

УДК 575.224.23:582.52:581.5:57.084.2:539.1.047

## ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОПУЛЯЦИЯХ КОВЫЛЯ ВОЛОСОВИДНОГО С ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

© 2022 г. С. А. Гераськин<sup>1,\*</sup>, К. С. Минкенова<sup>2</sup>, Т. В. Переволоцкая<sup>1</sup>, А. Н. Переволоцкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

<sup>2</sup>Филиал “Институт радиационной безопасности и экологии” РГП “НЯЦ РК”, Курчатов, Казахстан

\*E-mail: stgeraskin@gmail.com

Поступила в редакцию 02.03.2022 г.

После доработки 27.07.2022 г.

Принята к публикации 07.09.2022 г.

Оценка цитогенетических эффектов в популяциях ковыля волосовидного выполнена на 63 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 1953–1957 гг. проводили испытания боевых радиоактивных веществ. Дозовые нагрузки на растения ковыля волосовидного на этой площадке варьируют в диапазоне 0.00036–11 Гр/вегетационный сезон, основной вклад в поглощенную растениями дозу вносит внутреннее облучение от <sup>90</sup>Sr. Показано, что зависимость частоты цитогенетических эффектов от логарифма дозы распадается на два участка. В диапазоне 0.36–162 мГр частота аберрантных клеток статистически значимо не отличается от контрольного уровня. Увеличение дозы выше этого предела ведет к статистически значимому росту частоты аберрантных клеток. Точки перегиба оценены и для других цитогенетических показателей (120 мГр для одиночных фрагментов и мостов, 141 мГр для двойных фрагментов и мостов и 174 мГр для митотических аномалий). Основной вклад в формирование цитогенетических эффектов вносят двойные мосты, что служит дополнительным доказательством радиационной природы наблюдаемых в популяциях ковыля волосовидного изменений.

**Ключевые слова:** Семипалатинский испытательный полигон, радиоактивное загрязнение, <sup>90</sup>Sr, цитогенетические нарушения, ковыль волосовидный

**DOI:** 10.31857/S0869803122060054

Семипалатинский полигон (СИП), Казахстан, был основным местом испытаний ядерного оружия в СССР. Здесь были проведены испытания первой советской атомной и водородных бомб. Всего на СИП было выполнено 456 ядерных взрывов, что привело к формированию на полигоне участков с существенно повышенным радиационным фоном [1]. Наиболее высокие уровни радиоактивного загрязнения локализованы на нескольких технических площадках: Опытное поле, Дегелен, Балапан, Сары-Узень и 4А [2]. Радиоактивное загрязнение технических площадок существенно отличается уровнями загрязнения и составом дозообразующих радионуклидов, что делает особенно ценным исследование населяющих эти территории растений и животных. Однако исследования биологических эффектов хронического облучения в полевых условиях СИП немногочисленны, в большинстве публикаций отсутствует информация об уровнях радиоактивного и химического загрязнения и величинах по-

глощенных доз [3], что не позволяет связать описанные в этих работах биологические эффекты с радиационным воздействием. 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 [2, 4].

В настоящей работе представлены данные о цитогенетических эффектах в популяциях ковыля волосовидного с площадки 4А СИП, где в 1953–1957 гг. проводили испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ). В настоящее время уровни радиоактивного загрязнения на площадке 4А различаются на несколько порядков [2, 4], что предполагает наличие выраженных биологических эффектов у населяющих эту территорию растений и животных. Однако исследования био-

логических эффектов на этой площадке практически отсутствуют.

В нашем предварительном исследовании было показано [5], что частота цитогенетических эффектов в популяциях тонконога тонкого, населяющих наиболее загрязненные радионуклидами участки СИП, статистически значимо превышала контрольный уровень, однако имевшихся данных было недостаточно для оценки формы дозовой зависимости. На следующем этапе, на основе данных о частоте цитогенетических нарушений и мощности дозы ( $10^{-4}$ –13 Гр/вегетационный сезон) в 100 экспериментальных точках площадки 4А, была оценена форма зависимости частоты цитогенетических эффектов от логарифма дозы в популяциях тонконога тонкого [6]. Показано наличие порога по частоте аберрантных клеток вплоть до 49 мкГр/ч. Превышение этого порога вело к статистически значимому увеличению частоты этого показателя от менее, чем 2%, до 16%. В настоящей работе предпринята попытка выяснить: сохранятся ли выявленные в популяциях тонконога тонкого закономерности в популяциях ковыля волосовидного, широко распространенных на площадке 4А.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

**Район исследования.** Отбор проб для исследований проводили на площадке 4А площадью 63 км<sup>2</sup>, где в 1953–1957 гг. испытывали боевые радиоактивные вещества. БРВ представляли собой жидкие или порошкообразные смеси радионуклидов из отходов радиохимического производства, либо полученные путем облучения нейтронами на атомном реакторе специально подобранных веществ. Испытания включали рассеяние БРВ путем подрыва отдельных снарядов, обстрела участков минометами, сброса бомб или распыления БРВ с самолетов. В результате на площадке 4А сформировалось крайне гетерогенное радиоактивное загрязнение, основной вклад в которое вносит <sup>90</sup>Sr [2].

Площадка 4А расположена в 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 [7] с малым количеством осадков 250–300 мм/год. Растительность на площадке 4А представлена полынно-злаковым сообществом, в том числе: доминантный вид – полынь Маршалла (*Artemisia marschalliana* Spreng), кодоминантные 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 валлисская (*Festuca valesiaca* Gaudin). Единично встречаются карагана низкорослая (*Caragana pumila* Pojark) и таволга зверобоелистная (*Spiraea hypericifolia* L.).

**Объект исследования.** Объектом нашего исследования являлся многолетний дикорастущий злак ковыль волосовидный (*Stipa capillata* L.), образующий плотные дерновины. Этот типичный представитель растительности Казахстана широко распространен на территории СИП, что позволяет исследовать его ответные реакции в широком диапазоне уровней радиоактивного загрязнения.

**Полевые работы и отбор проб растений.** Полевые работы проведены в период созревания семян ковыля волосовидного, в конце июля – начале августа 2013–2016 гг. Участки для исследований выбирали на основе данных о распределении плотности потока β-частиц и мощности амбиентного эквивалента дозы γ-излучения на поверхности почвы, которые измеряли дозиметром-радиометром МКС-АТ6130 (ОАО МНИПИ, Беларусь). Число измерений этих параметров на каждой экспериментальной точке определялось необходимостью достижения статистической погрешности не более 15%. Всего на площадке 4А было выбрано 63 экспериментальных точки. Плотность потока β-частиц и мощность амбиентного эквивалента дозы γ-излучения в местах отбора проб менялись в пределах 10–10000 част/(мин см<sup>2</sup>) и 0.04–46 мкЗв/ч соответственно (табл. 1).

В каждой точке отбирали надземную часть растений. Вегетативную часть (150–300 г) – для анализа на содержание химических элементов и радионуклидов, генеративную часть (семена, 150–300 г) – для цитогенетического анализа. Растения отбирали на площади 1–2 м<sup>2</sup> в зависимости от плотности произрастания. В местах, где плотность потока β-частиц была от 10 до 4000 част/(мин см<sup>2</sup>), расстояние между точками отбора проб растений составляло 100–800 м. Поскольку площади с высокими уровнями загрязнения малы, в местах, где плотность потока β-частиц выше 4 тыс. част/(мин см<sup>2</sup>), расстояния между точками отбора проб растений составляли 5–20 м.

