

ФИЛИАЛ «ИНСТИТУТ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКОЛОГИИ»
РЕСПУБЛИКАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»

На правах рукописи



Минкенова Кырмызы Сериковна

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОПУЛЯЦИЯХ *KOELERIA GRACILIS*
PERS. И *STIPA CAPILLATA* L. С ПЛОЩАДКИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО
ПОЛИГОНА, ГДЕ ИСПЫТЫВАЛИ БОЕВЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Специальность: 1.5.1. «Радиобиология»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук, профессор
С.А. Гераськин

Курчатов – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	13
1.1 Радиобиологические эффекты у растений на разных уровнях биологической организации.....	13
1.2 Радиобиологические эффекты в популяциях растений, населяющих загрязненные радионуклидами территории.....	28
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	45
2.1 Характеристика места проведения исследования.....	45
2.2 Объекты исследования.....	49
2.3 Полевые работы и отбор проб растений.....	51
2.4 Аналитические работы.....	56
2.4.1 Определение содержания радионуклидов в растениях.....	56
2.4.2 Определение содержания тяжелых металлов в растениях.....	57
2.5 Расчет поглощенной дозы.....	58
2.6 Анализ цитогенетических эффектов.....	60
2.7 Статистический анализ экспериментальных данных.....	61
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	64
3.1 Удельная активность радионуклидов в растениях.....	64
3.2 Содержание тяжелых металлов в растениях.....	65
3.3 Дозовые нагрузки на растения.....	67
3.4 Цитогенетические эффекты в популяциях растений.....	67
3.4.1 Цитогенетические эффекты в популяциях тонконога тонкого.....	67
3.4.2 Цитогенетические эффекты в популяциях ковыля волосовидного.....	74

ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ	82
4.1 Удельная активность радионуклидов в растениях	82
4.2 Дозовые нагрузки на растения	83
4.3. Сравнительный анализ цитогенетических эффектов в популяциях тонконога тонкого и ковыля волосовидного	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	90
ВЫВОДЫ.....	92
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	95
ПРИЛОЖЕНИЕ А	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Среди множества факторов, негативно влияющих на популяции, биоценозы и биоту в целом, особое место занимает ионизирующее излучение. Интенсивное развитие атомной энергетики и радиационных технологий увеличивает риск загрязнения окружающей среды долгоживущими радионуклидами и выдвигает задачу анализа возможных последствий хронического воздействия ионизирующих излучений на природные популяции и сообщества. Поскольку первичные радиационные повреждения формируются на молекулярно-клеточном уровне, в значительной мере эта задача должна решаться в рамках радиационной генетики популяций. Для оценки действия ионизирующих излучений в радиобиологических исследованиях широко используют частоту аббераций хромосом в митотических клетках соматических тканей. Использование этого теста позволяет на объективной основе оценить качество окружающей среды (Geras'kin et al., 2019).

Населяющие в настоящее время территорию Семипалатинского испытательного полигона (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.

На площадках «4» и «4А» в 1953–1957 гг. проводили испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ). БРВ представляют собой жидкие или порошкообразные смеси радионуклидов из отходов радиохимического производства, либо полученные путем облучения специально подобранных веществ нейтронами на атомном реакторе (Назарбаев и др., 2016). После испытаний БРВ прошло более 60 лет, однако площадки «4» и «4А» до настоящего времени характеризуются высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Растения, в отличие от человека и животных, ведут прикрепленной образ жизни и не способны переместиться в более благоприятную среду, поэтому вынуждены были в ходе эволюции выработать эффективные системы защиты от внешнего воздействия. Травянистое растение включено в список референтных видов в современной концепции радиационной защиты биоты (ICRP, 2008). В связи с этим получение новой информации о последствиях облучения растений представляет значительный интерес. Полученных в полевых условиях данных о биологических эффектах хронического облучения крайне мало. Но именно такие данные являются основой для оценки риска хронического облучения растений и создают основу для совершенствования методов и средств радиационной защиты биоты.

Степень разработанности темы. Широкомасштабные исследования по оценке последствий хронического облучения растений проведены на территориях, загрязненных радионуклидами в результате крупных радиационных аварий и в областях с повышенным естественным радиационным фоном. Важное место в этих исследованиях занимали цитогенетические методы, основанные на учете частоты структурных нарушений хромосом в клетках меристем. Многолетний опыт использования цитогенетических тестов в целях оценки экологической ситуации в местах произрастания растений свидетельствует об их высокой чувствительности, информативности и надежности (Geras'kin et al., 2019).

Исследования влияния ядерных испытаний на окружающую среду СИП, проводились и ранее. Однако исследования биологических эффектов хронического облучения в полевых условиях СИП немногочисленны, в большинстве публикаций отсутствует информация об уровнях радиоактивного и химического загрязнения и величинах поглощенных доз, 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.

Настоящее исследование, в котором действие ионизирующих излучений на популяции растений исследовалось в естественной среде их обитания, отличается от многочисленных работ других авторов, изучавших радиобиологические эффекты на лабораторных объектах.

Оценки цитогенетических последствий облучения у растений СИП на данный момент представлены работами (Сейсебаев и др. (2004), Кадырова, Жапбасов (2019), Гераськин и др. (2009)), но выбранные площадки («Дегелен», «Балапан», «Опытное поле») значительно уступали по уровню радиоактивного загрязнения площадке «4А», где проходили испытания боевых радиоактивных веществ. В связи с этим необходимо проведение комплексных исследований с использованием современных методов (полевая радиометрия, цитогенетические методы, гамма-, бета- и масс-спектрометрия), нормативных документов и аппаратуры аккредитованных лабораторий Филиала ИРБЭ РГП НЯЦ РК, достаточного объема материала (163 экспериментальные точки, диапазон мощности доз $0,1-4,5 \times 10^3$ мкГр/час) оценки генетических последствий хронического воздействия ионизирующих излучений на природные популяции растений.

Целью диссертационной работы являлся анализ цитогенетических эффектов в популяциях тонконога тонкого (*Koeleria gracilis* Pers.) и ковыля волосовидного (*Stipa capillata* L.) с площадки Семипалатинского испытательного полигона, где испытывали боевые радиоактивные вещества.

Задачи исследования:

1. Выполнить радиоэкологическую оценку участков, включающую определение радиометрических параметров (мощности эквивалентной дозы γ -излучения и плотности потока β -частиц) в местах отбора проб, удельных активностей радионуклидов и концентраций химических элементов в растениях.

2. Оценить частоту и спектр цитогенетических нарушений в популяциях тонконога тонкого (*Koeleria gracilis* Pers.) и ковыля волосовидного (*Stipa capillata* L.) с экспериментальных участков.

3. Оценить зависимость частоты цитогенетических нарушений в популяциях тонконога тонкого (*Koeleria gracilis* Pers.) и ковыля волосовидного (*Stipa capillata* L.) от поглощенной растениями дозы.

Научная новизна работы. Впервые проведено цитогенетическое исследование природных популяций дикорастущих растений, произрастающих на площадке «4А» СИП, где проводили испытания БРВ. Оценены поглощенные растениями дозы, установлена форма зависимости частоты цитогенетических эффектов от логарифма мощности дозы. Определены спектр и частота цитогенетических нарушений в апикальных меристемных корешках проростков семян растений.

Установлена связь цитогенетических нарушений в меристеме тонконога тонкого и ковыля волосовидного с поглощенной критическими органами растений дозой и доказана радиационная природа наблюдаемых эффектов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Впервые, на основе полученного в полевых условиях большого экспериментального материала (163 экспериментальные точки, диапазон мощностей доз $0,1-4,5 \times 10^3$ мкГр/ч), установлено, что зависимость частоты цитогенетических нарушений от логарифма мощности дозы носит нелинейный и пороговый характер.

Исследованные виды злаковых растений могут быть использованы в качестве видов-индикаторов при проведении радиоэкологического мониторинга окружающей среды.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые на площадке «4А» СИП, где проходили испытания боевых радиоактивных веществ, выполнено комплексное исследование цитогенетических эффектов в популяциях типичных видов дикорастущих злаковых растений (тонконог тонкий и ковыль волосовидный), включающее оценку радиоэкологической обстановки, оценку поглощенных растениями доз и установление связи цитогенетических эффектов с поглощенной дозой.

2. Мощности поглощенных исследованными видами растений доз на площадке «4А» менялись в широких пределах ($0,1-4,5 \times 10^3$ мкГр/ч). Основную

часть дозы растения получали от внутреннего облучения радионуклидом ^{90}Sr . Вклад внешнего облучения и внутреннего облучения от других радионуклидов в поглощенные растениями дозы незначителен.

3. На основе большого фактического материала (163 экспериментальные точки и широкого диапазона изменения мощности дозы ($0,1-4,5 \times 10^3$ мкГр/ч)) исследована форма зависимости частоты цитогенетических нарушений от логарифма мощности дозы в популяциях растений с площадки «4А», где проходили испытания боевых радиоактивных веществ. Основной вклад в формирование цитогенетических эффектов вносят двойные мосты и фрагменты.

4. Впервые установлена пороговая величина поглощенной дозы для тонконога тонкого и ковыля волосовидного, ниже которой частота цитогенетических эффектов в природных популяциях растений не превышает спонтанный уровень, а выше возрастает с увеличением поглощенной дозы. Значения пороговых доз отличаются у разных видов растений и цитогенетических нарушений.

Предмет и объект исследования. Предметом исследования является оценка воздействия ионизирующих излучений на цитогенетические показатели растений на площадке «4А», где испытывали БРВ. Основными объектами исследования являются тонконог тонкий и ковыль волосовидный, произрастающие в местах испытания БРВ.

Методология и методы исследования. В качестве объекта исследования были выбраны типичные для Семипалатинского испытательного полигона многолетние дикорастущие злаки тонконог тонкий и ковыль волосовидный.

Исследования проведены на площадке «4А», где ранее проводили испытания боевых радиоактивных веществ. На основании данных о распределении плотности потока β -частиц и мощности эквивалентной дозы (МЭД) по β - и γ -излучению на поверхности почвы на площадке «4А» было выбрано три участка (№ 13, № 18 и № 20), в пределах которых отобраны пробы растений в 163 экспериментальных точках.

Для измерения удельных активностей радионуклидов и концентраций химических элементов в образцах растений применяли общепринятые аттестованные гамма-, бета- и масс-спектрометрические методы.

Для исследования структурных нарушений хромосом выбраны клетки корневой меристемы проростков. Препараты для изучения хромосом готовили с помощью стандартной методики. Семена проращивали в термостате MIR-253 (Sanyo, Япония) при температуре +24 °С в течение 7 ± 2 сут. Цитогенетический анализ препаратов выполнен с использованием микроскопа Axio Imager M2 при увеличении объектива $\times 100$ (масляная иммерсия) и $\times 60$, $\times 40$ и $\times 10$. На препаратах определяли общее число ана-телофазных клеток, частоту и спектр хромосомных перестроек.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В диссертационном исследовании представлена оценка цитогенетических эффектов в популяциях злаковых растений, произрастающих на загрязненной радионуклидами площадке «4А» СИП, определено содержание химических элементов и радионуклидов, проведена оценка дозовых нагрузок, что соответствует паспорту научной специальности 1.5.1. «Радиобиология» охватывающему такие области исследований, как «Фундаментальные и прикладные проблемы дозиметрии радиобиологических эффектов. Количественная оценка биологического действия излучения. Биологическая дозиметрия. Особенности биологического действия малых доз облучения» (п. 7), "Радиобиология растений. Влияние ионизирующих излучений на растения. Применение ионизирующих излучений в селекции растений" (п. 12), "Радиационная экология: изучение закономерностей поведения радиоактивных веществ в окружающей среде и действия ионизирующего излучения на растения и животных, разработка защитных мероприятий. Последствия ядерных аварий и катастроф, чрезвычайных ситуаций. Принципы и методы радиационного мониторинга. Миграция радионуклидов. Действие ионизирующего излучения на организмы, популяции и экосистемы. Радиоэкологические и радиобиологические

последствия радиоактивного загрязнения, в том числе в результате радиационных аварий" (п. 13).

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов основывается на достаточном объеме экспериментального материала, применении современной измерительной базы аккредитованных лабораторий, использовании стандартных и специально разработанных методических приемов. Всего было изучено 138905 клеток на 3942 постоянных препаратах.

Применяли параметрические методы статистики. Для оценки формы зависимости цитогенетических эффектов от мощности дозы использовали кусочно-линейную модель. Принята гипотеза H_0 о предполагаемой точке перегиба (Тп), разделяющей зависимость на два линейных участка, скорость изменения частоты цитогенетических нарушений в пределах которых существенно различается. Статистическая обработка результатов проводилась с помощью пакета компьютерных программ Microsoft Office Excel 2007 и Statistica 6.0.

Личный вклад диссертанта в работу. Соискателем сформулированы цель и задачи исследования, проведен в полевых условиях сбор образцов растений из природных популяций, в лабораторных условиях приготовлены и проанализированы все цитогенетические препараты, выполнена статистическая обработка результатов. Проведено обобщение и анализ полученных данных. Подготовлены научные публикации.

Апробация результатов. Основные положения работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих международных и региональных конференциях, конкурсах: XII конференции-конкурсе НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан (НЯЦ РК) (Курчатов, 2013); Международной конференции «Современные проблемы радиологии и агроэкологии, пути реабилитации техногенно-загрязненных угодий» (Обнинск, 2016); «4th International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity» (Берлин, 2017); II Международной конференции «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2018); VII и VIII международных научно-практических конференциях «Семипалатинский

испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (Курчатов, 2016, 2018); Международной научно-практической конференции «Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы» (Обнинск, 2018); Международном симпозиуме «Экология и эволюция: новые горизонты», посвященном — 100-летию академика С.С. Шварца (Екатеринбург, 2019); Международной молодежной конференции «Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии» (Обнинск, 2019); IX международной конференции «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (Курчатов, 2021); IX Республиканской научно-практической конференции с международным участием «Медико-биологические и экологические проблемы в уранодобывающих регионах» (Нур-Султан, 2022).

По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 5 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и/или индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus.

Связь темы диссертации с плановой тематикой научно-исследовательских работ. Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканское государственное предприятие Национальный ядерный центр Республики Казахстан (ИРБЭ РГП НЯЦ РК). Исследования проводились в рамках плановой темы Филиала ИРБЭ РГП НЯЦ РК по Республиканской научно-технической программе 036 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан», тема 03.02. «Разработка принципов биологического мониторинга зоны влияния предприятий ядерного топливного цикла» и Республиканской бюджетной программе 038 (011) «Обеспечение радиационной безопасности на территории РК» мероприятие 1 «Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона».

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов, списка сокращений и условных обозначений и списка использованных источников, который состоит из 178

наименований. Работа изложена на 136 страницах текста, включает 11 рисунков, 13 таблиц, а также 4 приложения.

Благодарности. Выражаю глубокую благодарность и искреннюю признательность директору Филиала ИРБЭ РГПНЯЦ РК., к.б.н. А.О. Айдарханову, научному руководителю, наставнику д.б.н., профессору С.А. Гераськину, ведущему научному сотруднику д.б.н. Переволоцкому А.Н и д.б.н. главному научному сотруднику Лукашенко С.Н. ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», к.б.н. заведующему кафедрой прикладной биологии Alikhan Vokeikhan University Байгазинову Ж.А., а также всему коллективу Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, особенно Мамырбаевой А.Н. и Каримбаевой К.С. Выражаю благодарность своей семье за терпение и поддержку.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Радиобиологические эффекты у растений на разных уровнях биологической организации

1.1.1 Молекулярный уровень

В организации живых систем различают молекулярный, клеточный, тканевой, органнй, организменный, популяционный, видовой, биоценотический и биосферный уровни. Все уровни взаимосвязаны, несмотря на собственные специфические особенности, что говорит о целостности живой природы. Любая живая система состоит из органических молекул: нуклеиновых кислот (ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота, РНК – рибонуклеиновая кислота), белков, углеводов, жиров и других. Все они находятся в клетке, различны по размерам, свойствам и выполняемым функциям. С этого уровня начинаются важнейшие процессы: обмен веществ и энергии, передача наследственной информации. Большинство органических молекул универсальны, так как построены по одному плану и могут использоваться любым организмом (Макарова, 2018). ДНК — макромолекула обеспечивающая хранение, передачу из поколения в поколение и реализацию генетической программы развития и функционирования живых организмов (Ермекова, 2017).

Эукариотические клетки больше бактерий по размеру, содержат больше ДНК и цитоскелет из белковых волокон. Клетке свойственна поразительная стабильность. При любых внешних воздействиях реакция клетки обращена на восстановление ее исходного состояния. Она может приспосабливаться и продолжать координированно функционировать во время голода или болезни. Мутации многих типов могут привести к элиминированию отдельных последовательностей реакций, и, тем не менее, клетка выживает при условии, что удовлетворяются определенные минимальные требования. Генетическая информация записана в линейной последовательности нуклеотидов ДНК. Каждая молекула ДНК состоит из двух комплементарных полинуклеотидных цепей, удерживаемых вместе водородными связями, образующими GC- и AT-пары

оснований. Репликация ДНК, обеспечивающая удвоение генетической информации, происходит путем образования новой комплементарной цепи на каждой из исходных цепей (Альбертс и др., 1994).

На клеточном и субклеточном уровне стресс-реакция растений включает комплекс разветвленных процессов на генетическом (транскрипционном, посттранскрипционном) и молекулярном (метаболическом) уровне, через регуляцию активности ферментов. В итоге формируется несколько метаболических путей, ведущих к образованию десятков тысяч вторичных продуктов, выполняющих протекторную функцию. В работе (Кондратьев и др., 2018) описана последовательность и взаимосвязь этих событий.

1.1.2 Клеточный уровень

Ионизирующие излучения могут индуцировать нарушения на разных уровнях биологической организации — от молекулярного и клеточного до организменного, популяционного и экосистемного (Geras'kin, 2016). Клетка является элементарной единицей живого, ей присущи все свойства живых организмов:

- высокоупорядоченное строение;
- получение энергии извне и ее использование для выполнения работы и поддержания упорядоченности;
- обмен веществ;
- активная реакция на раздражители;
- рост, развитие, размножение, удвоение и передача наследственной информации потомкам;
- регенерация, адаптация к окружающей среде (Лифарева, 2011).

Поглощение энергии ионизирующего излучения клеткой — это физический процесс. Ионизирующие излучения обладают способностью проникать в любые части клеток и отличаются неспецифичностью передачи энергии веществу. Поэтому ни один элемент клетки не огражден от поражения.

Цепь последовательных событий, завершающихся конечной радиобиологической реакцией, начинается с поглощения в клетке энергии

ионизирующего излучения. Выделяют (Гербенюк и др..., 2013) несколько стадий взаимодействия ионизирующего излучения с веществом:

1. Физическая – поглощение энергии излучения (10^{-16} – 10^{-15} с).

1. Физико-химическая стадия - прямое или косвенное действие излучения на молекулы-мишени (10^{-14} – 10^{-11} с).

2. Химическая стадия - воздействие на основные компоненты клеток с последующим изменением метаболизма (10^{-6} – 10^{-3} с).

3. Биологическая стадия - формирование генетических и соматических эффектов облучения (секунды – годы).

Облучение сказывается на многих физиологических процессах: изменяются темпы формообразования, нарушаются процессы дыхания, фотосинтеза, биосинтеза многих соединений и биогенеза структур (Гродзинский, 1989).

Проходя через клетку, ионизирующие излучения вырывают из внешней оболочки атомов электроны, которые включаются в процесс ионизации. По исчерпанию энергии свободные электроны присоединяются к другим атомам. Отрыв электронов от внешней оболочки атомов ведет к появлению положительных, а присоединение — отрицательных ионов (Дубинин, 1986). Анализ и обобщение результатов радиобиологических экспериментов позволил Бергонье и Трибондо сформулировать закон: «Чувствительность клеток к облучению прямо пропорциональна пролиферативной активности и обратно пропорциональна степени их дифференциации». Существует немало экспериментальных доказательств того, что важнейшей мишенью ионизирующей радиации является ядро клетки. В жизнедеятельности клетки ядро имеет исключительную значимость. В ядре сконцентрирована основная масса ДНК, важнейший резерв генетической информации. Под влиянием облучения в клетках происходят морфологические и функциональные модификации связанные с повреждением ДНК, в частности: 1) задержка вступления клетки в митоз; 2) формирование аббераций хромосом; 3) пикноз интерфазного ядра; 4) повреждения ДНК, ведущие к появлению мутаций в потомстве или уродств; 5) угнетение синтеза ДНК; 6) нарушение матричных молекулярных процессов (Кузин, 1997). В

соответствии с этим законом наиболее радиочувствительными являются растения, клетки которых имеют наибольшие по объему ядра (Sparrow, 1951).

1.1.2.1 Задержка клеточного деления

Реакция задержки деления отличается от абсолютного подавления митоза, наступающего после воздействия высоких доз, когда клетка продолжает функционировать, но необратимо лишается способности к делению. В результате формируются патологические формы гигантских клеток. Наиболее универсальная защитная реакция клетки на облучение - временная задержка деления или радиационный блок митозов. Длительность ее зависит от дозы: у лимфоцитов каждый Грей вызывает задержку митоза на 1 час (Стожаров, 2000). С увеличением дозы возрастает продолжительность задержки деления клеток. Эта реакция имеет адаптивное значение (увеличение длительности интерфазы и задержка вступления клетки в митоз дает возможность для эффективной репарации ДНК). Показано (Зайкина и др., 1973), что радиочувствительность клеток проростков *Vicia faba*, находящихся на разных стадиях клеточного цикла, варьирует в зависимости от условий эксперимента: дозы облучения, воздействия ингибиторов метаболизма или протекторов. Различия в радиочувствительности обусловлены различной эффективностью репарации на разных стадиях клеточного цикла. Наибольшая задержка деления происходит, когда воздействию подвергаются клетки в стадии синтеза ДНК или в постсинтетической стадии, самая короткая - при облучении в митозе.

1.1.2.2 Типы мутаций

В зависимости от характера изменения наследственных структур мутации делят на три типа: генные или точковые, хромосомные перестройки (абerrации) и геномные. Генные мутации обусловлены изменениями молекулярной структуры гена, т.е. нарушением последовательности нуклеотидов в молекуле ДНК. Хромосомные перестройки обусловлены разрывами и последующим воссоединением хромосом. К геномным мутациям относят изменения, связанные с увеличением или уменьшением числа хромосом или гаплоидных геномов (Жученко, 2004).

1.1.2.3 Цитогенетические эффекты

Клеточный цикл – период существования клетки от момента ее возникновения в результате деления материнской клетки до ее собственного деления или смерти. Клеточный цикл включает период покоя и митотический цикл (Карпюк, 2018).

Период между делениями клетки называют периодом покоя. Время от одного акта деления до другого называют клеточным циклом, а скорость, с которой происходит деление клеток-пролиферативной активностью клетки (Батян, 2021). Клеточный цикл включает фазы G_1 , S, G_2 и митоз. В фазе S происходит синтез ДНК, после фазы G_2 клетка вступает в процесс деления. Часть индуцированных излучением повреждений, обнаруживается во время деления клетки. Это aberrации хромосом. Частота aberrаций зависит от дозы: чем выше доза, тем больше частота aberrаций (Ярмоненко, 1988). При изучении действия ионизирующих излучений на клетки разных организмов были установлены общие закономерности, которые имеют существенное значение для понимания механизма повреждения хромосом. На растениях было показано (Даренская и др., 1968), что выход разных типов повреждений хромосом по-разному зависит от дозы облучения, а вероятность повреждения хромосом изменяется в пределах клеточного цикла. Aberrации хромосом делят на два типа:

а) перестройки хромосомного типа, которые затрагивают обе хроматиды в идентичных локусах;

б) перестройки хроматидного типа, которые затрагивают только одну хроматиду в хромосоме.

Видимые в анафазе митоза хромосомные перестройки обычно носят летальный характер. Это обусловлено тем, что в анафазе поврежденные хромосомы или хроматиды образуют мосты и ацентрические фрагменты, которые свидетельствуют о нарушении целостности хромосомного материала. Ацентрические фрагменты неравномерно распределяются между ядрами дочерних клеток, а мосты к концу анафазы разрываются в случайных точках, образуя нехватки и дубликации. В результате дочерние клетки оказываются

неполноценными по хромосомному и генетическому содержанию и погибают или же утрачивают способность к дальнейшему делению (Стрельчук, 1981).

Фрагменты представляют собой отделившиеся участки хромосом или хроматид. В каждом случае возникают два типа фрагментов: центрические и ацентрические (участок хромосомы не имеющий центромеры) (Бочков, Чеботарев, 1989). Ацентрические фрагменты лишены центромеры, участвующей в движении хромосом. Поэтому они остаются неподвижными или отстают при движении хромосом во время метакинеза и при расхождении к полюсам. При массовой фрагментации хромосом (пульверизация) фрагменты беспорядочно рассеяны по цитоплазме и не участвуют в общем движении хромосом. Иногда они сосредотачиваются вокруг веретена и даже проникают между его нитями, но никогда не собираются в экваториальной плоскости. Судьба фрагментов различна. Они могут попасть в одно из дочерних ядер, резорбироваться или образовать микроядро. Фрагменты обладают способностью воссоединяться своими концами. Воссоединение носит случайный характер и приводит к хромосомным aberrациям-нехваткам, инверсиям, дупликациям и транслокациям.

Мосты являются следствием фрагментации хромосом. При воссоединении содержащих центромеру фрагментов образуется дицентрическая хромосома, которая испытывает воздействие обоих митотических центров и, растягиваясь между дочерними группами анафазных или телофазных хромосом, образует мост. При воссоединении двух разорванных хромосом возникает хромосомный (двойной) мост, а при воссоединении двух сестринских хроматид-хроматидный мост (одиночный). Образование мостов приводит не только к генотипическому различию дочерних ядер, но и усугубляет патологию митоза, нарушая течение завершающих стадий деления. Образование моста задерживает завершение цитотомии. Между дочерними клетками длительно сохраняется цитоплазматическая перетяжка, напоминающая амитотическую перешнуровку, внутри которой проходит хромосомный мост, связывающий дочерние ядра и сохраняющийся иногда даже в интерфазе.

Отставание хромосом в метакинезе и при расхождении к полюсам возникает при повреждении хромосомы в области кинетохора. Такие хромосомы беспорядочно располагаются в цитоплазме и не попадают в дочерние ядра. Отставание целых хромосом в метакинезе и при расхождении их к полюсам часто встречается в клетках культуры ткани и в опухолевых клетках. На стадии телофазы хромосомы с поврежденным кинетохором либо оттесняются цитоплазматической перетяжкой в одно из дочерних ядер, либо образуют микроядро (Алов, 1972).

Обменные перестройки возникают в результате обмена материалом между разными хромосомами или внутри одной хромосомы. В связи с этим обменные перестройки подразделяют на межхромосомные и внутривхромосомные обмены.

Межхромосомные обмены бывают двух типов: симметричные и асимметричные. Симметричные перестройки — это хромосомные обмены, после образования которых хромосомы или хроматиды остаются моноцентрическими (транслокации). Асимметричные перестройки — это обмены, в результате которых появляются ди-, три- или полицентрические хромосомы и ацентрические фрагменты. Внутривхромосомные обмены также разделяются на внутривплечевые и межплечевые (Бочков, Чеботарев, 1989).

Типы aberrаций и aberrантных клеток зависят от стадии, на которой облучалась клетка, и от времени, прошедшего после облучения. Установлено, что при облучении клеток в стадии G_1 интерфазы, когда неподелившиеся хромосомы состоят из пары хромонем, в первом после облучения митозе преобладают aberrации хромосомного типа. После облучения клеток в середине фазы S и на стадии G_2 наблюдаются только хроматидные aberrации. Хромосомные aberrации встречаются редко уже при облучении клеток в ранней стадии S . Это имеет разные объяснения. Во-первых, в период S происходит репаративная рекомбинация хромосом; во-вторых, часть клеток из числа тех, в которых могли бы возникнуть при облучении в этой стадии хромосомные aberrации, переходит во фракцию неделящихся клеток; в третьих, часть клеток погибает в интерфазе, не дожив до деления. Облученные на стадии G_2 клетки дают наибольший выход aberrаций в

митозе; клетки, облученные в поздней стадии S, дают минимальный выход aberrаций (Тимофеев-Ресовский и др., 1980).

1.1.2.4 Клеточная гибель

1.1.2.4.1 Интерфазная гибель

Облучение очень высокими дозами может вызвать быстрое разрушение клетки. В этом случае говорят об интерфазной гибели (Храмченкова, 2003) Интерфазная гибель клеток наступает без вступления клетки митоз в результате пикноза ядра и фрагментации хроматина. Интерфазной гибели предшествуют изменения проницаемости ядерной, митохондриальной и цитоплазматической мембран. Изменения структуры и проницаемости мембран лизосом приводят к освобождению и активации ДНК-азы, РНК-азы, катепсинов, фосфатазы, ферментов гидролиза гликозаминогликанов и др. Угнетается клеточное дыхание, наблюдается деградация дезоксирибонуклеинового комплекса в ядре. Появляются различные дегенеративные изменения (пикноз ядра, фрагментация хроматина и др.). Эта форма клеточной гибели возникает после облучения в десятки и сотни греЙ.

Для интерфазной гибели свойственна практически 100% гибель пролиферирующих или непролиферирующих (дифференцированных) клеток при достижении определенных поглощенных доз. Интерфазная гибель клеток ввиду своей массовости, может привести к полной остановке морфогенетических и ростовых процессов (Михеев, 2016).

1.1.2.4.2 Митотическая гибель

Облучение более низкими дозами ведет к подавлению способности клеток делиться. Утрата клеткой способности к делению может произойти либо сразу, либо в результате 2–3 следующих за облучением митозов. Количество делений определяется, главным образом, тяжестью структурных нарушений хромосом. Поэтому долю клеток с хромосомными нарушениями часто используют в качестве количественного показателя радиочувствительности (Галицкий, 2001). Митотическая катастрофа — это гибель клетки в результате грубых нарушений митоза, таких как отставание хромосом в мета- и анафазе, К-митозы (нарушена

организация веретена деления и выстраивание хромосом в виде метафазной пластинки), мультиполюсные и многогрупповые мета- и анафазы (Деев и др., 2018) Образование одного или нескольких микроядер, в которых отсутствует явление маргинации и конденсации хроматина является признаком митотической гибели клетки (Okada, Mak, 2004) Микроядра в норме и при действиях мутагенов из интерфазного ядра могут образоваться путем немитотического выброса хроматина (Манских, 2007).

1.1.2.4.3 Апоптоз

Апоптоз – программируемая клеточная гибель (ПКГ) — запускается при таком уровне поражений ДНК, который сам по себе не должен приводить к гибели клетки. Этот вид гибели является физиологическим процессом саморазрушения клетки. Апоптоз у растений включает в себя три фазы: индукции, эффекторную и деградации. В ходе апоптоза наблюдаются конденсация хроматина и дробление ядра, происходит разрыв плазмодесм-мембранных каналов. Благодаря плазмодесмам образуется единая внутриклеточная система-симпласт. Содержимое протопласта разрушается с помощью гидролитических ферментов, а мономерные остатки разрушенных клеток утилизируются соседними клетками (Самуилов, 2001). Основная роль в инициации определенных видов апоптоза относится к митохондриям: также как и у животных, индуцированный выход из митохондрий цитохрома с и других белковых факторов запускает апоптоз в клетках растений. Активные формы кислорода могут служить триггерными молекулами апоптоза, а антиоксиданты подавляют апоптоз у растений (Ванюшин, 2001).

Способность индуцировать ПКГ присуща всем классам организмов, начиная от бактерий и заканчивая многоклеточными эукариотами. Роль ПКГ у растений значительна: обеспечение закономерного функционирования процессов роста и развития, а также участие в комплексе защитных реакций, направленных против всех видов стрессов окружающей среды, как абиотических так и биотических (Locato, De Gara, 2018).

Жизненный цикл растений включает в себя непрерывную работу ПКГ в контексте большого количества фаз развития и адекватных стрессовых реакций. По

своей сути, ПКГ является активной формой управляемого сетью генов клеточного апоптоза. Природа данного явления непосредственно связана с реконструкцией клеточных соединений и стабилизацией жизнедеятельности растений. Основная морфологическая и биохимическая специфика ПКГ присуща и растениям, и животным. Тем не менее, недавние исследования свидетельствуют о вкладе некоторых органелл (вакуоли и хлоропласты) в регуляции программируемой клеточной гибели, что, в свою очередь, раскрывает существование индивидуальных путей апоптоза у растений. Роль сигнала, индуцирующего ПКГ выполняют активные формы кислорода (АФК), которые генерируются биотическими и абиотическими стрессами (Pennell et al., 1997).

Программируемая клеточная гибель у растений имеет фундаментальное значение при всех типах размножения, а также принимает непосредственное участие в реакциях на абиотические и биотические стрессы. В настоящее время установлены основные механизмы апоптоза, активно ведутся исследования регуляторов и активаторов этого процесса. Важную роль в индукции апоптоза играет ген *p53*. Он воспринимает информацию о повреждении молекулы ДНК и, в зависимости от тяжести повреждений, запускает процесс репарации ДНК либо активирует каскад ферментативных реакций, запускающих ферменты, разрушающие определенные (но не все) структуры клетки. При апоптозе клетка распадается на отдельные апоптотические тельца, ограниченные плазматической мембраной. В результате цитозоль клетки и лизосомальные ферменты не выходят в межклеточную среду, а перерабатываются макрофагами, либо соседними клетками. Это происходит довольно быстро — в течение 90 минут. Поэтому гибнущие таким способом клетки не вызывают в ткани воспалительной реакции. Утрата клеткой способности к апоптозу является одной из предпосылок злокачественного перерождения (Xiquan et al., 2019).

1.1.2.4.4 Некротическая гибель

Противоположной апоптозу клеточной реакцией, имеющей не меньшее значение, является некроз — процесс бесконтрольной клеточной гибели. При некрозе, клетка претерпевает резкие изменения, набухая и разрываясь, при этом ее содержимое изливается в межклеточное пространство, вызывая воспаление ткани (Самуилов и др..., 2000). Некротическая гибель, как правило, сопровождается разрывом плазматической мембраны, сжатием протопласта, дисфункцией митохондрий, формированием АФК. При этом характерных черт вакуолярной смерти не наблюдается. По многочисленным литературным данным, причиной некрозов является абиотическая стрессовая реакция (Фомичева и др., 2012).

1.1.3 Организменный уровень

Характеризуя переход к организменному уровню в контексте адаптационных клеточных механизмов, необходимо обратить внимание на дополнительные, отражающие взаимодействие органов во всем растении, реакции, а также усиливающую конкуренцию между ними за физиологически активные вещества и трофические факторы, представленные специфичностью донор-акцепторных связей, ввиду их аттрагирующего действия. Подобный механизм приспособления дает возможность растениям к созданию и последующему сохранению необходимого минимума генеративных органов в неблагоприятных условиях среды, а также в достаточной мере обеспечить их необходимыми веществами для нормального созревания и достижения естественных морфофизиологических параметров.

Эффект облучения также обусловлен фазой развития растения. Например, зерновые культуры характеризуются тяжелыми поражениями генеративных органов во время кущения. Образовавшиеся колосья в значительной степени оказываются стерильными, а зерно - щуплым. В условиях тяжелых нарушений репродуктивных органов и высокой стерильности колосьев наблюдается эффект сильного кущения в следствии чего, подавляющая часть растений характеризуется угнетением корневой системы и формирования стеблей. При условии облучения на протяжении всего вегетационного периода генеративные органы отсутствуют.

Такие последствия наблюдаются и у двудольных растений (горох, фасоль, бобы и др.) (Климентова и др., 2006).

