutatsiy v kornevoy meristeme propostkov semian geksaploidnoy pshenicy // Radiac. biologiya. Radioekologiya. 1995. T. 35. Vyp. 2. S. 137–149. (In Russian)]

- loidnoy pshenitsi // Radiac. biologiya. Radioekologiya. 1995. V. 35. № 2. P. 137–149. (In Russian)]
25. Гераськин С.А., Зяблицкая Е.Я., Удалова А.А. Закономерности выхода структурных мутаций в корневой меристеме облученных ионизирующим излучением семян ячменя // Радиация. биология. Радиоэкология. 1997. Т. 37. Вып. 1. С. 82–90. [Geras'kin S.A., Zyblickaya E.Ya., Udalova A.A. Zakonomernosti vkhoda strukturnih mutatsiy v kornevoy meristeme obluchennykh ioniziruyuschim izlucheniem semyan yachmenya // Radiac. biologiya. Radioekologiya. 1997. V. 37. № 1. P. 82–90. (In Russian)]
26. Гераськин С.А., Дикарев В.Г., Удалова А.А., Дикарева Н.С. Закономерности индукции малыми дозами ионизирующего излучения цитогенетических повреждений в корневой меристеме проростков ячменя // Радиация. биология. Радиоэкология. 1999. Т. 39. Вып. 4. С. 373–383. [Geras'kin S.A., Dikarev V.G., Udalova A.A., Dikareva N.S. Zakonomernosti induktsii malymi dozami ioniziruyushchego izlucheniya tsitogeneticheskikh povrezhdeniy v kornevoy meristeme prorstkov yachmenya // Radiac. biologiya. Radioekologiya. 1999. V. 39. № 4. P. 373–383. (In Russian)]
27. Зяблицкая Е.Я., Кальченко В.А., Алексахин Р.М., Зуев Н.Д. Кинетика формирования поглощенных доз и влияние хронического β-излучения на цитогенетические показатели и урожай у ячменя // Радиобиология. 1984. Т. 24. Вып. 6. С. 774–778. [Zyblickaya E.Ya., Kal'chenko V.A., Aleakhin R.M., Zuev N.D. Kinetika formirovaniya pogloshchennykh doz i vliyaniye hronicheskogo β-izlucheniya na tsitogeneticheskie pokazateli i urozhay u yachmenya // Radiobiologiya. 1984. T. 24. Vyp. 6. S. 774–778. (In Russian)]
28. Преображенская Е.И. Радиоустойчивость семян растений. М.: Атомиздат, 1971. 239 с. [Preobrazhenskaya E.I. Radioustojchivost' semyan rastenij. M.: Atomizdat, 1971. 239 p. (In Russian)]

Cytogenetic Effects in Crested Hairgrass Populations from the Technical Site “4A” of the Semipalatinsk Nuclear Test Site where Combat Radioactive Substances Were Tested

K. S. Minkanova^a, Z. A. Baigazinov^a, S. A. Geras'kin^{b, #}, and A. N. Perevolotsky^b

^a Institute of Radiation Safety and Ecology, NNC, Kurchatov, Kazakhstan

^b Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

[#] E-mail: stgeraskin@gmail.com

An assessment of cytogenetic effects in the crested hairgrass was performed in 38 experimental points of the 4A site of the Semipalatinsk test site (Kazakhstan), which did not differ in soil characteristics and heavy metal contamination, but contrasted in level of radioactive contamination. At the “4A” site in 1954–1957 military radioactive substances were tested. Absorbed by plants doses at this site vary in the range of 0.00014–15 Gy, ⁹⁰Sr makes the main contribution. It was shown that the dose dependence splits into two sections, within which the nature of the change in the frequency of cytogenetic disorders with the dose is fundamentally different. In the range of 0.05–250 mGy, cytogenetic alterations frequency does not statistically significantly differ from the control level. The results obtained suggest the presence of a threshold dose below which the frequency of cytogenetic effects in natural plant populations remains at a spontaneous level. Increasing the dose above this limit leads to a linear increase in the frequency of cytogenetic abnormalities. The main contribution to the formation of cytogenetic effects is made by double bridges, which serves as additional evidence of the radiation nature of changes observed in the crested hairgrass populations.

Keywords: the Semipalatinsk test site, radioactive contamination, ⁹⁰Sr, cytogenetic abnormalities, crested hairgrass