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

Удельную активность радионуклидов <sup>40</sup>K, <sup>60</sup>Co, <sup>137</sup>Cs, <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Eu, <sup>155</sup>Eu, <sup>214</sup>Pb, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U и <sup>241</sup>Am в пробах растений определяли

**Таблица 1.** Плотность потока  $\beta$ -частиц и мощность амбиентного эквивалента дозы на исследуемых участках  
**Table 1.**  $\beta$ -particles flux density and exposure dose rate at the research plots

№	$\beta$ , част/(мин см <sup>2</sup> )	$\gamma$ , мкЗв/ч	№	$\beta$ , част/(мин см <sup>2</sup> )	$\gamma$ , мкЗв/ч	№	$\beta$ , част/(мин см <sup>2</sup> )	$\gamma$ , мкЗв/ч
1	<10	0.04	25	100	0.3	49	6000	7
2	<10	0.04	26	100	0.3	50	8000	13
3	<10	0.04	27	100	0.3	51	8000	13
4	<10	0.04	28	500	0.5	52	8000	13
5	<10	0.04	29	500	0.5	53	8000	13
6	<10	0.04	30	500	0.5	54	8000	13
7	<10	0.04	31	500	0.5	55	>10000	46
8	<10	0.14	32	500	0.5	56	>10000	46
9	40	0.2	33	500	0.5	57	>10000	46
10	40	0.2	34	500	0.5	58	>10000	46
11	40	0.2	35	500	0.5	59	>10000	46
12	40	0.2	36	1000	1.5	60	>10000	46
13	40	0.2	37	1000	1.5	61	>10000	46
14	40	0.2	38	1000	1.5	62	>10000	21
15	40	0.2	39	1200	1.5	63	>10000	38
16	40	0.2	40	1200	1.5			
17	40	0.2	41	2000	1.5			
18	100	0.3	42	2000	1.5			
19	100	0.3	43	2000	1.5			
20	100	0.3	44	2000	1.5			
21	100	0.3	45	4150	7			
22	100	0.3	46	6000	7			
23	100	0.3	47	6000	7			
24	100	0.3	48	6000	7			

на  $\gamma$ -спектрометре Canberra (США) с германиевым детектором (BE 2020), предел обнаружения – 0.7–20 Бк/кг. <sup>90</sup>Sr в пробах растений определяли на  $\beta$ -спектрометре “Прогресс” (Россия), предел обнаружения – 100 Бк/кг. Погрешность измерений в основном не превышала 25%. Спектрометр калибровали по энергии с использованием твердотельных источников <sup>90</sup>Sr и/или <sup>24</sup>Na.

*Определение содержания тяжелых металлов в растениях.* Пробы растений готовили методом автоклавного разложения по стандартной методике. В пробах растений определяли содержание следующих тяжелых металлов: ванадий, хром, марганец, кобальт, никель, медь, цинк, мышьяк, стронций, кадмий, теллур, цезий, свинец, уран. Концентрации элементов определяли методом

масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе “Elan 9000” (PerkinElmer SCIEX, США).

*Оценка поглощенных растениями доз.* При расчете поглощенной дозы внешнего облучения растений предполагали распространение  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения в однородной воздушно-растительной среде [8]. Поглощенную дозу от внешнего  $\gamma$ -излучения находящихся в почве радионуклидов за вегетационный период рассчитывали по формуле:

$$D_{\gamma} = \frac{EDR \times t}{1.09}, \quad (1)$$

где: *EDR* – мощность амбиентного эквивалента дозы, измеренная на поверхности почвы, мкЗв/ч,

$t$  – время от всходов до созревания семян, ч; 1.09 – коэффициент перевода мощности амбиентного эквивалента дозы в мощность поглощенной дозы. Время от всходов (начало апреля) до созревания (конец июля), 120 дней, использовали для оценки поглощенной дозы за вегетационный период ( $t = 120 \times 24 = 2880$ ).

Поглощенную растениями дозу от внешнего  $\beta$ -излучения находящихся на поверхности почвы радионуклидов рассчитывали по описанной в [9] методике. Активность бесконечного слоя почвы толщиной 1 см оценивали по измеренной плотности потока  $\beta$ -частиц. Плотность воздушно-растительной среды ( $1.5 \times 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>) рассчитывали исходя из биомассы растений и их высоты. Поглощенную дозу  $\beta$ -излучения рассчитывали как произведение мощности дозы на продолжительность вегетационного периода.

Поглощенную растениями дозу от внутренне-го облучения  $i$ -м радионуклидом рассчитывали в соответствии с основными допущениями дозиметрической модели [8]:

$$D_i = DCC_{int,i}^{plant} \times C_{plant,i}, \quad (2)$$

где  $DCC_{int,i}^{plant}$  – дозовый коэффициент облучения от  $i$ -го радионуклида, находящегося в растении, (мкГр/сут)/(Бк/кг);  $C_{plant,i}$  – активность  $i$ -го радионуклида в растении, Бк/кг.

В дозиметрической модели концентрации активности в растительности пересчитывали на сырой вес. В методике измерения содержания радионуклидов используют высушенные образцы растений. Разницу определяли путем взвешивания свежесобранных образцов растений до и после сушки. Мы оценивали сырой вес, используя соотношение сухой/влажный 1/3. Это значение хорошо согласуется с данными, представленными в работе [10] для других травянистых растений.

*Анализ цитогенетических эффектов.* Собранные семена подвергали предварительной камеральной обработке (очистка, удаление поврежденных семян и др.). Отобранные семена высушивали при комнатной температуре, после чего подвергали холодной стратификации, выдерживая в течение 30 сут при температуре 1–5°C в холодильнике.

Воздушно-сухие семена раскладывали на влажную фильтровальную бумагу в чашках Петри. Семена проращивали в термостате MIR-253 (Sanyo, Япония) при температуре 24°C в течение  $7 \pm 2$  сут. Проросшие семена, у которых главный корешок имел длину не менее длины семени, фиксировали в фиксаторе Кларка (смесь 96%-ного этилового спирта и ледяной уксусной кислоты в соотношении 3 : 1).

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 так, чтобы клетки корешка распределились в один слой. Цитогенетический анализ проводили на микроскопе AxioImager M2 (Zeiss, Германия) при увеличении объектива  $\times 100$  (масляная иммерсия) и  $\times 40$ .

Анализировали частоту aberrантных клеток в апикальной меристеме корешков проростков ковыля. При анализе учитывали такие цитогенетические аномалии, как мосты, фрагменты, отстающие хромосомы, забегавшие хромосомы и многополюсные митозы [11]. Процент aberrантных клеток ( $M$ ) определяли по формуле:

$$M = A \times 100 / N,$$

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

*Статистический анализ данных.* Связь поглощенной дозы с цитогенетическими нарушениями в апикальной меристеме корешков проростков ковыля исследовали методами корреляционного анализа. Для сравнения данных, находящихся в широком диапазоне значений (мощность поглощенной дозы в растениях изменяется на пять порядков, а частота aberrантных клеток только на один порядок) применяли логарифмическое преобразование для первого показателя. Это преобразование позволило: осуществить переход от мультипликативной модели к аддитивной; выровнять дисперсию; нормализовать распределение, что позволило применить параметрическую статистику. Кроме того, логарифмирование позволило улучшить визуализацию структуры экспериментальных данных в области малых значений экспозиции. Анализ частоты цитогенетических нарушений в зависимости от логарифма дозы проводили с применением кусочно-линейной регрессионной модели с оценкой параметров 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 частота нарушений на единицу десятичного логарифма поглощенной дозы в растениях статистически значимо отличается.

Статистическая оценка групп данных, характеризующих частоту цитогенетических нарушений в зависимости от логарифма поглощенной дозы, расположенных слева и справа от  $T_p$ , выполнена с применением двух уравнений линейной регрессии: одно для значений, которые меньше

или равны  $T_p$ , второе – для значений больше точки разрыва:

$$\begin{cases} Y = a_1 + a_2 \times X, & X < T_p \\ Y = a_3 + a_4 \times X, & X \geq T_p \end{cases} \quad (3)$$

где  $Y$  – частота цитогенетических нарушений, %;  $X$  – десятичный логарифм поглощенной дозы в растениях;  $a_1$  и  $a_3$  – свободные члены регрессии;  $a_2$  и  $a_4$  – коэффициенты регрессии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

*Содержание радионуклидов в растениях.* Основной вклад в загрязнение растений вносит  $^{90}\text{Sr}$ , удельная активность которого в растениях наименее загрязненных участков ниже предела обнаружения  $\beta$ -спектрометра, в то время как на других участках она находится в диапазоне  $790\text{--}2.6 \times 10^7$  Бк/кг и формирует более 95%  $\beta$ -спектра (табл. 2). Удельная активность остальных радионуклидов в образцах растений в большинстве случаев ниже предела обнаружения. В тех случаях, когда удельная активность превышала минимально детектируемую, она менялась в следующих пределах: для естественных радионуклидов:  $^{40}\text{K}$  –  $24\text{--}2.3 \times 10^3$  Бк/кг;  $^{214}\text{Pb}$  –  $1.4\text{--}6.3 \times 10^2$  Бк/кг;  $^{226}\text{Ra}$  –  $1.7\text{--}1.2 \times 10^3$  Бк/кг;  $^{232}\text{Th}$  –  $3.0\text{--}1.5 \times 10^3$  Бк/кг;  $^{235}\text{U}$  –  $1.1\text{--}2.1 \times 10^3$  Бк/кг;  $^{238}\text{U}$  –  $2.7\text{--}1.9 \times 10^3$  Бк/кг; для техногенных радионуклидов:  $^{60}\text{Co}$  –  $0.3\text{--}3 \times 10^2$  Бк/кг;  $^{137}\text{Cs}$  –  $0.9\text{--}4 \times 10^2$  Бк/кг;  $^{154}\text{Eu}$  –  $1.9\text{--}7.9 \times 10^2$  Бк/кг;  $^{155}\text{Eu}$  –  $0.7\text{--}4.8 \times 10^2$  Бк/кг;  $^{241}\text{Am}$  –  $0.3\text{--}1.5 \times 10^2$  Бк/кг (табл. 2).