У растений органогенез не ограничивается эмбриогенезом, а происходит всю жизнь. Клетки меристемы сохраняют способность к делению на протяжении всего онтогенеза. Радиобиологические эффекты растений обусловлены повреждением клеток и ткани меристем, что проявляется в виде замедления и нарушения ростовых процессов. Повреждения клеток меристем, снятие апикального доминирования в результате поражения апикальных меристем, изменения гормонального баланса могут вести к формированию морфологических аномалий (Geras'kin et al., 2021). Радиоморфозы корня, стебля, листьев, цветка, плода, семени характеризуются увеличением или уменьшением количества элементов, изменением размеров, формы, цвета и т.п.

Выросшие из облученного семени растения могут состоять из генетически разнородных тканей, т.е. представлять собой химеру. Пятнистость листьев возникает из-за того, что часть ткани листа состоит из нормальных клеток с хлорофиллом, а часть ткани образуют бесхлорофильные клетки (Лазаревич и др., 2014). Поддержание и восстановление топологии клеточных рядов при радиационном повреждении меристемы реализуется через репопуляцию и смену нарушенных клеток и слоев. Новые слои продвигаются в нарушенной ткани путем сочетания симпластического и интрузивного увеличения. Продвижение аномальных клеток в область растяжения задерживается через прерывание симпластического роста. Локальные процессы восстановления сопровождаются изменением линейности пакетирования клеток. По достижении 50%-го уровня частоты aberrаций хромосом указанные механизмы восстановления оказываются неэффективными и восстановление происходит по более радикальному механизму - регенерации, которая приводит к полной замене тканей апекса. Восстановительный потенциал апекса корня ограничивается "критической массой" меристематических клеток и степенью поражения зоны растяжения (Кравец и др., 2012).

Возникновение клеток с замедленной скоростью деления, с аберрациями хромосом или выпадением некоторых клеточных рядов вследствие гибели отдельных инициалей объясняется появлением в растениях химерности. Этими причинами можно объяснить изменение формы органа, сечения, скручиваемость, морщинистость, дихотомию, фасциации (Гудков, 1991).

Меристемы растений наиболее чувствительны к действию излучения (Гродзинский, 1989). Облучение может вести к образованию избыточного числа воздушных корней, нарушению кущения у злаков, усиленному росту боковых побегов, курчавости листьев, образованию опухолей и химер. Признаки лучевого поражения могут быть зарегистрированы в ходе фенологических наблюдений в условиях радиоактивного загрязнения территории. Замедление роста растений, ожоги и пожелтение листьев и даже элементов формирующегося колоса, запаздывание в сроках прохождения основных этапов органогенеза указывают на развитие процессов радиационного поражения, которое повлечет за собой снижение урожая.

Вклад β -излучения в поглощенную дозу, накапливаемую ассимилирующими и репродуктивными органами растений, примерно на порядок, а в некоторых случаях даже в несколько десятков раз может превышать эффект γ -излучения (Тихомиров, 1972).

1.1.4 Надорганизменный уровень

Классификация филогенетических или надорганизменных уровней эволюции включает в себя четыре основных уровня. Первоначальным филогенетическим подуровнем эволюционной организации живых организмов является популяция. Согласно современным представлениям, в качестве элементарной эволюционной единицы используется именно популяция. С этого уровня берет начало эволюционная биология. Вид же относится ко второму подуровню, характеризуя последовательность реализации эволюционного процесса.

Следующей ступенью является биоценоз либо, согласно терминологии академика В.Н. Сукачева (1880–1967), биогеоценоз, как сообщество отличающееся

корреляцией многочисленных условий среды: географических, климатических, гидрологических, атмосферных и т.п. (Отюцкий, 2017).

Четвертый и последний уровень представляет собой консолидацию всех предыдущих, отличаясь большим количеством биогеоценозов и называется биосферой. Таким образом, принципиальными тенденциями перманентного функционирования и эволюции живой природы выступают ее целостность и строгая иерархическая структурированность, выражающиеся в пирамиде уровней. При этом каждый последующий уровень характеризуется специфическими свойствами и закономерностями, не сводимыми к закономерностям низшего уровня (Рузавин, 2013).

Надорганизмальные системы отличает пролонгированность цикла существования больше, чем у особей в их составе. Данный фактор вынудил виды вырабатывать как можно больше адаптационных механизмов к широкому диапазону изменений среды. Расширение этого диапазона требует создания новых способов приспособления к нему, что достигается через направленное воздействие естественного отбора на генетическую и эпигенетическую регулируемую систему вида. Долгое существование популяций и видов обусловлено их биологической выносливостью, важнейшую роль в которой выполняет значительная численность особей. Подобное многократное дублирование элементов с относительно короткой продолжительностью жизни позволяет популяции выжить даже в случае гибели достаточно большого числа ее особей. Тем не менее есть риск индивидуальных колебаний численности популяции для каждого вида, превышение нижнего порога которых грозит вымиранием популяции либо вида. Повышенная жизнеспособность же особенно характерна для биоценозов и особенно биосферы. Полная гибель особей вида или их замена другим, как правило, не приводит в результате к гибели данного сообщества, равно как и биосферы в связи с постоянным замещением исчезнувших видов. Отличительной чертой надорганизмальных систем можно назвать флуктуационный характер сдвигов в численности особей. Это свидетельствует о высокой чувствительности надорганизмальных систем к управляющим воздействиям (Фролов, Розенберг,

2002). Авторы (Ульяненко, Удалова, 2015). подчеркивают, что для оценки радиоэкологического состояния и радиационной защиты окружающей среды необходим фундаментальный экосистемный подход, включающий анализ эффектов на всех эволюционных уровнях. Такие биоценотические показатели как численность, биомасса популяций, темпы размножения, продуктивность, биообразие, таксономическая и трофическая структура позволят в будущем дать точную и адекватную оценку взаимообусловленных радиоиндуцированных реакций всех компонентов био- и агроценозов.

Анализ значительного объема информации, полученной в лабораторных экспериментах с растениями, позволил установить общие и специфические реакции растений на острое и хроническое действие ионизирующих излучений на разных уровнях биологической организации — от молекулярно-клеточного до надорганизменного. При этом сведения об экологических и эволюционных последствиях хронического облучения популяций растений в дозах, встречающихся в современной биосфере, невозможно получить в лабораторном эксперименте потому, что на высших уровнях биологической организации (популяционном, экосистемном) в ответную реакцию на облучение вовлекаются биологические и экологические механизмы, не сводящиеся к реакции индивидуальных растений на облучение (Geras'kin, 2016). Помимо этого, существенным доводом в пользу проведения радиобиологических исследований в полевых условиях является несоответствие между лабораторными тестами на экотоксичность и полевыми данными, полученными на представителях биоты, живущих в условиях хронического облучения. Показано, что организмы в их естественной среде обитания более чувствительны к радиационному воздействию, чем в лабораторных условиях, причём различия в чувствительности достигают одного порядка (Garnier-Laplace et al., 2013). Именно поэтому следующий раздел литературного обзора посвящен анализу наблюдений за популяциями растений, населяющих загрязненные радионуклидами территории.

1.2 Радиобиологические эффекты в популяциях растений, населяющих загрязненные радионуклидами территории

1.2.1 Радиобиологические эффекты в популяциях растений с территорий, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС

Катастрофа на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) случилась 26 апреля 1986 года. Это самая крупная авария в истории атомной энергетики. Взрыв произошел в 4-м энергоблоке. В результате аварии в окружающую среду было выброшено $1,85 \times 10^{18}$ Бк радионуклидов (без учета инертных газов) (Израэль и др., 1990). Сформировавшееся в результате аварии широкомасштабное и крайне неравномерное радиоактивное загрязнение, разнообразие ответных реакций живой природы на разных уровнях биологической организации — от молекулярно-клеточного до экосистемного сделали исследования биологических последствий Чернобыльской катастрофы источником поистине уникальной информации.

Наибольшему радиационному воздействию подверглись природные и аграрные экологические системы в 30-км зоне ЧАЭС. Чернобыльская авария произошла в конце апреля - период ускоренного роста и формирования репродуктивных органов, когда растительные сообщества и многие представители мезофауны наиболее радиочувствительны. Максимальное радиационное воздействие на объекты живой природы пришлось на первые 10–20 дней с момента аварии, когда значительный вклад в поглощенную дозу вносили короткоживущие изотопы. Сразу после аварии в подвергшихся радиоактивному загрязнению районах были начаты исследования, выявившие многочисленные факты радиационного поражения растений и животных.

Цитогенетический анализ клеток корневой меристемы озимой ржи и пшеницы урожая 1986 года из 30-км зоны ЧАЭС выявил зависимость частоты аберрантных клеток от дозы. Значимое превышение над контрольным уровнем частоты аберрантных клеток наблюдалось начиная с поглощенной дозы 3,1 Гр, ингибирование митотической активности - начиная с дозы 1,3 Гр, а прорастание

семян замедлялось начиная с дозы 12 Гр. Анализ трех последовательных поколений растений, произраставших на наиболее загрязненных участках, выявил, что частота абберрантных клеток в интеркалярной меристеме во втором и третьем поколениях выше, чем в первом (Geras'kin et al., 2003).

В первый год после аварии при мощности дозы 5–10 мР/ч по γ -излучению максимальная частота клеток с абберациями в метафазах первого митоза корневой меристемы *Crepis tectorum* составляла 10,2–15,3%, наблюдались клетки с множественными абберациями хромосом. Во второй год на участках с мощностью дозы облучения от 20 мР/ч до 0,02–0,03 мР/ч максимально было обнаружено 1,4–2,2% клеток с абберациями хромосом при самых высоких мощностях дозы. Отмечали появление растений с измененным кариотипом, что свидетельствует об активных микроэволюционных процессах в длительно облучаемых популяциях растений (Шевченко, Гриних, 1990).

Частота нарушений хромосом в клетках корневых меристем водных растений: тростника обыкновенного (*Phragmites australis*), телореза алоэвидного (*Stratiotes aloides*), манника большого (*Glyceria maxima*), сусака зонтичного (*Butomus bellatus*), ежеголовника прямого (*Sparganium erectum*) и стрелолиста стрелолистного (*Sagittaria gittifolia*) из наиболее загрязненных озер зоны отчуждения составила 7–17%. У растений рек Уж и Припять этот уровень равен в среднем 3,5–5,0%, а в водоемах с отсутствием радионуклидного загрязнения не превышал 2,6% и в среднем составил 1,9%. Частота аббераций хромосом в органах водных растений загрязненных водоемов чернбыльской зоны в несколько раз превосходила уровень спонтанного мутагенеза, характерного для водных растений, и, возможно, является следствием радиационно-индуцированной генетической нестабильности (Гудков и др., 2014). Обнаружена значимая корреляция частоты цитогенетических повреждений в клетках апикальных меристем растений тростника обыкновенного с поглощенной дозой излучения ($r=0,94$, $p<0,01$). Выявлена зависимость между частотой аномальных клеток в апикальных меристемах и мощностью поглощенной дозы хронического облучения от инкорпорированных радионуклидов (Шевцова, Гудков, 2014).

Работы, посвященные исследованию сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), одного из наиболее радиочувствительных видов, часто встречаются в литературе. В работе (Федотов и др., 2006) представлены главные итоги 17-летнего наблюдения (1987–2004 гг.) за сосной обыкновенной в 30-км зоне аварии на ЧАЭС по радиобиологическим, цитогенетическим и генетическим тестам. Отмечено, что острое облучение в дозах >1 Гр вызывает формирование морфозов и угнетение роста, а при дозах >2 Гр снижается репродуктивная способность деревьев. Радиобиологические тесты имеют линейные или граничащие с линейной зависимости доза-эффект. Острое облучение в дозе 0,5 Гр вызывает цитогенетические и генетические эффекты, статистически значимо превышающие контрольные уровни. Зависимость цитогенетических эффектов от поглощенной дозы характеризуется экспоненциальной кривой, а частота мутаций изоферментных локусов - надлинейной. Аналогичные результаты были получены в работе (Йощенко и др., 2010).

Частота аберрантных клеток в корневой меристеме семян сосны обыкновенной, обитающих на участках Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС, статистически значимо превышала контрольный уровень на всех опытных участках в течение всего периода наблюдений (2003–2016) (Geras'kin et al., 2019). Сопоставление выхода цитогенетических нарушений с характеристиками радиационной ситуации на экспериментальных участках – концентрациями ^{137}Cs и ^{90}Sr в шишках, концентраций ^{137}Cs в почве и расчетными оценками поглощенной дозы в репродуктивных органах сосны свидетельствует о том, что повышение частоты цитогенетических нарушений обусловлено радиационным воздействием. Полученные данные согласуются с результатами ранее проведенных исследований по изучению цитогенетических нарушений в сообществах сосны обыкновенной, обитающих в условиях радиоактивного и техногенного загрязнения.

В фоновых популяциях сосны частота цитогенетических нарушений циклически изменялась во времени. В условиях хронического облучения обнаружено (Geras'kin et al., 2018). нарушение присущих фоновым популяциям

циклических закономерностей, увеличение вариабельности изученных признаков и тенденция к снижению во времени частоты цитогенетических нарушений. Таким образом, даже сравнительно малая мощность дозы хронического облучения способна разрушать свойственные интактным популяциям закономерности саморазвития.

Многолетние (2005–2015) наблюдения за состоянием семенного потомства сосны обыкновенной в лесхозах Гомельской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС, показали, что формирующиеся в условиях хронического облучения семена характеризуются высокой изменчивостью показателей жизнеспособности (Гончарова, Ковалев, 2017).

Изменчивость митотической активности тканей сосны обыкновенной была изучена на пробных площадках с разным уровнем радиоактивного загрязнения в Государственном казенном учреждении Брянской области «Клинцовское лесничество». Контроль располагался в относительно чистой зоне в ГКУ Брянской области «Учебно-опытное лесничество». Показано, что насаждения сосны обыкновенной испытывают существенное влияние хронического облучения: повышена митотическая активность клеток при минимальной мощности экспозиционной дозы, увеличено количество клеток в метафазе, телофазе, количество анафаз с мостами, с отставанием и одновременным выходом и отставанием хромосом. С увеличением мощности экспозиционной дозы наблюдалась тенденция к увеличению активности деления клеток и усилению мутационных процессов (Скок, Шлапакова, 2017).

Исследования цитогенетических характеристик дуба черешчатого с территорий, загрязненных в результате аварии на Чернобыльском АЭС, показали, что, несмотря на нормализацию радиоактивного фона на обследованных территориях, цитогенетические характеристики дуба черешчатого отличались от контроля. Полученные результаты можно объяснить радиационно-индуцированной нестабильностью генома и волновой кинетикой мутационного процесса (Артюхов, Калаев, 2005).

Исследован полиморфизм фермента глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы в популяциях сосны обыкновенной, населяющих участки Брянской области, загрязнённые радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Установлено, что с ростом мощности дозы хронического облучения (7,0–129,9 мГр/год) статистически значимо увеличивается общая частота мутаций. Не выявлено значимых изменений активности ферментов от мощности дозы ионизирующего излучения (Казакова и др., 2015).

Установлено увеличение частоты мутаций изоферментных локусов, а также изменение генетической структуры популяций, развивающихся в условиях хронического радиационного воздействия. У катаболических и анаболических ферментов значения показателей генетического разнообразия выше, чем у ферментов антиоксидантной системы. Используя в качестве маркеров группы ферментов, выполняющих в организме определенные функции, возможно не только получить данные о действии хронического облучения, но и выяснить, как изменяется генетическая структура популяции в зависимости от выбранной группы ферментов (Казакова и др., 2017). Таким образом, несмотря на низкие значения, наблюдаемые мощности дозы могут рассматриваться как фактор, способный модифицировать генетическую структуру популяций.

В целом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что, несмотря на повышенную частоту мутаций изоферментных локусов и изменения генетической структуры популяций, вынужденных развиваться в условиях хронического облучения, современных величин доз (7–130 мГр/год) недостаточно для формирования эффектов на организменном и популяционном уровнях (Geras'kin et al., 2019). В условиях техногенного загрязнения в сообществах растений может происходить отбор на увеличение устойчивости к действующему агенту. Но скорость и сама вероятность формирования этого свойства значительно отличается в разных радиоэкологических условиях (Geras'kin et al., 2013).

В работах (Гераськин и др., 2017; Гродзинский, Гудков, 2006) обобщены результаты многолетнего изучения биологических эффектов у растений и животных, населяющих территорию, загрязненную радионуклидами в результате

аварии на ЧАЭС, описаны соматические и генетические радиобиологические эффекты, наблюдавшиеся у культурных и дикорастущих растений в 30-км зоне ЧАЭС, а также на других загрязненных радионуклидами территориях. Особое внимание уделено отдаленным реакциям растений: ослаблению иммунитета, изменениям генетической и эпигенетической структуры популяций. Обсуждается вопрос о возможности адаптации растений к условиям повышенного радиационного воздействия. В условиях хронического действия ионизирующей радиации при низкой мощности дозы изменяется структура популяции, в которой появляются организмы с повышенной устойчивостью к облучению. То есть, в результате ряда вызванных хроническим облучением процессов в экосистемах, загрязненных радионуклидами, ускоряются микроэволюционные процессы (Бубряк и др., 2016).

В ходе многолетних масштабных исследований генетических процессов в популяциях флоры и фауны, обитающих в зонах Кыштымской и Чернобыльской аварий, обнаружен (Глазко и др., 2008) ряд общих закономерностей действия радиации на природные популяции, позволяющих перейти к количественным прогнозам отдаленных последствий хронического облучения:

- в хронически облучаемых популяциях растений, наряду с индукцией мутаций, действует отбор, затрагивающий как вновь возникшие мутантные гены, так и нормальные аллели. Интенсивность отбора в условиях хронического облучения в отношении многих нормальных генов может быть столь высока, что возможные отдаленные последствия хронического облучения будут определяться изменениями частот обычных генов;

- интенсивный радиационно-индуцированный отбор обнаруживается для ряда локусов как на гаплоидном, так и на диплоидном уровнях;

- повышенная популяционная частота особей, несущих определенный мутантный ген, не обязательно связана с высокой мутабельностью соответствующего локуса и/или вида.

Проведенные в зоне ЧАЭС исследования на сельскохозяйственных растениях позволили установить важные черты, специфичные для ответной

реакции биоты в условиях крупных радиационных аварий (Гераськин, 1998) а именно:

- на первом этапе (для чернобыльской аварии — это весна-осень 1986 г.) радиационное воздействие на растения по главным цитогенетическим тестам было похоже на эффект, индуцируемый острым γ -облучением в сравнимых дозах;

- после нормализации радиационной ситуации, невзирая на выраженную тенденцию к уменьшению со временем, на протяжении многих лет отмечался высокий и зависящий от уровня радиационного воздействия уровень цитогенетических нарушений, при этом скорость уменьшения его величины была существенно меньше скорости радиоактивного распада;

- длительное облучение малыми дозами на территориях, загрязненных радионуклидами в результате крупных радиационных аварий, может привести к наследуемой нестабильности генома, обнаруживающейся, в частности, в повышении частоты цитогенетических нарушений и кариотипической изменчивости у потомков изученных организмов.

1.2.2 Радиобиологические эффекты в популяциях растений, произрастающих на Восточно-Уральском радиоактивном следе

29 сентября 1957 г. на предприятии ПО «Маяк», вследствие повреждения системы охлаждения произошел взрыв цистерны, в которой находилось почти 80 м³ высокотоксичных радиоактивных отходов. В атмосферу попало приблизительно 20 МКи ($7,4 \times 10^{17}$ Бк) радиоактивных отходов, из которых около 18 МКи выпало на территории ПО «Маяк», а примерно 2 МКи-за её пределами, сформировав Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) протяженностью примерно 300 км. Общая бета-активность воды в озерах и реках на территории следа составила в начальный период 1000–10000 Бк/л; радиоактивное загрязнение почвы ВУРСа достигало 2000 Ки/км² и более. В отдаленный период аварии основной вклад в поглощенную растениями и животными дозу вносит ⁹⁰Sr (Атлас..., 2013).

Изучение генетических процессов в природных популяциях растений было начато на территории ВУРС в 1962 г. Основные направления генетических

исследований включали: 1) изучение интенсивности мутационного процесса в облучаемых популяциях растений в зависимости от дозы и мощности дозы излучения, а также анализ зависимости доза-эффект для разных видов генетических нарушений (генные мутации, абберации хромосом в митозе и мейозе); 2) изучение динамики мутационного процесса в хронически облучаемых популяциях растений в череде поколений; 3) анализ микроэволюционных процессов в облучаемых популяциях растений.

Флора в основной части ВУРСа представлена комплексом синантропных и полуприродных сообществ в разных фазах деградации и восстановительных сукцессий. Изменения фитоценозов вызваны острым облучением в первые дни аварии и сопутствующими рекультивационными мероприятиями. Радиобиологические последствия длительного облучения для флоры обнаруживаются в увеличении масштаба изменчивости всех параметров жизнестойкости семенного потомства и увеличении его мутабельности. Так, через 33 года после аварии на ПО «Маяк» на загрязненных ^{90}Sr почвах сформировались популяции одуванчика с повышенным уровнем цитогенетических нарушений в клетках меристемы, отличающиеся быстрыми темпами роста и развития и устойчивые к дополнительному радиационному воздействию (Позолотина и др., 1992). В ответ на длительное воздействие на природные популяции и сообщества редкоизирующих излучений, вызывающих в основном репарируемые повреждения, в природной популяции можно прогнозировать адаптивный ответ в виде повышенной радиорезистентности видов, достигаемый для разных видов с разной скоростью и разными биологическими путями (Шевченко и др., 1992). Возможности радиоадаптации ограничены. Она никогда не бывает полной, а лишь частично компенсирует явное радиационное поражение видов.

В работе (Шевченко, 1979) рассмотрены вопросы естественного и индуцированного ионизирующими излучениями мутационного процесса в популяциях хлореллы с территории ВУРС. Проанализированы закономерности динамики мутационного процесса в популяциях водорослей в условиях хронического влияния продуктов деления урана, УФ-лучей и этиленамина.

Описано явление радиоадаптации природных популяций к длительному воздействию ионизирующих излучений и вскрыта генетическая природа этого явления. Рассмотрены возможные отдаленные генетические последствия при действии на природные популяции различных загрязнителей окружающей среды.

Частота спонтанных мутаций зависит от условий культивирования хлореллы. Если условия для всех клеток культуры остаются неизменными, например при выращивании хлореллы при одной и той же плотности культуры, следует ожидать постоянную частоту спонтанных мутаций. Появление мутагенных факторов при культивировании хлореллы вело к повышению концентрации мутантов в культуре. Уровень этой концентрации зависел от мощности дозы. Прекращение воздействия мутагенного фактора приводило к экспоненциальной элиминации мутантов из культуры до спонтанного уровня (Шевченко, 1962). Сочетание селекционного и мутационного давлений на популяции хлореллы в условиях высокой концентраций $Sr^{90}+Y^{90}$ в почве приводило к возрастанию в облучаемых популяциях количества мутантных особей по сравнению с контролем (Шевченко, 1970).

В экспериментах по испытанию выделенных штаммов на устойчивость к рентгеновым лучам была выявлена более высокая радиорезистентность популяций хлореллы, обитающих в условиях повышенных уровней радиоактивности среды, чем в контрольной популяции. В условиях высоких уровней радиоактивности среды на базе генных мутаций идет отбор более жизнеспособных в новых условиях по сравнению с контрольной популяцией форм хлореллы. Радиорезистентные штаммы хлореллы являются также более термоустойчивыми по сравнению со штаммами контрольной популяции.

В экспериментах, проведенных на Восточно-Уральском радиоактивном следе, исследовали динамику мутационного процесса в последовательных поколениях природных популяций растений с целью изучения закономерностей формирования генетического груза при длительном пребывании их в условиях повышенного фона радиации. В качестве основного подхода был избран анализ цитогенетических изменений, хлорофильных и генных мутаций у растений,

обитающих более 40 лет в условиях хронического воздействия β -излучения и у их потомков (Кальченко и др., 2002).

Плотность радиоактивного загрязнения в месте обитания опытной популяции прозанника пятнистого (*Hypochoeris maculata* L.) составляла 55 МБк/м² по Sr-90 и 2,5 МБк/м² по Cs-137. Контрольная популяция произрастала на незагрязненной радионуклидами территории. В обеих популяциях были обнаружены растения, имеющие в кариотипе добавочные В-хромосомы, однако частота встречаемости В-хромосом в опытной популяции была выше, чем в контрольной. Из обследованных 30 семей опытной популяции 9 семей имели растения с изменениями кариотипа основного набора А-хромосом (Абрамов и др., 2010).

Уровень цитогенетических повреждений был исследован у трех видов – *Achyrophorus maculatus* L., *Plantago lanceolata* L. и *Plantago media* L., произрастающих на территории ВУРС (Абрамов и др., 2010). Определяли радиоустойчивость растений с загрязненных и контрольных участков. Установлен повышенный уровень мутагенеза в популяциях растений, произрастающих на радиоактивно загрязненных участках, по сравнению с контрольными популяциями. Дополнительное острое γ -облучение семян показало повышенную радиоустойчивость растений с загрязненных территорий.

Генетическая эффективность хронического облучения в пересчете на 1 Гр у *Centaurea scabiosa* L. при дозе 0,4 Гр была в 3,9 раза больше, чем при дозе 8,5 Гр, у сосны обыкновенной при дозе 0,2 Гр в 2,7 раза больше, чем при дозе 1,6 Гр. На загрязненной в результате аварии на ЧАЭС территории генетическая эффективность при дозе 0,4 Гр была в 16,6 раза больше, чем при дозе 36 Гр (Кальченко, 1998).

Изучена изменчивость восьми ферментных систем в ценопопуляциях триплоидного апомикта одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* s.l.), длительное время произрастающих в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа. В условиях хронического облучения у растений наблюдалось увеличение фенотипического разнообразия большинства ферментных систем. Предполагается,

что в ценопопуляциях растений из зоны радионуклидного загрязнения более интенсивно идут рекомбинационные процессы в геноме. Большое разнообразие ферментов служит материалом для естественного отбора, и повышает адаптивный потенциал ценопопуляций (Ульянова и др., 2004).

У сосен весной 1958 г начали проявляться лучевые эффекты, кончики хвои пожелтели, а потом начали засыхать. Почки облученных побегов не дали побегов, а образовавшиеся побеги были короче и толще. К осени 1959 г на участках с плотностью загрязнения более 180 Ки/км² сосны погибли.

Больше всего пострадали многолетние травянистые растения, у которых почки оказались расположенными недалеко от поверхности почвы. На участках с загрязнением почвы более 1500 Ки/км² эти растения исчезли. Их место заняли растения, у которых почки были погружены в почву.

При уровнях загрязнения почвы 1 тыс. Ки/км² растения не погибли, но семена многих видов потеряли всхожесть. У растений в течение 2–3 лет отмечались морфозы: гигантизм, посинение и скручивание листьев, уменьшение числа зерен в колосьях (Ларин, 2001).

В головной части ВУРСа запас ⁹⁰Sr в почвах составляет 6700–15000 кБк/м², а ¹³⁷Cs - 200–400 кБк/м². В этой зоне коэффициенты накопления у разных видов травянистых растений ниже, чем на других участках. Дозы облучения материнских растений были рассчитаны с использованием ERICA Tool. Мощность поглощенной дозы для подорожника в зоне ВУРС варьировала в диапазоне 19–157 мкГр/час, что в 178–1455 раз выше фоновых значений. Эти уровни хронического облучения не вызывали значительного снижения выживаемости семенного потомства *P. major*, скорость роста корней и листьев снизилась только у проростков из наиболее загрязненной ценопопуляции. В хронически облучаемых ценопопуляциях отмечено увеличение мутабельности потомства. Для них характерна также нестабильность в ответ на дополнительное облучение по большинству изученных признаков. Во всех изученных ценопопуляциях подорожника отмечен высокий уровень инбридинга. Для импактной ценопопуляции подорожника характерна также низкая изменчивость ферментных локусов. Вероятно это связано с жестким

отбором в пользу организмов, приспособленность которых к комплексу условий выше (Позолотина и др., 2005). Оценено состояние прооксидантных и антиоксидантных систем семенного потомства *P. major* из ценопопуляций ВУРС. При одинаковых концентрациях антиоксидантных ферментов (SOD, CAT и POX) средняя скорость накопления вторичных продуктов перекисного окисления липидов (MDA) в образцах из импактных популяций была в 3,3 раза выше, чем в фоновых образцах (Шималина и др., 2018).

У всех изученных видов (одуванчика, подорожника, костреца, дремы и щавеля) отмечено увеличение генетического груза в популяциях из зоны ВУРСа, что проявляется в повышенной частоте встречаемости морфологических аномалий и некроза корней проростков (Позолотина и др., 2009).

Изучено (Позолотина и др., 2010) семенное потомство звездчатки злаковой, произрастающей в зоне ВУРС и на фоновых территориях. Дозовые нагрузки на растения в зоне ВУРСа на 3 порядка величин были выше фоновых значений. Установлена высокая межгодовая изменчивость жизнеспособности семян и их устойчивости к дополнительному острому облучению, причем не выявлено определенной связи показателей с уровнем радиоактивного загрязнения мест обитания. Существенным источником вариабельности жизнеспособности семенного потомства являются погодные условия, но значимое влияние температуры и осадков выявлено только для ценопопуляций ВУРСа. Установлено, что доля проростков с морфозами в выборках ВУРСа повышена, выявлению скрытых нарушений способствовало дополнительное облучение. Показана отрицательная корреляция между выживаемостью проростков и содержанием в них низкомолекулярных антиоксидантов на всех участках. Впервые исследована аллозимная структура ценопопуляций звездчатки. Отмечен направленный сдвиг частот аллелей по локусам *Pgi-2* и *Fdh* в выборках ВУРСа.

В ходе многолетних исследований семенного потомства костреца безостого (*Bromus inermis* Leys.) с пробных площадок, расположенных вдоль градиента радиоактивного загрязнения ВУРС, где дозовые нагрузки на материнские растения и зародыши семян из хронически облучаемых ценопопуляций превышали

контрольные значения от 2 до 107 раз, обнаружены межгодовые и индивидуальные различия в жизнеспособности, изменчивости и радиочувствительности семенного потомства. На фоне значительных межпопуляционных изменений в тестовых параметрах в зоне ВУРС погодные условия, по-видимому, не оказывают существенного влияния на качество семян, хотя такие эффекты заметны в фоновых ценопопуляциях. Была показана положительная корреляция между исходной жизнеспособностью семенного потомства и их радиорезистентностью. Хроническое облучение в широком диапазоне доз вызывает увеличение частоты различных мутаций и морфологических модификаций. Содержание низкомолекулярных антиоксидантов в проростках импактных ценопопуляций оказалось выше, чем у фоновых. Полученные результаты характеризуют потенциал приобретенных в ходе эволюции защитных и восстановительных механизмов, которые позволяют растениям выживать в изменяющейся среде в условиях техногенного стресса (Антонова и др., 2014).

Сформировавшийся в результате аварии на ПО «Маяк» Восточно-Уральский радиоактивный след более 60 лет является уникальным полигоном для изучения биологических последствий крупномасштабного радиоактивного загрязнения. В целом, исследования в зоне ВУРС позволили выявить основные закономерности адаптивных реакций в популяциях растений и животных, населяющих загрязненные радионуклидами территории.

1.2.3 Радиобиологические эффекты в популяциях растений, произрастающих на территории СИП

На Семипалатинском испытательном полигоне (СИП), площадь которого более 18 тыс. км², с 1949 года было проведено 456 испытаний ядерного оружия (Назарбаев и др., 2016), что привело к формированию на его территории многочисленных участков с повышенным радиационным фоном (Актуальные вопросы радиоэкологии., 2011; Актуальные вопросы радиоэкологии..., 2013).

Цитогенетические исследования растений с территории СИП проводились на площадках «Опытное поле» и «Балапан», на берегу р. Шаган, в горном массиве «Дегелен» (Geras'kin et al., 2011; Минкенова и др., 2007; Сейсебаев и др., 2004;

Минкенова и др., 2013). Частота aberrаций хромосом в клетках колеоптиле тонконога тонкого в эпицентре «Опытного поля» при поглощенной дозе 265 мГр/год превышала контрольный уровень почти в 6,5 раз (Geras'kin et al., 2011).

На опытном участке «Балапан» частота aberrантных клеток у житняка гребенчатого (*Agropyron cristatum* L.) составляла 4,7%, при этом МЭД достигала 23 мкЗв/ч, плотность потока бета-частиц составила 775 част/(мин × см²). Удельная активность радионуклида ¹³⁷Cs в растениях составляла 0,04 кБк/кг, ⁹⁰Sr-0,77 кБк/кг. На контрольном участке частота aberrантных клеток составила 2,2% при МЭД-0,10 мкЗв/ч и плотность потока бета-частиц <10 част/(мин × см²). Удельная активность радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в растениях не превысила нижний предел измерения при используемом аппаратурно-методическом обеспечении (<0,003 кБк/кг) (Минкенова и др., 2007).

На опытном участке «Дегелен» при МЭД 6,0 мкЗв/ч частота aberrантных клеток у волоснеца узкого (*Leymus angustus* L.) была равна 2,9%, у люцерны серповидной (*Medicago falcata* L.) - 1,3%. На контрольном участке при МЭД 0,15 мкЗв/ч частота aberrантных клеток у волоснеца узкого составила 0,3%, у люцерны серповидной 0,7% (Сейсебаев и др., 2004).

В районе реки Шаган при мощности поглощенной дозы $6,3 \times 10^{-14}$ мГр/с, частота aberrантных клеток у волоснеца узкого составляла 1,3%. У чия блестящего (*Achnatherum splendens*) при мощности поглощенной дозы $6,0 \times 10^{-14}$ мГр/с частота aberrантных клеток равна 2,0%. На контрольном участке у волоснеца узкого при мощности поглощенной дозы $6,3 \times 10^{-16}$ мГр/с, частота aberrантных клеток была равна 0,7%. У чия блестящего при мощности поглощенной дозы $9,4 \times 10^{-16}$ мГр/с, частота aberrантных клеток составляла 0,5% (Минкенова и др., 2013).

Наибольшая частота мутаций была обнаружена у ковыля сарепского (*Stipa sareptana*): частота анафазных клеток с aberrациями хромосом на загрязненных радионуклидами участках СИП составляла 6,51%–8,02%, тогда как в контрольном варианте она была равна 1,20% (Генетические последствия радиоактивного..., 2010).

На площадках «Опытное поле» и «Балапан» у *Agropyron cristatum* и *Festuca valesiaca* частота абберантных клеток при сильном радиоактивном загрязнении территорий составляла соответственно $6,00 \pm 1,05\%$ и $5,62 \pm 1,20\%$, а при среднем уровне загрязнения равнялась соответственно $3,94 \pm 0,92\%$ и $4,15 \pm 0,85\%$ (Кадырова и др., 2019).

Степень и структуру генетического разнообразия популяций растений территорий Казахстана, прилегающих к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону, изучали с использованием RAPD (Random Amplified Polymorphic DNA). Были проанализированы ДНК трех многолетних видов: *Stipa capillata*, *Hordeum bogdanii* и *Agropyron pectinatum*, образцы которых были собраны в сильно, умеренно и слабо загрязненных зонах. Обнаружен значительно более высокий уровень генетической изменчивости растений, собранных на наиболее загрязненном участке, по сравнению с умеренно и слабо загрязненными участками для *A. pectinatum* и *H. bogdanii*. Вариация была в пять раз выше у чувствительного *H. bogdanii* и в два раза выше в популяциях *A. pectinatum*. *H. bogdanii*, по-видимому, очень чувствителен к облучению и является хорошим индикаторным видом для картирования радиоактивного загрязнения на ядерных полигонах или при радиационных авариях (Turuspekov et al., 2002).

Семена *Stipa capillata* собирали на контрольном и загрязненном участке СИП. Показано, что хроническое облучение на протяжении почти полувека привело к естественному отбору наиболее адаптированных генотипов, характеризующихся эффективной работой антиоксидантных ферментов, особенно СОД и ГбФДГ (Zaka et al., 2002). Отсутствие кислых изоформ эстеразы можно использовать в качестве маркерного показателя при исследовании действия радионуклидного загрязнения на растения житняка. Для тонконога, наоборот, наличие нейтральных и кислых форм эстеразы является показателем радионуклидного загрязнения (Кадырова и др., 2012).

При бета-излучении $145 \text{ част}/(\text{мин} \times \text{см}^2)$, гамма-излучении $1,46 \text{ мкЗв/ч}$ на площадке «Балапан» и при бета-излучении $200 \text{ част}/(\text{мин} \times \text{см}^2)$, гамма-излучении $0,76 \text{ мкЗв/ч}$ (скважина 1301) у спиреи зверобоелистной (*Spirea ehypericifolia* L.),

происходят изменения анатомической структуры (Айдосова и др., 2004). Исследованы фитоценозы в 8 км от площадки «Дегелен», где гамма-излучение составило 0,44 мкЗв/ч, альфа-активность в почве составила 770 Бк/кг, бета-активность 2050 Бк/кг. У некоторых многолетних видов растений были обнаружены анатомические изменения в стебле и листьях (Дурмекбаева и др., 2000).

Из-за высокого радиационного фона на территории СИП, в древесине у сосен аномалии выражены в виде нарушения порядка расположения трахеидов и образованием двух-трех порядков луча, которые не свойственны к соснам (Коровин, Чилимов, 1996).

Также, на территории СИП, были обнаружены карликовые формы растений (Байганов, 1999).

В обзорной работе (Мозолин и др., 2008) авторы систематизировали радиобиологические исследования растений и животных СИП. Для выявления биологических эффектов авторы советуют проведение комплексных исследований, включающих как определение широкого спектра радионуклидов и химических элементов (в растениях, в почве и в организме), мощности поглощенной дозы хронического облучения, так и биологических показателей растений и животных.

В исследовании (Минкенова и др., 2017) было показано, что частота цитогенетических эффектов в популяциях тонконога тонкого отобранных в 38 экспериментальных точках площадки «4А», статистически значимо превышала контрольный уровень, однако имевшихся данных было недостаточно для оценки формы дозовой зависимости.

В работе (Янкаускас и др., 2016) было исследовано влияние радионуклидного загрязнения на морфо-анатомические показатели тонконога (*Koeleria cristata*), произрастающего в условиях площадки, где проходили испытания боевых радиоактивных веществ, при увеличении суммарной мощности дозы от 0,02 до 270 мГр/сутки изменений в анатомическом строении стебля не наблюдалось.

Радиобиологические исследования на территориях, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, на Восточно-Уральском радиоактивном следе и на

Семипалатинском испытательном полигоне, позволили получить уникальные данные об отдаленных последствиях хронического радиационного воздействия на биоту на разных уровнях организации — от клеточного до экосистемного. В населяющих эти зоны популяциях растений обнаружены схожие радиационно-индуцированные эффекты хронического облучения. Проведены комплексные многолетние радиобиологические исследования, оценены дозовые нагрузки на некоторые виды растений. Представлены результаты многолетних исследований жизнеспособности, мутабельности, обнаружены повышенная частота мутаций, морфологических аномалий, активности антиоксидантных ферментов и адаптивные изменения растений. На радиоактивно загрязненных территориях образовались уникальные экосистемы, которые развиваются в условиях хронического облучения. Радиоэкологические последствия крупных радиационных аварий и испытаний ядерного оружия до сих пор остаются предметом острых дискуссий в научной литературе.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Характеристика места проведения исследования

Работа выполнена на базе филиала «Института радиационной безопасности и экологии» РГП «Национального ядерного центра Республики Казахстан» (ИРБЭ НЯЦ РК).

На площадках «4» и «4А» СИП ($S=63 \text{ км}^2$), где в период с 1953 по 1957 годы были проведены испытания радиологического оружия, снаряженного боевыми радиоактивными веществами, основой которого являются радиоактивные вещества в виде жидких и порошкообразных рецептур (Логачев, 2002). Обе площадки прилегают к северо-западной части «Опытного поля» СИП (Рисунок 1).

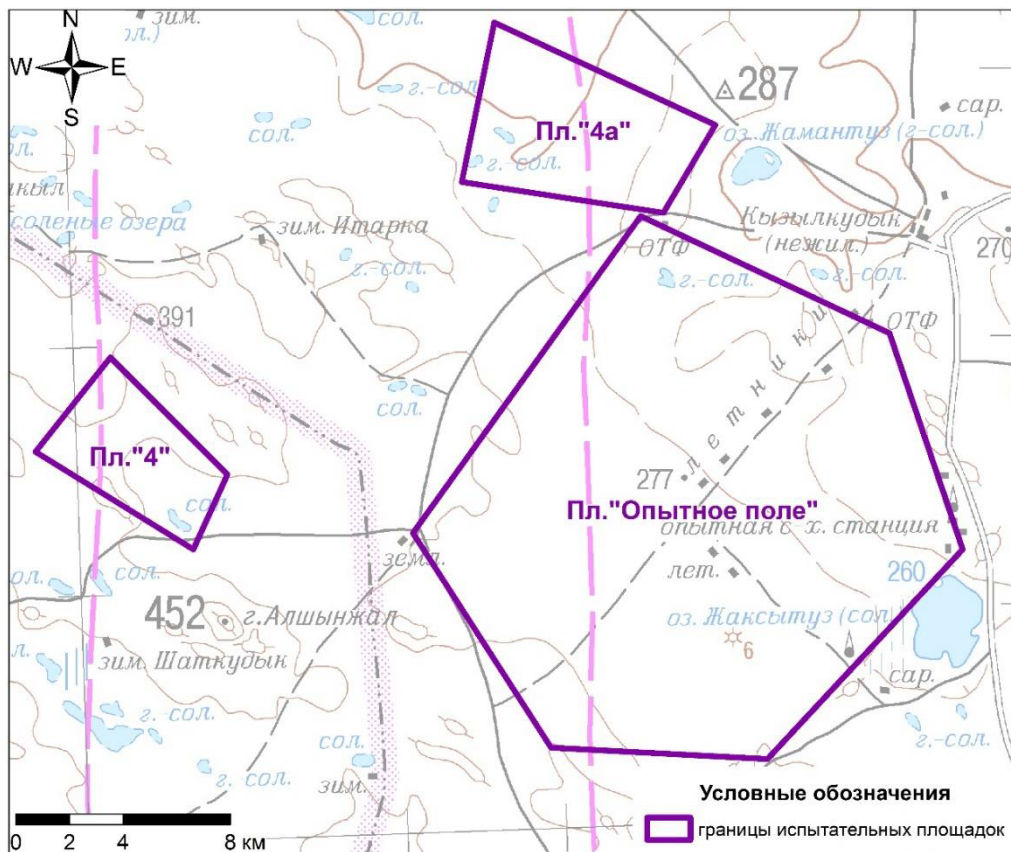


Рисунок 1 – Расположение площадок «4» и «4А», где проводили испытания БРВ

Испытания включали рассеяние БРВ путем подрыва отдельных снарядов, бомбардировки участков минометными снарядами, сброса бомб или распыления БРВ с самолетов. БРВ помещали в свинцовые контейнеры, доставляли на СИП, перемещали в специальные емкости, затем эти емкости подрывали. При

использовании самолетов бомбы заполняли жидкими БРВ и сбрасывали на определенные участки с мишенями. В виду осознания бесперспективности БРВ к концу 1950-х годов подобные испытания в СССР были прекращены, так как происходило радиоактивное загрязнение военной техники и переоблучение персонала при низкой эффективности поражения. Жидкая рецептура по химическим свойствам оказалась очень агрессивной. Устойчивым к ней были только емкости из нержавеющей стали.

В связи со сложностью дезактивации все оборудование (емкости, трубопроводы, насосы и др.), которое было задействовано при испытаниях БРВ захоронены под 5-метровым слоем грунта (Давыдов, 1997). Места захоронения неизвестны.

На территории площадки имеются траншеи, металлические фрагменты испытанного вооружения (остатки мин, авиабомб и т.д.), фортификационные сооружения и воронки. В большинстве случаев металлические обломки характеризовались высоким уровнем поверхностного радиоактивного загрязнения, что позволило сделать вывод об их принадлежности к испытываемым носителям БРВ.

На сегодняшний день на территории данных площадок были проведены радиологические обследования загрязненных территорий: аэрогаммасъемка в декабре 1956 (Характеристика радиационной обстановки., 1960; Птицкая и др., 1998); аэрогаммаспектрометрическая съемка в 1990–1991 гг. (Жариков, 2000); пешеходная альфа-, бета-, гамма-съемка в 2004 г. (Радиологическая характеристика площадок..., 2005), бета-, гамма-съемка выявленных ранее наиболее загрязненных участков в 2006 и 2011 гг. (Исследование полигона..., 2007; Республиканская бюджетная программа..., 2011).

Исследования 1956 и 1990–1991 гг. показали, что основное загрязнение почвы формируют ^{137}Cs и ^{90}Sr . Аэрогаммаспектрометрическая съемка местности, выполненная в 1990–1991 гг., не зафиксировала превышения плотностей загрязнения ^{137}Cs окружающей среды в этой части полигона (Комплексные исследования сейсмической..., 1992; Современное радиоэкологическое состояние..,

2002). Проведенные ИРБЭ НЯЦ РК современные исследования, позволили получить картину характера распределения радиационных параметров в пределах испытательных площадок «4» и «4А» и обнаружили, что основное загрязнение почвы формирует техногенный бета-излучающий радионуклид ^{90}Sr .

В результате проведения испытаний БРВ сформировались локальные зоны радиоактивного загрязнения, в основном в пределах испытательных площадок. Были вычислены площади пятен, ограниченные изолинией 5×10^4 – 10^5 Бк/кг (МЗУА ^{90}Sr составляет 10^5 Бк/кг). Площади, имеющие уровень загрязнения ^{90}Sr свыше 5×10^4 Бк/кг, на площадке 4 отсутствуют. Ранее на площадке «4» обнаружено 5 участков радиоактивного загрязнения, однако на сегодняшний день обнаружены еще 9 новых участков радиоактивного загрязнения (Скрипников и др., 2020). В пределах площадки «4А» выделены пятна поверхностного загрязнения ^{90}Sr с удельной активностью более 5×10^4 Бк/кг, площадь которых находится в диапазоне 0,1–3,2 га. Общая площадь участков составляет более 23 га. (Осинцев, Нефедов, 2015). Более загрязненной является площадка «4А». На момент обследования на ее территории обнаружено более 30 локальных пятен радиоактивного загрязнения, которые по взаимному расположению были объединены в 25 участков (Рисунок 2).

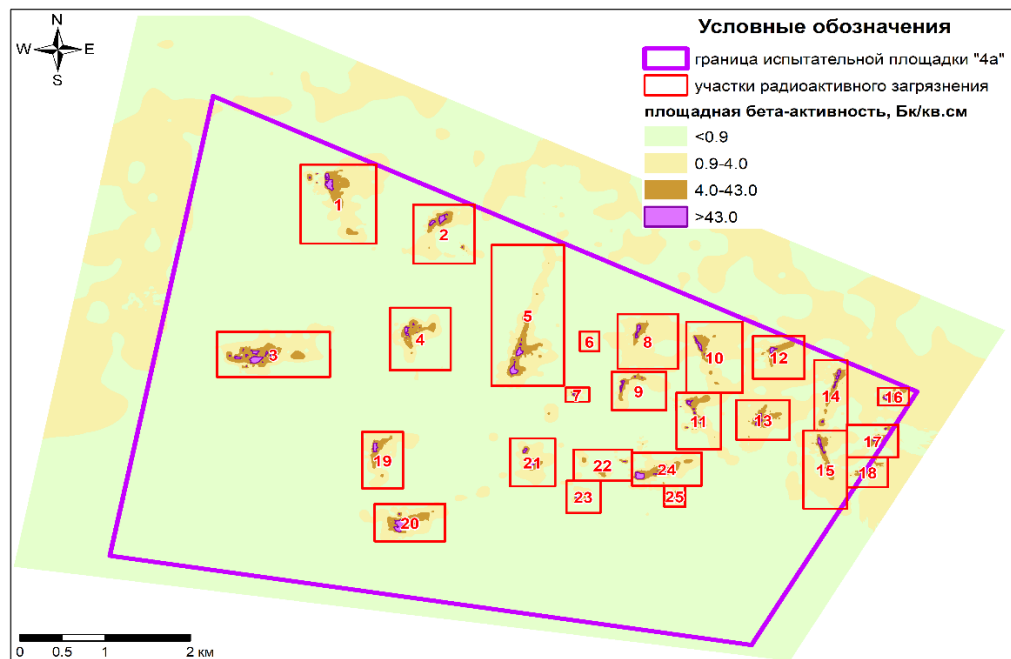


Рисунок 2 – Карта-схема площадки «4А» СИП (цифрами обозначены номера участков)

Максимальные значения удельной активности в почве ряда искусственных радионуклидов показаны в таблице 1. Максимальное содержание радионуклида ^{90}Sr в пробах растений составляет 4×10^7 Бк/кг (Лукашенко и др., 2010).

Таблица 1 – Удельная активность радионуклидов в почвенном покрове в районе локальных участков радиоактивного загрязнения площадки «4А»

Вид пробы	Удельная активность, Бк/кг							
	^{241}Am	^{137}Cs	^{60}Co	^{152}Eu	^{154}Eu	^{155}Eu	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
почва	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^8$	$n \cdot 10^4$

Удельная активность ^{137}Cs в почве варьирует в пределах от <1 до 3×10^5 Бк/кг; ^{90}Sr – от <2 до $5,8 \times 10^8$ Бк/кг; $^{239+240}\text{Pu}$ – от <1 до $1,6 \times 10^4$ Бк/кг; ^{241}Am – от $<0,3$ до $5,9 \times 10^3$ Бк/кг; ^{60}Co – $0,58$ – $1,9 \times 10^2$ Бк/кг; ^{154}Eu – $6,6$ – $3,6 \times 10^3$ Бк/кг; ^{155}Eu – 27 – $1,4 \times 10^3$ Бк/кг; ^{152}Eu – $8,5$ – $1,3 \times 10^2$ Бк/кг. Из результатов анализа видно, что основным загрязнителем почвенного покрова является ^{90}Sr (Оптимизация исследований территорий..., 2015).

Радионуклид ^{90}Sr , вносящий основной вклад в радиоактивное загрязнение площадки, находится в почве в основном в обменной форме, при этом значительная его доля находится в водорастворимой форме (Кундузбаева и др., 2013). Значение коэффициента накопления ^{90}Sr в большинстве случаев превышает единицу (Ларионова, 2013).

С целью исключения проникновения домашнего скота и предотвращения непреднамеренного доступа местного населения на территорию площадок «4» и «4А», ввиду их радиационной опасности, была установлена физическая защита с использованием предупреждающих знаков радиационной опасности.

Территория площадки «4А» СИП по ботанико-географическому районированию относится к подзоне сухих типчаково-ковыльных степей и входит в состав Восточно-Казахстанского мелкосопочника. Климат континентальный и засушливый с низкой нормой осадков 250 – 300 мм/год (Карамышева, Рачковская, 1973).

Пространственное распределение растительного покрова участка «4А», как и везде на территории Семипалатинского испытательного полигона, связано с климатом, рельефом, геоморфологическими, литологическими, почвенными условиями и условиями влагообеспеченности (Султанова, 1998).

На территории СИП почвы светло-каштановые с локальными пятнами солонцов и солончаков. Почвы щелочные, с низким содержанием органического вещества. Способность к обмену катионов довольно низкая, однако содержание обменного кальция находится в типичном для многих типов почв диапазоне (Howard et al., 2004).

Флористическое разнообразие растительного покрова площадки «4А» составляют 104 вида сосудистых растений из 22 семейств, из них 53 вида относятся к степному флороцено типу, 15 видов — к луговому флороцено типу, 13 видов — к пустынному флороцено типу и 23 вида — к синантропному (сорному) флороцено типу (О научно-технической деятельности..., 2012).

Исследуемый участок представлен полынно-злаковым сообществом доминантный вид — полынь Маршала (*Artemisia marschalliana* Spreng.), кодоминантные виды - тонконог тонкий (*Koeleria gracilis* Pers.) и ломкоколосник ситниковый (*Psathyrostachys juncea* Nevski.), ковыль волосовидный (*Stipa capillata* L.), солонечник татарский (*Galatella tatarica* Less.), подмаренник настоящий (*Galium verum* L.). Изредка встречаются овсяница валлиская (*Festuca valesiaca* Gaudin.), житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum* (L) Geartn.). Единично встречаются карагана низкорослая (*Caragana pumila* Pojark.) и таволга зверобоелистная (*Spireae hypericifolia* L.), пятнами осока омская (*Carex omskiana* Meinsh.).

2.2 Объекты исследования

Фитоценотическая диверсификация растительного покрова площадки «4А» представлена преимущественно степным типом, включающим фрагменты лугового и пустынного типов, и значительным объемом антропогенно-

обусловленного сорного фрагмента.

В качестве объекта исследования были выбраны степные многолетние дикорастущие злаки — тонконог тонкий (*Koeleria gracilis* Pers.) и ковыль волосовидный (*Stipa capillata* L.) (Рисунок 3). Оба растения относятся к семейству злаковых. Все исследуемые участки имеют в своей структуре несколько общих представителей: на уровне жизненных форм — многолетник, в составе экотипов — ксерофит, среди экоценотивов — степной, по типу подземных органов: плотно дерновинный.

Эти растения присутствуют на всех исследуемых участках, широко распространены на территории СИП, что позволяет исследовать их ответные реакции в широком диапазоне уровней радиоактивного загрязнения.

Тонконог тонкий — плотнодерновинное растение с голыми или под соцветием опушенными стеблями 10–60 см высотой (Рисунок 3, а). Листья вегетативных побегов короткие, узкие (0,5–1,5 мм), плоские или свернутые вдоль, волосистые, реже голые; влагалища отмерших листьев цельные. Колоски 3–5 мм длиной, 2–3 цветковые, зеленоватые или слегка фиолетовые. Колосковые чешуи голые. Нижние цветковые чешуи голые или покрыты короткими шипиковидными волосками (Пешкова и др., 1990; Цвелев, 1976).



а)



б)

Рисунок 3 – Объекты исследований тонконог тонкий (а) и ковыль
волосовидный (б)

Ковыль волосовидный — плотнодерновинное растение со стеблями 40–80 см высотой (Рисунок 3, б). Листья длинные, щетиновидные, снаружи шероховатые от очень коротких бугорковидных и довольно густых шипиков, внутри усажены короткими волосками и двумя рядами длинных волосков, расположенных вдоль краевых жилок. Язычки у верхних стеблевых листьев до 15 мм длиной. Метелки 10–25 см длиной. Нижние цветковые чешуи 10–12 мм длиной, под остью совершенно голые, без коронки волосков. Ость 10–12 мм длиной, шероховатая (Пешкова и др., 1990; Цвелев, 1976).

2.3 Полевые работы и отбор проб растений

Полевые работы проведены в период созревания семян исследуемых видов растений в конце июля и в начале августа 2013–2017 гг. Экспериментальные участки № 13, № 18 и № 20 (Рисунок 2) были выбраны как наиболее загрязненные участки площадки «4А» (Осинцев, Сальменбаев, 2013).

Для определения координат применяли спутниковый навигационный прибор (GPS-приемник) «Garmin». Подготовку прибора к работе проводили в соответствии с инструкциями по эксплуатации (Руководство по эксплуатации..., 1999).

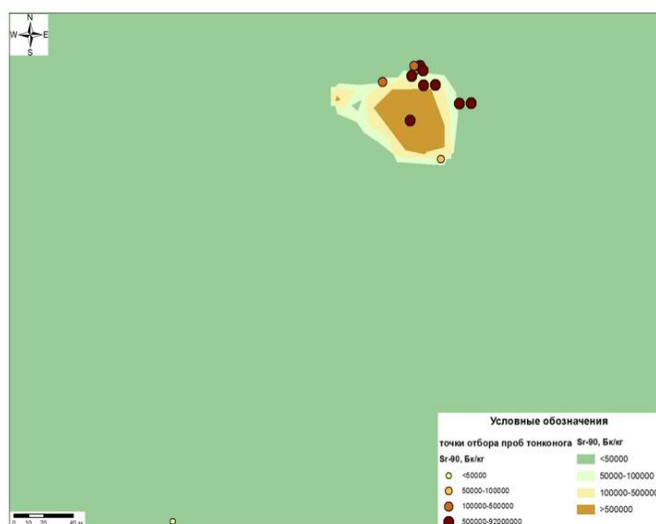
Перед отбором проб растений выполнена полевая радиометрия. Экспериментальные точки для исследований выбирали на основании данных о распределении плотности потока β -частиц и мощности эквивалентной дозы (МЭД) по β - и γ -излучению на поверхности почвы, которые измеряли дозиметром-радиометром МКС-АТ6130 (ОАО МНИПИ, Беларусь) (Дозиметры радиометры МКС-АТ6130). Всего на площадке «4А» было выбрано три участка (№ 13, № 18 и № 20). Пробы представлены надземной частью растений. В пределах трех участков отобраны пробы растений в 163 экспериментальных точках. Оценка цитогенетических эффектов в популяциях тонконога выполнена на 100

экспериментальных точках, а ковыля на 63 экспериментальных точках площадки «4А» Семипалатинского испытательного полигона, не отличающихся по почвенным характеристикам и загрязнению тяжелыми металлами, но контрастных по уровню радиоактивного загрязнения.

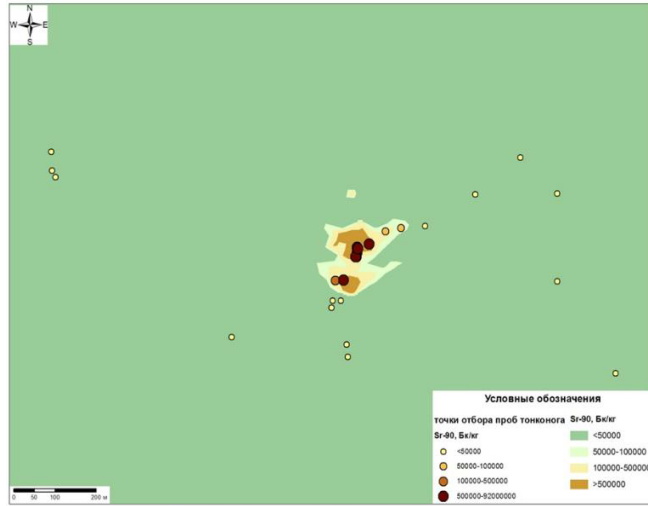
Схемы расположения точек отбора проб растений на трех участках для тонконога тонкого и двух участков для ковыля волосовидного площадки «4А» СИП представлены на рисунках 4 и 5.



а) участок № 13



б) участок № 18



в) участок № 20

Рисунок 4 – Схема расположения точек отбора проб тонконога на трех (а, б, в) участках площадки «4А»



а) участок № 13



Рисунок 5 – Схема расположения точек отбора проб ковыля на двух (а, б) участках площадки «4А»

Обследование радиационной обстановки на загрязненной территории проводили согласно установленным инструкциям и методике (Инструкция по наземному..., 1992). Плотность потока β -частиц и МЭД по β - и γ -излучению в местах отбора проб тонконога тонкого изменялись в пределах $<10 - >10000$ част/(мин \times см²) и 0,06–75 мкЗв/ч, соответственно. Плотность потока β -частиц и МЭД по β - и γ -излучению в местах отбора проб ковыля волосовидного изменялись в пределах $<10 - >10000$ част/(мин \times см²) и 0,04–46 мкЗв/ч, соответственно (Таблица 2, Таблица 3).

Таблица 2 – Плотность потока β -частиц и МЭД в местах отбора проб тонконога тонкого

№	β , част/(мин \times см ²)	γ , мкЗв/ч	№	β , част/(мин \times см ²)	γ , мкЗв/ч	№	β , част/(мин \times см ²)	γ , мкЗв/ч
1	<10	0,06	35	150	1,0	69	4200	6
2	<10	0,06	36	150	0,4	70	4500	5
3	<10	0,08	37	150	0,3	71	4500	5
4	<10	0,1	38	150	0,5	72	5000	10
5	<10	0,1	39	150	0,3	73	5000	3
6	<10	0,1	40	200	0,4	74	5000	15
7	<10	0,1	41	200	0,4	75	5000	14
8	14	0,1	42	200	0,3	76	5000	6
9	15	0,1	43	200	0,3	77	7000	14
10	15	0,1	44	250	0,3	78	8700	14
11	16	0,1	45	250	0,3	79	>10000	5
12	16	0,08	46	280	0,15	80	>10000	13
13	16	0,08	47	320	0,6	81	>10000	23
14	16	0,08	48	350	0,5	82	>10000	24
15	16	0,08	49	400	0,7	83	>10000	23
16	16	0,08	50	400	0,7	84	>10000	38
17	16	0,08	51	400	0,6	85	>10000	45
18	50	0,25	52	400	0,7	86	>10000	37
19	50	0,25	53	440	0,8	87	>10000	42
20	50	0,3	54	500	0,8	88	>10000	40
21	50	0,3	55	500	0,8	89	>10000	58
22	50	0,3	56	550	0,6	90	>10000	60
23	50	0,2	57	1100	1,5	91	>10000	60
24	60	0,2	58	1200	2,0	92	>10000	20
25	60	0,3	59	2000	1,2	93	>10000	26
26	60	0,2	60	2100	3,0	94	>10000	64

27	70	0,2	61	2200	4,0	95	>10000	30
28	70	0,2	62	2500	4,0	96	>10000	40
29	70	0,2	63	2500	4,0	97	>10000	75
30	90	0,3	64	2500	4,0	98	>10000	21
31	90	0,3	65	2500	4,0	99	>10000	27
32	100	0,2	66	2500	3,5	100	>10000	12
33	100	0,4	67	2500	3,5			
34	130	0,3	68	4000	4,0			

Таблица 3 – Плотность потока β -частиц и МЭД в местах отбора проб ковыля волосовидного

№	β , част/(мин \times см ²)	γ , МКЗВ/ч	№	β , част/(мин \times см ²)	γ , МКЗВ/ч	№	β , част/(мин \times см ²)	γ , МКЗВ/ч
1	<10	0,04	22	100	0,3	43	2000	1,5
2	<10	0,04	23	100	0,3	44	2000	1,5
3	<10	0,04	24	100	0,3	45	4150	7,0
4	<10	0,04	25	100	0,3	46	6000	7,0
5	<10	0,04	26	100	0,3	47	6000	7,0
6	<10	0,04	27	100	0,3	48	6000	7,0
7	<10	0,04	28	500	0,5	49	6000	7,0
8	<10	0,14	29	500	0,5	50	8000	13
9	40	0,2	30	500	0,5	51	8000	13
10	40	0,2	31	500	0,5	52	8000	13
11	40	0,2	32	500	0,5	53	8000	13
12	40	0,2	33	500	0,5	54	8000	13
13	40	0,2	34	500	0,5	55	>10000	46
14	40	0,2	35	500	0,5	56	>10000	46
15	40	0,2	36	1000	1,5	57	>10000	46
16	40	0,2	37	1000	1,5	58	>10000	46
17	40	0,2	38	1000	1,5	59	>10000	46
18	100	0,3	39	1200	1,5	60	>10000	46
19	100	0,3	40	1200	1,5	61	>10000	46
20	100	0,3	41	2000	1,5	62	>10000	21
21	100	0,3	42	2000	1,5	63	>10000	38

В каждой точке отбирали надземную часть растений для определения содержания тяжелых металлов (ТМ) и радионуклидов, а также семена для цитогенетического анализа. Для проведение цитогенетического анализа ножницами срезались созревшие семена в количестве 100-200 г. Растения были отобраны на следующие виды анализов: радионуклидный, элементный и цитогенетический. Растения отбирали с площади 1–2 м² в зависимости от плотности произрастания. В местах, где плотность потока β -частиц была от 10 до 4000 част/(мин \times см²) расстояние между точками отбора проб растений составляло

100–800 метров. Поскольку площади с высоким уровнями загрязнения малы, в местах, где плотность потока β -частиц была выше 4000 част/(мин \times см²), расстояние между точками отбора проб растений составляло 5–20 метров.

Сразу после отбора пробы растений помещали в полиэтиленовые пакеты и снабжали паспортом (ГОСТ 27262-87).

2.4 Аналитические работы

2.4.1 Определение содержания радионуклидов в растениях

Пробы растений взвешивали, промывали и ополаскивали дистиллированной водой, сушили при температуре 100 °С, измельчали и перемалывали до состояния травяной муки. Согласно рекомендациям (Иванова и др., 2015; Larionova et al., 2018). температура озоления проб растений для определения ¹³⁷Cs составляла 400 °С, ⁹⁰Sr - 550 °С, ²⁴¹Am - 650 °С. Чашки с золой охлаждали в эксикаторе. Готовую золу просеивали через сито для удаления незольного остатка. Остывший зольный остаток взвешивали и определяли коэффициент озоления.

Подготовку проб проводили согласно методическим указаниям по методам контроля (Методика определения содержания..., 2016), инструктивно-методическим указаниям по работе санитарно-эпидемиологических станций в области радиационной гигиены (Инструктивно-методические указания..., 1960).

Определение удельной активности радионуклидов (¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ⁹⁰Sr, ⁴⁰K, ²³²Th, ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu, ¹⁵⁵Eu, ²³⁵U, ²³⁸U, ²¹⁴Pb) в растениях проводили в предварительно вымытых сухих и измельченных образцах в соответствии со стандартными методическими указаниями на поверенной лабораторной аппаратуре.

Удельную активность гамма-излучающих радионуклидов определяли на γ -спектрометре Canberra GX (США) с полупроводниковым германиевым детектором (BE 2020), предел обнаружения 0,7–20 Бк/кг. Измерения проводили в соответствии с методикой выполнения измерений на γ -спектрометре (МИ 2143-91 РК Активность радионуклидов..., 1991). Погрешность измерений для γ -излучающих

радионуклидов не превышала 10–20%. Определение ^{90}Sr в пробах растений проводили на β -спектрометре «Прогресс-БГ» (Доза, Россия) (Методика измерения активности..., 2004).

Предел обнаружения составил 100 Бк/кг. Погрешность измерений в основном не превышала 15–25%. Для калибровки спектрометров по энергии и эффективности использовали сертифицированные калибровочные источники. Образцы растений с высоким содержанием радионуклида ^{90}Sr β -спектрометрии оценивает с высокой точностью. Образцы растений с низким содержанием радионуклида ^{90}Sr (менее 100 Бк/кг) желательно анализировать радиохимическим методом с β -спектрометрическим окончанием в соответствии с аттестованными методическими указаниями (Методика измерения активности..., 2004; Методика выполнения измерений..., 2017).

Однако и в этом случае мы использовали β -спектрометрический метод, поскольку даже при удельной активности ^{90}Sr 500 Бк/кг дозы на растения являются такими маленькими, что никак не влияют на форму исследуемых зависимостей. При удельной активности ^{137}Cs менее 5,6–0,7 Бк/кг в тонконоге тонком (Приложение А, Таблица 14) и при удельной активности ^{137}Cs менее 2,2–0,6 Бк/кг в ковыле волосовидном (Приложение А, Таблица 15), что характерно для проб растений с низкой удельной активностью ^{90}Sr , ^{137}Cs не влияет на результаты оценки удельной активности ^{90}Sr методом β -спектрометрии.

2.4.2 Определение содержания тяжелых металлов в растениях

В растениях определяли содержание ванадия, хрома, марганца, кобальта, меди, цинка, мышьяка, стронция (стабильный), кадмия, цезия (стабильный), свинца, урана (стабильный). Подготовку проб растений проводили методом автоклавного разложения по стандартной методике (Подготовка проб для элементного..., 2018; Manahan, 2013). Определение концентраций тяжелых металлов проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе "Elan 9000" (Perkin Elmer SCIEX, США) в комплекте с компьютером и специализированным программным обеспечением, стандартной распылительной камерой Скотта с поперечно-поточным распылителем и

одноколлекторным двухсегментным детектором ионов (без динамической реакционной ячейки) и оптический атомно-эмиссионный спектрометр iCAP 6300 Duo фирмы Thermo Scientific, оснащенный циклонной распылительной камерой с поперечно-поточным распылителем и CID полупроводниковым детектором, в комплекте с компьютером и специализированным программным обеспечением (Laeter et al., 1991).

2.5 Расчет поглощенной дозы

Поглощенные растениями дозы рассчитывали как сумму доз от α -, β - и γ -излучений ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr , ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu радионуклидов, содержащихся в поверхностном слое почвы и в надземной части растений. Согласно основным допущениям и положениям дозиметрической модели (публикация МКРЗ 136) (ICRP, 2017), оба типа излучения распространяются в однородной воздушно-растительной среде.

Поглощенную дозу внешнего облучения растений определяли по β - и γ -излучениям радионуклидов, находящихся в поверхностном слое почвы. Поглощенную дозу от γ -излучения за вегетационный сезон рассчитывали по формуле:

$$D_{\gamma} = \frac{\text{МЭД} \cdot t}{1,09} \quad (1)$$

где: МЭД – мощность эквивалентной дозы, измеренной на поверхности почвы, мкЗв/ч, t – время от прорастания семян до их созревания, час; 1,09 – пересчетный коэффициент для перехода от МЭД к мощности поглощенной дозы. Время от прорастания семян (начало апреля) до их созревания (конец июля) составляет порядка 120 суток. Соответственно, поглощенную дозу рассчитывали исходя из промежутка времени $t = 2880$ час ($t=120 \times 24=2880$).

Величину поглощенной дозы от внешнего β -излучения радионуклидов, содержащихся на поверхности почвы, рассчитывали описанным в (Cross, 1997) методом. Активность бесконечного слоя почвы толщиной 1 см оценивали по

измеренной плотности потока β -частиц. Плотность воздушно-растительной среды ($1,5 \times 10^{-3} \text{ г/см}^3$) рассчитывали исходя из биомассы растений и их высоты.

Рассматривали распространение бета-излучения от почвы в однородной воздушно-растительной среде (которая состоит из фитомассы растений и окружающего их воздуха) с плотностью $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$. Таким образом, происходит формирование поля внешнего бета-излучения. Поскольку размеры растений очень малы, а свободный пробег бета частиц с такой энергией, как у $Y-90$, в воздухе может исчисляться метрами, предположили, что частицы многократно взаимодействуют с фитомассой и формируют дозу.

Был применен расчет мощности поглощенной дозы внешнего бета-излучения для бесконечно протяженного в продольном направлении полубесконечного источника (почвы) с равномерно распределенной активностью в соответствии с формулами (18)-(21) (Cross, 1997). Была введена поправка на толщину слоя почвы в соответствии с формулой (22).

У Кросса коэффициент поглощения ν выражен в линейных единицах для водной среды с единичной плотностью (1 г/см^3). Поэтому был выполнен расчет ν с учетом распространения в воздушно-растительной среде. Проверка по формулам Левингера и формулам, которые вывел Спирин Е.В. (Переволоцкий и др., 2018) показала хорошую сходимость.

Величину поглощенной дозы от внутреннего облучения растений для i -го радионуклида рассчитывали согласно основной дозиметрической модели:

$$D_i = K_{ДП}^{\text{раст}}_{\text{внутр},i} \cdot C_{\text{раст},i} \quad (2)$$

где $K_{ДП}^{\text{раст}}_{\text{внутр},i}$ – дозовый коэффициент облучения от i -го радионуклида, находящегося в растениях ($\text{мкГр/сут}/(\text{Бк/кг})$); $C_{\text{раст},i}$ – активность i -го радионуклида в растениях, Бк/кг .

Значения дозовых коэффициентов для объекта «дикая трава» взяты из публикации (ICRP, 2017).