*Поглощенные растениями дозы.* Поглощенные растениями дозы были оценены с помощью описанного в разделе Материалы и методы подхода (формулы 1 и 2). Согласно нашим оценкам (табл. 3), поглощенные дозы в популяциях ковыля волосовидного меняются в диапазоне  $3.7 \times 10^{-4}\text{--}11$  Гр за вегетационный сезон ( $0.13\text{--}3819$  мкГр/ч), т.е. почти на 5 порядков. Отметим, что большая часть этого диапазона превышает установленное в [12] скрининговое значение  $70$  мкГр/ч, ниже которого не должны наблюдаться радиобиологические эффекты в популяциях растений. Таким образом, расчетные значения поглощенных доз предполагают наличие выраженных эффектов в популяциях ковыля волосовидного с площадки 4А. Большая часть поглощенной дозы формируется за счет внутреннего облучения от  $^{90}\text{Sr}$  (табл. 2, 3). Вклад внешнего облучения и других радионуклидов в поглощенную дозу незначителен.

*Содержание тяжелых металлов в растениях.* В наших предыдущих исследованиях [5, 6] было показано, что концентрации в почвах СИП тяжелых металлов и доступных растениям их мобильных форм находятся ниже допустимых уровней. Эта информация была подтверждена в настоящем ис-

следовании, поскольку, согласно нашим измерениям (табл. 4), содержание тяжелых металлов в ковыле волосовидном существенно ниже соответствующих кларков в растениях суши [13]. Таким образом, современные концентрации тяжелых металлов в растениях СИП не должны оказывать на них токсическое воздействие.

*Цитогенетические эффекты.* Для оценки возможного влияния радиационной обстановки на территории площадки 4А на растения были оценены частота и спектр цитогенетических нарушений в популяциях ковыля волосовидного в широком диапазоне мощностей доз ( $0.13\text{--}3819$  мкГр/ч). Всего был изучен 1261 препарат апикальной меристемы проростков, 102217 анафазных клеток, в том числе 591 aberrantная ана-телофаза (табл. 5). Частота aberrantных клеток на наименее загрязненных участках находилась в диапазоне  $0.16\text{--}0.69\%$ , что близко к типичному диапазону спонтанной частоты aberrantных клеток для многих дикорастущих и культурных злаков ( $0.5\text{--}1.0\%$ ) [14].

Уникальный для полевых исследований набор данных как по количеству экспериментальных точек, так и по диапазону поглощенных растениями доз, позволил с приемлемой точностью оценить форму зависимости между частотой цитогенетических нарушений и десятичным логарифмом поглощенной дозы. Представленные на рис. 1 данные предполагают наличие двух интервалов, в которых скорость изменения частоты цитогенетических нарушений существенно различается. Для подтверждения реальности существования точки перегиба был использован изложенный в разделе “Статистический анализ данных” метод (3). Результаты вычислений представлены в табл. 6–8. Для частоты aberrantных клеток  $56.3$  мкГр/ч (табл. 6) является критической мощностью дозы, существенно меняющей скорость изменения этого параметра. Частота одиночных мостов и фрагментов начинает возрастать, начиная с  $41.7$  мкГр/ч (табл. 6). Большая мощность дозы необходима для возрастания частоты митотических аномалий ( $60.4$  мкГр/ч). Регрессионный анализ показал, что слева от точки перегиба частота всех видов цитогенетических нарушений остается практически постоянной (табл. 7). Качественно иная ситуация наблюдается справа от точки перегиба. В этом диапазоне частота всех видов цитогенетических нарушений статистически значимо растет с логарифмом мощности дозы (табл. 8). Таким образом, в настоящей работе показано, что для популяций ковыля волосовидного существует порог мощности дозы, ниже которого эффекты облучения практически не наблюдаются. Поскольку аналогичный порог был ранее установлен нами для населяющих ту же территорию популяций тонконога тонкого [6], полученные результаты отражают закономерности формирования ответ-

Таблица 2. Удельная активность радионуклидов в ковиле волосовидном  
 Table 2. Specific activity of radionuclides in the feather grass

№ точки	Удельная активность радионуклидов в ковиле волосовидном, Бк/кг												
	<sup>90</sup> Sr	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>137</sup> Cs	<sup>241</sup> Am	<sup>60</sup> Co	<sup>152</sup> Eu	<sup>154</sup> Eu	<sup>155</sup> Eu	<sup>238</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>214</sup> Pb
1	1000 ± 500	130 ± 30	<4	5.4 ± 1.5	<0.9	<0.4	<0.7	<1.3	<3.1	<1	5.2 ± 2.6	<3.6	5.4 ± 1.0
2	<100	230 ± 50	<3	<1.7	<1.4	110 ± 20	<0.5	<0.9	<2.0	<0.6	<2.7	<2.4	1.7 ± 0.8
3	<100	210 ± 40	<4	<2.0	1.4 ± 0.5	140 ± 30	<0.6	<1	4.6	<0.8	<3.4	<3.0	23 ± 0.8
4	790 ± 390	250 ± 50	<3	<1.9	0.9 ± 0.4	120 ± 20	<0.6	<0.9	<1.9	<0.7	<3.0	<2.6	1.6 ± 0.7
5	<100	210 ± 40	<4	<2.2	1.5 ± 0.6	<0.4	<0.7	<1.2	<2.8	<0.8	5 ± 2.2	<3.4	<1.4
6	<100	160 ± 30	<4	<2.7	<2.2	<0.4	<1.6	<1.5	6	<1.0	<4.0	<3.7	<1.9
7	<100	190 ± 4	<3	5.0 ± 1.2	1.2 ± 0.5	0.3	<0.5	<1.1	<2.2	0.8 ± 0.4	4.0 ± 2.0	<2.8	2.6 ± 0.8
8	<100	620 ± 120	14 ± 3	10 ± 2	<0.6	0.3	<0.4	<0.8	<2.1	<2.0	<6.0	<1.1	9 ± 2
9	(4.3 ± 0.5) × 10 <sup>4</sup>	<280	<40	<20.4	<11	<3	<10	<24	<5.6	<1.5	<6.5	<6.0	<2.8
10	(1.7 ± 0.3) × 10 <sup>4</sup>	<250	<24	<26	<8	<2.5	<7	<9	<6.4	<1.5	<8.2	<7.5	<3.0
11	(2.2 ± 0.3) × 10 <sup>4</sup>	<150	<40	<24.3	<5	<1.5	4	<6	<6.2	<1.8	<6.7	<5.8	<1.9
12	(2.5 ± 0.4) × 10 <sup>4</sup>	<210	<29	<13.4	<6	<4	<6	<7	<5.3	<1.0	<5.6	<3.9	<1.8
13	(1.2 ± 0.2) × 10 <sup>4</sup>	<220	<30	<21	<7	<2.3	<7	<7	<4.9	<2.0	<6.8	<4.6	<3.8
14	(3.8 ± 0.5) × 10 <sup>4</sup>	130 ± 30	12 ± 4	<16	<1.8	2.5 ± 0.5	<1.2	<2.2	<4.5	<1.0	<5.6	<4.0	<1.8
15	(1.5 ± 0.2) × 10 <sup>4</sup>	160 ± 30	<7	<24.2	<1.8	<0.6	<1.3	<2.1	<5.8	<1.6	<6.0	<3.7	<3.0
16	(3.6 ± 0.5) × 10 <sup>4</sup>	<60	16 ± 5	<17	<2.1	<0.6	<1.6	<2.5	<4.5	<1.0	<5.4	<3.7	<1.7
17	(6.1 ± 0.9) × 10 <sup>4</sup>	140 ± 50	18 ± 6	<14.6	<2.3	<0.7	<1.8	<3	<3.6	<0.5	<3.0	<2.4	<1.0
18	(6.5 ± 0.8) × 10 <sup>4</sup>	80 ± 40	14 ± 7	<29	<6	<0.9	<2	<3	<10	<1.0	<11	<7.0	<3.2
19	(1.6 ± 0.2) × 10 <sup>5</sup>	150 ± 30	<12	<5.6	<6	<1	<2.2	<4	<9.2	<2.0	<10	<7.7	<2.8
20	(9.5 ± 1.1) × 10 <sup>4</sup>	80 ± 40	15 ± 7	<49	<3	<1	<2.2	<4	<21.6	<4.3	<15	<21	<7.0
21	(7.6 ± 0.9) × 10 <sup>4</sup>	24 ± 14	<4	<30	<1.2	<0.7	<0.8	<2.8	<15	<3.5	<9.2	<18	<5.0
22	(9.6 ± 1.2) × 10 <sup>4</sup>	110 ± 50	<14	<58	<4	<1.9	<2.6	<4	<20	<4.8	<13	<17.9	<6.7
23	(3.8 ± 0.4) × 10 <sup>5</sup>	<80	<18	<9.0	<4	3.7 ± 0.8	<4	<5	<14.4	<2.8	<11	<14.4	<3.2
24	(2.2 ± 0.3) × 10 <sup>5</sup>	90 ± 40	<16	<37.2	<4	<1.2	<3	<5	<16.7	<5.8	<15.4	<16.7	<4.5
25	(1.3 ± 0.2) × 10 <sup>5</sup>	<90	27 ± 11	<87	<5	<1.4	<4	<5	<22.3	<12.2	<27.3	<99.3	<7.2
26	(2.5 ± 0.3) × 10 <sup>5</sup>	150 ± 50	<20	<38	<6	<1.6	<4	<6	<26	<8.8	<22.5	<60	<6.4
27	(6.6 ± 0.8) × 10 <sup>4</sup>	<100	<19	<39	<12	<1.5	<4	<6	<12	<1.5	<10	<7.8	<3.6
28	(5.4 ± 0.6) × 10 <sup>5</sup>	110 ± 40	<22	<72	<6	<2	<4	<7	<42.2	<7.2	<30	<33.8	<9.5
29	(2.5 ± 0.3) × 10 <sup>5</sup>	80 ± 30	<17	<87	<4	<1.5	<3	<5	<30	<9.4	<21	<21	<6.7
30	(3.9 ± 0.4) × 10 <sup>5</sup>	130 ± 50	<24	<88	<17	<2	<5	<8	<41	<7.8	<25	<32	<8.0
31	(3.7 ± 0.4) × 10 <sup>5</sup>	<30	<8	<71	<2.5	<0.8	<1.8	<2.9	<29	<6.0	<19	<27.2	<8.6
32	(4.6 ± 0.5) × 10 <sup>4</sup>	<70	<50	<50	<11	<2	<4	<13	<7.3	<1.8	<8.0	<7.5	<3.4

Таблица 2. Окончание

№ точки	Удельная активность радионуклидов в ковylе волосовидном, Бк/кг													
	<sup>90</sup> Sr	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>137</sup> Cs	<sup>241</sup> Am	<sup>60</sup> Co	<sup>152</sup> Eu	<sup>154</sup> Eu	<sup>155</sup> Eu	<sup>238</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>214</sup> Pb	
33	$(9.8 \pm 1.2) \times 10^4$	<80	<16	<57.5	<4	<1.4	<3	<5	<6.8	<15.3	<35.6	<11		
34	$(1.7 \pm 0.2) \times 10^5$	180 ± 40	<12	<90	<3	<1.3	<1.8	<4	<8.0	<21	<58	<7.2		
35	$(3.9 \pm 0.4) \times 10^5$	70 ± 30	<16	<50	<4	<1.4	<3	<5	<5.6	<13.2	<18	<6.3		
36	$(1.9 \pm 0.2) \times 10^6$	490 ± 240	<150	<61	<40	<12	<30	<40	<12.2	<43	<29.4	<24.5		
37	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^6$	<280	<130	<126	<40	<40	<21	<40	<36.4	<92.4	<64.4	<53.2		
38	$(3.2 \pm 0.3) \times 10^6$	<230	<120	<102	<30	<13	<19	<70	<39	<102	<80.2	<51		
39	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^6$	<500	<180	151	<50	<14	<40	<60	66	252	<93	<35.3		
40	$(1.7 \pm 0.2) \times 10^6$	<500	<500	<103	<70	<19	<50	<170	<38	<183	<130	<49		
41	$(1.5 \pm 0.2) \times 10^6$	<270	<140	<64	<40	<15	<25	<50	48.5	<141	<91	47 ± 19		
42	$(8.6 \pm 0.9) \times 10^5$	<700	<130	109	<40	<12	<23	<100	<25.4	<126	<93	<29.4		
43	$(1.7 \pm 0.2) \times 10^6$	<190	<180	<44.8	<30	<10	<30	<30	<21	196	<65	29 ± 14		
44	$(4.7 \pm 0.5) \times 10^5$	<300	<90	<39	<40	<9	<13	<50	<16	<107.4	<80.4	<20		
45	$(1.2 \pm 0.5) \times 10^6$	603 ± 120	<3.1	<1.9	1.2 ± 0.5	<7	0.3	<1.8	<5.9	<59	2.2 ± 0.8	2.8 ± 1		
46	$(4.6 \pm 0.5) \times 10^6$	<900	<220	<112	<80	<70	<29	<90	<76	1296	<201	<77.4		
47	$(1.0 \pm 0.1) \times 10^7$	1200 ± 300	<200	<96	<60	<26	<30	<70	<51.3	<260	<141	<49		
48	$(4.9 \pm 0.5) \times 10^6$	<500	<150	<69	<40	<16	<21	<50	<34	<167	<99.5	<35		
49	$(2.9 \pm 0.3) \times 10^6$	240 ± 50	<50	<23	<15	<8	<17	<17	<10	<55.2	<31.4	<11.4		
50	$(4.5 \pm 0.5) \times 10^6$	860 ± 260	<190	<90	<60	<26	<26	<120	<51	<264.3	<138.4	<46		
51	$(2.6 \pm 0.6) \times 10^7$	<2300	<1300	<616	<400	<150	<190	<400	<347	<1546	2084	628		
52	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^7$	<2000	<900	<418.4	<280	<100	<130	<290	<192	1895	<238	<205.3		
53	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^7$	<2300	<1100	1188	<300	<140	<300	<300	483	<1423	<165	<251		
54	$(9.8 \pm 1.0) \times 10^6$	<2000	<1500	<328.2	<220	<90	<110	<240	<181	<996	<180	<162.4		
55	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^7$	240 ± 120	<120	<54.4	<40	<18	<24	<40	<22	<121	<71.3	<32		
56	$(6.4 \pm 0.7) \times 10^6$	<170	<100	<46.3	<30	<18	<40	<30	<20	<93	<61	<27		
57	$(2.2 \pm 0.2) \times 10^7$	1600 ± 400	<260	<132	<90	<40	<20	<150	<78	<388	<206.4	<88		
58	$(2.3 \pm 0.2) \times 10^7$	<600	<230	<116	<80	<40	<40	<70	<71	975	<159	<77		
59	$(1.6 \pm 0.2) \times 10^7$	<400	<150	<80	<110	<50	<11	<100	<61	<291	<110	<55.4		
60	$(1.0 \pm 0.2) \times 10^7$	800 ± 300	<200	<104	<70	<60	<30	<50	118	<316.3	273	<69		
61	$(8.4 \pm 0.8) \times 10^6$	1100 ± 200	<160	<81	<100	<28	<11	<90	<55	<279	<142.4	<56.3		
62	$(4.5 \pm 0.5) \times 10^6$	<330	<13	<7.9	10 ± 2	<45	<1.4	<6.4	<31	<608	<7.1	<7.7		
63	$(4.5 \pm 0.5) \times 10^6$	<193	<132	<97	<34	<19	<22	<39	<27	<184	<24	<36		

**Таблица 3.** Мощность поглощенной дозы в популяциях ковыля волосовидного с площадки 4А  
**Table 3.** Absorbed dose rate in feather grass from the "4A" site