Все значения поглощенной дозы (мощности дозы) выражены в мГр/сезон или мкГр/час . В дозиметрической модели использовали концентрации активности

растительности на сырой вес. В методике измерения содержания радионуклидов используют высушенные образцы растений. Разницу определяли путем взвешивания свежесобранных образцов растений до и после высушивания. Оценивали сырой вес, используя соотношения сухого и влажного 1/3. Это значение хорошо согласуется с данными, представленными в работе (Karamullina et al., 2018) для других травянистых растений.

2.6 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 °С в холодильнике.

Воздушно-сухие семена после подготовительных работ раскладывали на влажную фильтровальную бумагу в чашках Петри. Семена проращивали в термостате MIR-253 (Sanyo, Япония) при температуре +24 °С в течение 7±2 сут. Проросшие семена, у которых главный корешок имел длину не менее длины семени, фиксировали в фиксаторе Кларка (смесь 96% этилового спирта и ледяной уксусной кислоты в отношении 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 часов. Окрашенные корешки наносили на предметное стекло, отрезали кончики (2–3 мм), добавляли каплю 45% раствора уксусной кислоты, накрывали покровным стеклом и раздавливали так, чтобы клетки корешка распределились в один слой. Цитогенетический анализ проводили с использованием микроскопа AxioImager M2 (Zeiss, Германия) при увеличении объектива ×100 (масляная иммерсия) и ×60, ×40, ×10 (Паушева, 1980).

Анализировали частоту аберрантных клеток в апикальной меристеме корешков проростков. При анализе учитывали такие цитогенетические аномалии

как хроматидные (одиночные) и хромосомные (двойные) мосты и фрагменты, митотические аномалии (отстающие хромосомы, забегающие хромосомы и многополюсные митозы) (Прохорова и др., 2003).

Процент aberrантных клеток или частоту хромосомных aberrаций (Ч в %) определяли по формуле:

$$\text{Ч}(\%) = \frac{A \times 100}{N} \quad (3)$$

где А – число клеток с нарушениями, N – общее число просмотренных клеток.

Спектр aberrаций (К в %) определяли по формуле:

$$\text{К}(\%) = \frac{D \times 100}{N} \quad (4)$$

где D – число aberrаций определенного типа, N – общее число просмотренных клеток.

Долю aberrаций каждого типа (В в %) от общего числа всех aberrаций устанавливали по формуле:

$$\text{В}(\%) = \frac{D \times 100}{C} \quad (5)$$

где D – число aberrаций определенного типа, C – общее число aberrаций.

2.7 Статистический анализ экспериментальных данных

Полученные в ходе цитогенетического исследования данные о хромосомных нарушениях были обработаны статистически (Лакин, 1990). Из всех клеток корневой меристемы для оценки частоты и спектра aberrаций хромосом учитывали клетки с нормальными ана-телофазами и клетки с нарушениями нормального протекания этих стадий. Различия по частоте встречаемости цитогенетических нарушений в зависимости от поглощенной дозы облучения оценивали методами статистического анализа качественных признаков (Кобзарь, 2006).

Частота цитогенетических нарушений была оценена для каждой точки отбора проб, что позволило построить эмпирическое распределение цитогенетических нарушений в зависимости от мощности дозы. Для сопоставления изменяющихся в широком диапазоне данных (мощность дозы менялась на 5

порядков, а частота аберрантных клеток только на один), применяли логарифмическое преобразование для первого показателя. При расчетах принят критический уровень значимости $p=0,05$.

Для оценки формы зависимости цитогенетических эффектов от мощности дозы использовали кусочно-линейную модель. Принята гипотеза H_0 о предполагаемой точке перегиба (Тп), разделяющей зависимость на два линейных участка, скорость изменения частоты цитогенетических нарушений в пределах которых существенно различается. Статистическую оценку данных, расположенных по разные стороны от точки перегиба (Тп), проводили с использованием двух моделей линейной регрессии (для $X < Tп$ и для $X > Tп$):

$$Y = a + b \cdot X \quad (6)$$

где Y – частота цитогенетических нарушений, %; X – десятичный логарифм мощности поглощенной дозы в растениях, мкГр/вегетационный сезон; a , b – параметры регрессионной модели. Порог существует, если коэффициенты модели (a , b) значимо изменяются в точке перегиба.

Существование точек перегиба подтверждено методами (Swallow, Kianifard, 1996; Senko, 2001), основанными на оценке максимальной разницы в коэффициентах корреляции между группами парных данных, расположенных на противоположной стороне предполагаемой точки перегиба. Таким образом, расположение Тп определяется максимальным значением $C(\log(D))$, рассчитанным по формуле:

$$C(\log(D)) = |r_1| \cdot |r_1 - r_r| \cdot \sqrt{n_1 \cdot n_r} \quad (7)$$

где r_1 – коэффициент корреляции между частотой цитогенетических нарушений и мощностью поглощенной дозы слева от точки перегиба; r_r – коэффициент корреляции между исследуемыми значениями справа от точки перегиба; n_1 и n_r – число наблюдений слева и справа от точки перегиба.

Статистический анализ результатов исследования был проведен с помощью пакетов Excel 2007 и Statistica 6.0 (Лакин, 1990; Кобзарь, 2006). Расчет поглощенных доз и статистический анализ данных были выполнены в лаборатории Математического моделирования и программно-информационного обеспечения

радиоэкологических процессов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (ФГБНУ ВНИИРАЭ).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Удельная активность радионуклидов в растениях

Основной вклад в загрязнение растений вносит ^{90}Sr , удельная активность которого в растениях наименее загрязненных участков ниже предела обнаружения β -спектрометра, в то время как на загрязненных участках, где растет тонконог тонкий, удельная активность достигает значений $4,5 \times 10^2 - 6,3 \times 10^7$ Бк/кг, а на участках, где растет ковыль волосовидный, $7,9 \times 10^2 - 2,6 \times 10^7$ Бк/кг и формирует более 95% β -спектра. В тонконоге, в тех случаях, когда удельная активность превышала минимально детектируемую, она варьировала в пределах:

- естественные радионуклиды: ^{40}K - $14 - 3,3 \times 10^3$ Бк/кг; ^{214}Pb - $1,4 - 2,7 \times 10^2$ Бк/кг; ^{226}Ra - $1,8 - 5,3 \times 10^2$ Бк/кг; ^{232}Th - $3 - 2,5 \times 10^3$ Бк/кг; ^{235}U - $1,1 - 3,6 \times 10^2$ Бк/кг; ^{238}U - $3,0 - 2,5 \times 10^3$ Бк/кг;

- техногенные радионуклиды: ^{60}Co - $0,4 - 90$ Бк/кг; ^{137}Cs - $0,7 - 4,4 \times 10^2$ Бк/кг; ^{152}Eu - $0,5 - 1,7 \times 10^2$ Бк/кг; ^{154}Eu - $2,1 - 8,1 \times 10^2$ Бк/кг; ^{155}Eu - $0,7 - 9,9 \times 10^2$ Бк/кг; ^{241}Am - $0,2 - 4,4 \times 10^2$ Бк/кг (Таблица 4).

В ковыле удельная активность изменялась в пределах:

- естественные радионуклиды: ^{40}K - $24 - 2,3 \times 10^3$ Бк/кг; ^{214}Pb - $1,4 - 6,3 \times 10^2$ Бк/кг; ^{226}Ra - $1,7 - 6,2 \times 10^2$ Бк/кг; ^{232}Th - $3,0 - 1,5 \times 10^3$ Бк/кг; ^{235}U - $1,1 - 2,4 \times 10^2$ Бк/кг; ^{238}U - $2,7 - 1,9 \times 10^3$ Бк/кг;

- техногенные радионуклиды: ^{60}Co - $0,3 - 3,0 \times 10^2$ Бк/кг; ^{137}Cs - $0,9 - 4,0 \times 10^2$ Бк/кг; ^{152}Eu - $0,8 - 4,0 \times 10^2$ Бк/кг; ^{154}Eu - $1,9 - 8,1 \times 10^2$ Бк/кг; ^{155}Eu - $0,5 - 4,8 \times 10^2$ Бк/кг; ^{241}Am - $0,3 - 1,5 \times 10^2$ Бк/кг (Таблица 4).

Удельная активность радионуклидов в растениях (тонконог тонкий и ковыль волосовидный) представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Удельная активность радионуклидов в растениях

Тонконог (<i>Koeleria gracilis Pers.</i>), n=100		Ковыль (<i>Stipa capillata L.</i>), n=63	
Радионуклиды	min-max	Радионуклиды	min-max
⁹⁰ Sr	1,0×10 ² -6,3×10 ⁷ Бк/кг	⁹⁰ Sr	1,0×10 ² -2,6×10 ⁷ Бк/кг
¹³⁷ Cs	0,7-4,4×10 ² Бк/кг	¹³⁷ Cs	0,9-4,0×10 ² Бк/кг
²⁴¹ Am	0,2-4,4×10 ² Бк/кг	²⁴¹ Am	0,3-1,5×10 ² Бк/кг
⁶⁰ Co	0,4-90 Бк/кг	⁶⁰ Co	0,3-3,0×10 ² Бк/кг
¹⁵² Eu	0,5-1,7×10 ² Бк/кг	¹⁵² Eu	0,8-4,0×10 ² Бк/кг
¹⁵⁴ Eu	2,1-8,1×10 ² Бк/кг	¹⁵⁴ Eu	1,9-8,1×10 ² Бк/кг
¹⁵⁵ Eu	0,7-9,9×10 ² Бк/кг	¹⁵⁵ Eu	0,5-4,8×10 ² Бк/кг
⁴⁰ K	14-3,3×10 ³ Бк/кг	⁴⁰ K	24-2,3×10 ³ Бк/кг
²¹⁴ Pb	1,4-2,7×10 ² Бк/кг	²¹⁴ Pb	1,4-6,3×10 ² Бк/кг
²²⁶ Ra	1,8-5,3×10 ² Бк/кг	²²⁶ Ra	1,7-6,2×10 ² Бк/кг
²³² Th	3,0-2,5×10 ³ Бк/кг	²³² Th	3,0-1,5×10 ³ Бк/кг
²³⁵ U	1,1-3,6×10 ² Бк/кг	²³⁵ U	1,1-2,4×10 ² Бк/кг
²³⁸ U	3,0-2,5×10 ³ Бк/кг	²³⁸ U	2,7-1,9×10 ³ Бк/кг

Удельная активность остальных радионуклидов в образцах растений в большинстве случаев ниже предела обнаружения (Приложение А, Таблица 14, Таблица 1). Содержание радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в растениях превышает предельно-допустимые уровни радиоактивного загрязнения кормовых растений (¹³⁷Cs-74 Бк/кг, ⁹⁰Sr-111 Бк/кг), установленных Минсельхозом Республики Казахстан. В исследованных видах растений ¹³⁷Cs на некоторых точках до 5 раз, а ⁹⁰Sr до 1000 раз превышает допустимые уровни установленные Минсельхозом Республики Казахстан. Удельная активность других радионуклидов в данном документе не нормируется (Временные допустимые уровни..., 1994).

3.2 Содержание тяжелых металлов в растениях

Тяжелые металлы в больших концентрациях негативно влияют на растения. ТМ в меристематических клетках корней могут вызвать цитогенетические нарушения. Ионы металлов, взаимодействуя с молекулой ДНК, уменьшают стабильность ее структуры (Титов и др., 2007). В исследовании (Geras'kin et al., 2012) было показано, что концентрации тяжелых металлов и доступные растениям их подвижные формы в почвах СИП были ниже принятых в России предельных концентраций. В исследуемых растениях определяли следующие химические элементы: V, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, As, Sr, Cd, Cs, Pb, Ni, U. Содержание тяжелых

металлов в растениях представлено в таблицах (Приложение Б, Таблица 16, Таблица 17).

Сравнение полученных в исследуемых растениях данных со значением кларка растительности суши по данным (Добровольский, 2003) о средней концентраций элементов в золе растительности суши свидетельствует о том, что во всех случаях концентрации исследуемых элементов в пробах растений существенно ниже средних (Таблица 5, Таблица 6). Таким образом, содержание тяжелых металлов не должно оказать токсического воздействия на исследуемые растения.

Таблица 5 – Содержание тяжелых металлов в тонконоге тонком

Элемент	Содержание элементов, мг/кг (зола)			Средняя концентрация элементов в золе растительности суши (Добровольский В.С., 2003)
	m*	g*	$M_e(Q_{1/2}-Q_{3/4})$	
V, n=34	2,2	1,7	1,2 (1-2)	30
Cr, n=34	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=34	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
Ni, n=34	2,2	1,8	2,0 (1,0-3,0)	40

Примечание: n- количество 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

Таблица 6 – Содержание тяжелых металлов в ковыле волосовидном

Элемент	Содержание элементов, мг/кг (зола)			Средняя концентрация элементов в золе растительности суши (Добровольский В.С., 2003)
	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- количество экспериментальных участков, где отбирали пробы растений, m – среднее арифметическое, g – среднее геометрическое, Me – медиана, $Q_{1/2}$ – $Q_{3/4}$ – верхний и нижний квартиль

3.3 Дозовые нагрузки на растения

Поглощенные растениями дозы оценивали с помощью уравнений (1, 2). Согласно расчетам, значения поглощенной дозы в растениях изменялись в широком диапазоне $4,3 \times 10^{-4}$ –13 Гр за вегетационный сезон ($0,1$ – $4,5 \times 10^3$ мкГр/ч) у тонконога тонкого и у ковыля волосовидного– $3,6 \times 10^{-4}$ –11 Гр за вегетационный сезон ($0,1$ – $3,8 \times 10^3$ мкГр/ч) (Приложение В, Таблица 18, Таблица 19) охватывающем почти пять порядков величины. Следует отметить, что большая часть этого диапазона значительно превышает установленное для растений пороговое значение 70 мкГр/час (Andersson et al., 2009). Таким образом, расчетные значения поглощенных растениями доз свидетельствуют о наличии выраженных радиобиологических эффектов в исследуемых популяциях с площадки «4А». Основную часть дозы растения получали от внутреннего облучения ^{90}Sr (Приложение В, Таблица 18, Таблица 19). Вклад внешнего облучения и внутреннего облучения других радионуклидов в поглощенные растениями дозы был незначителен.

3.4 Цитогенетические эффекты в популяциях растений

3.4.1 Цитогенетические эффекты в популяциях

тонконога тонкого

Частота aberrantных клеток. Оценки цитогенетических последствий облучения у растений СИП к моменту подготовки диссертации были представлены отдельными работами (Мозолин и др., 2008), но площадки, где проходили эти исследования («Дегелен», «Балапан», «Опытное поле»), значительно уступали по уровню радиоактивного загрязнения площадке «4А», где проходили испытания

боевых радиоактивных веществ, что делает актуальным проведение комплексных радиоэкологических исследований на площадке «4А». Всего был изучен 2681 препарат апикальной меристемы корешков проростков семян тонконога тонкого, просмотрено 36688 ана-телофазных клеток. Частота aberrаций хромосом и спектры aberrаций рассчитаны по формулам (3 и 4). (Приложение Г, Таблица 20).

Максимальная частота aberrантных клеток у тонконога тонкого на загрязненных экспериментальных точках составляла $15,3 \pm 2,6\%$. Частота aberrантных клеток в менее загрязненных точках (диапазон поглощенных доз $4,3 \times 10^{-4} - 9,3 \times 10^{-4}$ Гр/сезон) находилась в диапазоне $0,21 - 1,6\%$, что близко к типичной частоте aberrантных клеток для многих диких и культурных злаков ($0,5 - 1,0\%$) (Geras'kin et al., 2019).

Уникальный для полевых исследований как по количеству экспериментальных точек, так и по диапазону поглощенной дозы в растениях набор данных позволил с приемлемой точностью оценить форму зависимости по частоте цитогенетических нарушений. Чтобы подтвердить существование точек перегиба для определения порога вдоль градиента мощности дозы были использованы два принципиально разных метода (см. формулы (6), (7)).

На рисунке 6 показаны зависимости частоты цитогенетических нарушений в популяциях тонконога тонкого от логарифма мощности поглощенной дозы. Анализ представленных данных (Рисунок 6) позволяет предположить существование двух участков, в пределах которых скорость изменения частоты цитогенетических нарушений принципиально отличается. Из представленных данных следует, что частота aberrантных клеток возрастает с $0,5 - 2,0\%$ при $\log(D) = 10^{-1} - 10^0$ (что соответствует мощности поглощенной дозы $0,4 - 1,0$ мГр/сезон) до 16% при $\log(D) = 10^4 - 10^5$ (13 Гр/сезон). При этом зависимость частоты цитогенетических нарушений от мощности дозы имеет нелинейный характер.

В диапазоне $\log(D)$ от 10^{-1} до 10^2 увеличение дозы практически не влияет на частоту нарушений. При значениях $\log(D) > 10^2$ частота практически всех видов цитогенетических нарушений возрастает пропорционально мощности дозы (для одиночных фрагментов и мостов возрастание начинается при $\log(D) > 10^1$). Как

правило, при значениях $\log(D) \sim 10^4$ частота всех видов цитогенетических нарушений достигает максимальных значений. Вместе с тем обращает на себя внимание достаточно большой разброс значений по частоте цитогенетических нарушений при больших значениях мощности дозы.

В таблице 7 представлены оценки положения точки перегиба (Тп) в популяциях тонконога тонкого, для разных типов цитогенетических нарушений. В диапазоне 0,43–141 мГр/сезон частота абберрантных клеток статистически значимо не отличается от контрольного уровня. Точка перегиба для частоты абберрантных клеток составляет 141 мГр/сезон (49 мкГр/ч) (Таблица 7). Точки перегиба оценены и для других цитогенетических показателей (21 мГр/сезон для одиночных мостов и фрагментов, 214 мГр/сезон для двойных фрагментов и мостов и 234 мГр/сезон для митотических аномалий). В таблице 8 представлены результаты регрессионного анализа зависимости доза-эффект в популяциях тонконога тонкого для группы данных, расположенных слева от точки перегиба

Из результатов регрессионного анализа данных, расположенных слева от точки перегиба, следует, что частота абберрантных клеток статистически значимо не изменяется в этом диапазоне концентраций (Таблица 8). В таблице 9 представлены результаты регрессионного анализа зависимости доза-эффект в популяциях тонконога тонкого для группы данных, расположенных справа от точки перегиба. Качественно иная ситуация характерна для данных, расположенных справа от точки перегиба (Таблица 9). В этом диапазоне концентраций частота абберрантных клеток демонстрирует значительный и статистически значимый ($p < 0,001$) рост. Таким образом, впервые с использованием полученных в полевых условиях данных, установлена пороговая величина мощности дозы, ниже которой частота цитогенетических эффектов в природных популяциях тонконога тонкого не превышает спонтанный уровень (Geras'kin et al., 2021).

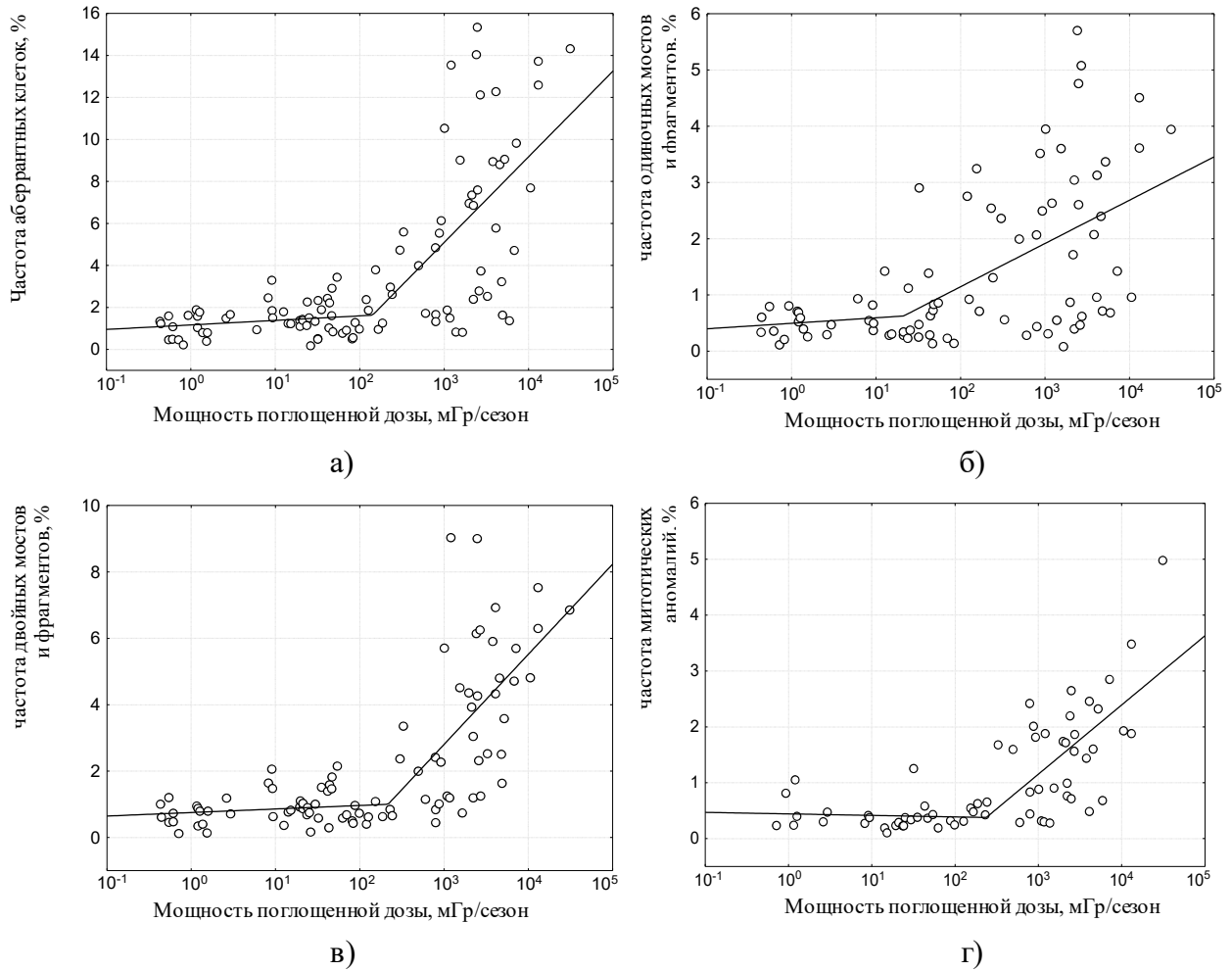


Рисунок 6 – Зависимость частоты цитогенетических нарушений в популяциях тонконога тонкого от логарифма мощности поглощенной дозы: а) частота абберрантных клеток; б) одиночные фрагменты и мосты; в) двойные фрагменты и мосты; г) митотические аномалии

Таблица 7 – Оценка положения точки перегиба (Тп) в популяциях тонконога тонкого, для разных типов цитогенетических нарушений

Точка разрыва для показателя	Мощность поглощенной дозы, мГр/сезон.	Доверительный интервал для Тп	
		Нижний	Верхний
Кусочно-линейная модель			
Частота абберрантных клеток	141,3	37,2	524,8
Частота одиночных фрагментов и мостов	20,9	0,4	1047,1
Частота двойных фрагментов и мостов	213,8	72,4	631,0
Частота трехполосных митозов, забеганий и отставаний хромосом	234,4	72,4	776,2

Таблица 8 – Результаты регрессионного анализа зависимости доза-эффект в популяциях тонконога тонкого для группы данных, расположенных слева от точки перегиба

Параметр	Оценка параметра и его стандартная ошибка	t-критерий Стьюдента	Уровень значимости, p	Доверительный интервал параметра	
				Нижний	Верхний
Частота aberrantных клеток					
a	0,518±0,523	0,99	0,323	-0,531	1,57
b	0,216±0,129	1,68	0,099	-0,043	0,474
Частота одиночных мостов и фрагментов					
a	0,143±0,399	0,357	0,724	-0,688	0,974
b	0,117±0,118	0,997	0,330	-0,127	0,362
Частота двойных мостов и фрагментов					
a	0,432±0,344	1,25	0,216	-0,261	1,13
b	0,106±0,084	1,27	0,208	-0,061	0,274
Частота трехполосных митозов, забеганий и отстаиваний хромосом					
a	0,523±0,269	1,94	0,062	-0,028	1,07
b	0,027±0,063	-0,43	0,666	-0,154	0,100

Таблица 9 – Результаты регрессионного анализа зависимости доза-эффект в популяциях тонконога тонкого для группы данных, расположенных справа от точки перегиба

Параметр	Оценка параметра и его стандартная ошибка	t-критерий Стьюдента	Уровень значимости, p	Доверительный интервал параметра	
				Нижний	Верхний
Частота aberrantных клеток					
a	-19,4±6,61	-2,93	0,005	-32,7	-6,07
b	4,08±1,05	3,87	<0,001	1,95	6,20
Частота одиночных мостов и фрагментов					
a	-2,71±1,16	-2,33	0,023	-5,03	-0,389
b	0,771±0,198	3,88	<0,001	0,373	1,17
Частота двойных мостов и фрагментов					
a	-13,5±4,16	-3,24	0,002	-21,9	-5,07
b	2,71±0,657	4,13	<0,001	1,38	4,04
Частота трехполосных митозов, забеганий и отстаиваний хромосом					
a	-6,28±1,95	-3,22	0,003	-10,3	-2,31
b	1,24±0,308	4,02	<0,001	0,613	1,86

Спектр цитогенетических нарушений. Во многих исследованиях оценивали только общую частоту цитогенетических нарушений, образованных вследствие техногенного воздействия, игнорируя то обстоятельство, что важную

дополнительную информацию можно получить в ходе анализа спектра мутаций. На рисунке 7 показаны патологии митоза в тонконоге тонком. В ходе цитогенетического анализа нами были обнаружены следующие типы нарушений: aberrации хромосом (одиночные и двойные мосты, одиночные и двойные фрагменты), митотические нарушения (забегания, отставания хромосом, трехполюсные митозы) (Рисунок 7). В некоторых клетках было обнаружено присутствие сразу нескольких типов нарушений (Minkenova et al., 2020).

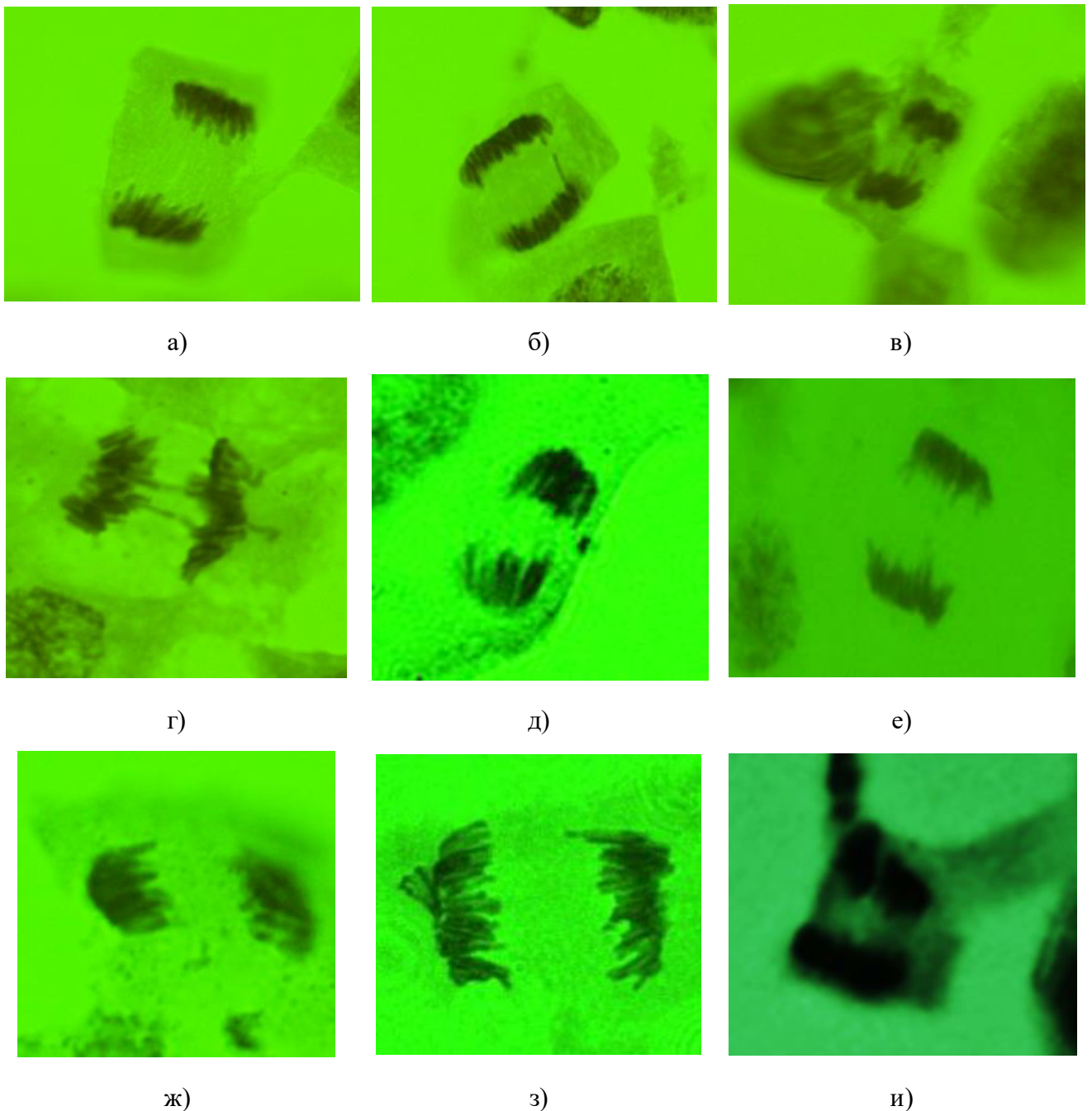


Рисунок 7 – Цитогенетические аномалии в ана-телофазных клетках тонконога с площадки «4А»: а) нормальная ана-телофаза; б) одиночный мост; в) двойной

мост; г) двойной мост и забегание хромосом; д) одиночный фрагмент; е) двойной фрагмент; ж) отстаивания хромосом; з) забегания хромосом; и) трехполюсный митоз

Данные о частоте aberrаций разного типа (хроматидные и хромосомные фрагменты и мосты, митотические аномалии) и их относительном вкладе в спектр цитогенетических нарушений представлены в Приложении Г, в таблице 20. Вклад aberrаций разного типа в спектр цитогенетических нарушений рассчитан по формуле (5). На рисунке 8 представлен вклад aberrаций разного типа в спектр цитогенетических нарушений в хронически облучаемых популяциях тонконога тонкого.

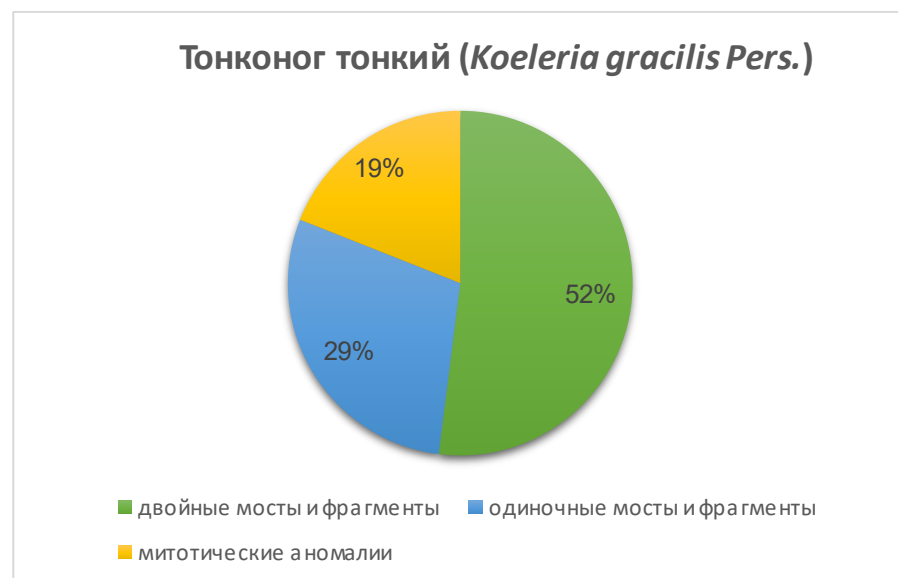


Рисунок 8 – Вклад aberrаций разного типа в спектр цитогенетических нарушений в хронически облучаемых популяциях тонконога тонкого

Основной вклад в спектр структурных мутаций в популяциях тонконога тонкого вносят двойные мосты и фрагменты (52%) (Приложение Г, Таблица 20, Рисунок 8). Вклад одиночных мостов и фрагментов (29%), а также митотических аномалий (19%) гораздо меньше.

Частота одностранных мостов и фрагментов начинает расти с мощности поглощенной дозы 21 мГр/сезон (7 мкГр/ч) (рисунок 6, б). Хроматидных aberrаций у тонконога тонкого (одиночные фрагменты и мосты) выявлено на 1–2 порядка меньше, чем в работе (Geras'kin et al., 2011). Большая мощность дозы необходима

для увеличения частоты митотических аномалий (234 мГр/сезон (81 мкГр/ч)) (рисунок 6, г). Важно, что общая частота двойных мостов и фрагментов существенно превышает частоту других видов нарушений. Это свидетельствует о том, что являющиеся маркерами радиационного воздействия (Streffler et al., 2004) двойные мосты и фрагменты вносят основной вклад в наблюдаемую частоту цитогенетических нарушений. Это позволяет сделать вывод о том, что, наблюдаемые в популяциях тонконога тонкого цитогенетические эффекты являются результатом радиационного воздействия.

Из результатов регрессионного анализа данных, расположенных слева от точки перегиба, следует, что частота цитогенетических нарушений статистически значимо не изменяется с мощностью поглощенной дозы (Таблица 8). Ситуация качественно меняется справа от точки перегиба (Таблица 9). В этом диапазоне частота всех видов цитогенетических нарушений статистически значимо ($p < 0,001$) растет с увеличением мощности поглощенной дозы. Таким образом, статистический анализ параметров дозовых зависимостей всех видов цитогенетических нарушений подтверждает наличие пороговой величины поглощенной дозы, ниже которой частота нарушений практически не отличается от спонтанного уровня, а выше — возрастает с увеличением мощности поглощенной дозы.

Наиболее сильная связь с мощностью поглощенной дозы обнаружена для двойных мостов и фрагментов, дозовая зависимость для которых фактически повторяет зависимость для частоты аберрантных клеток. Таким образом, в условиях загрязнения среды обитания растений преимущественно радионуклидом ^{90}Sr , основной вклад в формирование цитогенетических эффектов вносят маркеры радиационного воздействия (Streffler et al., 2004) - двойные мосты и фрагменты.

3.4.2 Цитогенетические эффекты в популяциях ковыля волосовидного

Частота аберрантных клеток

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 (0,13–3819 мкГр/ч). Всего был изучен 1261 препарат апикальной меристемы корешков проростков семян ковыля волосовидного, количество изученных анафазафазных клеток составило 102217 (Приложение Г, Таблица 21).

У ковыля волосовидного максимальная частота анафазафазных клеток при сильном радиоактивном загрязнении участка достигала $4,75 \pm 0,66\%$. Как и в случае тонконога тонкого, частота аберрантных клеток в менее загрязненных точках (диапазон поглощенных доз $3,6 \times 10^{-4}$ – $8,3 \times 10^{-4}$ Гр/сезон) находилась в диапазоне 0,06–0,69%, что близко к типичному диапазону спонтанной частоты аберрантных клеток для многих дикорастущих и культурных злаков (0,5–1,0%) (Geras'kin et al., 2019).

Установлена нелинейная зависимость между частотой цитогенетических нарушений и логарифмом мощности поглощенной дозы. Зависимости частоты цитогенетических нарушений в популяциях ковыля волосовидного от логарифма мощности поглощенной дозы показаны на рисунке 9. Анализ представленных на рисунке 9 данных показывает, что у ковыля волосовидного частота аберрантных клеток возрастает с 0,2–0,8% при $\log(D)=10^{-1}$ – 10^0 (что соответствует мощности поглощенной дозы 0,3–1,0 мГр/сезон) до 5% при $\log(D)=10^4$ – 10^5 (11 Гр/сезон). Зависимость частоты цитогенетических нарушений от мощности поглощенной дозы имеет нелинейный и пороговый характер.