N	Мощность дозы, Гр/вег.сезон		
	внутренняя	внешняя	общая
1	$4.9 \times 10^{-4}$	$<3.2 \times 10^{-4}$	$<8.1 \times 10^{-4}$
2	$<3.9 \times 10^{-4}$	$<3.2 \times 10^{-4}$	$<7.1 \times 10^{-4}$
3	$<4.8 \times 10^{-4}$	$<3.2 \times 10^{-4}$	$<8.3 \times 10^{-4}$
4	$7.6 \times 10^{-4}$	$<3.2 \times 10^{-4}$	$<1.1 \times 10^{-3}$
5	$<5.1 \times 10^{-5}$	$<3.2 \times 10^{-4}$	$<3.7 \times 10^{-4}$
6	$<5.2 \times 10^{-5}$	$<3.2 \times 10^{-4}$	$<6.0 \times 10^{-4}$
7	$<5.1 \times 10^{-5}$	$<3.2 \times 10^{-4}$	$<3.7 \times 10^{-4}$
8	$<5.0 \times 10^{-5}$	$<3.2 \times 10^{-4}$	$<3.6 \times 10^{-4}$
9	$2.1 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-2}$
10	$8.3 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$9.7 \times 10^{-3}$
11	$1.1 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-2}$
12	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-2}$
13	$5.9 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$7.3 \times 10^{-3}$
14	$1.9 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-2}$
15	$7.3 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$8.8 \times 10^{-3}$
16	$1.8 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-2}$
17	$3.0 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-2}$
18	$3.2 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-2}$
19	$7.8 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$8.1 \times 10^{-2}$
20	$4.7 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$4.9 \times 10^{-2}$
21	$3.7 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-2}$
22	$4.7 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$4.9 \times 10^{-2}$
23	0.19	$2.9 \times 10^{-3}$	0.19
24	0.11	$2.9 \times 10^{-3}$	0.11
25	$6.4 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-2}$
26	0.12	$2.9 \times 10^{-3}$	0.13
27	$3.2 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-2}$
28	0.26	$1.2 \times 10^{-2}$	0.28
29	0.12	$1.2 \times 10^{-2}$	0.13
30	0.19	$1.2 \times 10^{-2}$	0.20
31	0.18	$1.2 \times 10^{-2}$	0.19
32	0.23	$1.2 \times 10^{-2}$	0.24
33	$4.8 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$6.0 \times 10^{-2}$
34	$8.3 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$9.5 \times 10^{-2}$

Таблица 3. Окончание

N	Мощность дозы, Гр/вег.сезон		
	внутренняя	внешняя	общая
35	0.19	$1.2 \times 10^{-2}$	0.20
36	0.93	$2.5 \times 10^{-2}$	0.96
37	0.64	$2.5 \times 10^{-2}$	0.66
38	1.6	$2.5 \times 10^{-2}$	1.6
39	0.69	$2.9 \times 10^{-2}$	0.71
40	0.83	$2.9 \times 10^{-2}$	0.86
41	0.73	$4.6 \times 10^{-2}$	0.78
42	0.42	$4.6 \times 10^{-2}$	0.47
43	0.83	$4.9 \times 10^{-2}$	0.88
44	0.23	$4.6 \times 10^{-2}$	0.28
45	0.59	0.11	0.70
46	2.3	0.14	2.4
47	4.9	0.14	5.0
48	2.4	0.14	2.5
49	1.4	0.14	1.5
50	2.3	0.20	2.5
51	13	0.20	13.2
52	6.4	0.20	6.6
53	5.4	0.20	5.6
54	4.8	0.20	5.0
55	6.4	>0.34	>6.7
56	3.1	>0.34	>3.5
57	11	>0.34	>11
58	11	>0.34	>11
59	7.8	>0.34	>8.2
60	4.9	>0.34	>5.2
61	4.1	>0.34	>4.5
62	2.2	>0.34	>2.5
63	2.2	>0.34	>2.5

ной реакции растений на длительное хроническое облучение.

Важную дополнительную информацию можно получить в ходе оценки изменения спектра цитогенетических нарушений в зависимости от интенсивности действующего фактора [14]. В нашем исследовании были обнаружены следующие типы цитогенетических нарушений: абберации хромосом (одиочные и двойные мосты и фраг-

менты) и митотические аномалии (отставания и забегания хромосом, многополюсные митозы). В некоторых клетках присутствовали сразу несколько типов нарушений. Как и в наших предыдущих исследованиях на СИП [5, 6], двойные мосты и фрагменты вносят основной вклад (56%) в спектр цитогенетических нарушений. Вклад одиочных мостов и фрагментов (28%), как и митотических аномалий (16%), гораздо меньше. Легко

**Таблица 4.** Содержание химических элементов в ковыле волосовидном с площадки 4А

**Table 4.** The content of chemical elements in the feather grass from the "4A" site

Элемент	Содержание элементов, мг/кг			кларк в растительности суши [13]
	$m^*$	$g^*$	$M_e(Q_{1/2} - Q_{3/4})$	
V, $n = 30$	5.6	5.3	5.2 (4–7)	30
Cr, $n = 30$	12.9	12.0	12.5 (10–17)	35
Mn, $n = 30$	473	462	460 (430–520)	4100
Co, $n = 30$	1.2	1.2	1 (1–1.3)	10
Cu, $n = 30$	19.4	19.0	20 (17–22)	160
Zn, $n = 30$	71	70	71 (65–77)	600
As, $n = 30$	1.1	1.1	1.1 (1–1.3)	3
Sr, $n = 30$	710	693	705 (580–840)	700
Cd, $n = 30$	0.42	0.36	0.3 (0.3–0.4)	0.7
Cs, $n = 30$	0.23	0.22	0.2 (0.2–0.3)	3
Pb, $n = 30$	15.0	14.0	15.5 (12–19)	25
U, $n = 30$	0.23	0.21	0.2 (0.2–0.3)	0.4

Примечание:  $n$  – число экспериментальных участков, где отбирали пробы растений;  $m$  – среднее арифметическое;  $g$  – среднее геометрическое;  $M_e$  – медиана;  $Q_{1/2} - Q_{3/4}$  – верхний и нижний квартиль.

видеть, что форма зависимости на рис. 1, а и 1, в совпадает, близки и значения оцененных нами точек перегиба для частоты аберрантных клеток (56.3 мкГр/ч), а также двойных мостов и фрагментов (49.0 мкГр/ч). В совокупности с тем, что более половины цитогенетических нарушений в исследуемых популяциях составляют маркеры радиационного воздействия [15], двойные мосты и фрагменты, мы можем заключить, что наблюдаемые в популяциях ковыля волосовидного цитогенетические эффекты являются результатом хронического облучения.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка последствий хронического облучения для популяций растений и животных, населяющих загрязненные радионуклидами территории, осложняется отсутствием надежных сведений о форме зависимости основных биологических показателей (смертность, репродуктивность, заболеваемость, генетические эффекты) от характеристик радиационного воздействия (поглощенная доза, радиоактивное загрязнение почвы и

растений). Имеющиеся сведения о форме зависимости перечисленных показателей от дозы получены главным образом в контролируемых условиях лабораторных экспериментов с острым  $\gamma$ -облучением. К сожалению, эта информация не может быть использована для оценки последствий облучения для населяющих загрязненные территории растений и животных, поскольку в результате испытаний ядерного оружия и крупных радиационных катастроф значительные территории оказались загрязнены смесью  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучающих радионуклидов, обладающих разной проникающей способностью, биологической эффективностью и подвижностью в системе почва–растение. Кроме того, организмы в естественной среде обитания почти на порядок более чувствительны к радиационному воздействию [16], да и сама форма дозовой зависимости может отличаться от наблюдаемой в контролируемых условиях лабораторного эксперимента [17]. Это связано с многочисленными и разнообразными по своей природе воздействиями на исследуемый организм в естественной среде его обитания (нерадиационные стрессоры, конкуренция за ресурсы, погодные условия, взаимоотношения хищник–жертва, паразит–хозяин и др.). Важной проблемой также являются характерные для полевых исследований существенные неопределенности при оценке поглощенных доз и незначительное количество экспериментальных точек.

В нашем исследовании значительное количество экспериментальных данных (63 экспериментальные точки, широкий диапазон изменения мощности дозы 0.13–3819 мкГр/ч) было использовано для восстановления формы зависимости частоты цитогенетических эффектов от логарифма поглощенной дозы в популяциях ковыля волосовидного с площадки 4А, где проводили испытания боевых радиоактивных веществ. Выбранные нами экспериментальные точки на площадке 4А не отличались по свойствам почвы и содержанию тяжелых металлов (табл. 4), но были контрастны по уровню радиоактивного загрязнения (табл. 1, 2). Основную роль в радиоактивном загрязнении площадки играет  $^{90}\text{Sr}$ , удельная активность которого в растениях ковыля волосовидного достигает  $2.6 \times 10^7$  Бк/кг (табл. 2). Хотя стронций не является необходимым для растений элементом, он может замещать необходимый растениям кальций ввиду сходства их химических свойств и таким образом накапливаться в растениях. Поскольку растения не различают ионы Са и Sr [18], поступление Sr в растения происходит по кальциевым каналам. Высокие концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в растениях должны вести к индукции значительных биологических эффектов.