В диапазоне $\log(D)$ от 10^{-1} до 10^2 увеличение дозы не влияет на частоту цитогенетических нарушений. Как и у тонконога тонкого, при значениях $\log(D) > 10^2$ частота почти всех типов цитогенетических нарушений возрастает пропорционально мощности дозы. Частота всех цитогенетических нарушений достигает максимальных значений при $\log(D) \sim 10^4$.

В диапазоне 0,36–162 мГр/сезон частота аберрантных клеток статистически значимо не отличается от контрольного уровня. Оценки положения точек перегиба (Тп), в популяциях ковыля волосовидного, для разных типов цитогенетических нарушений показаны в таблице 10. Точка перегиба для частоты аберрантных клеток составляет 162 мГр/сезон (56,3 мкГр/ч) (Таблица 10). Увеличение дозы

выше этого предела ведет к статистически значимому росту частоты аберрантных клеток. Точки перегиба оценены для хромосомных aberrаций и митотических аномалий (120 мГр/сезон для одиночных мостов и фрагментов, 141 мГр/сезон для двойных мостов и фрагментов и 174 мГр/сезон для митотических аномалий). Результаты регрессионного анализа зависимости доза-эффект в популяциях ковыля волосовидного для группы данных, расположенных слева от точки перегиба показаны в таблице 11. Из результатов статистической оценки групп данных, расположенных слева от точки перегиба, следует, что частота аберрантных клеток статистически значимо не изменяется в этом диапазоне мощностей доз (Таблица 11). Результаты регрессионного анализа зависимости доза-эффект в популяциях ковыля волосовидного для группы данных, расположенных справа от точки перегиба представлены в таблице 12. Справа от точки перегиба установлена линейная зависимость частоты всех исследованных видов цитогенетических нарушений от мощности поглощенной дозы в ковыле волосовидном (Таблица 12). В этом диапазоне концентраций частота аберрантных клеток демонстрирует значительный и статистически значимый ($p < 0,001$) рост.

Результаты вычислений представлены в таблицах 10–12. Для частоты аберрантных клеток 56,3 мкГр/ч (Таблица 10) является критической мощностью дозы, существенно меняющей скорость изменения этого параметра. Частота одиночных мостов и фрагментов начинает возрастать, начиная со 120 мГр/сезон (41,7 мкГр/ч) (Таблица 10). Большая мощность дозы необходима для возрастания частоты митотических аномалий 174 мГр/сезон (60,4 мкГр/ч). Регрессионный анализ показал, что слева от точки перегиба частота всех видов цитогенетических нарушений остается практически постоянной (Таблица 11). Справа от точки перегиба частота всех видов цитогенетических нарушений статистически значимо растет с мощностью поглощенной дозы (Таблица 12).

Таким образом показано, что для популяций ковыля волосовидного существует порог поглощенной дозы, ниже которого эффекты облучения практически не наблюдаются. Поскольку аналогичный порог был ранее установлен нами для населяющих ту же территорию популяций тонконога тонкого (Гераськин

и др., 2021) полученные результаты отражают закономерности формирования ответной реакции растений на длительное хроническое облучение.

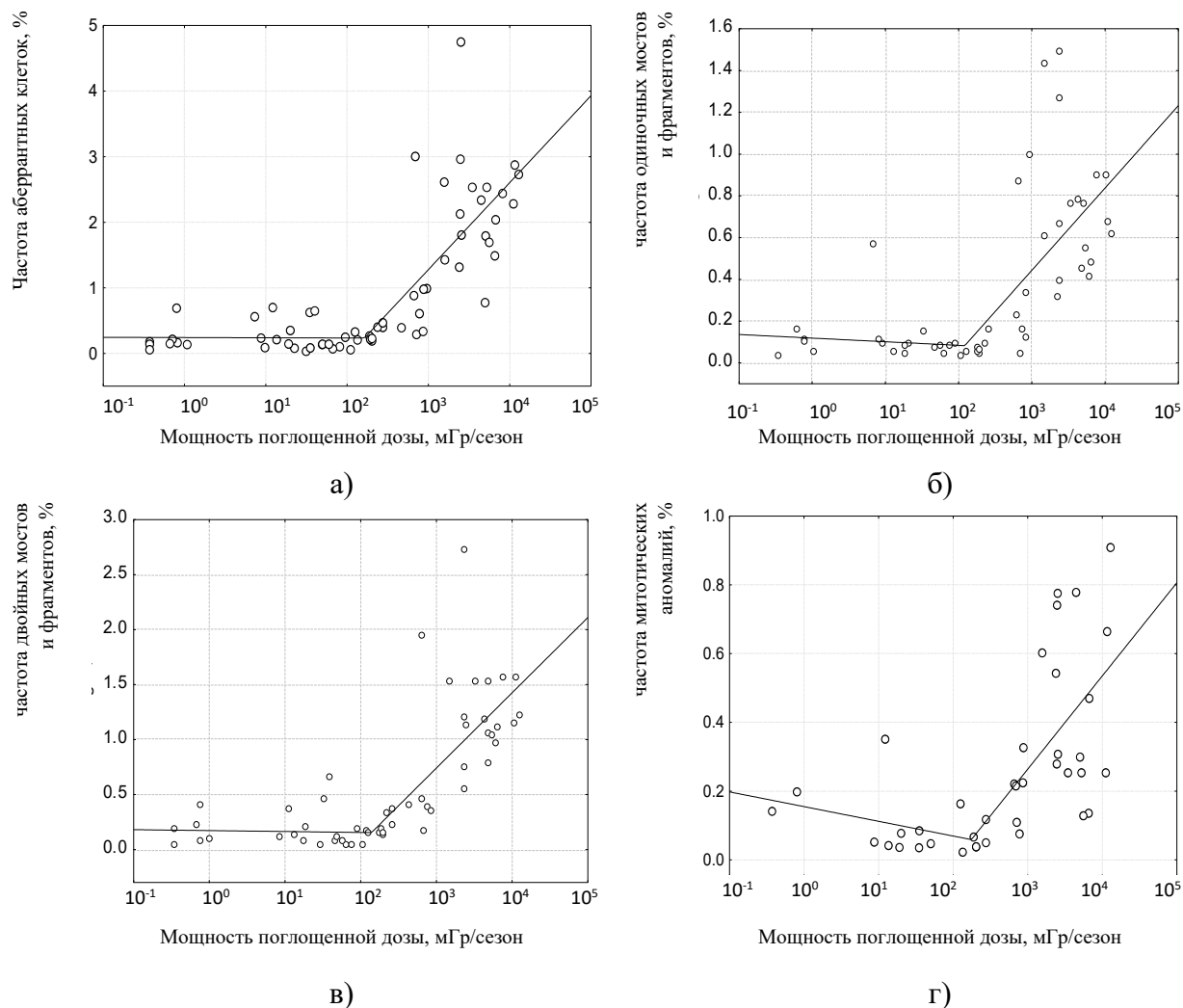


Рисунок 9 – Зависимость частоты цитогенетических нарушений в популяциях ковыля волосовидного от логарифма мощности поглощенной дозы: а) частота aberrантных клеток; б) одиночные фрагменты и мосты; в) двойные фрагменты и мосты; г) митотические аномалии

Таблица 10 – Оценка положения точки перегиба (Тп), в популяциях ковыля волосовидного, для разных типов цитогенетических нарушений

Точка разрыва для показателя	Мощность поглощенной дозы, мГр/сезон	Доверительный интервал для Тп	
		Нижний	Верхний
Частота aberrантных клеток	162	60,3	437
Частота одиночных фрагментов и мостов	120	21,9	661
Частота двойных фрагментов и мостов	141	39,8	479
Частота трехполосных митозов, забеганий и отставаний хромосом	174	29,5	1023

Таблица 11 – Результаты регрессионного анализа зависимости доза-эффект в популяциях ковыля волосовидного для группы данных, расположенных слева от точки перегиба

Параметр	Оценка параметра и его стандартная ошибка	t-критерий Стьюдента	Уровень значимости, р	Доверительный интервал параметра	
				Нижний	Верхний
Частота aberrantных клеток					
a	0,256±0,187	1,35	0,188	-0,131	0,636
b	-0,003±0,045	-0,076	0,940	-0,096	0,089
Частота одиночных мостов и фрагментов					
a	0,171±0,142	1,20	0,247	-0,130	0,471
b	-0,017±0,035	-0,502	0,622	-0,090	0,056
Частота двойных мостов и фрагментов					
a	0,198±0,167	1,18	0,250	-0,149	0,545
b	-0,008±0,039	-0,215	0,832	-0,090	0,073
Частота трехполосных митозов, забеганий и отставаний хромосом					
a	0,283±0,157	1,81	0,101	-0,066	0,633
b	-0,043±0,037	-1,16	0,273	-0,125	0,039

Таблица 12 – Результаты регрессионного анализа зависимости доза-эффект в популяциях ковыля волосовидного для группы данных, расположенных справа от точки перегиба

Параметр	Оценка параметра и его стандартная ошибка	t-критерий Стьюдента	Уровень значимости, р	Доверительный интервал параметра	
				Нижний	Верхний
Частота aberrantных клеток					
a	-6,68±1,52	-4,40	<0,001	-9,77	-3,59
b	1,33±0,244	5,44	<0,001	0,830	1,82
Частота одиночных мостов и фрагментов					
a	-1,92±0,638	-3,01	0,005	-3,22	-0,62
b	0,394±0,103	3,84	0,001	0,184	0,604
Частота двойных мостов и фрагментов					
a	-3,37±0,908	-3,71	0,001	-5,22	-1,51
b	0,685±0,146	4,70	<0,001	0,387	0,982
Частота трехполосных митозов, забеганий и отставаний хромосом					
a	-1,36±0,456	-2,99	0,006	-2,30	-0,424
b	0,271±0,073	3,72	0,001	0,121	0,421

Спектр цитогенетических нарушений

Важную дополнительную информацию можно получить в ходе оценки изменения спектра цитогенетических нарушений в зависимости от интенсивности действующего фактора. На рисунке 10 показаны патологии митоза в ковыле

волосовидном. В данной работе были обнаружены следующие типы цитогенетических нарушений: aberrации хромосом (одиночные и двойные мосты и фрагменты) и митотические аномалии (отставания и забегания хромосом, многополюсные митозы) (рисунок 10).

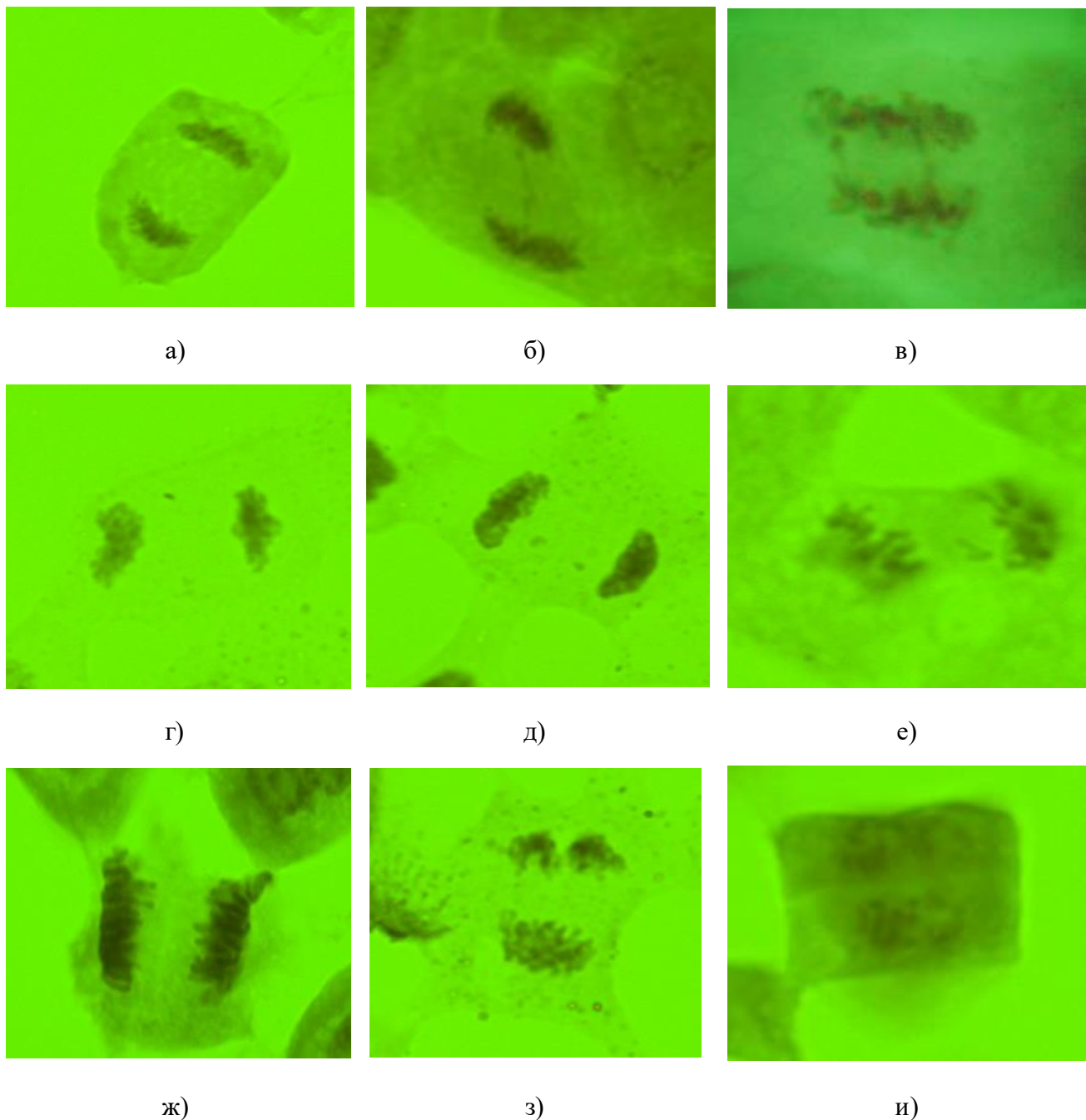


Рисунок 10 – Цитогенетические аномалии в ана-телофазных клетках ковыля волосовидного с площадки «4А»: а) нормальная ана-телофаза; б) одиночный мост; в) двойной мост; г) одиночный фрагмент; д) двойной фрагмент; е) отставания хромосом; ж) забегания хромосом; з) трехполюсный митоз; и) четырехполюсный митоз

В некоторых клетках было обнаружено присутствие сразу нескольких типов нарушений. Данные о частоте aberrаций разного типа и их относительном вкладе в спектр цитогенетических нарушений в популяциях ковыля волосовидного представлены в Приложении Г, Таблица 21.



Рисунок 11 – Вклад aberrаций разного типа в спектр цитогенетических нарушений в хронически облучаемых популяциях ковыля волосовидного

Как и у тонконога тонкого, основной вклад в спектр структурных мутаций в популяциях ковыля волосовидного вносят двойные мосты и фрагменты (56%) (Рисунок 11). Вклад одиночных мостов и фрагментов (28%), а также митотических аномалий (16%) гораздо меньше. Увеличение частоты одиночных фрагментов и мостов начинается с мощности дозы 120 мГр/сезон (41,7 мкГр/ч) (рисунок 9, б). Для увеличения частоты митотических аномалий необходима большая мощность дозы (174 мГр/сезон (60,4 мкГр/ч)) (рисунок 9, г). Легко видеть, что форма зависимости на рисунке 9, а и 9, в совпадает, близки и значения оцененных точек перегиба для частоты aberrантных клеток (162 мГр/сезон (56,3 мкГр/ч)), а также двойных мостов и фрагментов (141 мГр/сезон (49,0 мкГр/ч)). В совокупности с тем, что более половины цитогенетических нарушений в исследуемых популяциях составляют маркеры радиационного воздействия (Streffler et al., 2004) — двойные мосты и фрагменты, можно заключить, что наблюдаемые в популяциях ковыля волосовидного цитогенетические эффекты являются результатом хронического

облучения. Как и у тонконога тонкого, у ковыля волосовидного частота цитогенетических нарушений двойных мостов и фрагментов превышает другие виды нарушений. Хромосомные aberrации вносят основной вклад в наблюдаемую частоту цитогенетических эффектов, что свидетельствует о радиационной природе наблюдаемых изменений.

Результаты регрессионного анализа расположенных слева от точки перегиба данных показали, что частота цитогенетических нарушений статистически значимо не изменяется в зависимости от мощности дозы (Таблица 11). Справа от точки перегиба (Таблица 12) в этом диапазоне концентраций частота всех видов цитогенетических нарушений, также как и у тонконога тонкого, статистически значимо ($p < 0,001$) растет с увеличением мощности поглощенной дозы. Статистический анализ параметров дозовых зависимостей по всем видам цитогенетических нарушений подтверждает наличие пороговой дозы, ниже которой частота нарушений практически не отличается от спонтанного уровня, а выше — возрастает с увеличением мощности дозы. Основной вклад в формирование цитогенетических нарушений вносят двойные мосты и фрагменты, что служит дополнительным доказательством радиационной природы наблюдаемых в популяциях ковыля волосовидного изменений.

Дозовая зависимость двойных мостов и фрагментов у ковыля волосовидного, как и у тонконога тонкого, фактически повторяет зависимость для частоты aberrантных клеток. Таким образом, в условиях загрязнения среды обитания ковыля волосовидного преимущественно ^{90}Sr , основной вклад в формирование цитогенетических эффектов вносят двойные мосты и фрагменты.

ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1 Удельная активность радионуклидов в растениях

В пробах исследуемых видов растений определили удельную активность техногенных (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu) и естественных (^{40}K , ^{214}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U) радионуклидов (Таблица 4).

Выбранные для проведения исследований на площадке «4А» 163 экспериментальные точки не отличались друг от друга по почвенно-климатическим условиям и загрязнению химическими элементами (Таблица 5, Таблица 6), но были контрастны по уровню радиоактивного загрязнения (Таблица 14, Приложение А, Таблица 1, Таблица 15). Основную роль в радиоактивном загрязнении площадки «4А» играет ^{90}Sr , удельная активность которого в пробах растений тонконога тонкого достигала $6,3 \times 10^7$ Бк/кг (Приложение А, Таблица 14), в пробах ковыля волосовидного - $2,6 \times 10^7$ Бк/кг (Приложение А, Таблица 15). ^{90}Sr присутствует в почве площадки «4А» преимущественно в обменной и водорастворимой форме и может интенсивно накапливаться в растениях (Кундузбаева и др., 2013). 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 способны различать ионы Са и Sr, поступление Sr в растения происходит по кальциевым каналам корня (Burger et al., 2019). Высокие концентрации ^{90}Sr в растениях с площадки «4А», где проводили испытания боевых радиоактивных веществ, должны вести к индукции значительных биологических эффектов в популяциях растений. Исходя из однородности участков по почвенно-климатическим условиям и содержанию тяжелых металлов можно утверждать, что наблюдаемые в популяциях растений цитогенетические эффекты являются следствием радиационного воздействия.

4.2. Дозовые нагрузки на растения

Существенная разница в уровне радиоактивного загрязнения участков (Приложение В, Таблица 18, Таблица 19) формирует хорошие предпосылки для проверки гипотезы о радиационной обусловленности отмеченных в экспериментальных популяциях растений биологических эффектов. Поглощенная доза на контрольных точках начинается для тонконога тонкого с 0,15 мкГр/ч, для ковыля волосовидного с 0,13 мкГр/ч. Поглощённая в дозу на максимально загрязнённой экспериментальной точке составляет для тонконога тонкого 4514 мкГр/ч, а у ковыля волосовидного 3819 мкГр/ч (Приложение В, Таблица 18, Таблица 19). Доза варьирует в широких пределах от 0,1 до $4,5 \times 10^3$ мкГр/час и составляет пять порядков величины. Основная часть дозы у растений формируется за счет внутреннего облучения от радионуклида ^{90}Sr . Вклад внешнего и внутреннего облучения от других радионуклидов в поглощенные растениями дозу незначителен.

Международным сообществом рекомендованы представленные в таблице 13 диапазоны уровней облучения биоты.

Таблица 13 - Уровни облучения биоты, рекомендуемые для ограничения радиационного воздействия разными международными организациями и научными группами [Andersson et al., 2008]

Первоисточник	Предельные уровни облучения биоты, мкГр/час				
	(МАГАТЭ, 1992)	(НКДАР, 1996)	(СЕРА, 1999)	(ERICA, 2003)	(МКРЗ, 2009)
Растения	400	400	100	10	
Злаки					40-400

В настоящее время установлены различные уровни доз, которые принято считать безопасными для наземных растений. При этом рекомендованный МАГАТЭ и НКДАР предельный уровень облучения от техногенных радионуклидов для наземных растений составляет 400 мкГр/час. Мощности поглощенной дозы на наиболее загрязнённых точках площадки «4А» спустя 65 лет после испытания БРВ, превышают значение 400 мкГр/час примерно в 11 раз (4514 мкГр/час). Большинство рассчитанных нами доз находятся на верхнем пороговом уровне «предельной дозы», по данным разных литературных источников. Следует

отметить, что большая часть этого диапазона значительно превышает установленное для растений пороговое значение 100 мкГр/час (СЕРА) и 10 мкГр/час (ERICA), ниже которого не должны наблюдаться радиобиологические эффекты в популяциях растений. В рамках европейского проекта ERICA в качестве безопасного уровня радиационного воздействия принято значение 10 мкГр/час, эта мощность дозы была рассчитана исходя из имевшейся на тот момент информации в базе данных ERICA. Хотя сопоставление рекомендованных разными организациями допустимых пределов затруднительно, можно сделать общий вывод, что минимальные допустимые уровни хронического облучения биоты сопоставимы – от 4 до 40 мкГр/час и превышают допустимое дозовое воздействие на человека (1 мЗв/год) в 40-400 раз. В целом, расчетные значения поглощенных растениями доз на наших экспериментальных участках свидетельствуют о наличии выраженных радиобиологических эффектов в исследуемых популяциях с площадки «4А».

4.3. Сравнительный анализ цитогенетических эффектов в популяциях тонконога тонкого и ковыля волосовидного

Сложившаяся на территории Семипалатинского испытательного полигона уникальная радиоэкологическая ситуация, характеризующаяся значительным градиентом 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.

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 γ -облучением. К сожалению, эта информация не может быть без модификации 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 α -, β - и γ -излучающих радионуклидов, обладающих различной 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 (Garnier-Laplace et. al., 2013), да и сама форма дозовой зависимости может отличаться от наблюдаемой в контролируемых условиях лабораторного эксперимента (Schafer et al., 2012). 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 (163 экспериментальные точки, широкий диапазон изменения мощности дозы для тонконога тонкого ($0,1-4,5 \times 10^3$ мкГр/ч) и ковыля волосовидного ($0,1-3,8 \times 10^3$ мкГр/ч) были использованы для восстановления формы дозовой зависимости в популяциях растений с площадки «4А», где проводили испытания боевых радиоактивных веществ.

Визуально семена ковыля крупнее в два раза семян тонконога. Но клетки и ядро мелкие, хромосомы ковыля мельче, ана-телофазные хромосомы в фазе митоза имеют большее число хромосом, чем у тонконога. У тонконога хромосомы

крупнее. Известно (Sparrow, 1951), что наиболее радиочувствительными являются виды растений, клетки которых имеют наибольшие по объему ядра. Основными параметрами, определяющими устойчивость высших растений к облучению, являются цитогенетические характеристики — размеры ядер, число и строение хромосом, а также степень пloidности. В наших исследованиях на тонконоге тонком и ковыле волосовидном с площадки «4А» впервые на основе данных полевых исследований установлена пороговая мощность дозы для частоты цитогенетических нарушений. Основной вклад в формирование цитогенетических нарушений вносят двойные мосты и фрагменты (Приложение Г, Таблица 20, Таблица 21), что можно рассматривать как дополнительное подтверждение радиационной природы наблюдаемых изменений. Действительно, при сопоставимом диапазоне радиационного воздействия на эти дикие злаки частота абберрантных клеток тонконога на наиболее загрязненных участках превышала 15% (Приложение Г, Таблица 20), в то время как у ковыля волосовидного максимальная частота абберрантных клеток не достигала 5% (Приложение Г, Таблица 21). Кроме того, частота цитогенетических нарушений в пределах дозозависимого участка у тонконога тонкого почти в два раза больше, чем у ковыля волосовидного (0,5% у тонконога (Таблица 8) и 0,26% у ковыля (Таблица 11), а точка перегиба зафиксирована при меньшей мощности дозы (49 мкГр/ч у тонконога против 56,3 мкГр/ч у ковыля).

Исследованные виды растений относятся к семейству злаковых, но к разным родам. Из трех показателей, составляющих интегральную частоту абберрантных клеток, по двум показателям, которые вносят основной вклад, а именно двойные абберрации и митотические нарушения, радиочувствительность тонконога оказалось существенно ниже, чем у ковыля, и только по показателю одиночные мосты и фрагменты (повреждения, существенно менее опасные для клетки), у тонконога зафиксирован низкий уровень мощности дозы в точке перегиба. Кроме того, сравнение углов наклона линий регрессии справа от точки перегиба (таблица 9, 12) свидетельствует о том, что для всех видов цитогенетических нарушений прирост их частоты на единицу мощности дозы статистически значимо выше у

ковыля. Это свидетельствует о том, что ковыль волосовидный чувствительнее к хроническому облучению, чем тонконог тонкий.

В середине 1930-х годов принято было считать, что выход мутаций на единицу дозы одинаков как для малых, так и для больших доз (линейность) и предполагалось, что квант энергии излучения, воздействуя непосредственно на хромосому, вызывает в молекулах ДНК необратимые изменения (беспороговость) (Тимофеев-Ресовский и др., 1968). Эти постулаты легли в основу получившей в настоящее время наибольшее распространение линейной беспороговой концепции (ICRP, 2017). Однако наши результаты свидетельствуют о наличии пороговой мощности дозы, ниже которой биологически значимые эффекты у исследованных нами видов растений отсутствуют.

Для обоснования порога должно быть предложено значение пороговой мощности дозы и оценены доверительные интервалы этого значения (Lutz, Lutz, 2009). Результаты расчетов представлены в таблицах 7–9 и 10–12. У тонконога тонкого начиная с 49 мкГр/ч, у ковыля волосовидного начиная с 56 мкГр/ч, частота цитогенетических нарушений в проростках собранных на площадке «4А» семян статистически значимо увеличивалась (Рисунок 6, Рисунок 9). Однако ниже этого значения частота цитогенетических нарушений не отличалась значимо от контрольного уровня. Таким образом, впервые по данным полевых исследований установлена пороговая мощность дозы, ниже которой частота цитогенетических нарушений не превышает статистически значимо спонтанный уровень. Выявление порога в ответной реакции популяций растений на антропогенное воздействие увеличивает нашу способность предвидеть резкие и внезапные изменения в поведении экосистем (Groffman et al., 2006).

Следует подчеркнуть, что значения точек перегиба отличаются для разных видов растений и цитогенетических нарушений. Наименьшая мощность дозы у тонконога тонкого (7 мкГр/ч, Рисунок 6, б) и у ковыля волосовидного (41,7 мкГр/ч, Рисунок 9, б) необходима для формирования одиночных мостов и фрагментов. Большинство aberrаций этого типа быстро репарируются. Гораздо большие мощности дозы у тонконога тонкого (74 мкГр/ч, Рисунок 6, в) и ковыля

волосовидного (49 мкГр/ч, Рисунок 9, в) требуются для увеличения частоты двойных мостов и фрагментов, которые могут вести к гибели клетки (Feinendegen, Pollycove, 2001). Хромосомные и хроматидные aberrации отличаются от митотических аномалий механизмами формирования (причиной aberrаций хромосом является их повреждение, в то время как митотические аномалии вызваны повреждением митотического аппарата, особенно веретена деления). Коана и др. (Koana et al., 2004), предполагают, что репарация ДНК ответственна за существование порога по частоте мутаций. 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 (Veylder et al., 2011).

Ранее пороговая форма дозовой зависимости была обнаружена в лабораторных экспериментах с облучением семян пшеницы (Гераськин и др., 1995). Нелинейная дозовая зависимость с выраженным дозозависимым плато была обнаружена при γ -облучении семян (Гераськин и др., 1997) и проростков ячменя (Geras'kin et al., 2007), а также на других видах растений (George et al., 2014). Пороговая мощность дозы, вызывающая резкое увеличение уровня метилирования генома была выявлена у сосны обыкновенной из Чернобыльской зоны (Volkova et al., 2018). Представленные в работе (Зяблицкая и др., 1984) результаты эксперимента с корневым поступлением радионуклидов ^{90}Sr в растения ячменя также позволяют предположить наличие дозозависимого участка по частоте клеток с aberrациями вплоть до 0,2 Гр (200 мГр) с последующим линейным ростом до 2,4 Гр (2400 мГр), после чего частота цитогенетических нарушений выходит на плато. В нашем исследовании прирост частоты цитогенетических нарушений также замедляется, начиная с концентраций порядка 10^6 Бк/кг. Порог вплоть до 1 Гр наблюдался (Koana et al., 2004), в зависимости доза рентгеновского излучения - частота соматических мутаций у дрозофилы. Сравнение формы выявленных в ходе настоящего исследования эмпирических дозовых зависимостей с ранее

полученными результатами показало, что кривые имеют схожий вид, отличаясь только значениями точек перегиба, которые зависят от видовой радиочувствительности.

Хотя теоретические основы пороговой концепции до сих пор являются предметом дискуссий, ее значение для дальнейшего развития системы радиационной защиты окружающей среды несомненно. Точная форма зависимости доза-эффект должна базироваться на прочном биологическом обосновании, т.е. необходимо ответить на вопрос: какие биологические механизмы определяют существование порога и в каких условиях он проявляется? Такая форма дозовой зависимости может быть связана (Henderson et al., 2000; Geras'kin et al., 2007) с исчерпанием возможности систем восстановления на клеточном уровне. Действительно, в работе (Koana et al., 2004), причиной существования порога назвали работу систем репарации повреждений ДНК. Следовательно, даже небольшое увеличение мощности дозы в районе точки перегиба может привести к качественному изменению работы защитных систем растений. Фактически работах (Geras'kin et al., 2021; Гераськин и др., 2022) мы оценили критическое значение мощности поглощенной дозы, которое еще не приводит к существенным изменениям реакции двух видов растений на облучение. Эти результаты могут стать научной основой более эффективного управления экосистемами.

Таким образом, в ходе исследования цитогенетических эффектов у растений, произрастающих на площадке, где испытывали боевые радиоактивные вещества, установлена нелинейная зависимость между частотой цитогенетических нарушений в апикальной меристеме корешков проростков семян и логарифмом мощности дозы, поглощенной растениями. В диапазоне мощности дозы до 49 мкГр/ч для тонконога тонкого и до 56 мкГр/ч для ковыля волосовидного частота цитогенетических нарушений не отличается от контрольного уровня, то есть установлен порог для данного типа эффектов. Превышение пороговой мощности дозы ведет к линейному росту частоты цитогенетических нарушений вплоть до 15 % у тонконога тонкого и до 5% у ковыля волосовидного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка цитогенетических эффектов в популяциях ковыля волосовидного и тонконога тонкого выполнена на участках площадки «4А» Семипалатинского испытательного полигона (Казахстан), не отличающихся по почвенным характеристикам и загрязнению тяжелыми металлами, но контрастных по уровню радиоактивного загрязнения.

Доминирующая роль в радиоактивном загрязнении площадки «4А» принадлежит радионуклиду ^{90}Sr , удельная активность которого в пробах растений тонконога тонкого достигала $6,3 \times 10^7$ Бк/кг, в пробах ковыля волосовидного $2,6 \times 10^7$ Бк/кг.

Основной вклад в поглощенную растениями дозу вносит внутреннее облучение от ^{90}Sr . Показано, что у исследованных видов растений дозовая зависимость распадается на два участка, в пределах которых характер изменения частоты цитогенетических нарушений с дозой принципиально различается.

В популяциях тонконога тонкого и ковыля волосовидного, населяющих загрязненные радионуклидами участки, установлена повышенная частота хромосомных перестроек и патологий митоза.

Основной вклад в формирование цитогенетических эффектов вносят двойные мосты и фрагменты, что служит дополнительным доказательством радиационной природы наблюдаемых в популяциях тонконога тонкого и ковыля волосовидного изменений.

Значения точек перегиба отличаются для исследованных видов растений и видов цитогенетических нарушений. Наименьшая мощность дозы у тонконога тонкого (7 мкГр/ч) и у ковыля волосовидного (41,7 мкГр/ч) необходима для формирования одиночных мостов и фрагментов. Большинство aberrаций этого типа быстро репарируются. Гораздо большие мощности дозы у тонконога тонкого (74 мкГр/ч) и у ковыля волосовидного (49 мкГр/ч) требуются для увеличения частоты двойных мостов и фрагментов, которые могут вести к гибели клетки.

Порог для митотических аномалий фиксируется при наиболее высоких дозах (81 мкГр/ч для тонконога тонкого и 60,4 мкГр/ч для ковыля волосовидного).

Оценка полноты решения поставленных задач. В диссертационной работе поставленные задачи полностью решены. Впервые с использованием современных цитогенетических, физических и химических методов анализа проведены комплексные исследования растений, произрастающих на площадке «4А» Семипалатинского испытательного полигона и установлены основные пороговые дозы.

Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов. Проведение исследований на многолетних доминантных видах растений даст дополнительную информацию о последствиях радиоактивного загрязнения для растений, произрастающих на территории СИП. Проведенные исследования на наиболее загрязненных площадках территории СИП имеют важное значение для оценки отдаленных последствий для растений, произрастающих на территориях со сложной радиационной обстановкой.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области. Научный уровень выполненной работы достаточно высок, так как впервые с использованием современных цитогенетических, физических и химических методов анализа проведены комплексные исследования у растений, произрастающих на площадке «4А» Семипалатинского испытательного полигона и установлены основные пороговые дозы.

ВЫВОДЫ

1. Впервые на площадке «4А» СИП, где проходили испытания боевых радиоактивных веществ, выполнено комплексное исследование цитогенетических эффектов в популяциях типичных для Казахстана видов дикорастущих злаковых растений (тонконог тонкий и ковыль волосовидный), включающее оценку мощности эквивалентной дозы гамма-излучения, плотности потока бета-частиц с поверхности почвы, определение удельной активности радионуклидов и концентраций химических элементов в растениях, оценку поглощенных растениями доз и установление связи наблюдавшихся цитогенетических эффектов с поглощенной дозой.

2. Мощности поглощенной дозы на площадке «4А» менялись в широких пределах (тонконог тонкий ($0,1-4,5 \times 10^3$ мкГр/ч), ковыль волосовидный ($0,1-3,8 \times 10^3$ мкГр/ч)). Основную часть дозы растения получали от внутреннего облучения радионуклидом ^{90}Sr . Вклад внешнего облучения и внутреннего облучения от других радионуклидов в поглощенные растениями дозы незначителен.

3. На основе большого фактического материала (163 экспериментальные точки, широкий диапазон изменения мощности дозы $0,1-4,5 \times 10^3$ мкГр/ч) исследована форма зависимости частоты цитогенетических нарушений от логарифма мощности дозы в популяциях растений с площадки «4А», где проходили испытания боевых радиоактивных веществ. Показан нелинейный и пороговый характер выявленной зависимости. Для обоих видов основной вклад в спектр цитогенетических эффектов вносят двойные мосты и фрагменты.