Следует отметить, что тонконог тонкий проявил гораздо большую чувствительность к радиа-

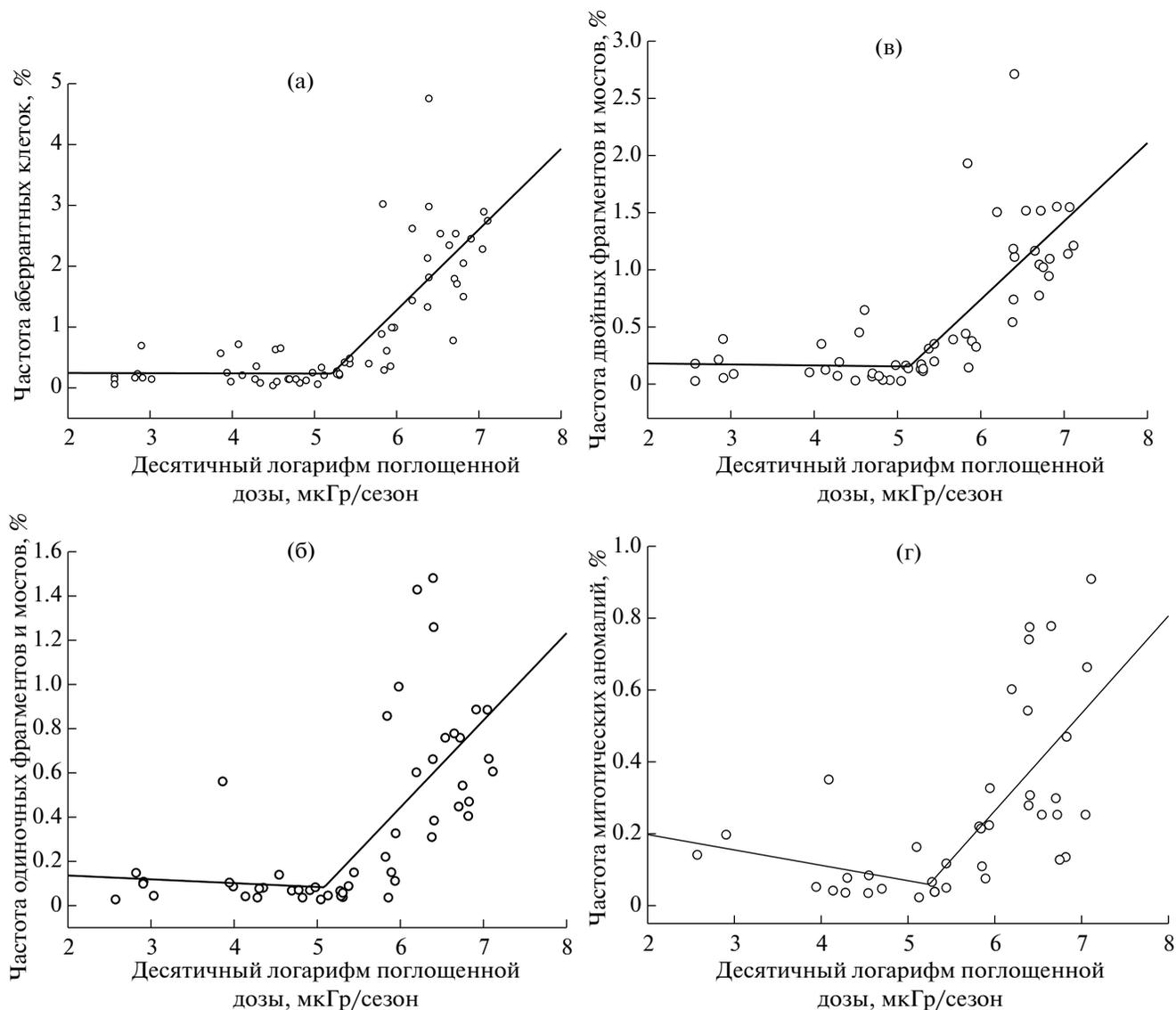
Таблица 5. Частота и спектр цитогенетических нарушений в проростках ковыля волосовидного  
 Table 5. Frequency and spectrum of cytogenetic abnormalities in feather grass seedlings

N	Просмотрено			Вид цитогенетических нарушений							Спектр цитогенетических нарушений				Частота аберрантных клеток, % ± m	
	корешков	анателофаз	аберрантных клеток	общее число нарушений	m'	m''	f'	F''	g	s	3p	4p	M' + f''	m'' + f''		g + s + 3p
1	17	1848	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1 ± 0.07	0.05 ± 0.05	—	0.16 ± 0.09
2	6	466	1	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	0.21 ± 0.21	—	0.21 ± 0.21
3	15	1013	7	7	1	4	—	—	2	—	—	—	0.1 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.69 ± 0.26
4	27	2226	3	3	1	2	—	—	—	—	—	—	0.04 ± 0.04	0.09 ± 0.06	—	0.13 ± 0.08
5	8	559	1	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	0.2 ± 0.2	—	0.18 ± 0.18
6	12	708	1	1	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	0.1 ± 0.1	0.14 ± 0.14
7	38	3515	2	2	1	1	—	—	—	—	—	—	0.03 ± 0.03	0.03 ± 0.03	—	0.06 ± 0.04
8	9	676	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	0.2 ± 0.2	—	—	0.15 ± 0.15
9	13	1241	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	0.08 ± 0.08	—	—	0.08 ± 0.08
10	17	1148	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	0.09 ± 0.09	—	—	0.09 ± 0.09
11	8	570	4	4	—	2	—	—	1	1	—	—	—	0.4 ± 0.07	0.4 ± 0.3	0.70 ± 0.35
12	35	2401	5	5	—	3	1	—	—	1	—	—	0.04 ± 0.04	0.12 ± 0.07	0.04 ± 0.04	0.21 ± 0.09
13	2	178	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	0.6 ± 0.6	—	—	0.56 ± 0.56
14	27	2583	9	9	2	4	—	—	1	1	—	—	0.08 ± 0.06	0.2 ± 0.08	0.08 ± 0.06	0.35 ± 0.11
15	33	3830	9	10	4	3	—	—	1	1	—	—	0.10 ± 0.05	0.08 ± 0.05	0.05 ± 0.04	0.23 ± 0.08
16	31	2780	4	4	1	2	—	—	—	1	—	—	0.04 ± 0.04	0.07 ± 0.05	0.04 ± 0.04	0.14 ± 0.07
17	36	3206	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03 ± 0.03	—	0.03 ± 0.03
18	31	2872	18	18	3	12	1	1	—	—	—	—	0.1 ± 0.07	0.5 ± 0.1	0.03 ± 0.03	0.63 ± 0.15
19	40	2846	3	3	2	1	—	—	—	—	—	—	0.07 ± 0.05	0.04 ± 0.04	—	0.11 ± 0.06
20	34	2951	4	4	2	2	—	—	—	—	—	—	0.07 ± 0.05	0.07 ± 0.05	—	0.14 ± 0.07
21	2	154	1	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	0.7 ± 0.7	—	0.65 ± 0.65
22	47	4243	6	6	—	4	—	—	1	1	—	—	0.07 ± 0.07	0.1 ± 0.05	0.05 ± 0.03	0.14 ± 0.06
23	15	1511	4	4	1	2	—	—	—	—	—	—	0.07 ± 0.07	0.1 ± 0.08	0.07 ± 0.07	0.26 ± 0.13
24	40	3615	2	2	1	1	—	—	—	—	—	—	0.03 ± 0.03	0.03 ± 0.03	—	0.06 ± 0.04
25	31	2752	2	2	—	1	1	—	—	—	—	—	0.04 ± 0.04	0.04 ± 0.04	—	0.07 ± 0.05
26	9	613	2	2	—	1	—	—	1	—	—	—	—	0.2 ± 0.2	0.2 ± 0.2	0.33 ± 0.23
27	39	2366	2	2	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	0.08 ± 0.06	0.08 ± 0.06
28	22	2003	8	8	2	3	1	1	—	—	—	—	0.15 ± 0.09	0.2 ± 0.1	0.05 ± 0.05	0.40 ± 0.14
29	39	4373	9	9	2	6	—	—	—	—	—	—	0.05 ± 0.03	0.14 ± 0.06	0.02 ± 0.02	0.21 ± 0.07
30	32	2616	5	5	1	3	—	—	—	—	—	—	0.04 ± 0.04	0.1 ± 0.06	0.04 ± 0.04	0.19 ± 0.09
31	32	2309	5	5	—	4	1	—	—	—	—	—	0.04 ± 0.04	0.17 ± 0.09	—	0.22 ± 0.10
32	18	2247	9	9	2	6	—	—	—	—	—	—	0.09 ± 0.06	0.3 ± 0.1	—	0.40 ± 0.13

Таблица 5. Окончание

N	Просмотрено			Вид цитогенетических нарушений								Спектр цитогенетических нарушений				Частота аберрантных клеток, % ± m
	корешков	анателофаз	аберрантных клеток	общее число нарушений	m'	m''	f'	F''	g	s	3p	4p	M' + f''	m'' + f''	g + s + 3p	
33	18	1417	2	2	—	1	1	—	—	—	—	—	0.07 ± 0.07	0.07 ± 0.07	—	0.14 ± 0.10
34	30	2403	6	6	1	4	1	—	—	—	—	—	0.08 ± 0.06	0.2 ± 0.1	—	0.25 ± 0.10
35	62	5235	12	12	2	7	1	—	1	—	—	—	0.06 ± 0.03	0.1 ± 0.04	0.04 ± 0.03	0.23 ± 0.07
36	3	101	1	1	—	—	1	—	—	—	—	—	1.0 ± 1.0	—	—	0.99 ± 0.99
37	11	453	4	4	1	2	—	—	1	—	—	—	0.22 ± 0.22	0.4 ± 0.3	0.22 ± 0.22	0.88 ± 0.44
38	2	70	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	1.4 ± 1.4	—	—	1.43 ± 1.42
39	44	2745	8	8	1	4	—	—	2	1	—	—	0.04 ± 0.04	0.2 ± 0.07	0.1 ± 0.06	0.29 ± 0.10
40	10	894	3	3	1	—	—	—	1	1	—	—	0.1 ± 0.1	—	0.2 ± 0.1	0.34 ± 0.19
41	37	2648	16	16	2	8	2	2	1	1	—	—	0.2 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.08 ± 0.05	0.60 ± 0.15
42	7	512	2	2	—	1	—	1	—	—	—	—	—	0.2 ± 0.2	—	0.40 ± 0.28
43	5	306	3	3	1	1	—	—	—	1	—	—	0.3 ± 0.3	0.3 ± 0.3	0.3 ± 0.3	0.98 ± 0.56
44	15	853	4	4	—	3	—	—	1	—	—	—	—	0.4 ± 0.2	0.1 ± 0.1	0.47 ± 0.23
45	14	466	14	14	3	7	1	2	—	1	—	—	1.0 ± 0.5	2.0 ± 0.6	0.2 ± 0.2	3.00 ± 0.80
46	3	1290	17	18	4	7	—	—	4	2	1	—	0.3 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.2	1.32 ± 0.32
47	7	669	12	12	3	6	—	1	2	—	—	—	0.4 ± 0.06	1.0 ± 0.4	0.3 ± 0.2	1.79 ± 0.51
48	27	2603	47	47	9	25	1	4	4	4	—	—	0.4 ± 0.1	1.1 ± 0.2	0.3 ± 0.1	1.80 ± 0.26
49	18	996	26	27	3	14	3	1	2	1	3	—	0.2 ± 0.09	0.6 ± 0.2	0.2 ± 0.09	2.61 ± 0.51
50	40	2870	61	61	14	32	5	2	4	3	1	—	0.7 ± 0.2	1.2 ± 0.2	0.3 ± 0.1	2.13 ± 0.27
51	5	330	9	9	2	3	—	1	1	1	1	—	0.6 ± 0.4	1.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5	2.73 ± 0.90
52	11	740	11	11	3	7	—	—	—	—	1	—	0.4 ± 0.2	1.0 ± 0.4	0.1 ± 0.1	1.49 ± 0.46
53	39	3128	53	53	12	29	5	3	2	2	—	—	0.5 ± 0.1	1.0 ± 0.2	0.1 ± 0.06	1.69 ± 0.23
54	3	129	1	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	0.5 ± 0.3	—	0.78 ± 0.77
55	4	638	13	13	2	6	1	1	2	1	—	—	0.5 ± 0.3	1.0 ± 0.4	0.5 ± 0.3	2.04 ± 0.56
56	4	395	10	10	2	6	1	—	1	—	—	—	0.8 ± 0.4	1.5 ± 0.6	0.3 ± 0.3	2.53 ± 0.79
57	16	790	18	18	6	8	1	1	1	1	—	—	1.0 ± 0.4	1.0 ± 0.4	0.3 ± 0.2	2.28 ± 0.53
58	4	452	13	13	3	7	—	—	2	1	—	—	0.7 ± 0.4	1.5 ± 0.6	0.7 ± 0.4	2.88 ± 0.79
59	6	451	11	11	3	6	1	1	—	—	—	—	0.9 ± 0.4	1.6 ± 0.6	—	2.44 ± 0.73
60	12	790	20	20	6	11	—	1	2	—	—	—	0.8 ± 0.3	1.4 ± 0.4	0.4 ± 0.2	2.53 ± 0.56
61	3	257	6	6	2	3	—	—	1	—	—	1	0.8 ± 0.6	1.2 ± 0.7	0.8 ± 0.6	2.33 ± 0.94
62	9	135	4	4	2	1	—	—	—	1	—	—	1.5 ± 1.0	0.7 ± 0.7	0.7 ± 0.7	2.96 ± 1.03
63	27	1032	49	49	9	22	4	6	6	2	—	—	1.3 ± 0.4	2.7 ± 0.5	0.8 ± 0.3	4.75 ± 0.66

Примечание. 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 — отставания хромосом; s — забегания хромосом; 3p — трехполосные митозы; 4p — четырехполосные митозы.



**Рис. 1.** Зависимость частоты цитогенетических нарушений от десятичного логарифма мощности поглощенной дозы: а) aberrant cells frequency; б) single fragments and bridges; в) double fragments and bridges; г) mitotic abnormalities.

**Fig. 1.** Relationships of cytogenetic alteration frequency on the logarithm of the absorbed dose rate: a) aberrant cells frequency; б) single fragments and bridges; в) double fragments and bridges; г) mitotic abnormalities.

ционному воздействию, чем ковыль волосовидный. Действительно, при сопоставимом диапазоне радиационного воздействия на эти дикие злаки частота aberrantных клеток тонконога на наиболее загрязненных участках превышала 15% [6], в то время как у ковыля волосовидного максимальная частота aberrantных клеток не достигала 5% (табл. 5). Кроме того, частота цитогенетических нарушений в диапазоне до точки перегиба у тонконога тонкого почти в 2 раза больше, чем у ковыля волосовидного (0.5% у тонконога [6] и 0.26% у ковыля (табл. 7)), а точка перегиба зафиксирована при меньшей мощности дозы (49 мГр/ч у тонконога против 56.3 мГр/ч у ковыля). При

этом прирост частоты цитогенетических нарушений с мощностью дозы на участке справа от точки перегиба гораздо быстрее происходит у тонконога, чем у ковыля (табл. 8).