4. Впервые установлена пороговая величина мощности дозы для тонконога тонкого и ковыля волосовидного, ниже которой частота цитогенетических эффектов в природных популяциях растений не превышает спонтанный уровень, а выше возрастает. Значения пороговых мощностей доз отличаются у разных видов растений и цитогенетических нарушений. Наименьшая мощность дозы у тонконога тонкого (7 мкГр/ч) и ковыля волосовидного (41,7 мкГр/ч) необходима для формирования одиночных мостов и фрагментов. Большие мощности дозы у

тонконога тонкого (74 мкГр/ч) и ковыля волосовидного (49 мкГр/ч) требуются для увеличения частоты двойных мостов и фрагментов. Порог для митотических аномалий наблюдается при большей мощности дозы (81 мкГр/ч для тонконога тонкого и 60,4 мкГр/ч для ковыля волосовидного).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БРВ – боевые радиоактивные вещества

ВУРС – Восточно-Уральский радиоактивный след

ИРБЭ РГП НЯЦ РК – «Институт радиационной безопасности и экологии»

Республиканское государственное предприятие Национальный ядерный центр
Республики Казахстан

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии

МЭД – мощность эквивалентной дозы

МКРЗ – Международная комиссия по радиационной

НКДАР – Научный комитет ООН по действию атомной радиации

СИП – Семипалатинский испытательный полигон

СССР – Союз Советских Социалистических Республик

ТМ – Тяжелые металлы

УА – удельная активность

ЧАЭС – Чернобыльская атомная электростанция

защите

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, В.И. Отдаленные последствия хронического облучения прозанника пятнистого *Hurochoeris maculata* L., произрастающего на Восточно-Уральском радиоактивном следе / В.И. Абрамов, И. С. Федотов, Е. В. Игонина [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2010. – Т. 50, №. 6. – С. 681–690.
2. Абрамов, В.И. Радиобиологические эффекты у растений, обитающих на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа / В.И. Абрамов, А.А. Степанова, С.А. Фамелис // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2010. – Т. 50, №. 3. – С. 345–351.
3. Айдосова, С.С. Влияние радиационного излучения на морфо-анатомическую структуру *Spireae hypericifolia* L. / С.С. Айдосова, Н.М. Мухитдинов, Н.З. Ахтаева [и др.] // Вестник НЯЦ РК. - 2004. – Вып. 1. – С. 29–35. – Библиогр.: с. 35.
4. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011 г.] / под рук. Лукашенко С. Н. – Вып. 3. – Павлодар: Дом печати, 2011. – т. 1,2. – 828 с.: ил. - ISBN 978-601-7112-51-6.
5. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011-2012 г.] / под рук. Лукашенко С. Н. – Вып. 4. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т. 1,2. – 870 с.: ил. - ISBN 978-601-7112-73-8.
6. Алов, И.А. Цитофизиология и патология митоза / И.А. Алов. - М.: Медицина, - 1972. – С. 170-172.
7. Албертс, Б. Молекулярная биология клетки: в 3-х т. / Албертс Б., Д.Брей, Дж. Льюис [и др.]; 2-е изд., пераб. М75 и доп.; пер. в англ. – М.: Мир, 1994. - Т.1. – 517 с.: ил. – Библиогр.: с. 317-320. – ISBN 5-03-001985-5.
8. Антонова, Е.В. Изменчивость семенного потомства костреца безостого в условиях хронического облучения зоны Восточно-Уральского радиоактивного

следа / Е.В. Антонова, В.Н. Позолотина, Э.М. Каримуллина // Экология. -2014. - № 6. – С.459-468.

9. Артюхов, В.Г. Цитогенетические показатели семенного потомства деревьев дуба черешчатого, подвергшихся воздействию радиоактивности в результате аварии на Чернобыльского АЭС и произрастающих на территориях с разным уровнем антропогенного загрязнения / В.Г. Артюхов, В.Н. Калаев // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2005. – Т. 45. - №. 5. – С. 619–628.

10. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / Под ред. Ю.А. Израэля. – М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2013. – 140 с.

11. Байганов Ж.К. Микропопуляции карликовых форм растений на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона / Ж.К. Байганов // Вестник Каз ГУ, серия экологическая. - 1999. - №5. – С. 58 – 60.

12. Батян, А.Н. Молекулярная и клеточная радиационная биология: учебное пособие / А.Н. Батян, И.Э Бученков, Н.Г. Власова [и др.]. – Минск: Вышэйшая школа, 2021. – 268 с.

13. Бочков, Н.П., Наследственность человека и мутагены внешней среды / Н.П. Бочков, Чеботарев А.Н. – М.: Медицина, 1989. – 269 с.

14. Бубряк, И. Долгосрочные последствия Чернобыльских радионуклидных загрязнений на репарацию ДНК и устойчивость растений к биотическим и абиотическим стрессовым факторам. / И. Бубряк, Т. Акимкина, В. Полищук [и др.] // Цитология и генетика. - 2016. - Т.50, №6. - С. 34-59.

15. Ванюшин, Б.Ф. Апоптоз у растений / Б.Ф. Ванюшин // Успехи биологической химии – 2001. – Т. 41. – С. 3-38.

16. Временные допустимые уровни содержания радионуклидов в объектах контроля Минсельхоза РК, не вошедших в перечень Минздрава Республики, 22.02.94.

17. Галицкий, Э.А. Радиобиология: Курс лекций / Э.А. Галицкий – Гродно: Гр Гу, 2001. – 204 с.

18. Генетические последствия радиоактивного загрязнения территории Семипалатинского испытательного полигона для природных популяций растений и животных: технический отчет (годовой; проект МНТЦК–759 за третий год)/ ДГП Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н.; рук. работ Кадырова Н.Ж. - Курчатов: ИРБЭ, 2010. – 177 с.

19. Гераськин С.А. Нелинейность зависимости частоты цитогенетических нарушений от содержания ^{90}Sr в растениях тонконога тонкого с территории Семипалатинского испытательного полигона / С.А. Гераськин, К.С. Минкенова, А.Н. Переволоцкий, Ж.А. Байгазинов, Т.В. Переволоцкая // Радиация и риск. – 2021. – Т. 30, № 2 – С. 77-88.

20. Гераськин С.А. Цитогенетические эффекты в популяциях ковыля волосовидного с территории Семипалатинского испытательного полигона / К.С. Минкенова, Т.В. Переволоцкая, А.Н. Переволоцкий // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2022. - Т. 62. - № 6. - С. 642-658.

21. Гераськин, С. А. Воздействие аварийного выброса Чернобыльского АЭС на биоту / С.А. Гераськин, С.В. Фесенко, Р.М. Алексахин // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – Т. 46. - №. 2. – С. 213-224.

22. Гераськин, С.А. Закономерности выхода структурных мутаций в корневой меристеме облученных ионизирующим излучением семян ячменя / С.А. Гераськин, Е.Я. Зяблицкая, А.А. Удалова // Радиационная биология. Радиоэкология. - 1997. - Т. 37, вып. 1. - С. 82-90.

23. Гераськин, С.А. Закономерности индукции γ -излучением структурных мутаций в корневой меристеме проростков семян гексаплоидной пшеницы / С.А. Гераськин, Е.Я. Зяблицкая, А.А. Удалова // Радиационная биология. Радиоэкология. - 1995. - Т. 35, вып. 2. - С. 137-149.

24. Гераськин, С.А. Закономерности формирования цитогенетических эффектов малых доз ионизирующего излучения: автореф. дис. ... д-ра биолог. наук: 03.00.01 / Гераськин Станислав Алексеевич. – Обнинск, 1998. - 52 с.

25. Гребенюк, А.Н. Радиационная медицина : учебное пособие - Ч. 1: Основы биологического действия радиации /А.Н. Гребенюк, В.И. Легеза, В.И. Евдокимов [и др.]. – СПб.: Политехника-сервис, 2016. - 124 с.

26. Глазко, Т.Т. Популяционно-генетические последствия экологических катастроф на примере Чернобыльской аварии / Т.Т. Глазко, Н.П. Архипов, В.И. Глазко. - М.: МСХА им. К.А. Тимирязева, 2008. – 556 с.

27. Гончарова, Н.В. Формирование семян сосны обыкновенной (PINUS SILVESTRIS) в условиях хронического облучения / Н.В. Гончарова, В.Ф. Ковалев // Экологический вестник. – 2017. – № 1 (39). – С. 48-52.

28. ГОСТ 27262-87 «Корма растительного происхождения. Методы отбора проб». – Введ. 1988-07-01. – Астана : Изд-во стандартов: госуд. стандарт Союза ССР, 1987. – 9 с.

29. Гродзинский, Д.М. Радиационное поражение растений в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС / Д.М. Гродзинский, И.Н. Гудков // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – Т. 46, №. 2. – С. 189–199.

30. Гродзинский, Д.М. Радиобиология растений: монография / Д.М. Гродзинский; отв. ред. Гудков И.Н.; Ин-т ботаники им. Н. Г. Холодного. - Киев: Наукова думка, 1989. - 384 с.: ил. – Библиогр.: с. 333-370; 800 назв. – 1560 экз. - ISBN 5-12001077-6.

31. Гудков, Д.И. Водная биота Чернобыльской зоны: Эффекты хронического радиационного воздействия на различных уровнях организации / Д.И. Гудков, Н.Л. Поморцева, Е.В. Дзюбенко [и др.] // Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Материалы межд. конф. (17-21 марта 2014 г., Сыктывкар, Республика Коми). – Сыктывкар, 2014. – С. 123-128.

32. Гудков, И.Н. Основы общей и сельскохозяйственной радиобиологии: / И.Н. Гудков – Киев: Изд-во УСХА, 1991. - 328 с.

33. Давыдов, С.Л. О людях и их свершениях: сборник воспоминаний ветеранов полигона / С.Л. Давыдов. - М.: Минобороны России. - 1997. – Ч. 1. – 394 с.

34. Даренская, Н.Г. Относительная биологическая эффективность излучений. Фактор времени облучения / Н.Г. Даренская, Л. Б. Кознова, И. Г. Акоев [и др.]; под ред. М. П. Домшлага. - М.: Атомиздат, 1968. – 376 с.
35. Деев Р.В. Современные представления о клеточной гибели / Р.В. Деев., Билялов А.И., Жампеисов Т.М. // Гены & Клетки. – 2018. - Т. XIII, №1. - С. 6-19.
36. Добровольский, В.С. Основы биогеохимии: учебник для студентов ВУЗ / В.С. Добровольский // М.: Академия, 2003. - 400 с. - ISBN: 5-7695-1098-6.
37. Дозиметры радиометры МКС-АТ6130, МКС-АТ6130А, МКС-АТ6130В. Руководство по эксплуатации. АТОМТЕХ Научно-производственное унитарное предприятие. – 84 с.
38. Дубинин, Н.П. Общая генетика / Н.П. Дубинин.; Ин-т общей генетики. – 2 е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1986. - 590 с.: ил.
39. Дурмекбаева, Ш.Н. Структура растений как показатель радиоактивного загрязнения / Ш.Н. Дурмекбаева, Н.М. Мухитдинов, С. С. Айдосова // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: материалы межд. научно-практической конф. (9-11 февраля 2000 г., Семипалатинск). – Семипалатинск: СГУ им. «Шакарима», 2000. – С. 221-222.
40. Ермекова, С.А. Молекулярная биология: учебник / С.А.Ермекова; Казахстанско-Российский медицинский университет. – Алматы: МЗРК, 2017. – 592 с.: ил. – Библиогр.: с. 552-553; 35 назв.
41. Жариков, С.К. Радиоэкологическое обследование южной части территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона / С.К. Жариков. – Вестник НЯЦ. – 2000. – Вып. 3. – С.58-61. – Библиогр.: с. 60.
42. Жученко, А.А. Генетика: учеб. пособие для ВУЗов / А.А Жученко, Ю.Л. Гужов, В.А. Пухальский; под ред. А. А. Жученко. - М.: Колос, 2004. - 480 с.: ил. – Библиогр.: с. 468. - ISBN 5-9532-0069-2.
43. Зайчкина, С.И. Связь радиочувствительности различных стадий клеточного цикла с процессами восстановления (на примере проростков VICIA FABA) / С.И. Зайчкина, Г.Ф. Аптикаева, Э.Е. Ганасси // Радиобиология. – 1973. – Т. 13, вып. 5. – С. 754–757.

44. Зяблицкая, Е.Я. Кинетика формирования поглощенных доз и влияние хронического β -излучения на цитогенетические показатели и урожай у ячменя / Е.Я. Зяблицкая, В.А. Кальченко, Р.М. Алексахин [и др.] // Радиобиология. - 1984. - Т. 24, вып. 6. - С. 774-778.

45. Иванова. А.Р. Методические особенности подготовки проб растений для определения радионуклида Cs-137. / Иванова, А.Р. Ларионова, Н.В. Лукашенко, С.Н. // Вестник НЯЦ РК. - 2015. вып. 1. – С. 85-88.

46. Израэль, Ю.А Чернобыль: Радиоактивное загрязнение природных сред: монография / Ю.А. Израэль, С.М. Вакуловский, В.А. Ветров [и др.]; ред. Ю.А. Израэль. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. - 295 с. - ISBN 5-286-00799-6.

47. Инструктивно-методические указания по работе санитарно-эпидемиологических станций в области радиационной гигиены/ М-во здрав. СССР. Гос. сан. инспекция СССР. - Москва: Медгиз, 1960. - 136 с.: ил. - Библиогр.: с. 132-133.

48. Инструкция по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории: утв. Межвед. комис. по рад. контролю природной среды при Госкомгидромете СССР 17.03.1989. - М.: Всесоюзный центр наблюдения и лабораторного контроля, 1992. – 23 с.

49. Исследование полигона, изучение вариантов по оценке и ремедиации возможных площадок для размещения хранилища отработанного ядерного топлива на Семипалатинском испытательном полигоне в Казахстане: отчет о НИР (итоговый), по проекту МНТЦ К-1323р./ ДГП Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н.; рук. работ Стрильчук Ю.Г. – Курчатова: ИРБЭ, 2007. – 65 с.

50. Йощенко, В.И. Эффекты хронического облучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Чернобыльской зоне отчуждения / В.И. Йощенко, В.А. Кашпаров, С.Е. Левчук [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2010. – Т. 50, № 6. – С. 632–641. – Библиогр.: с 641.

51. Кадырова, Н.Ж. Исследование полиморфизма белков популяций растений Семипалатинского испытательного полигона / Н.Ж. Кадырова, Г.А. Исмагулова,

Ш.К. Мурумбаева [и др.] // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. - 2012. - №5. - С. 7-13. – Библиогр.:с. 12.

52. Кадырова, Н.Ж. Радиобиологические и цитогенетические аспекты последствий хронического воздействия ионизирующих излучений Семипалатинского испытательного полигона на природные популяции растений и животных: монография / Н.Ж. Кадырова, Р. Жапбасов. – Павлодар: Дом печати, 2019. - 308 с. - ISBN 978-601-7844-94-3.

53. Казакова, Е.А. Анализ изменений генетической структуры хронически облучаемых популяций сосны обыкновенной. / Е.А. Казакова, П.Ю. Волкова, С.А. Гераськин. // Экологическая генетика. - 2017. - Т. 15, №2. - С. 50-61.

54. Казакова, Е.А. Полиморфизм глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы в хронически облучаемых популяциях сосны обыкновенной / Е.А. Казакова, Волкова П.Ю., Гераськин С.А. [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. - 2015. - Т. 55. - № 4. - С. 389-394.

55. Кальченко, В.А. Генетические эффекты облучения популяций растений при радиоактивном загрязнении среды: автореф. дис. ...д-ра биолог. наук: 03.00.15 / Кальченко Василий Арсентьевич. – Москва, 1998. - 47 с.

56. Кальченко, В.А. Цитогенетические эффекты в популяциях растений, произрастающих на Восточно-Уральском радиоактивном следе / В.А. Кальченко, В.И. Абрамов, А.В. Рубанович [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. - 2002. Т. 42, №6. - С. 745-749.

57. Карамышева, З.В. Ботаническая география степной части Центрального Казахстана / З.В. Карамышева, Е.И. Рачковская. – Л.: Наука, 1973. – 278с.

58. Карпюк, Т.В. Биология с основами цитологии: учеб. пособие [электронный ресурс] / Т.В. Карпюк. – Красноярск. Краснояр. Гос. Аграр. Ун-т. 2018. – 282 с.

59. Климентова Е.Г. Приспособление и устойчивость растений: Учебное пособие для студентов экологического факультета / Е.Г. Климентова., Г.А. Сатаров., Т.А. Зудова. Ульяновск: УлГУ. – 2006. – 53 с.

60. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. - 816 с. - ISBN 5-9221-0707-0.

61. Комплексные исследования сейсмической, радиационной и санитарноэпидемиологической обстановки района Семипалатинского полигона при подземных ядерных взрывах: отчет о НИР / НПО "Радиевый институт"; рук. Дубасов Ю.В.; исп. Кривохатский А.С., Баранов Ю. И. – С/Пб, 1992. – 72 с.

62. Кондратьев, М.Н. Влияние абиотических стрессов на метаболизм вторичных соединений в растениях / М.Н. Кондратьев., Е.С. Роньжина., Ю.С. Ларинова // Известия КГТУ. – 2018. – № 49. . – С. 203-219. – Библиогр.: с. 212-215; 46 назв.

63. Коровин, В.В. Качество древесины в лесах загрязненных радионуклидами / В.В. Коровин, А.Н. Чилимов // Современные проблемы древесиноведения: Сб. матер. науч. сес. координац. сов. России (2-4 октября 1996 г., Йошкор–Ола). - Йошкор–Ола, 1996. – С. 18 – 20.

64. Кравец, Е.А. Восстановление структурной архитектоники меристемы корня после радиационного воздействия / Е.А. Кравец, В.В. Бережная, В.И. Сакада [и др.] // Доповіді Національної академії наук України. - 2012. - № 5. - С. 152-157.

65. Кузин, А.М. Стимулирующее действие ионизирующего излучения на биологические процессы / А.М. Кузин. - М.: Атомиздат, - 1997. -132 с.: ил.

66. Кундузбаева, А.Е. Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах испытательной площадки боевых радиоактивных веществ / А.Е. Кундузбаева, А.Ю. Осинцев, С.Н. Лукашенко [и др.] // Актуальные вопросы радиозащиты Казахстана / Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Павлодар: Дом печати, 2013. - Вып. 4: Сб. тр. Национального ядерного центра РК за 2011-2012 гг., Том 2. - С. 167-179. – Библиогр.: с. 177-178.

67. Лазаревич, Н.В. Радиобиология: учебно-методическое пособие / Н.В. Лазаревич, И.И. Сергеева, С.С. Лазаревич. – Горки: БГСХА, 2014. - 168 с.

68. Лакин, Г.Ф. Биометрия: учеб. пособие для биол. спец. ВУЗов / Г.Ф. Лакин. - 4-е изд., перераб и доп. - М.: Высш. шк., 1990. - 352 с. – ISBN 5 06 000471-6.

69. Ларин, В.И. Комбинат «Маяк» - проблема на века / В.И. Ларин. – 2-е изд. перераб. и доп. - М.: КМК, 2001. – 504 с.: ил. – Библиогр.: с. 371-379.

70. Ларионова, Н.В. Накопление искусственных радионуклидов растениями на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона: автореф. дис. ...канд. биол. наук: 03.01.01 / Ларионова Наталья Владимировна. – Обнинск, 2013. – 23 с.

71. Лифарева, Н.А. Биология клетки: Цитология и гистология: учебно-методическое пособие // Н.А. Лифарева. Павлодарский государственный педагогический институт. – Павлодар: ПГПИ, 2011. – 300 с.: ил. - Библиогр.: с. 299; 8 назв. – 500 экз. - ISBN 978-601-267-137-7.

72. Логачев, В.А. Радиоэкологические последствия испытаний БРВ на Семипалатинском полигоне / В.А. Логачев // Бюллетень по атомной энергии. – 2002. – №12. – С. 62-67.

73. Лукашенко С.Н. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Радиоэкологическое состояние «северной» части Семипалатинского испытательного полигона: монография / под ред. С. Н. Лукашенко. – Павлодар: ТОО «Дом печати», 2010. – Вып. 1. – 234 с.: ил. – Библиогр.: с. 224-231. – ISBN 978-601-7112-28-8.

74. Макарова, Т.Н. Биология. Основы общей биологии и экологии, растения, вирусы, бактерии, лишайники: учебное пособие / Т.Н.Макарова. – Троицк, 2018. – 265 с.

75. Манских В.Н. Пути гибели клетки и их биологические значение / В.Н. Манских // Цитология. – 2007. - Т. 48, №11. - С. 909-915.

76. Методика выполнения измерений «Определение удельной активности искусственных радионуклидов плутония- (239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды: почвах, грунтах, донных отложениях и растениях» МЭ РК. - Зарегистрирован РГП «Казахстанский институт метрологии», № KZ.07.00.03445-2016 от 24.11.16 г. Алматы: РГП «Институт ядерной физики», 2017.

77. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного бета-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс»: зарегистр 26.08.2004 г. № KZ.07.00.00303-2004. - Менделеево: ГНМЦ «ВНИИФТРИ», 2004. – 22 с.

78. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях): утв. и.о. ген. Директора РГП ИЯФ 10.10.2016: зарегистр. в реестре ГСИ РК 24.11.2016 № KZ.07.00.03445-2016. - Алматы: РГП ИЯФ РК, 2016. – 26 с.

79. МИ 2143-91 РК. "Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре". - Введ. 1998-06-02. - Рег. № 5.06.001.98. – М.: НПО ВНИИФТРИ, 1991.-18 с.

80. Минкенова, К.С. Исследования влияния трития на морфо-анатомические и цитогенетические показатели растений / К.С. Минкенова, А.Б. Янкаускас, К.С. Каримбаева [и др.] // Актуальные вопросы радиэкологии Казахстана/ Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Павлодар: Дом печати, 2013. - Вып. 4.: Сб. тр. Национального ядерного центра РК за 2011-2012 гг., Т. 2. – С. 311-331. – Библиогр.: с. 328-331.

81. Минкенова, К.С. Оценка уровня мутирования хромосомного аппарата *Agropyron cristatum* / К.С. Минкенова, А.Б. Бигалиев, К.С. Каримбаева [и др.]// Вестник НЯЦ. – 2007. – Вып. 4. – С. 57-62. – Библиогр.: с. 61-62.

82. Минкенова, К.С. Цитогенетические изменения тонконога (*Coeleria gracilis* Pers), произрастающего в местах испытания боевых радиоактивных веществ на Семипалатинском испытательном полигоне / К.С. Минкенова, Ж.А. Байгазинов, С.Н. Лукашенко [и др.] // Актуальные вопросы радиэкологии Казахстана/ Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Павлодар: Дом печати, 2017. - Вып. 6: Сб. тр. Национального ядерного центра РК за 2014-2016 гг., Т. 2. – С. 185-202. – Библиогр.: с. 199-202.

83. Михеев А.Н. Малые «дозы» радиобиологии. Моя маленькая радиобиологическая вера: монография / А.Н. Михеев. Киев: Фитосоциоцентр, 2016. - 371 с. ISBN 978-601-7844-94-3.

84. Мозолин Е.М. Радиобиологические эффекты у растений и животных Семипалатинского испытательного полигона/ Е.М. Мозолин, С.А. Гераськин, К.С.

Минкенова // Радиационная биология. Радиэкология. – 2008. - Т. 48. - №4. - С. 422-432.

85. Назарбаев, Н.А. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние: монография в 3 т./ Н.А. Назарбаев, В.С. Школьник, Э.Г. Батырбеков [и др.]; РГП Национальный ядерный центр РК. – Павлодар: «Дом Печати», 2016. – т. 2. - 448 с.: ил. – 700 экз. - ISBN 978-9965-675-95-9.

86. О научно-технической деятельности института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, выполненной в составе мероприятия 1 "Реализация научно-технической программы развитие атомной энергетики в Республике Казахстан": отчет НТП 003 за 2012 год (промежуточный; дог. № 1/3 от 20.02.2012 г.) / ДГП Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н. – Курчатов, 2012. – 216 с. – Библиогр.: с.211-116; 156 назв.

87. Оптимизация исследований территорий Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот: монография/ под рук. С. Н. Лукашенко// Актуальные вопросы радиэкологии Казахстана/ Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Павлодар: ТОО «Дом печати», 2015. - Вып. 5. – 357 с.: ил. – Библиогр.: с.332-349. - ISBN 978-601-7112-99-8.

88. Осинцев А.Ю. О характере поверхностного загрязнения искусственными радионуклидами испытательной площадке 4 и «4А» расположенных в пределах Семипалатинского испытательного полигона / А.Ю. Осинцев., Р.А. Нефедов // Биологические науки. – 2015. – №. 1. – С. 121-122.

89. Осинцев, А.Ю. Исследование характера и уровней радиоактивного загрязнения площадки испытаний боевых радиоактивных веществ / А.Ю. Осинцев, С.Е. Сальменбаев // Актуальные вопросы радиэкологии Казахстана/ Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. - Павлодар: Дом печати, 2013. – Вып. 4: Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011-2012 г., Т.1. - С. 189-201. – Библиогр.: с. 199-200.

90. Отюцкий, Г.П. Концепции современного естествознания: учебник и практикум для прикладного бакалавриата / Г.П. Отюцкий; под ред. Г.Н. Кузьменко. - М: Юрайт, 2017. – 380 с.

91. Паушева, З.В. Практикум по цитологии растений: учебное пособие для студентов / З.В. Паушева. – 3-е изд., перераб. и доп.– М.: Колос, 1980. – 304 с.: ил. – Библиогр.: с. 296-300.

92. Переволоцкий А.Н. Модель расчета мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы в острую фазу радиоактивных выпадений / А.Н. Переволоцкий, Е.В. Спирин, Т.В. Переволоцкая, С.И. Спиридонов // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2018. - Т. 58. - №4. - С. 415-424.

93. Подготовка проб для элементного анализа способом автоклавного разложения в лаборатории элементного анализа отдела аналитических исследований: рабочая инструкция: утв. рук. филиала ИРБЭ РГП НЯЦ РК 03.05.2018 г.: исп. центр «Центр радиоэкологических исследований». – Курчатов: ДГП ИРБЭ НЯЦ РК, 2018. – 13 с.

94. Позолотина, В.Н. Анализ современного состояния наземных экосистем на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа / В.Н. Позолотина, Молчанова, Е.Н. Караваева [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – Т. 49, №5. - 2007. – С. 32-44.

95. Позолотина, В.Н. Отдаленные последствия хронического облучения растений в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа / В.Н. Позолотина, И.В. Молчанова, Е.Н. Караваева [и др.] // Радиобиология. – 1992. – Т. 32, вып. 6. – С. 851-855.

96. Позолотина, В.Н. Оценка радиационного воздействия на ценопопуляции звездчатки злаковой в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа / В.Н. Позолотина, Е.В. Антонова, Э.М. Каримуллина // Экология. - 2010. - № 6. - С. 403-413.

97. Позолотина, В.Н. Современные уровни радионуклидного загрязнения ВУРСа и биологические эффекты в локальных популяциях *Plantago major* L. / В.Н.

Позолотина, Молчанова И.В., Михайловская Л.Н. [и др.] // Экология. - 2005. - №5. - С. 353-361.

98. Прохорова, И.М. Оценка митотоксического и мутагенного действия факторов окружающей среды: Методич. указания. / И.М. Прохорова, М.И. Ковалева, А.Н. Фомичева - Ярославль.: ЯрГУ, 2003. – 32 с.

99. Птицкая Л.Д. Исследование очагов загрязнения природной среды территории Семипалатинского полигона и разработка программы реабилитации экологии / Л.Д. Птицкая, О. И. Артемьев [и др.]. – Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК, 1998. – 97 с.

100. Радиологическая характеристика площадок «4» и «4А» бывшего Семипалатинского испытательного полигона: отчет о НИР за 2005 г. (итоговый; дог. № NUCFSU2001/85756/KNNC/1-1)/ Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК; рук. Птицкая Л.Д.; исп. Стрильчук Ю. Г. [и др.]. - Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК, 2005. – 60 с. – Библиогр.: с. 31; 5 назв.

101. Республиканская бюджетная программа 038 «Обеспечение радиационной безопасности на территории РК. Мероприятие 1 "Обеспечение безопасности бывшего СИП": отчет за 2011 г. (информац.; дог. № 1/3 от 09.02.2011 г.) / ДГП Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н.; рук. работ Стрильчук Ю.Г. – Курчатов, 2011. – 165 с. – Библиогр.: с. 163-165; 58 назв. – Прил. с.182-506.

102. Рузавин, Г.И. Концепции современного естествознания: учебник для бакалавров /Г.И. Рузавин. – М.: Проспект, 2013. - 279 с. - ISBN 978-5-392-10417-8.

103. Руководство по эксплуатации спутникового навигационного прибора «Garmin», 1999.

104. Самуилов, В.Д. Программируемая клеточная смерть / В.Д. Самуилов, А.В. Олескин, Е.М. Лагунова // Биохимия. - 2000. - Т.65, Вып. 8. - С. 1029-1046.

105. Самуилов, В.Д. Программируемая клеточная смерть у растений / В.Д. Самуилов // Соросовский Образовательный Журнал. - 2001. - Т.7, № 10. - С. 12-17.

106. Сейсебаев, А.Т. Особенности цитогенетической структуры растений отдельных участков Семипалатинского испытательного полигона с различным

уровнем радиоактивного загрязнения / А.Т. Сейсебаев, Кадырова Н.Ж., Минкенова К.С. [и др.] // Вестник НЯЦ РК. - 2004. - Вып 1. – С. 36-40. – Библиогр.: с. 39.

107. Скок, А.В. Исследования генетического материала сосны обыкновенной в условиях ионизирующего облучения / А.В. Скок, С.Н. Шлапакова // Пермский аграрный вестник. - 2017. - № 2 (18). – С. 63-67.

108. Скрипников М.В. Площадное радиационное обследование мест проведения испытаний боевых радиоактивных веществ на испытательной площадке «4» Семипалатинского испытательного полигона / М.В. Скрипников., А.О Айдарханов., М.А. Умаров., Е.В. Мустафина., П.Е. Кривицкий // Вестник НЯЦ РК – 2020. Вып. 1(81). - С. 82-86. – Библиогр.: с. 86.

109. Современное радиозэкологическое состояние полигонов. Факты. Свидетельства. Воспоминания: монография/ ред. гр. Н. П. Волошин, К. Н., Даниленко, Ю. В. Дубасов [и др.]; под рук. В.А. Логачева//Ядерные испытания СССР/ Федер. Упр. медико-биол. и экстремальных проблем при Мин. Здравоохран. РФ [и др.]. – М.: ИздАТ, 2002. – 652 с.: ил. – ISBN 5-86656-135-2.

110. Стожаров, А.Н. Радиационная медицина: учебное пособие / А.Н. Стожаров, Л.А. Квиткевич, Г.А. Солодкая и др. Мн.: МГМИ, 2000. - 154 с.

111. Стрельчук, С.И. Основы экспериментального мутагенеза: учеб. пособие для студ. биолог. фак-тов ун-тов / С.И. Стрельчук. – Киев: Вища школа, – 1981. – 215 с.: ил.

112. Султанова, Б.М. Ценозообразователи антропогенно-производных сообществ в местах проведения наземных и подземных ядерных взрывов на СИП. – Алматы 1998.- 60 с.

113. Тимофеев-Ресовский, Н.В. Введение в молекулярную радиобиологию / Н.В Тимофеев-Ресовский, А. В Савич, М. И. Шальнов. - Москва: Медицина, 1980. - 320 с.

114. Тимофеев-Ресовский, Н.В. Применение принципа попадания в радиобиологии/ Н.В. Тимофеев-Ресовский, В.И. Иванов, В.И. Корогодин. - М.: Атомиздат, 1968. – 228 с.

115. Титов, А.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Казнина, Г.Ф. Лайдинен; отв. ред. Немова Н.Н.; Институт биологии Кар НЦ РАН. – Петрозаводск; Карельский научный центр РАН, 2007. – 172 с.: ил. – Библиогр.: с. 36-39; - 300 экз. – ISBN 978-5-9274-0268-7.

116. Тихомиров Ф.А. Действие ионизирующих излучений на экологические системы / Ф.А. Тихомиров. – Москва.: Атомиздат, – 1972. – С.54.

117. Ульяненко, Л.Н. Оценка состояния окружающей среды по реакции сельскохозяйственных растений на действие ионизирующих излучений / Л.Н. Ульяненко., А.А. Удалова // Радиация и риск – 2015. – Т. 24. – № 1. – С. 118-131.

118. Ульянова, Е.В. Изменчивость ферментных систем в ценопопуляциях одуванчика лекарственного из зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа / Е.В. Ульянова, В.Н. Позолотина // Радиационная биология. Радиоэкология. - 2004. - Т. 44. - №5. - С. 598-603.

119. Федотов, И.С. Радиационно-генетические последствия облучения популяции сосны обыкновенной в зоне аварии на ЧАЭС / И.С. Федотов, В.А. Кальченко, Е.В. Игонина [и др.]. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – Т. 46, №. 3. – С. 268–278.

120. Флора Сибири. Poaceae (Gramineae): в 14 томах / Г.А. Пешкова, О.Д. Никифорова, М.Н. Ломоносова [и др.]; под ред. Л.И. Мальшева, Г.А. Пешковой. – Новосибирск: Наука, 1990. – Т.2. – 361 с. – ISBN 5-02-0289485.

121. Фомичева, А.С. Программированная клеточная смерть у растений / А.С. Фомичева, А.И.Тужиков, Р.Е. Белошистов [и др.] // Успехи биологической химии. – 2012. – Т. 52. - С. 97-126. – Библиогр.: с. 121-126.

122. Фролов, Ю.П. Управление биологическими системами. Надорганизменный уровень / Ю.П. Фролов, Г.С. Розенберг; под ред. Ю.П.Фролова. - Самара: Самарский ун-т, 2002. - 192 с. - ISBN 5-86465-210-5.

123. Характеристика радиационной обстановки в районах, прилегающих к месту испытаний ядерного оружия, и состояние здоровья местного населения: отчет о НИР/ ИБФ; Кобзев А. Ф., Шорохов А. И., Агранат В. З. [и др.]. - Москва, 1960. – 450 с.

124. Храмченкова, О.М. Основы радиобиологии: учебное пособие для студентов биологических специальностей высших учебных заведений / О.М. Храмченкова. – Гомель: УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2003. – 238 с.

125. Цвелев Н.Н. Злаки СССР: монография / Н.Н. Цвелев, отв. ред. А.А. Федоров. – Ленинград: Наука, 1976. – 788 с.

126. Шевцова, Н.Л. Цитогенетические последствия хронического радиационного воздействия на локальные ценопопуляции *PHRAGMITES AUSTRALIS* в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения / Н. Л. Шевцова, Д.И. Гудков // Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Материалы межд. конф. (17-21 марта 2014 г., Сыктывкар, Республика Коми). – Сыктывкар, 2014. – С. 345-349.

127. Шевченко, В.А. Естественный и индуцированный мутационный процесс у хлореллы / В.А. Шевченко // Успехи соврем. генетики. - 1962. - Т. 1. - С. 246-278.

128. Шевченко, В.А. О генетической адаптации популяции хлореллы к хроническому воздействию ионизирующей радиации / В.А. Шевченко // Генетика. - 1970. - Т. 6, № 8. - С. 64-73.

129. Шевченко, В.А. Радиационная генетика одноклеточных водорослей / В.А. Шевченко. - М.: Наука, 1979. – 256 с.: ил. - Библиогр.: с. 223-254.

130. Шевченко, В.А. Радиационная генетика природных популяций: генетические последствия Кыштымской аварии / В.А. Шевченко, В.Л. Печкуренок, В.И. Абрамов // М.: Наука, 1992. - 221 с.: ил. - Библиогр.: с. 206-219. - ISBN 5-02-004182-3.

131. Шевченко, В.В. Цитогенетические эффекты в природных популяциях *Среpis tectorum*, подвергшихся хроническому облучению в районе Чернобыльской АЭС / В.В. Шевченко, Л.И. Гриних // Радиобиология. –1990. – Т. 30, вып. 6. – С. 728-734.

132. Шималина, Н.С. Особенности про и антиоксидантных систем *Plantago Major*, длительное время произрастающего в зоне радиоактивного загрязнения / Н.С. Шималина, Н.А. Орехова, В.Н. Позолотина // Экология. - 2018. – № 5. –С. 333-341.

133. Янкаускас, А.Б. Исследование морфо-анатомических показателей растений, произрастающих в местах испытания боевых радиоактивных вещества / А.Б. Янкаускас, Н.В. Ларионова, А.Н. Шатров // Современные проблемы радиологии и агроэкологии, пути реабилитации техногенно-загрязненных угодий: сб. докладов межд. конф. (15 декабря 2016 г., Обнинск). – Обнинск, 2016. – С. 208-212. – Библиогр.: с. 211-212.

134. Ярмоненко, С.П. Радиобиология человека и животных: учебное пособие / С.П. Ярмоненко. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. Школа, 1988. – 424 с.: ил. – Библиогр.: с. 412-413. – 10000 экз. - ISBN 5-06-000469-4.

135. Andersson P. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: Proposed levels, underlying reasoning and recommendation. Andersson P., Beaugelin-Seiller K., Beresford N.A., et al. Deliverable 5: Report for the PROTECT Project. EC Contract Number: 036425 (FI6R). 2008.

136. Andersson, P. Protection of the environment from ionizing radiation in a regulatory context (protect): proposed numerical benchmark values/ P. Andersson, J. Garnier-Laplace, N.A. Beresford [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2009. - Vol. 100 (12). - P. 1100-1108. – References: p. 1106-1008.

137. Burger, A. Strontium in the environment: Review about reactions 366 of plants towards stable and radioactive strontium isotopes/ A. Burger, I. Lichtscheidl //Science of the Total Environment. - 2019. – Vol. 653. – P. 1458-1512.

138. Cross W.G. Empirical Expressions for beta ray point source dose distributions / W.G. Cross // Radiation Protection Dosimetry. 1997. Vol. 69. P. 85-96

139. Feinendegen, L.E. Biologic responses to low doses of ionizing radiation: detriment versus hormesis. Part 1. Dose responses of cells and tissues./ L.E. Feinendegen, M. Pollycove //Journal of Nuclear Medicine. - 2001. – Vol. 42, Ed. 7. – P. 17N-27N.

140. Garnier-Laplace, J. 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. Garnier-Laplace, S. Geras'kin, C. Della-Vedova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. - 2013. - Vol. 121. - P. 12-21.

141. George, J.T. Non-linear dose response of a few plant taxa to acute gamma radiation/ J.T. George, B.B. Patel, V.A. Rane [et al.] //Cytologia. - 2014. - Vol. 79, Is. 1. - P. 103-109.

142. 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.

143. Geras'kin, S. Scots pine as a promising indicator organism for biomonitoring of the polluted environment: A case study on chronically irradiated populations / S. Geras'kin, P. Volkova, D. Vasiliyev [at all]. // Mutation Research. - 2019. - V. 842. - P. 3-13.

144. Geras'kin, S.A. Chronic radiation exposure modifies temporal dynamics of cytogenetic but not reproductive indicators in Scots pine populations/ S.A. Geras'kin, A. Oudalova, A. Kuzmenkov [et al.] // Environmental Pollution. – 2018. – Vol. 239. - P. 399-407.

145. Geras'kin, S.A. Ecological effects of exposure to enhanced levels of ionizing radiation / S.A. Geras'kin // J. Environ. Radioactivity. - 2016. V. 162-163. P. 347-357.

146. Geras'kin, S.A. Effects of long-term chronic exposure to radionuclides in plant populations / S.A. Geras'kin, T.I. Evseeva, A.A. Oudalova // Journal of Environmental Radioactivity. - 2013. - V. 121. - P. 22-32.

147. Geras'kin, S.A. Genetic consequences of radioactive contamination by the Chernobyl fallout to agricultural crops / S.A. Geras'kin, V.G. Dikarev, Ye.Ya. Zyablitskaya [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2003. – Vol. 66. – P. 155–169.

148. Geras'kin, S.A. Effects of chronic exposure in populations of *Koeleria gracilis* Pers. from the Semipalatinsk nuclear test site, Kazakhstan/ S.A. Geras'kin, A.A. Oudalova, V.G. Dikarev [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. - 2012. - Vol. 104. - P. 55-63.

149. Geras'kin, S.A. Threshold dose rates for the cytogenetic effects in crested hairgrass populations from the Semipalatinsk nuclear test site, Kazakhstan / S.A.

Geras'kin, K. Minkenova, A. Perevolotsky [et al.] // Journal of Hazardous Materials. - 2021. – Vol. 416, №125817. - P. 1-9. - References: p. 8-9.

150. Geras'kin, S.A. Cytogenetic effect of low dose γ -radiation in *Hordeum vulgare* seedlings: non-linear dose-effect relationship/ S.A. Geras'kin, A.A. Oudalova, J.K. Kim [et al.] // Radiation and Environmental Biophysics. - 2007. – Vol. 46, Is. 1. – P. 31-41. – References: p. 39-41.

151. Geras'kin, S.A. Effects of chronic exposure in populations of *Koeleria gracilis* Pers. from the Semipalatinsk nuclear test site, Kazakhstan / S.A. Geras'kin, A.A. Oudalova, V.G. Dikarev [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. - 2011. – Vol. 104, Is. 1. - P. 55-63.

152. Geras'kin, S.A. Multifaceted effects of chronic radiation exposure in Japanese red pines from Fukushima prefecture / S. Geras'kin, V. Yoschenko, S. Bitarishvili, E. Makarenko, D. Vasiliev, A. Prazyan, M. Lychenkova, K. Nanba // Science of the Total Environment. - 2021. -Vol. 763. 142946.

153. Groffman, P.M. Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application?/ P.M. Groffman, J.S. Baron, T. Blett [et al.] // Ecosystems. - 2006. - Vol. 9, Is.1. - P. 1-13. - References: p. 11-13.

154. Henderson, L. Thresholds in genotoxicity responses/ L. Henderson, S. Albertini, M. Aardema // Mutation Research. - 2000. – Vol. 464, Is.1. – P. 123-128.

155. Howard, B.J. Radiostrontium contamination of soil and vegetation within the Semipalatinsk test site/ B.J. Howard, N. Semioschkina, G. Voigt [et al.]. - Radiation and Environmental Biophysics. – 2004. - Vol. 43, Is. 4. – P. 285-292.

156. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).

157. ICRP, 2008. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. In Publication 108. Ann. ICRP, 38 (4-6).

158. ICRP, 2017. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. Ann. ICRP 46 (2).

159. Karamullina, E.M. Radionuclide uptake and dose assessment of 14 herbaceous species from the East-Ural radioactive trace area using the ERICA Tool/ E.M. Karamullina L.N. Mikhailovskaya, E.V. Antonova [at al.] // Environmental Science Pollution Research. - Vol 25, Is. 14. – P. 13975-13987.

160. Koana, T. A threshold exist in the dose-response relationship for somatic mutation frequency induced by X irradiation of *Drosophila*/ T. Koana, Y. Takashima, M.O. Okada, [et al.] // Radiation Research. - 2004. – Vol. 161, Is. 4. – P. 391-396.

161. Laeter, J.R. Isotopic Compositions of the Elements 1989/ J.R. Laeter, K. Heumann, K. Rosman// Pure and Applied Chemistry. – 1991. - Vol. 63, №.7. – P. 991-1002.

162. Larionova, N.V. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site / N.V. Larionova S N Lukashenko, A M Kabdyrakova [at all.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – V. 186. – P. 63–70.

163. Locato, V. Programmed Cell Death in Plants: An Overview/ V. Locato, L. De Gara// Plant Programmed Cell Death. Methods in Molecular Biology. - New York: Humana Press, 2018. – Vol. 1743. – P 1-8. – ISBN 978-1-4939-7668-3.

164. Lutz, W.K. Statistical model to estimate a threshold dose and its confidence limits for the analysis of sublinear dose-response relationships, exemplified for mutagenicity data/ W.K. Lutz, R.W. Lutz // Mutation Research. - 2009. – Vol. 678, Is. 2. – P. 118-122.

165. Manahan, S.E. Fundamentals of Environmental and Toxicological Chemistry/ S.E. Manahan. - 4th Edition. - Taylor Francis & Group: CRC Press, 2013. - 614 p. – ISBN 978-1-4665-5317-0.

166. Minkenova K. S. Cytogenetic effects in crested hairgrass from a site where tests of military radioactive substances were conducted at the Semipalatinsk test site / Zh. A. Baigazinov, S. A. Geras'kin, A. N. Perevolotsky // Biology Bulletin. – 2020. - Vol. 47. - No. 12. - P. 1637-1650.

167. Okada, H. Pathways of apoptotic and non-apoptotic death in tumor cells/ H. Okada, T. W. Mak //Nature Reviews Cancer. – 2004. – Vol. 4(8). – P. 592-603.

168. Pennell R.I. Programmed cell death in plant / R.I. Pennell., C. Lamb // The plant cell. – 1997. - Vol. 9. - C. 1157-1168.

169. Schafer, R.B 2012. Thresholds for the effects of pesticides on invertebrate communities and leaf breakdown in stream ecosystems / R.B. Schafer, von der Ohe, P.C., J. Rasmussen, B.J.Kefford, [et.al.] Environmental Science. Technology. -2012. Vol. 46, 5134-5142.

170. Senko, O.V. A method for estimating adequacy of approximation models/ O.V. Senko // Pattern Recognition and Image Analysis. - 2001. – Vol. 11, № 1. – P. 85 86.

171. Sparrow, A.H. Radiation sensitivity of cells during mitotic and meiotic cycles with emphasis on possible cytochemical changes/ A.H. Sparrow // Annals of the New York Academy of Sciences. - 1951. - Vol. 51. - P. 1508–1540.

172. Streffer, C. Low dose exposures in the environment. Dose-effect relations and risk evaluation/ C. Streffer, H. Bolt, D. Follesdal [et al.]. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. - 471 p. – ISBN 978-3-662-08422-9.

173. Swallow, W. Using robust scaler estimates in detecting multiple outliers in linear regression/ W. Swallow, F. Kianifard//Biometrics. - 1996. – Vol. 52, Is. 2. - P. 545–556.

174. Turuspekov, Y. Genetic diversity in three perennial grasses from the Semipalatinsk nuclear testing region of Kazakhstan after long-term radiation exposure / Turuspekov Y., Adams R. P., Kearney C. M. // Biochemical Systematics and Ecology. - 2002. - V.30. - P. 809-817.

175. Veylder, L. De. Molecular control and function of endoreplication in development and physiology/ L.De Veylder, J.C. larkin, A. Schnittger // Trends in Plant Science. - 2011. – Vol. 16, Is. 11. – P. 624-634.

176. Volkova, P.Yu. Chronic radiation exposure as an ecological factor: hypermethylation and genetic differentiation in irradiated Scots pine populations/ P.Yu. Volkova, S.A. Geraskin, N. Horemans [et al.] / Environmental Pollution. - 2018. - Vol. 232. - P. 105-112.

177. Xiquan, Gao. BAKing up to Survive a Battle: Functoinal dynamics of BAK1 in plant programmed cell death / Gao Xiquan, Ruan Xinsen, Sun Yali [et al.]// *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1-14.

178. Zaka, R. Effects of low chronic doses of ionizing radiation on antioxidant enzymes and G6PDH activities in *Stipacapillata* (Poaceae) / R. Zaka, C. M Vandecasteele, M. T. Misset // *Journal of. Experimental Botany*. - 2002. - V. 53. - № 376. - P. 1979-1987.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 14 – Удельная активность радионуклидов в тонконоге тонком

№ точки	Удельная активность радионуклидов в тонконоге, 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
1	<100	<190	<24	<13	<5,6	<3,3	<4,0	<5,0	<18	<9,0	<54	<6,0	<8,0
2	<100	140±30	<7,0	<3,0	<1,6	<0,9	<1,0	<1,5	<4,0	<3,0	<12	<1,1	<4,0
3	760±310	80±40	<6,0	<3,0	<1,4	<0,5	<2,6	<1,9	<9,0	<1,5	<5,0	<7,0	<2,0
4	450±350	<70	<6,0	<3,0	<1,3	<0,5	<1,7	<1,7	<3,0	<1,6	<5,0	<6,0	<2,0
5	(1,8±0,5)×10 ³	<50	<5,0	<2,8	<1,1	<0,4	<0,9	<1,4	<4,0	<1,0	9±3	<4,0	<1,5
6	<100	<50	<5,0	<2,7	<1,2	<0,4	<0,9	<1,4	<3,0	<1,0	9±3	<11	<1,4
7	<100	490±100	9,2±2,1	16±3	2,9±0,6	<0,4	<0,5	<0,5	<2,1	<1,6	<3,8	<1,5	11±2
8	(1,4±0,6)×10 ³	140±51	<10	<5,0	<3,0	<1,9	<1,8	<3,0	<8,0	<8,0	<24	<1,8	<4,0
9	(4,1±0,8)×10 ³	150±30	7,8±2,3	2,6±1,1	<0,7	6,6±1,3	<0,5	<1,0	<8,0	<3,0	18±8	<31	6±2
10	(2,0±0,6)×10 ³	950±190	<3,0	13±3	<0,7	<0,3	<0,5	<0,8	11±6	<3,0	36±9	<31	42±3
11	(1,1±0,5)×10 ³	<76	<10	<5,0	5,0±2,0	<1,7	<1,6	<2,0	<6,0	<7,0	<27	<1,7	<4,0
12	(7,5±4,1)×10 ²	130±50	<8,0	<4,0	<1,5	<0,6	<2,4	<2,2	<4,2	<1,9	<6,0	<18	<1,9
13	<100	<66	<6,0	<4,0	<1,3	<0,5	<0,8	<1,8	<7,4	<1,3	<4,8	<8,8	<1,8
14	(1,3±0,3)×10 ³	<70	<7,0	4,6±2,3	<1,4	<1,0	<0,9	<2,0	<4,0	<1,5	<5,0	<6,7	<2,0
15	(2,0±0,5)×10 ³	<80	<7,0	<4,0	<1,7	<0,6	<1,1	<2,0	<4,2	<1,6	<6,0	<7,4	<2,0
16	(1,3±0,4)×10 ³	180±40	<6,0	<3,0	<1,4	<1,0	<2,6	<1,9	<3,6	<1,3	<5,0	<12	<1,8
17	<100	150±30	<3,0	<1,8	<0,7	<0,2	<0,4	<1,0	<4,0	<0,7	<3,0	<3,8	<1,0
18	(4,8±0,7)×10 ⁴	<90	<16	<7,0	<4,0	<1,1	<3	<4,0	<12	<2,7	<11	<10	4,8±2
19	(1,5±0,2)×10 ⁴	<120	<14	15±3	<4,0	<1,2	<2,2	<4,0	<9,6	<3,0	<13	<10	14,6±2,7
20	(1,5±0,3)×10 ⁴	<70	<10	<5,0	<2,1	<0,9	<1,9	<2,7	<5,4	<2,2	<8,0	<7,2	3,6±1,4
21	(1,3±0,2)×10 ⁴	<60	<8,0	11±3	<2,0	<0,8	<1,4	<2,4	<5,4	<1,5	<8,0	<11,6	8,9±1,5
22	(3,6±0,5)×10 ⁴	94±22	<5,0	11±2	<1,4	<0,9	<0,9	<1,5	<3,0	<1,0	<5,0	<3,5	7,8±1,0
23	(4,0±0,5)×10 ⁴	<60	<9,0	11±3	<2,2	<0,7	<1,5	<5,0	<6,0	<1,7	<7,0	<14	8,8±1,4
24	(2,2±0,4)×10 ⁴	<140	<16	<10	<5,0	<4,3	<3,0	<5,0	<14	<10	<9,0	<5,0	<7,0
25	(4,4±0,5)×10 ⁴	160±50	<13	<6,0	<4,0	<1,1	<5,0	<4,0	<7,7	<2,7	<11	<8,3	<3,0
26	(2,3±0,6)×10 ³	170±40	<7,0	13±3	<1,5	<0,6	<1,2	<1,9	<4,2	<1,4	<15	<5,0	12±1,4
27	(1,5±0,3)×10 ⁴	440±90	6,0±3,0	20±4	<1,1	<0,6	<0,7	<1,4	<2,7	<1,4	<12	<10	21±1,0
28	(2,5±0,4)×10 ⁴	<60	<10	10±3	<2,5	<0,8	<1,6	<6,0	<13	<1,8	<9,0	<6,6	10±2
29	(2,7±0,4)×10 ⁴	<60	<10	18±3	<2,5	<0,8	<2,0	<2,7	<7,4	<1,8	<7,7	<6,0	16±2
30	(6,0±0,8)×10 ⁴	<80	<15	<7,0	<4,0	1,2±0,7	<3,0	<4,0	<12	<2,6	<21	<8,7	<3,3
31	(5,5±0,7)×10 ⁴	<60	<12	10±3	<2,9	<0,8	<2,5	<6,0	<8,6	<1,9	<8,0	<6,6	12±1,5
32	(3,5±0,5)×10 ⁴	<80	<13	<6,0	<4,0	<1,2	<2,3	<4,0	<8,3	<2,5	<12	<8,7	<3,3
33	(4,7±0,6)×10 ⁴	80±50	<16	10±5	<4,0	<1,4	<2,7	<4,0	<19	<2,8	<25,3	<10	13±2
34	(8,8±1,1)×10 ⁴	90±40	<14	16±4	<4,0	1,1±0,6	<3,0	<4,0	<23	<2,2	<9,7	<7,7	11±2
35	<100	<14	<125	<5,1	5±1	4,79±0,67	<2,8	<2,5	<8,0	<1,9	<13	<7,8	<11
36	(2,5±0,3)×10 ⁵	130±4,	<16	<6,0	<4,0	1,6±0,6	<6,0	<4,0	<13,3	<2,3	<9,6	<15,4	<3,0
37	(1,2±0,1)×10 ⁵	<80	<17	<7,0	<4,0	2,1±0,7	<4,0	<5,0	<15	<2,7	<11,3	<9,6	<3,8
38	(5,6±0,7)×10 ⁴	<80	23±11	<7,0	<4,0	<1,2	<4,0	<5,0	<14	<3,0	<26	<9,7	<3,7
39	(3,5±0,5)×10 ⁴	<60	15±17	<5,0	5,9	<1,0	<2,2	<4,0	<7,0	<2,2	<10,5	<7,4	<2,6
40	(4,6±0,6)×10 ⁵	840±170	<19	27±7,0	8,7±1,7	<11	<4,0	<4,4	<9,1	<11	<94	<6,0	29±6
41	(5,5±0,7)×10 ⁴	210±60	<11	<6,1	3,3±0,7	<8,6	<1,2	<2,8	<5,4	<7,4	<70	<2,2	<3,7
42	(3,9±0,6)×10 ⁴	140±70	<16	<8,0	<4,0	<4,0	<2,0	<5,0	<10	<10	<80	<3,0	<6,0
43	(7,5±0,9)×10 ⁴	<80	<15	<7,0	<4,0	1,9±0,8	<2,6	<5,0	<9,3	<3,0	<27,2	<9,6	<3,3

44	$(7,6\pm0,9)\times 10^4$	<60	16±8	<6,0	<4,0	<1,2	<2,6	<4,0	<12	<2,7	<11,3	<8,6	<3,0
45	$(1,9\pm0,1)\times 10^5$	<90	<22	<9,0	<6,0	<1,4	<6,0	<6,0	<38	<5,8	<15	<12	<4,3
46	$(1,3\pm0,2)\times 10^5$	<90	<21	17±6	<6,0	<1,8	<4,0	<7,0	<14,4	<4,0	<18	<13	12±3
47	$(1,5\pm0,1)\times 10^5$	<120	<22	<10	<6,0	<1,8	<4,0	<13	<14,3	<4,0	<17,4	<14	<5,0
48	$(7,2\pm0,9)\times 10^4$	<30	<8,0	<3,0	<2,1	<0,6	<1,8	<2,5	<6,2	<1,5	<6,2	<4,6	<1,5
49	$(1,5\pm0,2)\times 10^5$	140±60	<24	<10	<6,0	<1,6	<6,0	<7,0	<21	<3,5	<16	<13	<4,7
50	$(5,1\pm0,6)\times 10^4$	<90	<25	<10	<7,0	<4,0	<5,0	<8,0	<23	<7,0	<19	<19	<5,2
51	$(1,6\pm0,2)\times 10^5$	<60	<21	<9,0	<11	<3,0	<4,0	<6,0	<15	<3,7	<34	<12,2	<4,4
52	$(7,7\pm1,0)\times 10^4$	<90	<20	<9,0	<6,0	2,5±1	<4,0	<6,0	<16	<3,7	<15	<20	<4,4
53	$(7,3\pm0,1)\times 10^4$	200±90	<21	<12	9±4	<8,0	<3,0	<7,0	<13	<22	<94	<5,0	<9,0
54	$(2,9\pm0,3)\times 10^5$	200±60	<13	<7,2	17±3	<15	<1,2	<3,8	<5,9	12±7	<120	<2,9	<4,9
55	$(2,2\pm0,3)\times 10^5$	170±80	<16	<8,6	9,7±2,3	<49	<1,2	<4,6	14±4	<13	<150	<3,6	<5,7
56	$(8,4\pm1,1)\times 10^4$	930±190	<9,0	29±3	<2,0	<4,0	<1,3	<3,0	<6,0	<10	<71	<2,0	32±2
57	$(4,4\pm0,5)\times 10^5$	1500±300	<17	<10	15±2,6	130±30	<1,8	<5,1	<7,3	<16	<140	<4,1	<6,7
58	$(3,2\pm0,4)\times 10^5$	1200±200	<16	47±6	7,8±1,6	<31	<1,9	<4,6	<7,1	<13	<120	<3,6	32±6
59	$(1,8\pm0,2)\times 10^5$	3300±1700	<22	49±7	<5,0	<10	<3,0	<9,0	<15	<28	<175	11±4	36±6
60	$(9,1\pm0,9)\times 10^5$	1400±100	33±12	<11	6,1±2,7	<42	<2,1	<6,3	17±6	<21	<190	<5,3	<7,9
61	$(5,0\pm0,5)\times 10^5$	770±150	<8,7	30±6	10,7±1,7	<15	<1,4	<3,8	<6,1	<9,0	<63	<9,0	25±5
62	$(1,5\pm0,2)\times 10^6$	300±140	130±60	<40	<27	<7,0	<22	<27	<81	<15,8	<127	<218	<19
63	$(1,2\pm0,1)\times 10^7$	<600	<260	<100	<70	<16	<60	<50	<230	<37,4	<330	<343	<47
64	$(9,9\pm1,0)\times 10^6$	<270	<100	<40	<26	<6,0	<25	<24	<91,3	<13,8	<59	<223	<18
65	$(1,1\pm0,1)\times 10^6$	<170	<70	<29	<19	<5,0	<16	<20	<108,5	<11	<50	<94,3	<14
66	$(5,5\pm0,6)\times 10^5$	<140	<50	<22	<15	<4,0	<12	<16	<110	<8,6	<41	<91,3	<10
67	$(1,5\pm0,2)\times 10^6$	<180	<80	<30	<20	<5,0	<18	<23	<65	<11,3	<50	<40	<14,3
68	$(1,6\pm0,2)\times 10^6$	490±100	<7,1	<4,2	3,3±1,1	27±7,0	<0,8	<2,7	9,4±2,3	15±6,0	<94	<2,3	<6,4
69	$(1,4\pm0,2)\times 10^6$	470±160	<84	<37	62±15	22±6,0	<15	<9,1	<57	<13	<105	<27	<21
70	$(2,0\pm0,2)\times 10^6$	<250	<110	<40	<30	<8,0	<26	<24	<91	<1,6	<8,4	<342	<38
71	$(2,6\pm0,3)\times 10^6$	<260	<100	<40	<27	<12	<25	<24	<90	<15	<103	<361	<19
72	$(4,1\pm0,4)\times 10^6$	2700±500	45±20	<22	18±7	<52	<4,0	<20	42±13	<200	860±390	<42	63±18
73	$(1,1\pm0,1)\times 10^5$	<90	<40	<10	<7,0	<4,0	<6,0	<8,0	<19,3	<3,9	<18	<1,4	<5,0
74	$(6,4\pm0,7)\times 10^6$	<400	<190	<140	125±25	<13	<80	<60	141±720	991±538	<280	<170	<106
75	$(2,1\pm0,2)\times 10^6$	<300	<140	<90	<80	22±6	<50	<40	<112	<22	<191	<133	<45
76	$(4,3\pm0,4)\times 10^6$	<240	<100	<70	<75,2	22±4	<40	<30	<88,3	<17	<91	<54	<19,4
77	$(3,0\pm0,3)\times 10^6$	<160	<70	<26	<37	12±2	<30	<40	<58	<17,4	<41	<34	<12
78	$(4,1\pm0,4)\times 10^6$	<121	<19	<11	20±3	160±30	2,6±1,3	<8,3	40±6	<38	<440	<8,9	<9,9
79	$(1,4\pm0,1)\times 10^6$	735±101	<48	<33	57±12	<110	<6,0	<30	57±16	<240	<1200	<46	<64
80	$(7,9\pm0,8)\times 10^6$	340±70	<14	<9,1	6,8±2,6	<41	<1,6	<6,8	14±5	<35	<344	<7,6	<19
81	$(2,6\pm0,3)\times 10^6$	261±70	27±11	<9,6	47±9	<88	<4,0	<7,8	33,6±5,4	<34	<390	<7,8	<8,9
82	$(7,2\pm0,7)\times 10^6$	750±15	<36	<24	24±8	<73	<4,0	26±15	<21	<140	<870	<32	42±22
83	$(6,3\pm0,6)\times 10^7$	1300±300	<550	<525	350±70	230±50	<35	<170	<280	<200	<2500	<310	<138
84	$(1,0\pm0,1)\times 10^7$	292±66	<23	<14	35±7	230±50	4,5±1,6	<9,2	74±8	<61	<728	<14	<15
85	$(4,8\pm0,5)\times 10^6$	1400±300	<42	49±17	<15	<75	6±4	<25	<29	<240	<1400	<54	47±24
86	$(4,3\pm0,4)\times 10^6$	360±70	<6,2	11±3	36±7	22±4	<0,91	<3,5	11±3	<10	<77	<3,6	14±3
87	$(1,8\pm0,2)\times 10^6$	950±190	<25	38±10	42±8	110±20	<3,0	<16	35±12	86±49	<480	<25	41±12
88	$(1,4\pm0,1)\times 10^7$	920±180	<600	<294	290±60	230±50	<50	<90	<200	<150	<400	<150	270±105
89	$(4,3\pm0,4)\times 10^6$	280±60	<18	<10	190±40	180±40	<3,5	<8,2	94±7	71±24	<450	<9,2	<22
90	$(2,6\pm0,3)\times 10^7$	410±130	<79	<50	72±18	<180	16±6	<46	<35	<370	<2200	<84	<80
91	$(2,6\pm0,3)\times 10^7$	2300±500	<2500	<300	<440	440±90	<90	<160	<810	<260	<2100	<220	<300
92	$(2,1\pm0,2)\times 10^7$	<500	<210	<80	100±30	40±8	<50	<60	<292	<57	<133	<180	<38
93	$(7,8\pm0,8)\times 10^6$	<300	<150	<60	110±20	30±6	<30	<40	<122	<23	<109	<78	<28
94	$(4,3\pm0,4)\times 10^6$	<400	<170	<70	<100	49±10	<40	<50	<138	<26	<269	<5,7	<31

95	$(9,2 \pm 0,9) \times 10^6$	<400	<170	<70	<100	<22	<40	<80	<136	<27	<119	<5,6	<32
96	$(8,7 \pm 0,9) \times 10^6$	<400	<200	<80	<110	44±9	<40	<60	<166	<33	<149	<2,0	<39
97	$(1,3 \pm 0,1) \times 10^7$	<600	<240	<90	<64	54±11	<60	<130	<207	<70	<153	<4,5	<44
98	$(3,5 \pm 0,4) \times 10^6$	<290	<130	70±30	<35	<9,0	<29	<40	<122	21±11	<98	<75	<28
99	$(5,0 \pm 0,5) \times 10^6$	<400	<160	<60	<43	18±6,0	<40	<50	<131	<51,5	<143	<83	<30
100	$(4,8 \pm 0,5) \times 10^6$	<260	<110	<40	<58,5	<16	<25	<30	<232	<37	<149	<59	<20

Таблица 15 – Удельная активность радионуклидов в ковыле волосовидном

№ точки	Удельная активность радионуклидов в ковыле, 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
1	1000±500	130±30	<4,0	5,4±1,5	<0,9	<0,4	<0,7	<1,3	<3,1	<1,0	5,2±2,6	<3,6	5,4±1,0
2	<100	230±50	<3,0	<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	<4,0	<2,0	1,4±0,5	140±30	<0,6	<1,0	<4,6	<0,8	<3,4	<3,0	2,3±0,8
4	790±390	250±50	<3,0	<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	<4,0	<2,2	1,5±0,6	<0,4	<0,7	<1,2	<2,8	<0,8	5,0±22	<3,4	<1,4
6	<100	160±30	<4,0	<2,7	<2,2	<0,4	<1,6	<1,5	<6,0	<1,0	<4,0	<3,7	<1,9
7	<100	190±4,0	<3,0	2,6±0,8	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 ⁴	<280	<40	<2,4	<11	<3,0	<10	<24	<5,6	<1,5	<6,5	<6,0	<2,8
10	(1,7±0,3)×10 ⁴	<250	<24	<2,6	<8,0	<2,5	<7,0	<9,0	<6,4	<1,5	<8,2	<7,5	<3,0
11	(2,2±0,3)×10 ⁴	<150	<40	<2,4	<5,0	<1,5	<4,0	<6,0	<6,2	<1,8	<6,7	<5,8	<1,9
12	(2,5±0,4)×10 ⁴	<210	<29	<1,8	<6,0	<4,0	<6,0	<7,0	<5,3	<1,0	<5,6	<3,9	<1,8
13	(1,2±0,2)×10 ⁴	<220	<30	<2,1	<7,0	<2,3	<7,0	<7,0	<4,9	<2,0	<6,8	<4,6	<3,8
14	(3,8±0,5)×10 ⁴	130±30	12±4	<1,6	<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 ⁴	160±30	<7,0	<2,4	<1,8	<0,6	<1,3	<2,1	<5,8	<1,6	<6,0	<3,7	<3,0
16	(3,6±0,5)×10 ⁴	<60	16±5	<1,7	<2,1	<0,6	<1,6	<2,5	<4,5	<1,0	<5,4	<3,7	<1,7
17	(6,1±0,9)×10 ⁴	140±50	18±6	<14,6	<2,3	<0,7	<1,8	<3,0	<3,6	<0,5	<3,0	<2,4	<1,0
18	(6,5±0,8)×10 ⁴	80±40	14±7	<2,9	<6,0	<0,9	<2,0	<3,0	<10	<1,0	<11	<7,0	<3,2
19	(1,6±0,2)×10 ⁵	150±30	<12	<5,6	<6,0	<1,0	<2,2	<4,0	<9,2	<2,0	<10	<7,7	<2,8
20	(9,5±1,1)×10 ⁴	80±40	15±7	<4,9	<3,0	<1,0	<2,2	<4,0	<22	<4,3	<15	<21	<7,0
21	(7,6±0,9)×10 ⁴	24±14	<4	<3,0	<1,2	<0,7	<0,8	<2,8	<15	<3,5	<9,2	<18	<5,0
22	(9,6±1,2)×10 ⁴	110±50	<14	<5,8	<4,0	<1,9	<2,6	<4,0	<20	<4,8	<13	<18	<6,7
23	(3,8±0,4)×10 ⁵	<80	<18	<9,0	<4,0	3,7±0,8	<4,0	<5,0	<14	<2,8	<11	<14	<3,2
24	(2,2±0,3)×10 ⁵	90±40	<16	<3,7	<4,0	<1,2	<3,0	<5,0	<17	<5,8	<15	<17	<4,5
25	(1,3±0,2)×10 ⁵	<90	27±11	<8,7	<5,0	<1,4	<4,0	<5,0	<22	<12	<27	<99	<7,2
26	(2,5±0,3)×10 ⁵	150±50	<20	<3,8	<6,0	<1,6	<4,0	<6,0	<26	<8,8	<23	<60	<6,4
27	(6,6±0,8)×10 ⁴	<100	<19	<3,9	<12	<1,5	<4,0	<6,0	<12	<1,5	<10	<7,8	<3,6
28	(5,4±0,6)×10 ⁵	110±40	<22	<7,2	<6,0	<2,0	<4,0	<7,0	<42	<7,2	<30	<34	<9,5
29	(2,5±0,3)×10 ⁵	80±30	<17	<8,7	<4,0	<1,5	<3,0	<5,0	<30	<9,4	<21	<21	<6,7
30	(3,9±0,4)×10 ⁵	130±50	<24	<8,8	<17	<2,0	<5,0	<8,0	<41	<7,8	<25	<32	<8,0
31	(3,7±0,4)×10 ⁵	<30	<8,0	<7,1	<2,5	<0,8	<1,8	<2,9	<29	<6,0	<19	<27	<8,6
32	(4,6±0,5)×10 ⁴	<70	<50	<5,0	<11	<2,0	<4,0	<13	<7,3	<1,8	<8,0	<7,5	<3,4
33	(9,8±1,2)×10 ⁴	<80	<16	<57,5	<4,0	<1,4	<3,0	<5,0	<30	<6,8	<15	<36	<11
34	(1,7±0,2)×10 ⁵	180±40	<12	<90	<3,0	<1,3	<1,8	<4,0	<23	<8,0	<21	<58	<7,2
35	(3,9±0,4)×10 ⁵	70±30	<16	<50	<4,0	<1,4	<3,0	<5,0	<19	<5,6	<13	<18	<6,3
36	(1,9±0,2)×10 ⁶	490±240	<150	<61	<40	<12	<30	<40	<34	<12	<43	<29	<25
37	(1,3±0,1)×10 ⁶	<280	<130	<126	<40	<40	<21	<40	<67	<36	<92	<64	<53
38	(3,2±0,3)×10 ⁶	<230	<120	<102	<30	<13	<19	<70	<85	<39	<102	<80	<51
39	(1,4±0,2)×10 ⁶	<500	<180	<151	<50	<14	<40	<60	<154	<66	<252	<93	<35
40	(1,7±0,2)×10 ⁶	<500	<500	<103	<70	<19	<50	<170	<214	<38	<183	<130	<49
41	(1,5±0,2)×10 ⁶	<270	<140	<64	<40	<15	<25	<50	<102	<48,5	<141	<91	47±19
42	(8,6±0,9)×10 ⁵	<700	<130	<109	<40	<12	<23	<100	<161	<25,4	<126	<93	<29
43	(1,7±0,2)×10 ⁶	<190	<180	<45	<30	<10	<30	<30	<71	<21	<196	<65	29±14
44	(4,7±0,5)×10 ⁵	<300	<90	<39	<40	<9,0	<13	<50	<67	<16	<107	<80	<20
45	(1,2±0,5)×10 ⁶	603±120	<3,1	<1,9	1,2±0,5	<7,0	<0,3	<1,8	<1,4	<5,9	<59	2,2±0,8	2,8±1,0
46	(4,6±0,5)×10 ⁶	<900	<220	<112	<80	<70	<29	<90	<108	<76	<1296	<201	<77
47	(1,0±0,1)×10 ⁷	1200±300	<200	<96	<60	<26	<30	<70	<112	<51,3	<260	<141	<49