Наименьшая мощность дозы требуется для увеличения частоты одиночных мостов и фрагментов (41.7 мГр/ч). Большая часть поврежденных этого типа быстро репарируется. Гораздо большая мощность дозы требуется для увеличения частоты двойных мостов и фрагментов, являющихся потенциально летальными событиями [19]. Хроматидные и хромосомные aberrации отличаются от митотических аномалий, поскольку имеют разное происхождение (причиной aberrаций

**Таблица 6.** Оценка значений точки перегиба для разных видов цитогенетических нарушений  
**Table 6.** Position of the breakpoint for different types of cytogenetic abnormalities

Вид цитогенетических нарушений	Мощность дозы, мкГр/ч	Доверительный интервал	
		нижняя граница	верхняя граница
Аберрантные клетки	56.3	20.9	151.7
Одиночные мосты и фрагменты	41.7	7.6	229.5
Двойные мосты и фрагменты	49.0	13.8	166.3
Митотические аномалии	60.4	10.2	355.2

**Таблица 7.** Регрессионный анализ зависимости логарифм доза–эффект слева от точки перегиба  
**Table 7.** Regression analysis of dose logarithm–effect relationship for the data located to the left of the breakpoint

Параметр	Оценка параметров регрессионной модели	<i>t</i> -test	Уровень значимости, <i>p</i>	Доверительный интервал	
				нижний	верхний
Аберрантные клетки					
<i>a</i>	0.256 ± 0.187	1.35	0.188	–0.131	0.636
<i>b</i>	–0.003 ± 0.045	–0.076	0.940	–0.096	0.089
Одиночные мосты и фрагменты					
<i>a</i>	0.171 ± 0.142	1.20	0.247	–0.130	0.471
<i>b</i>	–0.017 ± 0.035	–0.502	0.622	–0.090	0.056
Двойные фрагменты и мосты					
<i>a</i>	0.198 ± 0.167	1.18	0.250	–0.149	0.545
<i>b</i>	–0.008 ± 0.039	–0.215	0.832	–0.090	0.073
Митотические аномалии					
<i>a</i>	0.283 ± 0.157	1.81	0.101	–0.066	0.633
<i>b</i>	–0.043 ± 0.037	–1.16	0.273	–0.125	0.039

**Таблица 8.** Регрессионный анализ зависимости логарифм доза–эффект справа от точки перегиба  
**Table 8.** Regression analysis of dose logarithm–effect relationship for the data located to the right of the breakpoint

Параметр	Оценка параметров регрессионной модели	<i>t</i> -test	Уровень значимости, <i>p</i>	Доверительный интервал	
				нижний	верхний
Аберрантные клетки					
<i>a</i>	–6.68 ± 1.52	–4.40	<0.001	–9.77	–3.59
<i>b</i>	1.33 ± 0.244	5.44	<0.001	0.830	1.82
Одиночные мосты и фрагменты					
<i>a</i>	–1.92 ± 0.638	–3.01	0.005	–3.22	–0.62
<i>b</i>	0.394 ± 0.103	3.84	0.001	0.184	0.604
Двойные мосты и фрагменты					
<i>a</i>	–3.37 ± 0.908	–3.71	0.001	–5.22	–1.51
<i>b</i>	0.685 ± 0.146	4.70	<0.001	0.387	0.982
Митотические аномалии					
<i>a</i>	–1.36 ± 0.456	–2.99	0.006	–2.30	–0.424
<i>b</i>	0.271 ± 0.073	3.72	0.001	0.121	0.421

является повреждение хромосом, а митотических аномалий – нарушения аппарата деления). Однако репарация ДНК не защищает от формирования митотических аномалий. Это обстоятельство может быть причиной того, что порог для митотических аномалий наблюдается при большей мощности дозы (60.4 мкГр/ч). Полученные результаты поддерживают гипотезу о том, что частота митотических аномалий возрастает в случае, когда растения не способны поддерживать генетическую стабильность [20].

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, подвергающихся хроническому радиационному воздействию на фоне экстремальных условий среды обитания. Населяющие в настоящее время территорию СИП организмы являются потомками растений и животных, испытавших 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 филиала “Института радиационной безопасности и экологии” НЯЦ РК за помощь в организации и проведении радиоэкологических исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Логачев 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. Moskva: FU Medbioekstrem; 1997. 319 p (In Russ.)]
2. *Larionova N.V., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M. et al.* Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site // *J. Environ. Radioact.* 2018. V. 186. P. 63–70.
3. *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 (Kazakhstan) // *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya.* 2008. V. 48. № 4. P. 422–431. (In Russ.)]
4. *Осинцев А.Ю., Сальменбаев С.Е.* Исследование характера и уровня 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 urovnej radioaktivnogo zagryazneniya ploshchadki ispytaniy boevyh radioaktivnyh veshchestv // *Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana.* Pavlodar: Dom pechati; 2013; 1 (4): 189–201. (In Russ.)].
5. *Geras'kin S.A., Oudalova A.A., Dikarev V.G., et al.* Effects of chronic exposure in populations of *Koeleria gracilis* Pers. from the Semipalatinsk nuclear test site, Kazakhstan // *J. Environ. Radioact.* 2012. V. 104. P. 55–63.
6. *Geras'kin S., Minkanova K., Perevolotsky A. et al.* Threshold dose rates for the cytogenetic effects in crested hairgrass populations from the Semipalatinsk nuclear test site, Kazakhstan // *J. Hazardous Materials.* 2021. V. 416. 125817.
7. *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 Kazakhstana. L.: Nauka; 1973. 277 p. (In Russ.)].
8. ICRP Publication 136. Dose Coefficients for Non-Human Biota Environmentally Exposed to Radiation // *Ann. ICRP.* 2017. V. 46. № 2. 136 p.
9. *Cross W.G.* Empirical expression for beta ray point source dose distributions // *Radiat. Prot. Dosim.* 1997. V. 69. P. 85–96.
10. *Karimullina E.M., Mikhailovskaya L.N., Antonova E.V., Pozolotina V.N.* Radionuclide uptake and dose assessment of 14 herbaceous species from the East-Ural radioactive trace area using the ERICA Tool // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. P. 13975–13987.
11. *Паушева З.В.* Практикум по цитологии растений. М.: Колос, 1980. 225 с. [*Pausheva Z.V.* Praktikum po citologii rastenij. Moskva: Kolos, 1980. 225 p. (In Russ.)]
12. *Andersson P., Garnier-Laplace J., Beresford N.A. et al.* Protection of the environment from ionizing radiation in a regulatory context (protect): proposed numerical benchmark values // *J. Environ. Radioact.* 2009. V. 100. P. 1100–1108.

13. Добровольский В.С. Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003. 400 с. [*Dobrovolskiy V.S. Osnovy biogeokhimi. M.: Akademiya, 2003. 400 p. (In Russ.)*]
14. Geras'kin S., Evseeva T., Oudalova A. Plants as a tool for the environmental health assessment. Encyclopedia of Environmental Health. Second edition. Elsevier, 2019. V. 5. P. 239–248.
15. 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.
16. Garnier-Laplace J., Geras'kin S., Della-Vedova C. et al. Are radiosensitivity data derived from natural field conditions consistent with data from controlled exposures? A case study of Chernobyl wildlife chronically exposed to low dose rates // J. Environ. Radioact. 2013. V. 121. P. 12–21.
17. Schafer R.B., von der Ohe P.C., Rasmussen J., Kefford B.J. et al. Thresholds for the effects of pesticides on invertebrate communities and leaf breakdown in stream ecosystems // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46. P. 5134–5142.
18. Burge 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.
19. Feinendegen L.E., Pollycove M. Biologic responses to low doses of ionizing radiation: detriment versus hormesis. Part 1. Dose responses of cells and tissues // J. Nucl. Med. 2001. V. 42. P. 17N–27N.
20. De Veylder L., Larkin J.C., Schnittger A. Molecular control and function of endoreplication in development and physiology // Trends Plant Sci. 2011. V. 16. P. 624–634.

## Cytogenetic Effects in Feather Grass Populations from the Semipalatinsk Nuclear Test Site

S. A. Geras'kin<sup>a, #</sup>, K. S. Minkanova<sup>b</sup>, T. V. Perevolotskaya<sup>a</sup>, and A. N. Perevolotsky<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

<sup>b</sup>Institute of Radiation Safety and Ecology, NNC, Kurchatov, Kazakhstan

<sup>#</sup>E-mail: stgeraskin@gmail.com

Evaluation of cytogenetic effects in feather grass populations was performed at 63 sampling points of “4A” site from the Semipalatinsk test site (Kazakhstan), which do not differ in soil characteristics and contamination with heavy metals, but contrast in terms of the level of radioactive contamination. At the “4A” site in 1953–1957 combat radioactive substances were tested. The dose loads on feather grass at this site vary in the range of 0.00036–11 Gy/vegetation season, the main contribution to the dose absorbed by plants is made by internal irradiation from <sup>90</sup>Sr. It was shown that dependence of the cytogenetic effects frequency of on the logarithm of the dose is divided into two parts, within which changes in the frequency of cytogenetic abnormalities with dose is fundamentally different. In the range of 0.36–162 mGy, frequency of aberrant cells does not differ statistically significantly from the control level. Increasing the dose above this limit leads to a statistically significant increase in the aberrant cell's frequency. Breakpoints for other types of cytogenetic alterations were also evaluated (120 mGy for single fragments and bridges, 141 mGy for double fragments and bridges, and 174 mGy for mitotic abnormalities). The main contribution to the cytogenetic effects formation is made by double bridges, which serves as additional evidence of the radiation nature of changes observed in feather grass populations.

**Keywords:** the Semipalatinsk test site, radioactive contamination, <sup>90</sup>Sr, cytogenetic alterations, feather grass