48	$(4,9\pm 0,5)\times 10^6$	<500	<150	<69	<40	<16	<21	<50	<86	<34	<167	<100	<35
49	$(2,9\pm 0,3)\times 10^6$	240±50	<50	<23	<15	<8,0	<17	<17	<35	<10	<55	<31	<11
50	$(4,5\pm 0,5)\times 10^6$	860±260	<190	<90	<60	<26	<26	<120	<104	<51	<264	<138	<46
51	$(2,6\pm 0,6)\times 10^7$	<2300	<1300	<616	<400	<150	<190	<400	<812	<347	<1500	<208	<628
52	$(1,3\pm 0,1)\times 10^7$	<2000	<900	<418	<280	<100	<130	<290	<539	<192	<1900	<240	<205
53	$(1,1\pm 0,1)\times 10^7$	<2300	<1100	<119	<300	<140	<300	<300	<658	<483	<1400	<170	<251
54	$(9,8\pm 1,0)\times 10^6$	<2000	<1500	<328	<220	<90	<110	<240	<796	<181	<996	<180	<162
55	$(1,3\pm 0,1)\times 10^7$	240±120	<120	<54	<40	<18	<24	<40	<91	<22	<121	<71	<32
56	$(6,4\pm 0,7)\times 10^6$	<170	<100	<46	<30	<18	<40	<30	<76	<20	<93	<61	<27
57	$(2,2\pm 0,2)\times 10^7$	1600±400	<260	<132	<90	<40	<20	<150	<79	<78	<388	<206	<88
58	$(2,3\pm 0,2)\times 10^7$	<600	<230	<116	<80	<40	<40	<70	<63	<71	<975	<159	<77
59	$(1,6\pm 0,2)\times 10^7$	<400	<150	<80	<110	<50	<11	<100	<94	<61	<291	<110	<55
60	$(1,0\pm 0,2)\times 10^7$	800±300	<200	<104	<70	<60	<30	<50	<56	<118	<316	<273	<69
61	$(8,4\pm 0,8)\times 10^6$	1100±200	<160	<81	<100	<28	<11	<90	<43	<55	<279	<142	<56
62	$(4,5\pm 0,5)\times 10^6$	<330	<13	<7,9	10±2	<45	<1,4	<6,4	<20	<31	<608	<30	<7,7
63	$(4,5\pm 0,5)\times 10^6$	<193	<132	<97	<34	<19	<22	<39	<173	<27	<184	<24	<36

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица 16 – Содержание тяжелых металлов в тонконоге тонком, n=34

№ п/п	Содержание элементов, мг/кг												
	V	Cr	Mn	Co	Cu	Zn	As	Sr	Cd	Cs	Pb	U	Ni
1 (К)	6,8±0,3	11±1,0	204±10	1,5±0,1	6,0±1,0	18±1,0	0,99±0,05	77±4,0	0,23±0,01	0,17±0,01	8,7±0,4	0,18±0,009	4,1±0,2
2 (К)	4,3±0,2	10±1,0	159±8,0	0,9±0,1	5,0±1,0	15±1,0	0,71±0,04	63±3,0	0,24±0,01	0,12±0,01	6,0±0,3	0,12±0,006	3,1±0,2
3 (К)	2,0±0,1	9,9±0,1	83±1,0	0,44±0,01	3,9±0,1	15±1,0	0,36±0,01	27±1,0	0,06±0,01	0,08±0,01	1,8±0,1	0,073±0,001	4,4±0,1
4 (К)	0,7±0,1	<п.о.	31±1,0	0,11±0,01	2,4±0,1	8,0±1,0	0,15±0,01	31±1,0	0,03±0,01	0,03±0,01	1,4±0,1	0,049±0,002	<п.о.
5	1,1±0,1	0,8±0,1	39±1,0	0,18±0,01	2,5±0,1	10±1,0	0,23±0,01	34±1,0	0,06±0,01	0,04±0,01	2,6±0,1	0,048±0,001	<п.о.
6	1,2±0,1	0,1±0,1	29±1,0	0,22±0,01	2,0±0,1	7,0±1,0	0,22±0,01	21±1,0	0,03±0,01	0,05±0,01	1,9±0,1	0,040±0,001	<п.о.
7	1,0±0,1	1,4±0,1	75±2	0,17±0,01	2,1±0,1	13±1,0	0,23±0,01	37±1,0	0,13±0,01	0,04±0,01	2,9±0,1	0,029±0,001	0,8±0,1
8	1,1±0,1	<п.о.	38±1,0	0,21±0,01	1,9±0,1	8±1,0	0,23±0,01	27±1,0	0,05±0,01	0,04±0,01	2,2±0,1	0,099±0,002	<п.о.
9	1,1±0,1	0,5±0,1	41±1,0	0,22±0,01	2,6±0,1	12±1,0	0,21±0,01	40±1,0	0,07±0,01	0,04±0,01	3,0±0,1	0,104±0,001	<п.о.
10	0,6±0,1	0,4±0,1	42±1,0	0,14±0,01	2,4±0,1	8±1,0	0,15±0,01	29±1,0	0,04±0,01	0,02±0,01	1,7±0,1	0,036±0,001	<п.о.
11	0,9±0,1	2,4±0,1	62±1,0	0,21±0,01	3,2±0,1	12±1,0	0,24±0,01	39±1,0	0,07±0,01	0,04±0,01	3,1±0,1	0,023±0,001	0,3±0,1
12	0,5±0,1	0,8±0,1	26±1,0	0,10±0,01	1,9±0,1	7±1,0	0,11±0,01	19±1,0	0,03±0,01	0,02±0,01	1,7±0,1	0,118±0,003	<п.о.
13	2,9±0,1	4,6±0,1	103±1,0	0,46±0,01	3,3±0,1	16±1,0	0,46±0,01	55±1,0	0,17±0,01	0,08±0,01	3,9±0,1	0,068±0,001	1,7±0,1
14	1,1±0,1	3,2±0,1	152±1,0	0,27±0,01	2,6±0,1	27±1,0	0,27±0,01	52±1,0	0,23±0,01	0,04±0,01	2,3±0,1	0,064±0,001	0,8±0,1
15	1,0±0,1	7,8±0,1	165±1,0	0,35±0,01	3,8±0,1	31±1,0	0,22±0,01	68±1,0	0,19±0,01	0,03±0,01	2,7±0,1	0,073±0,001	4,8±0,1
16	1,2±0,1	4,9±0,1	75±1,0	0,31±0,01	2,9±0,1	12±1,0	0,25±0,01	41±1,0	0,13±0,01	0,04±0,01	2,0±0,1	0,04±0,001	2,1±0,1
17	1,1±0,1	5,6±0,1	140±1,0	0,30±0,01	3,9±0,1	28±1,0	0,23±0,01	62±1,0	0,16±0,01	0,03±0,01	2,4±0,1	0,039±0,001	2,4±0,1
18	1,0±0,1	6,3±0,1	94±1,0	0,26±0,01	3,5±0,1	13±1,0	0,23±0,01	38±1,0	0,15±0,01	0,04±0,01	2,6±0,1	0,070±0,001	2,8±0,1
19	0,9±0,1	2,2±0,1	71±1,0	0,22±0,01	2,3±0,1	17±1,0	0,16±0,01	42±1,0	0,13±0,01	0,03±0,01	1,6±0,1	0,057±0,002	0,4±0,1
20	2,2±0,1	4,0±0,1	109±2,0	0,46±0,01	4,5±0,1	15±1,0	0,47±0,01	63±1,0	0,12±0,01	0,10±0,01	6,5±0,1	0,098±0,001	2,6±0,1
21	1,7±0,1	11±0,1	127±1,0	0,43±0,01	4,3±0,1	17±1,0	0,34±0,02	54±1,0	0,23±0,02	0,06±0,01	3,3±0,1	0,075±0,002	4,8±0,1
22	1,5±0,1	3,2±0,1	108±1,0	0,33±0,01	3,4±0,1	17±1,0	0,36±0,01	49±1,0	0,22±0,01	0,06±0,01	2,4±0,1	0,438±0,009	1,5±0,1
23	0,7±0,1	0,3±0,1	60±2	0,16±0,01	2,9±0,1	10±1,0	0,19±0,01	44±1,0	0,05±0,01	0,03±0,01	2,1±0,1	0,061±0,002	<п.о.
24	1,5±0,1	2,7±0,1	101±1,0	0,4±0,1	3,3±0,1	14,2±0,4	0,07±0,01	49±1,0	0,20±0,01	0,04±0,01	2,0±0,1	0,10±0,01	3,0±0,1
25	1,7±0,1	3,5±0,1	86±1,0	0,45±0,01	3,8±0,1	16±1,0	0,28±0,01	54±1,0	0,17±0,01	0,05±0,01	2,1±0,1	0,136±0,002	2,0±0,1
26	2,2±0,1	6,9±0,1	107±1,0	0,40±0,01	3,6±0,1	27±1,0	0,46±0,01	64±1,0	0,23±0,02	0,07±0,01	4,0±0,1	0,086±0,001	2,4±0,1
27	1,6±0,1	5,3±0,1	143±1,0	0,37±0,01	4,2±0,1	17±1,0	0,35±0,02	69±1,0	0,11±0,01	0,07±0,01	3,5±0,1	0,147±0,001	2,2±0,1
28	1,2±0,1	0,8±0,1	95±1,0	0,28±0,01	3,2±0,1	16±1,0	0,24±0,01	47±1,0	0,16±0,01	0,03±0,01	1,7±0,1	0,346±0,004	0,6±0,1
29	5,7±0,1	6,9±0,1	87±1,0	1,1±0,1	3,6±0,1	13,4±0,1	0,70±0,01	38±1,0	0,16±0,01	0,11±0,01	2,6±0,1	0,31±0,01	1,8±0,1
30	0,8±0,1	<п.о.	40±1,0	0,15±0,01	2±0,1	9±1,0	0,16±0,01	28±1,0	0,05±0,01	0,03±0,01	2,1±0,1	0,073±0,002	<п.о.
31	1,3±0,1	0,7±0,1	76±1,0	0,3±0,1	2,3±0,1	11,1±0,1	0,02±0,01	48±1,0	0,13±0,01	0,03±0,01	1,8±0,1	0,07±0,01	0,6±0,1
32	1,2±0,1	1,9±0,1	61±1	0,2±0,1	1,7±0,1	7,4±0,1	<п.о.	34±1,0	0,11±0,01	0,03±0,01	1,6±0,1	0,08±0,01	0,5±0,1
33	3,4±0,1	4,7±0,1	121±1	4,7±0,1	4,1±0,1	20±1,0	0,56±0,01	45±1,0	0,12±0,01	0,11±0,01	6,3±0,1	0,222±0,003	0,7±0,1
34	1,5±0,1	2,2±0,1	77±1,0	0,3±0,1	3,2±0,1	7,1±0,1	<п.о.	41±1,0	0,07±0,01	0,05±0,01	1,9±0,1	0,10±0,01	1,2±0,1

Примечание: <п.о.-меньше предела обнаружения, К-контрольные пробы

Таблица 17 – Содержание тяжелых металлов в ковыле волосовидном, n=30

№ п/п	Содержание элементов мг/кг											
	V	Cr	Mn	Co	Cu	Zn	As	Sr	Cd	Cs	Pb	U
1 (К)	3,60±0,60	6,8±1,1	250±40	0,80±0,10	14±2	42±7	0,70±0,10	360±57	0,20±0,03	0,20±0,03	13,0±2,0	0,10±0,02
2	3,10±0,50	9,6±1,5	460±70	0,70±0,10	13±2	48±8	0,70±0,10	570±90	0,20±0,04	0,10±0,02	13,0±2,0	0,10±0,02
3	7,90±1,20	17,0±2,7	470±70	1,50±0,20	22±3	84±13	1,40±0,20	710±110	0,30±0,05	0,30±0,05	18,0±3,0	0,30±0,04
4	4,30±0,70	12,0±2,0	460±70	1,00±0,10	20±3	70±11	0,90±0,10	760±120	0,20±0,03	0,20±0,03	16,0±2,0	0,10±0,02
5	8,40±1,30	12,0±2,0	590±90	1,80±0,30	23±4	91±14	1,40±0,20	750±120	0,40±0,06	0,30±0,05	19,0±3,0	0,30±0,04
6	3,40±0,50	8,4±1,3	420±70	0,70±0,10	14±2	65±10	0,80±0,10	500±80	0,20±0,03	0,20±0,03	17,0±3,0	0,10±0,02
7	6,60±1,00	17,0±2,6	460±70	1,30±0,20	22±3	70±11	1,20±0,20	660±100	0,40±0,06	0,30±0,04	26,0±4,0	0,30±0,04
8	3,50±0,50	12,0±2,0	500±80	0,70±0,10	18±3	61±10	0,90±0,10	660±100	0,40±0,06	0,20±0,03	19,0±3,0	0,20±0,03
9	7,90±1,20	19,0±3,0	890±140	1,50±0,20	26±4	94±15	1,30±0,20	760±120	0,70±0,10	0,30±0,05	23,0±3,0	0,30±0,05
10	4,90±0,75	15,0±2,4	540±85	1,20±0,20	17±3	91±14	1,20±0,20	970±150	0,30±0,05	0,20±0,03	14,0±2,0	0,30±0,05
11	5,50±0,80	15,0±2,3	530±80	1,10±0,20	11±2	68±11	1,00±0,20	730±110	0,20±0,03	0,20±0,04	19,0±3,0	0,20±0,04
12	5,90±0,90	14,0±2,2	570±90	1,00±0,20	18±3	92±15	1,10±0,20	970±150	0,30±0,05	0,20±0,04	5,8±1,0	0,20±0,02
13	5,30±0,80	12,0±2,0	440±70	1,10±0,20	20±3	66±10	1,00±0,10	670±100	0,30±0,04	0,20±0,04	16,0±2,0	0,20±0,03
14	3,10±0,50	8,1±1,3	430±70	0,60±0,10	17±3	64±10	0,80±0,10	670±100	0,30±0,04	0,20±0,03	7,6±1,2	0,10±0,02
15	5,00±0,80	12,0±2,0	520±80	1,00±0,10	22±3	72±11	1,30±0,20	840±130	0,40±0,06	0,20±0,03	6,0±1,0	0,10±0,02
16	7,90±1,20	19,0±3,0	490±80	1,30±0,20	19±3	71±11	1,30±0,20	880±140	0,50±0,07	0,30±0,05	13,0±2,0	0,20±0,04
17	6,70±1,00	15,0±2,4	430±70	1,20±0,20	23±4	75±12	1,10±0,20	870±140	0,50±0,08	0,30±0,05	11,0±1,8	0,20±0,03
18	7,20±1,10	20,0±3,2	590±90	1,30±0,20	23±4	83±13	1,20±0,20	880±140	0,50±0,08	0,30±0,05	26,0±4,0	0,30±0,04
19	9,30±1,40	17,0±2,7	470±70	1,70±0,30	26±4	81±13	1,40±0,20	810±130	0,30±0,05	0,30±0,05	15,0±2,3	0,40±0,06
20	5,40±0,80	16,0±2,5	440±70	1,20±0,20	24±4	75±12	1,10±0,20	890±140	0,30±0,05	0,30±0,04	19,0±3,0	0,30±0,05
21	4,30±0,70	19,0±3,0	410±60	0,90±0,10	21±3	60±9	0,90±0,10	850±130	0,30±0,04	0,20±0,03	19,0±3,0	0,30±0,04
22	4,70±0,70	18,0±2,8	500±80	1,00±0,10	16±2	70±11	0,90±0,10	820±130	0,40±0,06	0,20±0,04	17,0±2,6	0,20±0,04
23	6,40±1,00	17,0±2,7	470±70	1,30±0,20	20±3	74±12	1,20±0,20	540±84	0,30±0,05	0,30±0,05	24,0±3,6	0,40±0,06
24	3,80±0,60	13,0±2,1	340±50	0,80±0,10	22±3	54±9	0,70±0,10	700±110	0,20±0,03	0,20±0,03	18,0±2,8	0,20±0,04
25 (К)	3,30±0,50	12,0±2,0	380±60	0,80±0,10	13±2	51±8	0,80±0,10	560±88	0,20±0,04	0,20±0,03	12,0±2,0	0,20±0,03
26	3,60±0,60	6,1±1,0	530±80	0,80±0,10	16±3	74±12	0,70±0,10	610±90	0,50±0,08	0,20±0,03	15,0±2,4	0,20±0,04
27	3,80±0,60	7,2±1,1	400±60	0,80±0,10	22±3	71±11	0,90±0,10	530±80	0,40±0,06	0,20±0,03	9,4±1,4	0,20±0,04
28	4,40±0,70	9,8±1,5	430±70	0,80±0,10	23±4	65±10	0,90±0,10	650±100	0,30±0,04	0,20±0,04	15,0±2,3	0,30±0,04
29	7,50±1,10	4,4±0,7	320±50	1,40±0,20	17±3	77±12	1,30±0,20	580±90	0,40±0,07	0,20±0,03	4,4±0,7	0,40±0,06
30	6,60±1,00	4,0±0,6	450±70	1,30±0,20	20±3	72±11	1,30±0,20	540±85	0,30±0,05	0,20±0,04	6,0±0,9	0,30±0,05

Примечание: К-контрольные пробы

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица 18 – Мощность поглощенной дозы в тонконоге тонком с площадки «4А»

№ точки	Мощность поглощенной дозы Гр/сезон		
	Доза внутреннего облучения	Доза внешнего облучения	Суммарная доза
1	$6,4 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-4}$
2	$5,3 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-4}$
3	$3,8 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-4}$	$8,2 \times 10^{-4}$
4	$2,2 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{-4}$
5	$8,8 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-3}$
6	$5,1 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$5,5 \times 10^{-4}$
7	$5,1 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$5,5 \times 10^{-4}$
8	$6,9 \times 10^{-4}$	$5,8 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-3}$
9	$2,0 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-3}$
10	$9,8 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-3}$
11	$5,5 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$
12	$3,7 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-4}$	$9,3 \times 10^{-4}$
13	$5,2 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-4}$
14	$6,4 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$
15	$9,8 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-3}$
16	$6,4 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$
17	$5,0 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-4}$
18	$2,4 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-2}$
19	$7,4 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$9,1 \times 10^{-3}$
20	$7,3 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$9,2 \times 10^{-3}$
21	$6,4 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$8,3 \times 10^{-3}$
22	$1,8 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-2}$
23	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-2}$
24	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-2}$
25	$2,2 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-2}$
26	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$
27	$7,3 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$9,4 \times 10^{-3}$
28	$1,2 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$
29	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
30	$2,9 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-2}$
31	$2,7 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-2}$
32	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-2}$
33	$2,3 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-2}$
34	$4,3 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-3}$	$4,7 \times 10^{-2}$
35	$6,5 \times 10^{-5}$	$6,0 \times 10^{-3}$	$6,1 \times 10^{-3}$
36	0,12	$4,3 \times 10^{-3}$	0,13
37	$5,9 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-2}$
38	$2,7 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-2}$
39	$1,7 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-2}$
40	0,23	$5,3 \times 10^{-3}$	0,23
41	$2,7 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-2}$
42	$1,9 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-2}$

№ точки	Мощность поглощенной дозы Гр/сезон		
	Доза внутреннего облучения	Доза внешнего облучения	Суммарная доза
43	$3,7 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-3}$	$4,2 \times 10^{-2}$
44	$3,7 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-2}$
45	$9,3 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-3}$	$9,9 \times 10^{-2}$
46	$6,4 \times 10^{-2}$	$6,2 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^{-2}$
47	$7,3 \times 10^{-2}$	$8,4 \times 10^{-3}$	$8,2 \times 10^{-2}$
48	$3,5 \times 10^{-2}$	$8,7 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-2}$
49	$7,3 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$8,4 \times 10^{-2}$
50	$2,5 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-2}$
51	$7,8 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$8,8 \times 10^{-2}$
52	$3,8 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-2}$
53	$3,6 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-2}$
54	0,14	$1,3 \times 10^{-2}$	0,15
55	0,11	$1,3 \times 10^{-2}$	0,12
56	$4,1 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-2}$
57	0,22	$2,7 \times 10^{-2}$	0,24
58	0,16	$3,1 \times 10^{-2}$	0,19
59	0,88	$4,5 \times 10^{-2}$	0,93
60	0,45	$5,2 \times 10^{-2}$	0,50
61	0,24	$5,7 \times 10^{-2}$	0,30
62	0,73	$6,3 \times 10^{-2}$	0,80
63	5,9	$6,3 \times 10^{-2}$	5,9
64	4,8	$6,3 \times 10^{-2}$	4,9
65	0,54	$6,3 \times 10^{-2}$	0,60
66	0,27	$6,2 \times 10^{-2}$	0,33
67	0,73	$6,2 \times 10^{-2}$	0,80
68	0,78	$9,4 \times 10^{-2}$	0,88
69	0,69	0,10	0,79
70	0,98	0,11	1,1
71	1,3	0,11	1,4
72	2,0	0,13	2,1
73	$5,4 \times 10^{-2}$	0,11	0,17
74	3,1	0,15	3,3
75	1,0	0,14	1,2
76	2,1	0,12	2,2
77	1,5	0,19	1,7
78	2,0	0,22	2,2
79	0,69	0,33	1,0
80	3,9	0,24	4,1
81	1,3	0,27	1,6
82	3,5	0,28	3,8
83	13	0,27	13
84	4,9	0,32	5,2
85	2,4	0,34	2,7
86	2,1	0,31	2,4
87	0,88	0,33	1,2
88	6,9	0,32	7,2
89	2,1	0,37	2,5

№ точки	Мощность поглощенной дозы Гр/сезон		
	Доза внутреннего облучения	Доза внешнего облучения	Суммарная доза
90	13	0,38	13
91	13	0,38	13
92	10	0,26	11
93	3,8	0,28	4,1
94	2,1	0,39	2,5
95	4,5	0,29	4,8
96	4,3	0,32	4,6
97	6,4	0,42	6,8
98	1,7	0,27	2,0
99	2,4	0,29	2,7
100	2,4	0,24	2,6

Таблица 19 – Мощность поглощенной дозы в ковыле волосовидном с площадки «4А»

№ точки	Мощность поглощенной дозы Гр/сезон.		
	Доза внутреннего облучения	Доза внешнего облучения	Суммарная доза
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	$8,3 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$
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

№ точки	Мощность поглощенной дозы Гр/сезон.		
	Доза внутреннего облучения	Доза внешнего облучения	Суммарная доза
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	1,6
50	2,3	0,20	1,3
51	13	0,20	13
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

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица 20 – Частота и спектр цитогенетических нарушений в тонконоге тонком произрастающего на площадке «4А»

№ точки	Просмотрены и изучены				Количество аберраций							Спектр аберрации			Частота хромосомных аберраций, %±m
	Кол-во корешков	Кол-во ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число аберраций	m ^I	m ^{II}	f ^I	f ^{II}	g	s	3p	m ^I +f ^I	m ^{II} +f ^{II}	g+s+3p	
1	32	330	4	4	1	1	1	1	-	-	-	0,6±0,4	0,6±0,4	-	1,2±0,6
2	26	299	4	4	1	3	-	-	-	-	-	0,3±0,3	1,0±0,6	-	1,3±0,7
3	30	475	1	1	-	-	1	-	-	-	-	0,2±0,2	-	-	0,21±0,21
4	37	875	4	4	1	-	-	1	1	1	-	0,1±0,1	0,1±0,1	0,2±0,2	0,46±0,23
5	15	252	2	2	1	1	-	-	-	-	-	0,4±0,4	0,4±0,4	-	0,79±0,56
6	15	219	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	0,5±0,5	-	0,46±0,45
7	37	251	4	5	2	3	-	-	-	-	-	0,8±0,6	1,2±0,7	-	1,6±0,8
8	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
9	25	339	5	6	1	2	-	2	-	1	-	0,3±0,3	1,2±0,6	0,3±0,3	1,47±0,65
10	7	127	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	0,8±0,8	-	0,79±0,79
11	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
12	28	371	6	6	3	-	-	-	1	2	-	0,8±0,5	-	0,8±0,5	1,62±0,66
13	22	278	3	3	1	2	-	-	-	-	-	0,4±0,4	0,7±0,5	-	1,08±0,62
14	41	572	9	14	3	3	-	2	1	4	1	0,5±0,3	0,9±0,4	1,0±0,4	1,57±0,52
15	42	776	3	3	1	-	1	1	-	-	-	0,3±0,2	0,1±0,1	-	0,39±0,22
16	16	291	3	3	1	1	1	-	-	-	-	0,7±0,5	0,3±0,3	-	1,03±0,59
17	28	423	2	2	-	2	-	-	-	-	-	-	0,5±0,3	-	0,47±0,33
18	21	267	4	4	1	1	-	1	1	-	-	0,4±0,4	0,7±0,5	0,4±0,4	1,50±0,55
19	18	243	8	8	1	5	1	-	1	-	-	0,8±0,3	2,0±0,9	0,4±0,4	3,29±1,14
20	19	271	5	5	-	4	1	-	-	-	-	0,4±0,4	1,5±0,7	-	1,85±0,82
21	21	367	9	9	1	5	1	1	-	1	-	0,5±0,4	*1,6±0,7	0,3±0,3	2,45±0,81

№ точки	Просмотрены и изучены				Количество аберраций							Спектр аберрации			Частота хромосомных аберраций, %±m
	Кол-во корешков	Кол-во ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число аберраций	m ^I	m ^{II}	f ^I	f ^{II}	g	s	3p	m'+f'	m"+f"	g+s+3p	
22	17	435	6	6	-	2	-	2	-	1	-	-	1,0±0,5	0,2±0,2	1,15±0,51
23	21	292	4	4	-	2	1	1	-	-	-	0,3±0,3	1,0±0,6	-	1,37±0,68
24	25	281	5	5	2	1	2	-	-	-	-	1,4±0,7	0,4±0,4	-	1,8±0,8
25	13	439	5	5	1	2	-	1	1	-	-	0,2±0,2	0,7±0,4	0,2±0,2	1,14±0,51
26	18	423	7	7	1	3	1	-	1	1	-	0,5±0,3	0,7±0,4	0,5±0,3	1,65±0,62
27	27	800	12	12	3	4	1	1	1	1	1	0,5±0,2	0,6±0,3	0,4±0,2	1,50±0,43
28	43	1053	13	13	3	8	-	-	1	1	-	0,3±0,2	0,8±0,3	0,2±0,1	1,23±0,34
29	41	987	12	12	2	7	1	1	1	-	-	0,3±0,2	0,8±0,3	0,1±0,1	1,22±0,35
30	12	211	1	1	-	-	1	-	-	-	-	0,5±0,5	-	-	0,47±0,47
31	15	300	4	4	-	3	-	-	1	-	-	-	1,0±0,6	0,3±0,3	1,33±0,66
32	12	274	3	3	-	1	-	2	-	-	-	-	1,0±0,6	-	1,09±0,69
33	29	629	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	0,2±0,2	-	0,16±0,16
34	38	751	12	12	-	9	1	2	-	-	-	0,1±0,1	1,5±0,4	-	1,60±0,46
35	124	107	1	1	-	-	1	-	-	-	-	0,9±0,9	-	-	0,9±1,0
36	19	324	6	6	2	2	1	-	-	1	-	1,0±0,6	0,6±0,4	0,3±0,3	1,85±0,75
37	25	521	4	4	-	2	-	1	1	-	-	-	0,6±0,3	0,2±0,2	0,77±0,38
38	21	399	2	6	1	-	-	-	-	4	1	0,3±0,3	-	1,3±0,6	0,50±0,35
39	23	349	5	5	-	3	1	-	1	-	-	0,3±0,3	0,9±0,5	0,3±0,3	1,43±0,64
40	41	236	7	9	5	2	1	-	1	-	-	2,5±1,0	0,9±0,6	0,4±0,4	3,0±1,1
41	23	172	4	6	2	1	3	-	-	-	-	3,0±1,3	0,6±0,6	2,3±1,1	2,3±1,1
42	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
43	15	288	7	7	3	4	1	-	-	-	-	1,4±0,7	1,4±0,7	-	2,43±0,91
44	28	689	7	8	1	2	1	-	2	2	-	0,3±0,2	0,3±0,2	0,6±0,3	1,02±0,38
45	29	416	4	4	-	2	-	1	-	1	-	-	0,7±0,4	0,2±0,2	0,96±0,48
46	16	439	4	4	-	3	1	-	-	-	-	0,2±0,2	0,7±0,4	-	0,91±0,45
47	10	202	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	0,5±0,5	-	0,50±0,50

№ точки	Просмотрены и изучены				Количество аберраций							Спектр аберрации			Частота хромосомных аберраций, %±m
	Кол-во корешков	Кол-во ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число аберраций	m ^I	m ^{II}	f ^I	f ^{II}	g	s	3p	m'+f'	m"+f"	g+s+3p	
48	21	317	7	7	1	4	1	1	-	-	-	-	0,6±0,4	1,6±0,7	2,21±0,83
49	39	715	4	4	-	3	1	-	-	-	-	0,1±0,1	0,4±0,2	-	0,56±0,28
50	16	265	5	5	-	4	-	-	-	1	-	-	1,5±0,7	0,4±0,4	1,89±0,84
51	22	313	4	4	-	2	-	1	1	-	-	-	1,0±0,6	0,3±0,3	1,28±0,64
52	10	120	1	1	-	-	1	-	-	-	-	0,8±0,8	-	-	0,83±0,51
53	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
54	32	185	7	9	3	-	3	2	-	1	-	3,2±1,3	1,1±0,8	0,5±0,5	3,8±1,4
55	49	254	6	8	6	1	1	-	-	-	-	2,8±1,0	0,4±0,4	-	2,4±1,0
56	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
57	56	459	12	12	3	2	3	1	2	1	-	1,1±0,5	0,4±0,3	-	2,6±0,7
58	22	161	2	2	-	1	-	-	-	1	-	-	0,6±0,6	0,6±0,6	1,2±0,9
59	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
60	48	251	10	14	3	5	2	-	4	-	-	2,0±0,9	2,0±0,9	1,6±0,8	*4,0±1,2
61	24	127	6	6	3	2	-	1	-	-	-	2,4±1,4	*2,4±1,1	-	4,7±2,0
62	14	228	3	3	-	-	1	1	1	-	-	0,4±0,4	0,4±0,4	0,4±0,4	1,32±0,76
63	9	147	2	2	1	-	-	-	1	-	-	0,7±0,7	-	0,7±0,7	1,36±0,91
64	14	184	3	3	-	1	-	2	-	-	-	-	1,6±1,0	-	1,63±0,93
65	27	349	6	6	-	3	1	1	-	1	-	0,3±0,3	0,6±0,4	-	1,72±0,70
66	12	179	10	10	1	5	-	1	3	-	-	0,6±0,6	*3,4±1,4	1,7±1,0	*5,59±1,72
67	16	241	4	4	-	1	-	1	1	1	-	-	0,8±0,6	0,8±0,6	1,66±0,82
68	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
69	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
70	18	321	6	6	1	4	-	-	1	-	-	0,3±0,3	1,2±0,6	0,3±0,3	1,87±0,76
71	24	365	3	3	2	-	-	-	-	1	-	0,5±0,4	-	0,3±0,3	0,82±0,47
72	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
73	28	422	4	5	2	-	1	-	-	2	-	0,7±0,4	-	0,5±0,3	0,95±0,47

№ точки	Просмотрены и изучены				Количество аберраций							Спектр аберрации			Частота хромосомных аберраций, %±m
	Кол-во корешков	Кол-во ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число аберраций	m ^I	m ^{II}	f ^I	f ^{II}	g	s	3p	m'+f'	m''+f''	g+s+3p	
74	7	119	3	3	-	2	-	1	-	-	-	-	2,5±1,4	-	2,52±1,44
75	17	336	5	5	-	4	-	-	1	-	-	-	1,2±0,6	0,3±0,3	1,49±0,66
76	33	505	12	13	2	5	-	1	1	3	1	0,4±0,3	1,2±0,5	1,0±0,4	2,38±0,68
77	51	1230	10	10	1	8	-	1	-	-	-	0,08±0,08	0,7±0,2	-	0,81±0,26
78	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
79	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
80	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
81	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
82	40	627	56	59	9	32	4	5	4	4	1	2,1±0,6	***6,0±1,0	1,8±0,5	***9,0±1,1
83	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
84	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
85	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
86	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
87	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
88	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
89	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
90	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
91	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
92	6	104	8	8	1	5	-	-	2	-	-	1,0±1,0	*4,8±2,0	2,0±1,3	**7,70±2,61
93	13	208	12	12	2	6	-	3	1	-	-	1,0±0,7	**4,3±1,4	0,5±0,5	**5,77±1,62
94	20	422	32	32	9	17	2	1	1	2	-	2,6±0,8	***4,3±1,0	0,7±0,4	***7,58±1,29
95	20	280	9	9	1	5	1	2	-	-	-	0,7±0,5	*2,5±0,9	-	3,21±1,05
96	8	125	11	11	-	5	3	1	1	1	-	2,4±1,4	*4,8±2,0	1,6±1,1	**8,8±2,53
97	10	170	8	8	-	5	-	3	-	-	-	-	**4,7±1,6	-	*4,71±1,62
98	13	115	8	8	1	3	-	2	1	1	-	0,9±0,9	*4,3±1,9	1,7±1,2-	**6,96±2,37
99	10	161	6	6	1	2	-	-	2	1	-	0,6±0,6	1,2±0,9	1,9±1,0	3,73±1,49

№ точки	Просмотрены и изучены				Количество aberrаций							Спектр aberrации			Частота хромосомных aberrаций, %±m
	Кол-во корешков	Кол-во ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число aberrаций	m ^I	m ^{II}	f ^I	f ^{II}	g	s	3p	m'+f'	m"+f"	g+s+3p	
100	17	216	6	6	1	4	-	1	-	-	-	0,5±0,5	2,3±1,0	-	2,78±1,12

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. Статистически значимое отличие от контроля: * - p<0,05, ** - p<0, 01, - ***p<0,001

Таблица 21 – Частота и спектр цитогенетических нарушений в популяциях ковыля волосовидного с площадки «4А»

№ точки	Просмотрены и изучены				Количество аберраций								Спектр нарушений, %±m			Частота хромосомных аберраций, %±m
	Кол-во корешков	Кол-во ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число аберраций	m ^I	m ^{II}	f ^I	f ^{II}	g	s	3p	4p	m ^I +f ^I	m ^{II} +f ^{II}	g+s+3p	
1	17	1848	3	3	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	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	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	-	-	-	1	-	-	-	-	-	0,03±0,03	-	0,03±0,03
18	31	2872	18	18	3	12	1	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	-	-	-	0,1±0,05	0,05±0,03	0,14±0,06
23	15	1511	4	4	1	2	-	-	1	-	-	-	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

№ точки	Просмотрены и изучены				Количество аберраций								Спектр нарушений, %±m			Частота хромосомных аберраций, %±m
	Кол-во корешков	Кол-во ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число аберраций	m ^I	m ^{II}	f ^I	f ^{II}	g	s	3p	4p	m ^I +f ^I	m ^{II} +f ^{II}	g+s+3p	
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	1	-	-	-	-	0,08±0,06	0,08±0,06
28	22	2003	8	8	2	3	1	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	-	-	1	-	-	-	0,05±0,03	0,14±0,06	0,02±0,02	0,21±0,07
30	32	2616	5	5	1	3	-	-	-	1	-	-	0,04±0,04	0,1±0,06	0,04±0,4	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	-	1	-	-	-	-	0,09±0,06	0,3±0,1	-	*0,40±0,13
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	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

№ точки	Просмотрены и изучены				Количество аберраций								Спектр нарушений, %±m			Частота хромосомных аберраций, %±m
	Кол-во корешков	Кол-во ана-телофазных клеток	Аберрантные клетки	Общее число аберраций	m ^I	m ^{II}	f ^I	f ^{II}	g	s	3p	4p	m ^I +f ^I	m ^{II} +f ^{II}	g+s+3p	
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^I и f^{II} – одиночные и двойные фрагменты; m^I и m^{II} – одиночные и двойные мосты; m^I+f^I – хроматидные мосты и фрагменты; m^{II}+f^{II} – хромосомные мосты и фрагменты; g-отставания хромосом; s – забегания хромосом; 3p – трехполосные митозы. Статистически значимое отличие от контроля: * - p<0,05, ** - p<0, 01, - ***p<0,001